

온도 허용오차와 고정 노드를 고려한
자동화된 위성 축소 열모델 생성 방법남지민^{1,†}¹국방과학연구소Automated reduced thermo-mathematical model generation method
for satellite considering temperature tolerance and fixed nodesJimin Nam^{1,†}¹Agency for Defense Development (ADD)

Abstract

The task of generating a reduced thermal model of a satellite must be performed at least once in a satellite project to shorten the time of orbital thermal analysis and perform thermal analysis coupled to a launch vehicle. Although there are various methods for generating a reduced thermal model, an intuitive and convenient iso-thermal mesh generation method is used the most widely in practice. However, there is still a lack of research on automation of the isothermal mesh generation method. In this paper, we proposed an automated generation method of satellite reduced thermo-mathematical model based on the isothermal mesh generation method considering temperature tolerance and fixed nodes. The proposed method was validated using three different temperature tolerance cases. The average temperature difference satisfied the guidelines of ECSS.

초 록

인공위성의 축소 열모델 생성 작업은 궤도 열해석의 시간 단축과 발사체 연동 열해석 수행을 위해 인공위성 제작 프로젝트에서 반드시 한 번 이상 수행하게 된다. 축소 열모델 생성 방법은 여러가지가 거론되고 있지만, 실무적으로는 직관적이면서도 편리한 등온격자생성법이 가장 많이 사용되고 있다. 그러나 아직까지 등온격자생성법의 자동화에 관한 연구는 부족한 실정이다. 본 논문에서는 온도 허용오차와 고정 노드를 고려한 등온격자생성법 기반 위성 축소 열모델 자동 생성 방법을 제안하였다. 서로 다른 세 가지의 온도 허용오차 케이스를 이용하여 방법론을 검증하였으며, 평균 온도 차이는 ECSS의 축소 열모델 생성 가이드라인(<2 K)을 만족함을 확인할 수 있었다.

Key Words : Satellite(위성), Thermal Analysis(열해석), Model Reduction(모델 축소), Automation(자동화)

1. 서 론

위성 열해석 업무는 주어진 궤도환경 하에서 위성에 탑재된 구성품들이 허용 온도 내에서 동작할 수 있도록 설계하는데 있어서 굉장히 중요한 프로세스로 자리

잡고 있다[1,2]. 그러나 최근에는 임무의 복잡화와 위성 크기의 증가 등으로 인해 열모델의 총 노드 수 또한 수만에서 수십만 개 이상으로 크게 늘어나고 있으며, 열모델의 총 노드 수 증가에 따라 엔지니어의 시간과 인적 비용 또한 크게 증가하고 있다[3]. 이에 따라 열해석 시간 단축과 엔지니어의 인적 비용 감축을 위해 축소 열모델(RTMM: Reduced thermal math model)에 대한 필요성과 연구 사례 또한 증가하고 있다[4,5]. 축소 열모델은 궤도 열해석 시간 단축뿐만 아니라 발사체 연동 열해석 수행 시에도 형상에 대한

Received: Nov. 24, 2022 Revised: Feb. 06, 2023 Accepted: Feb. 27, 2023

† Corresponding Author

Tel: +82-42-821-0568, E-mail: jiminnam@add.re.kr

© The Society for Aerospace System Engineering

보안 및 계산 효율화를 위해 필수적이다[6]. 특히, 궤도 열해석의 경우 지구의 자전과 공전, 인공위성의 공전 등이 고려되어야 하기 때문에 수천에서 수만 번 이상의 열해석 케이스가 수행된다. 위 과정에 상세 열모델을 적용하게 되면 막대한 계산 비용과 해석 시간이 필요하기 때문에 상세 열모델의 해석과 결과 차이는 크지 않으면서도 해석 시간을 현저히 줄일 수 있는 축소 열모델의 생성 및 적용이 필수적이다. 또한 SpaceX 등의 주요 발사 서비스 업체는 위성 열모델의 총 노드 수를 수천 개 수준으로 제한하고 있기 때문에, 위성 열설계 담당자는 축소 열모델 생성 과정을 한 번 이상 거칠 수 밖에 없게 된다.

열모델 축소 방법에는 대표적으로 수리화적인 방법(Direct Mathematical Method)과 수동적인 방법(Manual Method)이 있다. 수리화적인 열모델 축소 방법이란 주파수 도메인 기반 접근법, 모멘트 매칭 방법, 프로젝션 기반 방법, 특히 값 분해 방법 등 모델 축소를 수리화적으로 접근하여 수행하는 방법이다. 반면 수동적인 방법이란 인접한 노드들의 온도를 비교하여, 온도 값이 비슷한 노드들을 하나로 묶어 노드 수를 축소시키는 수동적인 방법이며, 대표적으로는 등온격자 생성법(Isothermal Meshing Method)이 있다[7]. 수리화적인 열모델 축소 방법에 대한 지속적인 연구개발에도 불구하고, 실무적으로는 직관적인 열모델 축소 방법인 수동 등온격자생성법이 가장 많이 사용되고 있다. 그러나 수동 등온격자생성법의 오랜 사용 역사에도 불구하고 등온격자생성 자동화에 관한 연구는 부족한 상황이다[8,9].

수동 등온격자생성법은 크게 네 가지 한계를 가지고 있다. 첫째, 엔지니어의 직감에 의해 수행되기 때문에 노드 수가 많아질 경우 human error 발생 가능성이 높아진다. 둘째, 평균온도편차(Average Temperature Deviation) 규격을 만족하는 축소 열모델을 생성해야 하는 경우 해당 규격을 만족할 때까지 반복적으로 온도 허용오차를 변경해 가면서 축소 열모델 생성을 수행해야 하기 때문에 수행 시간이 현저히 증가한다. 셋째, 인공위성의 경우 발사 전까지 빈번하게 설계 변경이 이루어 지는데, 설계 변경이 발생할 때마다 긴 시간을 할애하여 수동 등온격자생성을 수행해야 한다. 넷째, 단순 반복 작업임에도 불구하고 열모델과 열해석에 관해 충분히 이해하고 있는 숙련된 엔지니어가 필요하다.

본 연구에서는 이러한 수동 등온격자생성법의 단점을 해결하고자 간단한 구현이 가능하면서도 축소 열모델 생성 시간을 현저하게 줄일 수 있는 방법을 제안하였다.

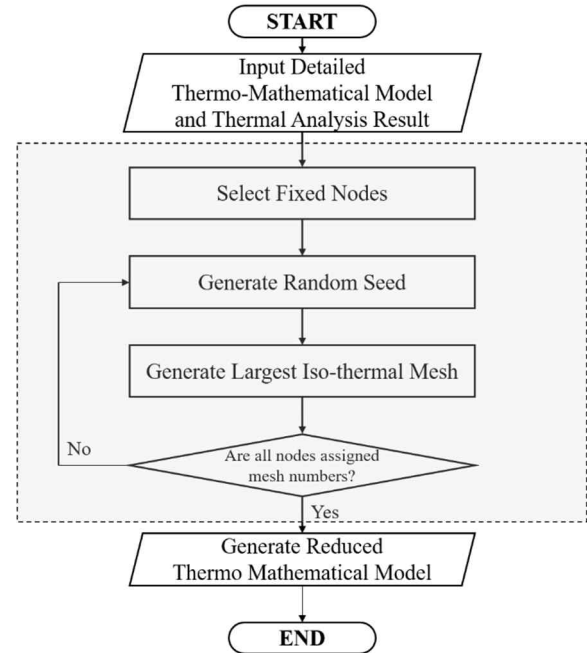


Fig. 1 Flow Chart of Proposed Automated Reduced Thermo-Mathematical Model Generation

2. 제안된 축소 열모델 자동 생성 방법

제안된 방법은 (1) 고정 노드 선정, (2) Random Seed 생성, (3) 온도 허용오차를 고려한 최대 면적 등온격자 생성의 총 3단계로 이루어져 있으며, 전체적인 흐름도는 Fig. 1과 같다. 특히, 본 방법은 열해석 분야에서 가장 많이 사용되고 있는 직사각형 매쉬에 적용될 수 있도록 고안되었다.

2.1 고정 노드 선정

고정 노드 선정 단계는 축소 열모델의 정확도 향상을 위해서 적용되는 전처리 과정이며, 상세 열모델과 상세 열모델의 열해석 결과가 입력되면 총 2가지 조건에 부합하는 노드들이 고정 노드로 선정된다. 첫째, 기본적으로 ECSS 열모델 축소 가이드라인[5]를 따라서, 발열 구성품 등의 중요 인터페이스는 고정 노드로 선정한다. 둘째, 온도가 급격하게 변화하는 구간을 속한 노드들을 등온격자생성 과정에 포함시키게 되면 전체적인 열해석 정확도를 낮출 수 있기 때문에, 각 노드들의 Gradient 값을 계산하여 온도 변화량이 상위 구간에 포함되는 노드들을 고정 노드로 선정한다. 얼마만큼의 상위 구간을 고정 노드로 선정할지(e.g. 10%, 20%)는 목표하는 축소 열모델의 총 노드 수 등을 고려하여 사용자가 선정할 수 있다. 고정 노드의 선정 예시는 Fig. 2(a)에 표시된 Fixed Nodes과 같으며, 고정 노드들은 등온격자생성 과정에서 배제된다.

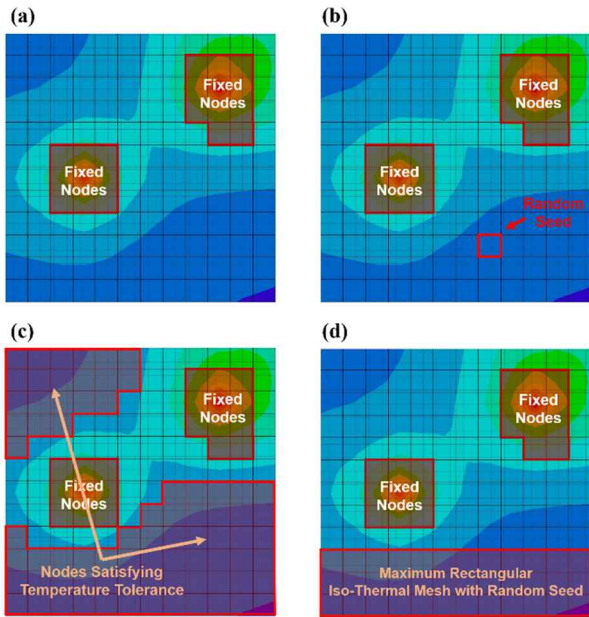


Fig. 2 Schematic Diagram of Proposed Method

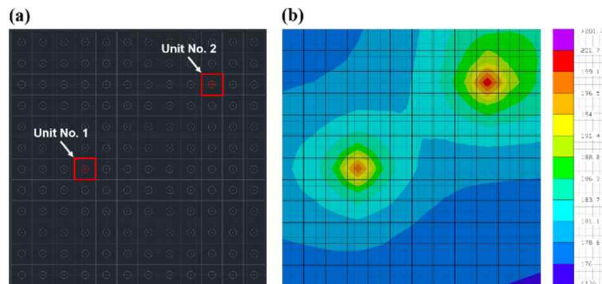


Fig. 3 (a) Detailed Thermo-Mathematical Model and (b) Thermal Analysis Result of Satellite Panel

2.2 Random Seed 생성

고정 노드 선정 후 Fig.2(b)와 같이 Random Seed를 생성한다. 예를 들어 2차원 열모델일 경우, 0~1사이의 값을 갖는 난수 2개를 생성한 후 각각 열모델의 가로와 세로의 최대 크기에 곱한 후 반올림하여 (x, y) 좌표를 생성한다. (x, y) 좌표가 Fixed Nodes에 생성되었거나 열모델이 정의되지 않은 위치에 생성되면, Fixed Nodes이 아닌 열모델 위치에 (x, y) 좌표가 생성될 때까지 Random Seed 생성 작업을 반복한다.

2.3 온도 허용오차를 고려한 최대 면적 등온격자 생성

생성된 Random Seed의 온도를 기반으로, 사용자가 선정할 온도 허용오차(e.g. $\pm 2K$) 안에 들어오는 노드들만을 Fig. 2(c)와 같이 남긴다. 남겨진 노드들을 이용하여 Random Seed를 반드시 포함하는 직사각형의 등온격자 후보들을 생성한 후 Fig. 2(d)와 같이 후보들

중 가장 면적이 큰 등온격자를 최종 선정한다. 선정된 등온격자에 포함된 노드들의 경우 다음 iteration에서는 고정 노드로 간주되며, 단 한 개의 노드도 남지 않을 때까지 해당 절차를 반복한다. (Fig. 1)

3. 방법론 적용 예시 및 수치 해석 결과

3.1 위성 패널 상세 및 축소 열모델 생성

제안된 방법의 검증을 위해 생성한 위성 패널의 상세 열모델과 열해석 결과는 Fig. 3(a)-(b)와 같다. 위성 패널은 총 144개 (가로 12 개 \times 세로 12 개)의 노드를 가지고 있으며, 발열 구성품의 경우 2개를 적용하였다. 모델 생성 및 열해석은 SINDA/FLUINT with Thermal Desktop으로 수행되었으며, 제안된 축소 열모델 생성 방법은 MATLAB 프로그램을 이용하여 구현하였다. MATLAB 코드는 Fig. 1에서 제시한 흐름도에 맞게 작성되었다.

제안된 방법은 총 2가지의 변수(허용오차, 상위 Gradient 노드 고정 구간)와 Random Seed 값에 따라 결과가 달라질 수 있기 때문에, 관심 변수를 제외하고 다른 변수들은 고정된 값을 적용하는 방식으로 독립 시험을 수행하였다.

첫째, 허용오차 값 변경에 따른 결과를 비교하기 위하여 총 3가지의 허용오차 값($\pm 2K$, $\pm 3K$, $\pm 5K$)을 적용하였다. 고정 노드 선정을 위한 상위 Gradient 노드 고정 구간은 허용오차 값 변경에 따른 차이를 효과적으로 보여줄 수 있는 수준의 값을 실험적으로 탐색하였고, 12%를 적용하였다. 상위 Gradient 노드 고정 구간을 너무 넓게 선정하게 되면 대부분의 노드가 고정되기 때문에, 허용오차 값 변경에 따른 유의미한 결과 차이를 볼 수 없게 된다.

둘째, 상위 Gradient 노드 고정 구간 변경에 따른 결과를 비교하기 위하여 총 3가지의 구간 선정 값(상위 10%, 20%, 30%)을 적용하였다. 허용오차 값의 경우 구간 선정 값 변경에 따른 차이를 효과적으로 보여줄 수 있는 수준의 값을 실험적으로 탐색하였고, $\pm 2K$ 를 적용하였다. 너무 큰 허용오차 값을 적용하게 되면, 전체 노드 수 자체가 너무 적어 지기 때문에 구간 선정 값 변경에 따른 유의미한 결과 차이를 볼 수 없게 된다.

셋째, Random Seed값 변경에 따른 결과 비교를 위하여 동일한 허용오차 값과 상위 Gradient 노드 고정 구간을 적용하여 제안된 방법을 3번 반복 수행하였다. 허용오차 값 상위 Gradient 노드 고정 구간은 독립 시험에 사용된 변수들의 중간 값인 허용오차 값 $\pm 3K$, 상위 Gradient 노드 고정 구간 20%를 적용하였다.

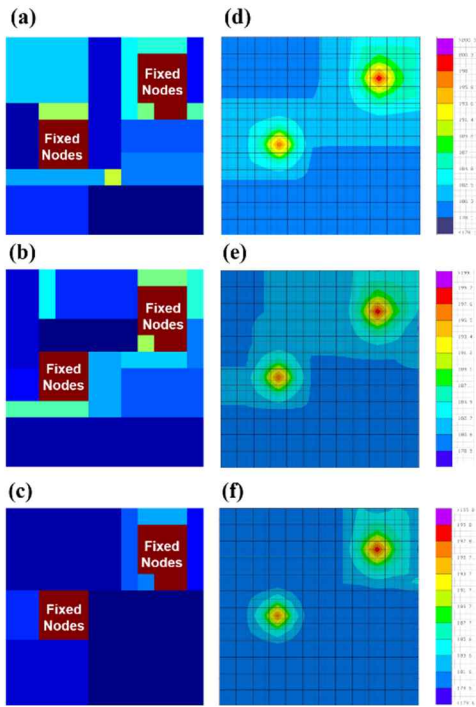


Fig. 4 Reduced Thermo-Mathematical Model and Thermal Analysis Result for Tolerance $\pm 2K$ (a, d), $\pm 3K$ (b, e) and $\pm 5K$ (c, f)

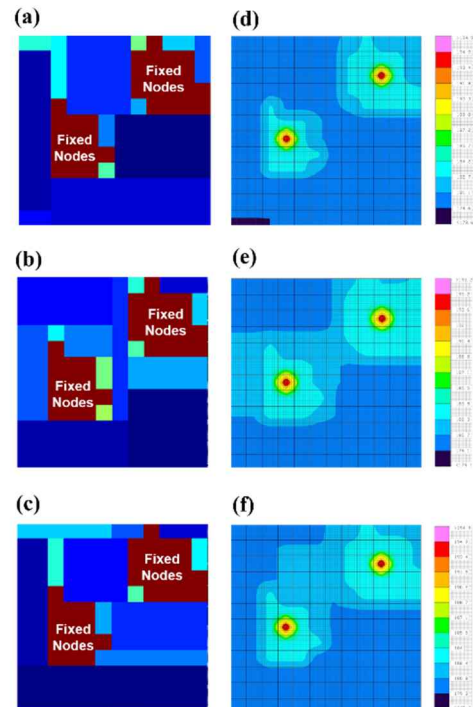


Fig. 6 Reduced Thermo-Mathematical Model and Thermal Analysis Result for Difference Random Seed #1 (a, d), #2 (b, e) and #3 (c, f)

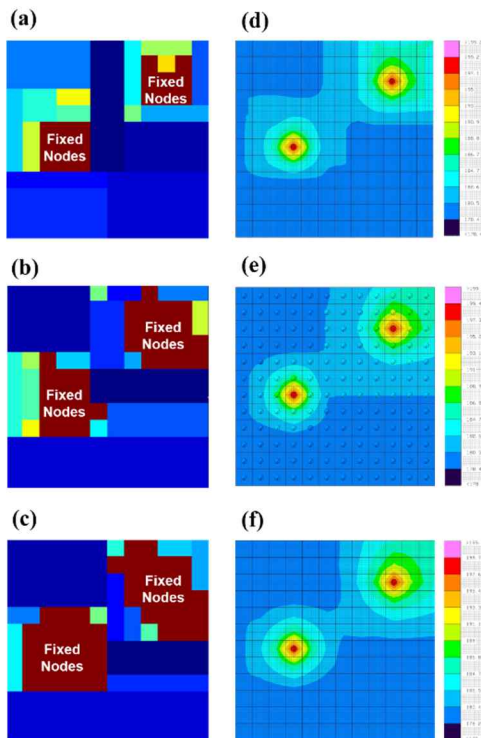


Fig. 5 Reduced Thermo-Mathematical Model and Thermal Analysis Result with Fixed Node for High Ranked Gradient Value 10% (a, d), 20% (b, e) and 30% (c, f)

3.2 상세 및 축소 열모델의 열해석 결과 비교

3.2.1 허용오차 값 변경에 따른 결과 비교

허용오차 값($\pm 2K$, $\pm 3K$, $\pm 5K$) 변경에 따른 축소 열모델 생성 결과는 Fig. 4(a)-(c)와 같으며, 해당 축소 열모델을 이용하여 수행한 열해석 결과는 Fig. 4(d)-(f)와 같다. 축소 열모델의 열해석 결과(Fig. 4(d)-(f))는 Fig. 3(b)의 상세 열모델의 열해석 결과와 전반적인 온도 구배가 유사하다는 것을 확인할 수 있었으며, 훨씬 적은 수의 노드만으로 구성된 축소 열모델의 열해석 결과가 상세 열모델의 열해석 결과를 대표할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

Table 1 Tolerance 행에 상세 열모델과 축소 열모델의 열해석 온도 차이의 평균 값을 표현하였으며, 온도 허용오차 값이 $\pm 2K$, $\pm 3K$, $\pm 5K$ 일 때 온도 편차의 평균 값은 각각 0.97K, 1.26K, 1.58K로 확인되었다. 즉, 허용오차 값이 커질수록 상세 열모델과 축소 열모델의 평균 온도 편차가 커진다는 것을 확인할 수 있다.

추가적으로, 상세 및 축소 열모델의 열해석 온도 차이를 각 노드 별로 비교하기 위해 계산한 노드 별 온도 편차 그래프는 Fig. 7과 같으며, 노드 별 온도 편차의 최대 값은 온도 허용오차 값 $\pm 2K$, $\pm 3K$, $\pm 5K$ 에 대해 각각 2.79K, 3.46K, 3.57K로 확인되었다.

3.2.2 상위 Gradient 노드 고정 구간 변경에 따른 결과 비교

상위 Gradient 노드 고정 구간(10%, 20%, 30%) 변경에 따른 축소 열모델 생성 결과는 Fig. 5(a)-(c)와 같으며, 해당 축소 열모델을 이용하여 수행한 열해석 결과는 Fig. 5(d)-(f)와 같다. 축소 열모델의 열해석 결과(Fig. 5(d)-(f))는 Fig. 3(b)의 상세 열모델의 열해석 결과와 전반적인 온도 구배가 유사하다는 것을 확인할 수 있었으며, 훨씬 적은 수의 노드만으로 구성된 축소 열모델의 열해석 결과가 상세 열모델의 열해석 결과를 대표할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

Table 1 Gradient 행에 상세 열모델과 축소 열모델의 열해석 온도 차이의 평균 값을 표현하였으며, 고정 구간이 Gradient값 상위 10%, 20%, 30% 일 때 온도 편차의 평균 값은 각각 0.99K, 0.92K, 0.80K로 확인되었다. 즉, 상위 Gradient 노드 고정 구간이 넓어질수록 상세열모델과 축소열모델의 평균 온도 편차가 작아진다는 것을 확인할 수 있다.

추가적으로, 상세 및 축소 열모델의 열해석 온도를 각 노드 별로 비교하기 위해 계산한 노드 별 온도 편차 그래프는 Fig. 8와 같으며, 상위 Gradient 노드 고정 구간 10%, 20%, 30%에 대해 각각 2.50K, 2.35K, 2.22K로 확인되었다.

3.2.3 Random Seed 값 변경에 따른 결과 비교

Random Seed 값 변경에 따른 축소 열모델 생성 결과는 Fig. 6(a)-(c)와 같으며, 해당 축소 열모델을 이용하여 수행한 열해석 결과는 Fig. 6(d)-(f)와 같다. 축소 열모델의 열해석 결과(Fig. 6(d)-(f))는 Fig. 3(b)의 상세 열모델의 열해석 결과와 전반적인 온도 구배가 유사하다는 것을 확인할 수 있었으며, 훨씬 적은 수의 노드만으로 구성된 축소 열모델의 열해석 결과가 상세 열모델의 열해석 결과를 대표할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

Table 1 Random Seed 열에는 상세 열모델과 축소 열모델의 열해석 온도 차이의 평균 값을 표현하였으며, Random Seed #1, #2, #3에 대한 온도 편차의 평균 값은 각각 1.21K, 0.99K, 1.08K로 확인되었다. 즉, 동일한 온도 허용오차 조건과 상위 Gradient 노드 고정 구간을 적용했다고 하더라도, Random Seed의 변경에 따라서 결과가 달라질 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

추가적으로, 상세 및 축소 열모델의 열해석 온도를 각 노드 별로 비교하기 위해 계산한 노드 별 온도 편차 그래프는 Fig. 9와 같으며, 노드 별 온도 편차의 최대 값은 Random Seed #1, #2, #3에 대해 각각 3.16K, 2.45K, 2.69K로 확인되었다.

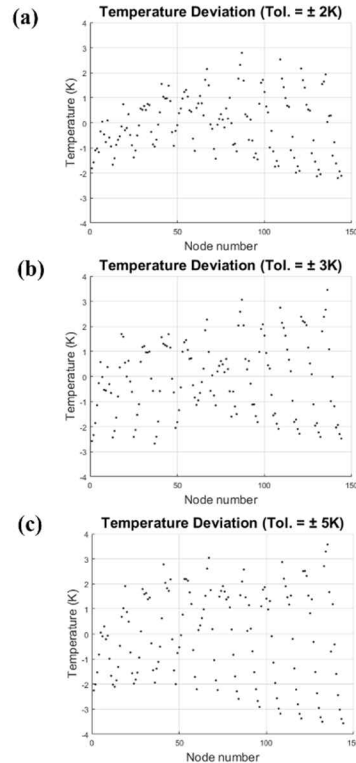


Fig. 7 Temperature Deviation Between Detailed and Reduced Model for Tolerance $\pm 2K$ (a), $\pm 3K$ (b) and $\pm 5K$ (c)

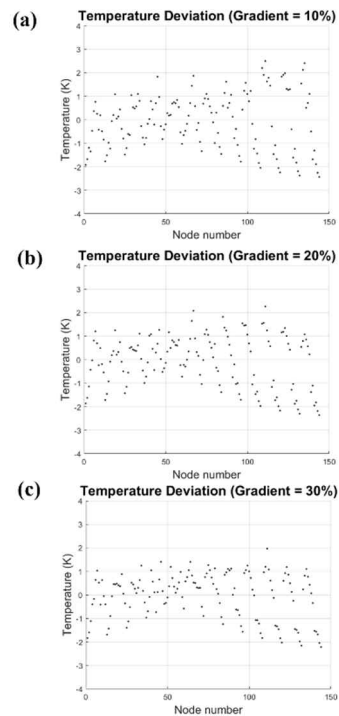


Fig. 8 Temperature Deviation Between Detailed and Reduced Model for Fixed Nodes with High Ranked Gradient 10% (a), 20% (b) and 30% (c)

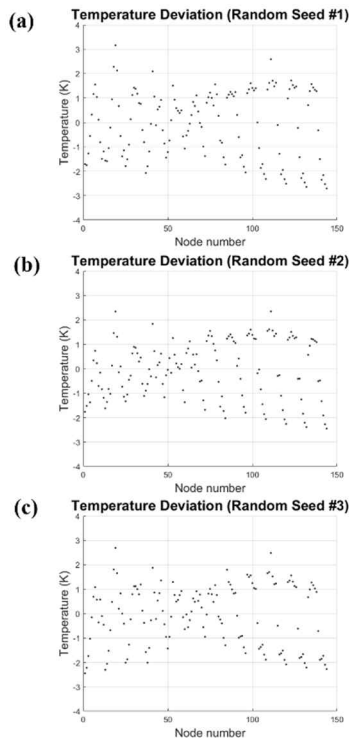


Fig. 9 Temperature Deviation Between Detailed and Reduced Model for Random Seed #1 (a), #2 (b) and #3 (c)

Table 1 Absolute Average Temperature Deviation Between Detailed and Reduced Model

Case	Absolute average temperature deviation	
Requirement (ECSS)		< 2K
	± 2K	0.97K
Tolerance	± 3K	1.26K
	± 5K	1.58K
	10%	0.99K
Gradient	20%	0.92K
	30%	0.80K
	#1	1.21K
Random Seed	#2	0.99K
	#3	1.08K

4. 결 론

본 논문에서는 온도 허용오차와 고정 노드를 고려한 자동화된 등온격자생성법 기반 열모델 축소 방법을 제안하였다. G. F. Rico가 제안한 축소 열모델 자동 생성 방법에서는 단순히 Boundary 노드와 Boundary 최인

접 노드만을 고정 노드로 선정한 것과 달리, 본 논문에서 제안한 방법은 각 노드별 Gradient를 계산하여 상위 Gradient 구간에 포함된 노드들을 고정 노드로 선정할 수 있도록 하였다는 점에서 큰 차별성이 있다.

다만, 본 연구는 축소 열모델 생성 과정에 Random Seed를 이용했기 때문에 동일한 상세 열모델이라고 하더라도 알고리즘을 새로 실행할 때마다 다른 결과가 나올 수 있다. 이는 알고리즘의 실행 횟수가 적을수록 전역 최적해가 아닌 국소 최적해에 가까운 결과일 가능성이 높다는 뜻이다. 만약 사용자가 전역 최적해에 가까운 등온격자 개수를 원한다면 최소의 등온격자 개수가 나올 때까지 알고리즘을 충분히 반복수행해야 한다.

제안된 방법은 상세 열모델과 축소 열모델의 열해석 결과 노드 별 온도 차이는 ECSS 에서 제시하는 온도 허용 오차 2K를 만족함을 확인하였으며, 대표적인 발사 서비스 업체 SpaceX가 허용하는 SINDA/FLUINT with Thermal Desktop으로 검증하였기 때문에 위성 사업과 관련된 다수의 궤도 열해석 및 발사체 통합 열해석을 위한 축소 열모델 생성에 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

References

- [1] H. Sundu and N. Doner, "Detailed thermal design and control of an observation satellite in low earth orbit," *European Mechanical Science*, vol. 4, pp. 171-178, Jul. 2020.
- [2] H. Y. Jun, J. H. Kim, C. Y. Han and J. W. Chae, "Development of thermal analysis program for geostationary satellite panel," *Korean Society of Computational Fluids Engineering*, vol. 15, pp. 66-72, Sep. 2010.
- [3] J. H. Kim, H. Y. Jun and B. Kim, "Reduction of the conductive thermal model and detailed temperatures recovery for a satellite panel," *J. Comput. Fluids Eng.*, vol. 22, pp. 9-16, Sep. 2017.
- [4] J. H. Kim, B. Kim, "Study on the reduction method of the satellite thermal mathematical model," *Advances in Engineering Software*, vol. 108, pp. 37-47, Mar. 2017.
- [5] F. Jourffroy, D. Charvet, M. Jacquiau and A. Captitaine, "Automated thermal model reduction for telecom s/c walls," *European Thermal & ECLS Software Workshop*, Oct. 2004.
- [6] T. Basset, P. Hugonnot, P. Connil and M. Ferrier, "TMRT: Presentation of the tool and application on satellite model

- reduction for launcher coupled analysis," *International Conference on Environmental Systems*, vol. 46, pp. 10-14, Jul. 2016.
- [7] G. F. Rico, "Quasi-autonomous spacecraft thermal model reduction," *Universidad Politecnica de Madrid*, pp. 5-9, Feb. 2018.
- [8] S. Appel, R. Patricio, H. P. Koning and O. Pin, "Automatic conductor generation for thermal lumped parameter models," *34th International Conference on Environmental Systems*, Jul. 2004.
- [9] J. H. Kim, H. Y. Jun and S. J. Kim "A study on thermal model reduction algorithm for satellite panel," *J. Comput. Fluids Eng.*, vol. 17, pp. 9-15, Dec. 2016.
- [10] E. Secretariat, "ECSS-E-HB-31-03A Space engineering – Thermal analysis handbook," *European Space Agency*, pp. 55-56, Nov. 2016.