

## 技術論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 43(9), 805-813(2015)

DOI:http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2015.43.9.805

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

## 인공위성 설계를 위한 열-구조 이종 격자 간 온도변환 알고리즘 연구

김민기\*

## A Study of Temperature Transform Algorithm of Distinguished Grids between Thermal and Structural Mesh for Satellite Design

Min Ki Kim\*

Korea Aerospace Research Institute

## ABSTRACT

This paper introduces the development of temperature mapping code between thermal mesh and structural mesh in KARI Satellite Design Software. Generally, temperature distribution of a satellite varies with the time by the space environment of the orbit, so thermal expansion of the structure should be analysed in design of the satellite. For the sake of the coupled thermal structural analysis, an interpolation algorithm between two finite element heterogeneous grids has been proposed by which temperature transfer is successively conducted.

## 초 록

본 논문은 한국항공우주연구원에서 개발 중인 위성종합설계 소프트웨어의 부분들 중 열 해석 및 구조해석 격자 사이의 온도 해석 결과를 변환하는 알고리즘에 대한 전반적인 연구 내용을 기술한다. 일반적으로 인공위성은 궤도상의 다양한 우주환경에 따라서 온도가 시간에 따라 변하며 이에 따른 열변형을 고려한 구조적 안정성을 설계 단계에서 고려해야 한다. 본문에는 유한요소 열-구조 연계해석을 위한 이종 격자 간 온도 정보를 보간하는 방법을 제시하였으며 이 방법을 통해 온도 변환이 잘 수행됨을 확인할 수 있다.

**Key Words** : KARI Satellite Design Software(KSDS), Thermal-Structural Coupling(열-구조 연계), Finite Element(유한요소), Shape Function(형상 함수), Temperature Interpolation(온도 보간)

## 1. 서 론

인공위성은 그 궤도상에서 주기적인 태양열 및 복사열을 받기에 이에 따른 온도차에 의한 열 변형에 대한 구조적인 고려가 필요하다. 이를 위

해 본 연구에서는 궤도설계-열-구조로 이어지는 계층적이고 유기적인 연계해석을 위해 열해석-구조해석 온도 변환 알고리즘을 연구, 개발하여 이를 한국항공우주연구원에서 개발 중인 위성종합 설계 소프트웨어(KSDS; KARI Satellite Design

† Received : May 29, 2015      Revised : July 20, 2015      Accepted : July 31, 2015

\* Corresponding author, E-mail : mkkim12@kari.re.kr

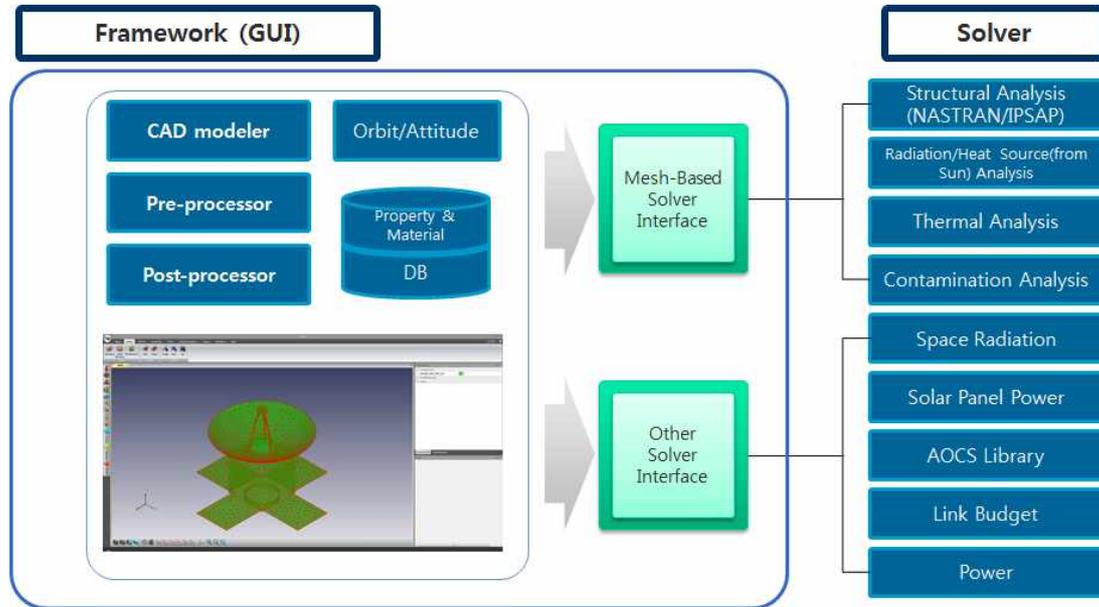


Fig. 1. Overview of KSDS

Software)[1-10]에 구현하였다.

위성종합설계 소프트웨어 KSDS는 인공위성의 설계에 필수적인 각종 해석 모듈들[2-9]을 통합하고 이들을 유기적으로 연동함으로써 인공위성을 포함한 우주구조물 설계에 특화된 프로그램이다. KSDS에는 인공위성의 설계를 위한 간단한 형상 모델링[1]을 포함하여 궤도 결정[2], 열해석[3] 및 이를 위한 복사형상계수와 태양열류량 계산모듈[4], 오염해석(Outgassing)[5], 외란토크 계산 모듈[6], 우주방사선 조사량 예측 및 태양전지판 성능예측 모듈[7], 통신링크 버짓 계산 모듈[8], 전력해석 모듈[9] 등으로 구성되어 있으며 이들 해석모듈들의 사용자 인터페이스 및 전후처리 모델링 기능을 갖추고 있다. 최근에 구조해석 모델러 및 열-구조 연계해석을 위한 온도변환 알고리즘[10]을 구현하였다. Fig. 1은 위성종합설계 SW의 전반적인 구성을 나타내고 있다.

일반적으로 열해석 격자와 구조해석 격자는 기본 형상은 동일하더라도 그 크기가 다른 경우가 일반적이다. 열해석은 복사열전달 때문에 격자의 크기가 아무리 커도 미지수의 개수가 10,000을 넘는 경우는 많지 않고 상세해석모델이 수천 개의 미지수를 갖는 경우가 대다수이다. 반면에 구조해석의 경우 상세 모델은 100,000개 이상의 절점을 갖는 경우가 많고 백만 이상의 미지수를 갖는 경우도 있다. 이렇게 다른 수준의 격자의 온도를 변환하기 위해서 본 연구에서는 열해석 온도 결과를 구조해석 격자로 변환하는 방법에 대한 연구를 수행하였다[10].

## II. 이종 격자 간 온도 변환

### 2.1 이기종 격자 간 데이터 변환

#### 2.1.1 근거리 격자 대입법

이기종 격자 간의 데이터 변환에는 여러 방법이 제안된 바 있다. 첫 번째 방법은 근거리 절점 대입법(Nearest Node)으로 구조해석 격자(이하 구조격자)의 절점(이하 구조절점) 온도를 가장 가까운 위치 혹은 거리가 가까운 몇 개의 열해석 격자(이하 열격자)의 절점(이하 열절점)의 온도의 평균을 대입하는 방법이다. 해당 방법은 이후에 언급할 형상함수법이나 Radial Basis Function을 이용한 온도 보간 기법에 비해 정확도가 무척 떨어지기에 거의 활용되지 않는다.

#### 2.1.2 전도행렬법

두 번째 방법은 전도행렬법(Conduction Matrix Method)로서 상대적으로 규모가 큰 구조격자의 온도 전도행렬을 구성 후 열격자의 온도의 결과를 제약조건으로 부과하여 이를 통해 구조격자의 온도를 계산하는 기법이다. 이 방법은 열격자가 유한요소법이 아니어도 무방하고 열절점 및 그 온도분포에 대한 정보만으로 온도 변환을 수행할 수 있다. 하지만 이 방법은 제약조건이 부과된 전도행렬의 연산이 필요하고, 온도 결과가 왜곡될 수 있다는 문제점으로 인해 그리 널리 사용되는 기법은 아닌 것으로 알려져 있다 [11,12].

### 2.1.3 Radial Basis Function

세 번째 방법은 절점 간 거리를 기반으로 하는 Radial Basis Function을 활용하여 온도를 보간하는 기법이 있다. Radial Basis Function법은 신호처리나 컴퓨터 그래픽스 등에서 다수의 절점을 바탕으로 함수를 근사화하는 기법으로[13], 이는 요소의 연결도(Connectivity)와는 무관하게 오직 절점의 정보만을 바탕으로 온도 변환을 수행한다. 임의의 지점의 물리량은 주어진 절점의 자료들로부터 식 (1)과 같이 거리 기반 기저함수들의 선형 합으로 온도를 변환할 수 있고 기저함수의 가중치는 최소제곱오차로부터 구해진다. 기저함수로는 식 (2)와 같은 가우시안 함수가 널리 사용되며, 식 (3)과 같은 역 2차함수 형식도 많이 사용된다.

$$Y(X) = \sum_i \omega_i \phi(\|X - X_i\|) \quad (1)$$

$$\phi(r) = e^{-(\epsilon r)^2} \quad (2)$$

$$\phi(r) = \frac{1}{1 + (\epsilon r)^2} \quad (3)$$

해당 방법은 절점 및 요소의 연결도와는 무관하므로 두 격자계의 해석 방법에 구애받지 않는다. 그리고 전체 영역에 걸쳐 수학적으로 미분 가능한 온도 분포를 얻을 수 있다. 열격자가 그리 크지 않을 경우 기저함수의 가중치는 그리 어렵지 않게 계산된다. 다만 많은 수의 기저함수 사용 시 가중치 계산을 포함하여 온도 변환에 많은 계산량이 소요된다는 문제점이 있다. 이러한 문제점은 일정한 거리 이내의 절점들만 계산에 고려하는 방식으로 해결할 수도 있다.

### 2.1.4 형상함수 보간법

마지막으로 형상함수에 기반한 보간법이 있다. 형상함수는 유한요소법의 근사화 기법에서 널리 사용되는 개념으로 각 요소 별 형상함수를 도입하여 요소 내 연속적인 함수공간을 몇 개의 형상함수의 선형합으로 근사화하는 개념이다. 이 방법의 장점은 보간이 요소 단위로 이루어지기에 계산량이 적다는 점이다. 이 방법을 적용하기 위해서는 변환 대상이 되는 열해석 격자의 온도 분포와 함께 유한요소법과 같은 방식의 요소 단위의 절점 연결도가 같이 활용되어야 한다. 따라서 유한차분법 방식의 열해석 문제의 경우, 각 절점의 전도계수에 따른 요소망을 구축하여 이를 활용하기도 한다[14,15]. 본 연구에는 KSDS의 유한요소 기반 열해석 프로그램인 ICARUS와 서울대학교에서 개발한 유한요소 구조해석 프로그램

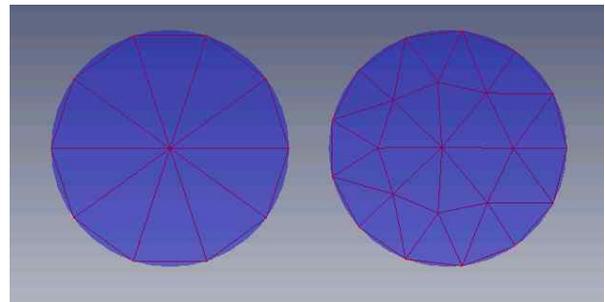


Fig. 2. Unmatched Boundary

IPSAP[16,17,18,19]을 연동하고 있기 때문에 형상함수 보간법을 적용하기에 적합하다.

## 2.2 형상함수 기반 온도 보간

### 2.2.1 개요

본 연구에 적용한 형상함수 온도 보간법은 열해석 기법이 유한요소법일 때 쉽게 적용할 수 있는 물리량 변환 기법이다. 열해석 격자의 온도 분포를 바탕으로 변환하고자 하는 구조절점과 가장 가까운 열해석 격자의 요소(이하 열요소)를 탐색 후, 해당 열요소의 형상함수 및 형상인자를 계산하여 이것으로 보간된 구조격자의 절점 온도를 얻을 수 있다. 열요소를 구성하는 공간은 3차원이고 인공위성의 특성 상 주로 셀이나 빔 등으로 이루어져 있기에 3차원 공간에서 셀 혹은 빔의 온도를 임의의 절점으로 보간시킬 수 있는 일정한 규칙을 제정해야 한다. 그리고 특히 곡면의 경우 열요소와 구조절점이 꼭 일치하지는 않기에 구조격자에서 가장 가까운 요소를 선택하여 이 때의 요소 형상인자를 계산하는 방식을 채택하였다. 이렇게 계산된 최소거리는 보통 0이 되지만 곡면경계의 경우는 꼭 그렇지 않다. Fig. 2는 크기가 같은 두 원의 서로 다른 두 격자를 예시로 나타낸 것으로 원호에 놓인 절점의 위치는 두 격자가 서로 다르며 좌측의 물리량을 우측 격자로 보간 시 우측 원호의 절점과 좌측 원 경계의 요소와의 최소 거리는 0보다 큰 값을 갖게 된다.

계산 절차는 크게 나누어서 아래와 같다.

1. 전체 영역을 일정 크기의 정육면체 Voxel로 분할 후 각 Voxel에 놓인 열격자의 절점과 요소들을 Voxel 별 목록(List)에 저장
2. 구조격자의 절점이 위치한 Voxel에 위치한 열요소 목록으로부터 최소거리 및 해당 열요소의 형상인자 계산
3. 2의 요소 형상인자로부터 형상함수를 통한 구조격자 온도 보간 수행

### 2.2.2 Voxel 기반 탐색 기법

열격자와 구조격자 간 최소거리 계산을 위해 일대일 검색은 무척 시간과 비용이 많이 들기에 이를 줄이기 위해서 전체 영역을 일정 크기의 3차원 Voxel로 분할하여 Voxel 별 거리 탐색을 통해 계산량을 줄이도록 개발하였다. 각 Voxel 별로 해당 Voxel에 속한 열요소들을 목록으로 저장 후 구조격자의 절점이 속한 Voxel의 요소들과의 최소 거리 탐색을 수행하게 된다. Voxel의 크기가 너무 작으면 많은 저장공간이 소요되고 해당 Voxel에 열격자 요소가 위치하지 않을 수도 있기에 그 범위를 넓히며 탐색에 드는 비용이 커지게 되므로 적절한 크기의 Voxel의 선정이 필요하다. 본 연구에서는 열격자 전체 영역의 XYZ 범위 중 최대 범위의 100분위 값을 Voxel의 크기로 사용하였다. 이론상으로 Voxel의 크기는 다양하게 결정할 수 있고 직육면체의 Voxel 형상을 사용할 수도 있지만 개발의 용이함으로 정육면체를 사용하여 3차원 인덱스로 쉽게 각 Voxel의 목록에 접근할 수 있도록 개발하였다.

Voxel 분할 기반 탐색법은 열요소와 구조절점의 범위를 지정하여 계산량을 절약하기 위한 방법으로서 계산 결과에는 전혀 영향을 미치지 않는다. 탐색에 소요되는 저장 공간과 계산량을 이론적으로 분석하기 위해 3차원 공간의 영역이 길이  $L$ 의 정육면체고 열격자 및 구조격자, Voxel의 길이가 순서대로  $H, h, l$ 이라고 가정한다. 이를 각 공간 축의 등분으로 표현할 경우, 열격자의 개수를  $N$ , 구조격자의 개수를  $n$ , Voxel의 개수를  $M$ 으로 표현하면  $H=L/N, h=L/n, l=L/M$ 이다. 이는 내부에 열요소와 구조절점이 균질하게 분포되어 있으면 비교적 합리적인 추정이라고 할 수 있으며 단위 Voxel 당 열요소 및 구조절점에 소요되는 저장 공간과 총 저장 공간은 각각 식 (4), (5)로 나타낼 수 있으며, 구조절점과 열요소의 거리 탐색에 소요되는 비용은 Big-O표현으로 각각 식 (6), (7)과 같다.

$$s_{therm} = O\left(\max\left(\left(\frac{l}{H}\right), 1\right)\right)^3 = O\left(\max\left(\left(\frac{N}{M}\right), 1\right)\right)^3 \quad (4)$$

$$s_{struct} = O\left(\max\left(\left(\frac{l}{h}\right), 1\right)\right)^3 = O\left(\max\left(\left(\frac{n}{M}\right), 1\right)\right)^3$$

$$S_{total} = O(M)^3 (s_{therm} + s_{struct}) \quad (5)$$

$$= O\left(\frac{L}{l}\right)^3 (s_{therm} + s_{struct})$$

$$c = O\left(\frac{l}{H}\right)^3 O\left(\frac{l}{h}\right)^3 = O\left(\frac{N}{M}\right)^3 O\left(\frac{n}{M}\right)^3 \quad (6)$$

$$C = O\left(\frac{L}{l}\right)^3 O\left(\frac{l}{H}\right)^3 O\left(\frac{l}{h}\right)^3 \quad (7)$$

$$= O(M)^3 O\left(\frac{N}{M}\right)^3 O\left(\frac{n}{M}\right)^3$$

저장공간을 나타내는 식 (4)에서 최대값을 의미하는 수식 'max'가 삽입된 것은 각 Voxel별로 해당 영역에 걸쳐 있는 열요소 및 구조절점의 정보를 연결목록(Linked List)이나 배열(Array) 등으로 저장하기 때문이다. 반면에 탐색의 계산량은 그러한 제한이 없기에 식 (6)과 같이 단순하게 표현된다. 위 식을 보듯이 Voxel의 크기를 작게 할수록 탐색에 드는 비용은 작아지게 되지만 저장공간은 Voxel의 개수만큼의 공간이 최소한 필요하다. 각 축의 100분위는 현대의 데스크톱 컴퓨터에서도 무리 없이 사용할 만한 저장공간이며, 계산 측면에서도 인공위성 열해석 및 구조해석 모델을 충분히 효율적으로 포함할 수 있기에 본 연구에 사용하였다.

Figure 3은 2차원의 Voxel을 활용한 거리 탐색의 예를 설명하는 그림이다. 비록 해당 그림은 2차원에 적용하였으나 3차원에도 동일한 원리로 적용된다. 두 개의 범 열격자 요소가 그림처럼 놓이고, 보간하고자 하는 구조격자 절점이 10번 Voxel에 위치한다. 1번 열요소는 X방향으로 9~11, Y방향으로 9~13번에 놓여 있고, 2번 열요소는 X축으로 3번, Y축으로 3~11까지 놓여 있다. 붉은 색의 구조격자 절점이 위치한 10번 Voxel에 놓인 열요소는 1번이다. 다만 해당 그림처럼 10번에 걸쳐있는 열요소 1번만 거리 계산에 고려하게 되면 실제로 가장 가까운 열요소는 2번인데도 불구하고 계산에 참여하지 않게 된다. 이러한 점을 방지하기 위해 구조격자 절점이 위치한

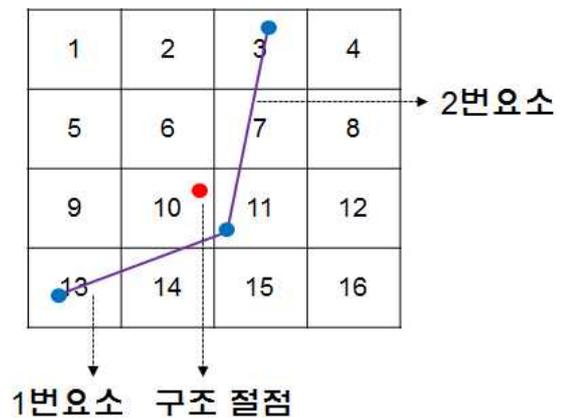


Fig. 3. Searching Closest Thermal Element from a Structural Node via Voxel Based Partitioned Domain

Voxel 외에 추가적으로 XYZ로 전후 1씩 더 증가된 영역을 탐색한다. 이 예의 경우 10번에서 XY로 전후 1씩 추가된 Voxel은 5, 6, 7, 9, 10, 11, 13, 14, 15가 된다. 만일 해당 영역에 걸친 열 요소가 없을 경우, 방향 크기를 1씩 늘려가며 탐색을 수행하도록 하여 비록 많은 시간이 소요될 지언정 어떠한 경우에도 온도 보간이 이루어지도록 개발하였다.

**2.2.3 형상함수 인자 계산**

이렇게 탐색된 최소거리 열격자 요소와 구조 격자 절점의 최소거리는 비선형 방정식의 해 산출에 널리 활용되는 Newton-Raphson 방법으로 계산한다. 이 때 최소거리와 함께 요소의 형상인자가 같이 계산된다. 최소거리를 표현하면 아래 식과 같다.

$$D = d^2 = \|X_S - X_T\|^2 \tag{8}$$

$$= (X_S - X_{NT}\Phi)^T (X_S - X_{NT}\Phi)$$

위 식에서  $X_S$ 는 각각 구조격자의 절점,  $X_T$ 는 열격자의 형상함수로 표현된 공간좌표를 담은 벡터이다. 이를 다시 풀어쓰면  $X_{NT}$ 는 열격자의 절점 벡터를 담은 행렬,  $\Phi$ 는 형상함수를 가리키는 벡터가 된다. 최소거리는 위 식의 최소값과 동치이므로 해당 식을 형상함수를 구성하는 독립변수인 형상인자로 미분한 값은 0이 되어야 한다. 형상인자의 개수는 형상함수의 각 차원의 수와 동일하다. 즉 빔 요소는 1개의, 셸 요소는 2개의, 고체 요소는 3개의 형상인자를 독립변수로 표현할 수 있다.

$$\frac{dD}{d\eta_k} = -2(X_S - X_{NT}\Phi)^T X_{NT} \frac{d\Phi}{d\eta_k} = 0 \tag{9}$$

$$H_k = X_S^T \frac{d\Phi}{d\eta_k} - \Phi^T X_{NT}^T X_{NT} \frac{d\Phi}{d\eta_k} = 0 \tag{10}$$

최소거리는 위 식의 방정식의 결과로 얻은 형상인자로부터 쉽게 계산된다. 위 식을 풀기 위해 Newton-Raphson법을 활용하였고 이 때 사용되는 이차 미분식은 아래와 같다.

$$\frac{\partial H_k}{\partial \eta_l} = X_S^T \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \eta_l \partial \eta_k} - \frac{\partial \Phi^T}{\partial \eta_l} X_{NT}^T X_{NT} \frac{\partial \Phi}{\partial \eta_k} - \Phi^T X_{NT}^T X_{NT} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \eta_l \partial \eta_k} \tag{11}$$

계산된 형상인자를 얻으면 이에 따른 형상함수값을 통해 식 (8)와 유사한 방식으로 열격자의 온도값을 아래 식과 같이 구조격자의 온도로 쉽게 변환할 수 있다.

$$T_S = T_{NT}\Phi \tag{12}$$

**2.2.4 형상함수 인자 범위에 따른 보간 방법**

식 (10)을 풀어서 얻은 최소거리를 이루는 형상인자가 요소 내부가 아닐 경우, 즉 최소거리가 요소 외부의 특정 지점과 구조절점 사이일 때가 발생할 수 있다. 이 때 계산된 형상인자를 그대로 활용하면 보외법(Extrapolation)과 동일한 방법이 된다. 혹은 요소 경계의 한 차원 낮은 형상

**Table 1. Cases of Calculation of Minimum Distances by Recursive Boundary Extraction**

1차원 경계	2차원 경계
<p>1. 구조절점이 열요소 내에 위치하며, 최소거리의 열요소 형상인자도 열요소 범위 이내</p>	
<p>2. 구조절점이 열요소 외부에 위치하지만, 최소거리의 열요소 형상인자는 열요소 범위 이내</p>	
<p>3. 구조절점이 열요소 외부에 위치하며, 최소거리의 열요소 형상인자는 열요소의 경계에 있음(초기에 계산된 최소거리 형상인자는 해당 열요소의 범위 외부)</p>	
<p>○ : 구조절점, ● : 열절점, 선 : 열요소</p>	

함수를 활용하여 최소거리를 계산할 수도 있다. 예를 들어 2차원 요소의 각 경계면들은 1차원 형상함수를 활용한 1차원 요소로 여길 수 있으므로 이를 재귀적(Recursive)인 함수 호출을 활용하여 최소거리와 해당 형상인자를 재계산한다. 전자의 방법으로는 구조절점과 열요소 간 최소거리 결과가 왜곡될 수 있으므로, 현 연구에는 후자의 방법을 적용하여 개발하였다.

Table 1은 순서대로 1차원, 2차원 경계면의 최소 거리를 후자의 방법으로 세 가지 경우에 나눠서 계산한 경우를 나열한 것이다. 첫 번째는 구조절점이 열요소 내부에 위치하는 경우로서 당연히 최소거리의 열요소 형상인자도 열요소 범위 내에 있고 최소거리는 0이다. 두 번째는 구조절점 자체는 열요소에 있지 않지만, 최소거리의 열요소 형상인자는 열요소 범위 이내인 경우로서 최소거리는 0보다 크다. 세 번째는 구조절점도 열요소 바깥에 있으며 최소거리의 열요소 형상인자는 해당 열요소의 경계에 있는 경우로서, 최소거리는 0보다 크다. 세 번째 경우에 대해 더욱 자세한 부연설명을 하자면, 초기에 계산된 최소거리의 형상인자는 해당 요소의 범위를 벗어나게 되며, 이 때는 초기 형상인자에 가까운 해당 요소의 경계를 새로운 요소로 취급하여 이 요소에 대한 최소거리와 형상인자를 계산하게 된다.

본지에서 제시된 알고리즘은 Python의 클래스를 활용한 객체 지향적 개발 개념으로 구현되었고, Python은 인터프리터 방식의 언어이므로 이를 단독 실행파일로 변환[20]하여 위성종합설계 소프트웨어 KSDS에 포함시켰다.

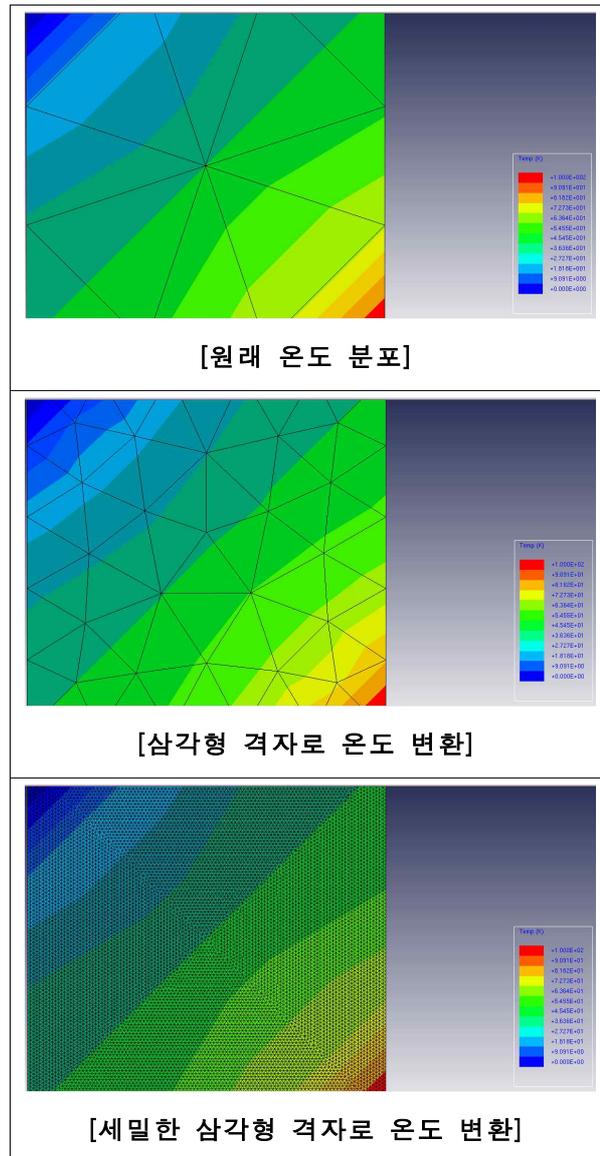
### III. 온도 보간 결과

개발된 코드의 검증을 위해 평판 및 곡면이 포함된 2, 3차원 요소에 대한 보간을 수행하였다. 첫 번째 예는 삼각형 요소로 이루어진 정사각 평판의 모델의 온도를 훨씬 세밀한 삼각형 요소로 보간하였다. Table 2는 사각 평판에 대한 온도 변환을 보여주는 그림으로서 온도 보간이 잘 이루어지고 있음을 확인할 수 있다.

다음은 휘어진 사각 평판 모델의 온도 변환이다. 사각형 요소의 온도를 세밀한 다른 사각형 격자로 변환한 결과가 Table 3에 잘 나와 있다.

세 번째는 삼각형 격자로 구성된 원판 모델의 온도를 각각 세밀한 삼각형 요소 및 사각형 요소로 변환하는 것을 검증하였다. 원판의 경계는 곡선이고 이 부분의 격자는 앞의 두 예제와는 달리

Table 2. Temperature Transform between Triangular Grids



경계의 격자가 서로 정확히 일치하지는 않는 좋은 실례라고 할 수 있다. Table 4의 그림에서 볼 수 있듯이 원본 격자와 변환 대상 격자의 경계가 정확히 일치하지 않아도 비교적 온도 변환이 잘 이루어짐을 확인할 수 있다.

마지막 예는 사면체 고체 요소로 구성된 구의 온도를 각각 원본과 비슷한 밀도의 육면체 중심의 요소망(Hexahedron Dominated Grid), 더욱 세밀한 육면체 중심의 요소망으로 변환 여부를 확인하였다. 세 번째와 달리 경계가 곡면이기에 난이도는 더욱 높다고 할 수 있다. Table 5에 나타난 첫 번째 그림과 두 번째 그림을 보면, 구의 양 끝단에서 급격한 온도 구배가 있고 이 부근의

Table 3. Temperature Transform between Quadratic Grids

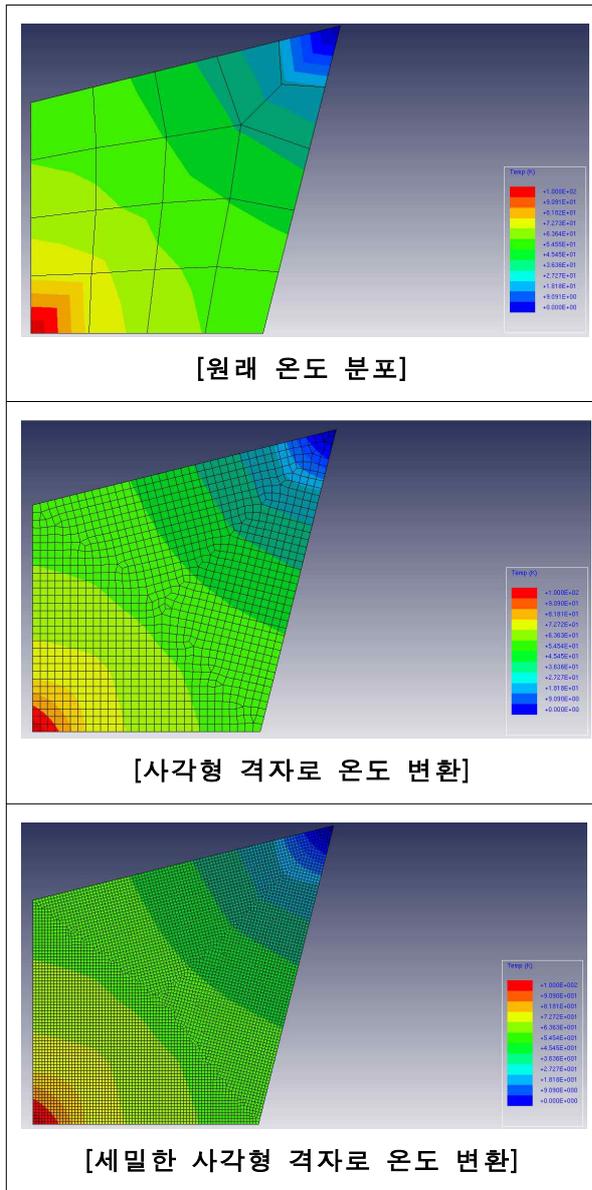
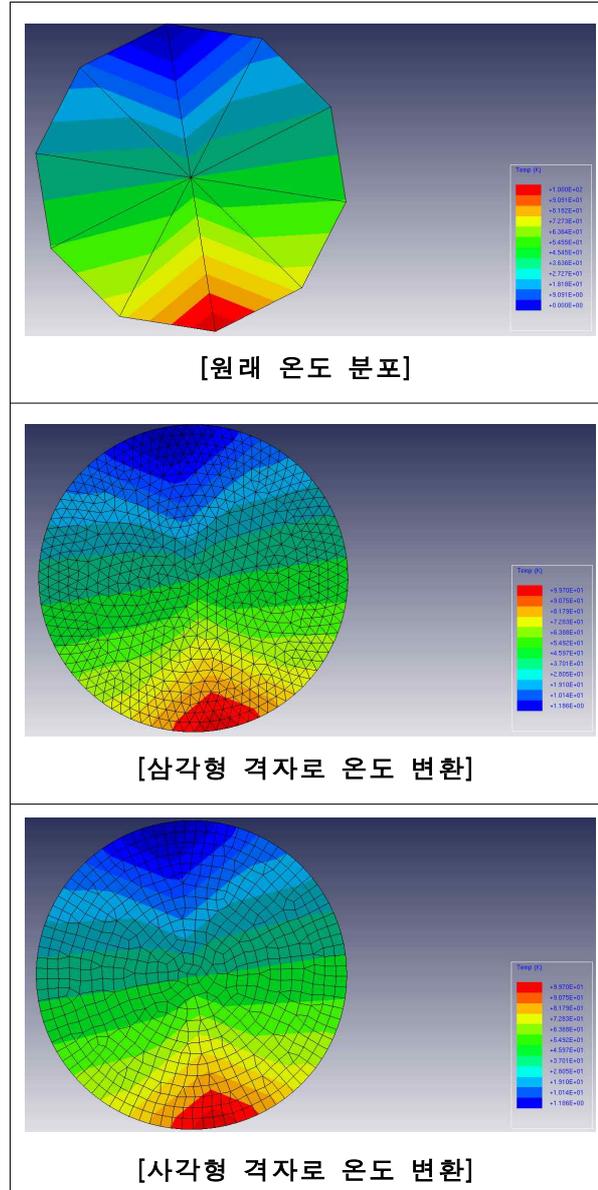


Table 4. Temperature Transform between Circular Shaped Grids



온도 변환에 다소 오차가 존재함을 확인할 수 있다. 세밀한 격자로 보간된 결과인 세 번째 그림은 두 번째 그림에 비해 원본인 첫 번째 그림과 훨씬 더 비슷한 결과를 가져옴을 알 수 있다.

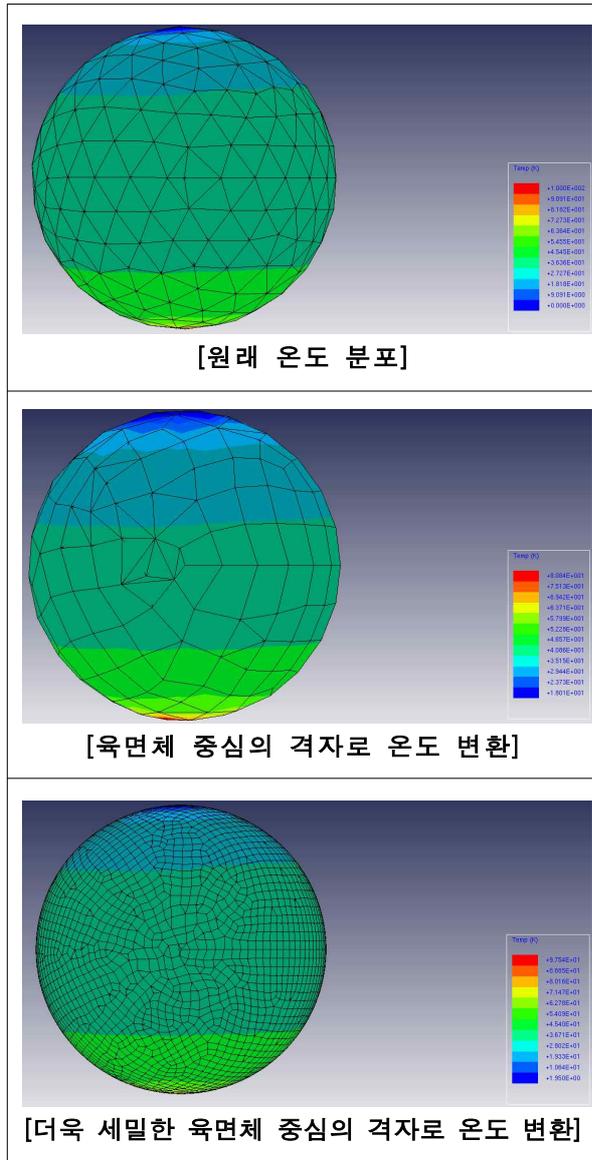
이는 형상함수 기반 온도 보간법의 특성에서 기인하는 것으로서 온도 구배가 심한 영역에서는 더욱 세밀한 격자를 사용해야 그 오차를 줄일 수 있음을 알 수 있다. 이 결과에서 보듯이 곡면 경계를 가진 문제의 온도 변환의 경우 원본 열격자보다 세밀한 구조격자를 사용할 때 온도 변환이 성공적으로 잘 이루어짐을 확인할 수 있다. 실제 대다수의 인공위성 구조격자는 열격자에 비해 세

밀하기에 본 논문의 방식은 곡면경계가 포함된 경우에도 여전히 유효함을 확인할 수 있다.

#### IV. 결 론

본 연구는 인공위성의 열하중으로 인한 위성의 구조적 안정성 해석을 위해 열해석과 구조해석이라는 서로 다른 두 격자 간 온도 변환을 위한 다양한 방법론에 대해 서술하고 위성종합설계 소프트웨어에 구현된 형상함수 기반 방법론을 적용하여 곡면경계가 포함된 3차원 형상들에 대한 다양한 경우의 온도 변환을 수행하였다. 제안된

Table 5. Temperature Transform between Sphere Shaped Grids



방법은 곡면경계를 포함한 다양한 경계면을 가지는 물체에 대한 온도 변환을 잘 수행함을 확인할 수 있으며, 이로서 본 논문에서 제시하는 방법의 유용성을 확인할 수 있다. 본 방법은 비단 열-구조 연계 해석뿐만 아니라 다양한 분야의 연계 해석에도 적용 가능하다.

## 후 기

본 논문은 한국항공우주연구원에서 수행 중인 (초소형위성을 이용한 미래 우주탐사 핵심기술 개발)의 일부로 수행되었으며, 이에 한국항공우주연구원의 지원에 감사드립니다.

## Reference

- 1) Y. H. Kim, I. H. Choi, Y. H. Jeon, B. S. Hyun, H. Y. Jeon and J. H. Kim, "Functions of Pre/Post Processor using Finite Element Method," KSAS 2014 Spring Conference, Apr. 2014, pp.944-947.
- 2) S. C. Lee, M. K. Kim, H. D. Kim, D. Y. Ryu, E. S. Sim, S. H. Yoon, and Y. H. Kim, "Development of Attitude Control Module for KARI Satellite Design Software," KSAS 2015 Spring Conference, Apr. 2015, 787-791.
- 3) M. K. Kim, B. S. Hyun, J. H. Kim, J. M. Woo, J. Y. Cho, "Functionalities and Verification of the Satellite Thermal Analysis Solver Based on Finite Element Method," KSAS 2014 Spring Conference, Apr. 2014, pp.948-951.
- 4) J. J. Lee, B. S. Hyun, J. H. Choi and T. K. Kim, "Introduction and Verification about Solver of View Factor and External Heat Source in KSDS," KSAS 2014 Spring Conference, 952-955.
- 5) C. H. Lee, J. H. Lee and Y. S. Cheon, "Introduction of KSDS Contamination Analysis and Its Verification," KSAS 2014 Spring Conference, Apr. 2014, pp.956-959.
- 6) K. J. Park, Y. Y. Park, J. R. Lim and H. T. Choi, "AOCS Library Development for KARI Satellite Design System," KSAS 2014 Spring Conference, Apr. 2014, pp.1004-1007.
- 7) Y. J. Cho, S. K. Lee and J. H. Seon, "Development and Verification of Calculation Program for Total Dose and Solar Cell Degradation by Space Radiation," KSAS 2014 Spring Conference, Apr. 2014, pp.1008-1011.
- 8) W. K. Lim, S. B. Ryu, J. P. Kim, S. I. Lee, S. K. Kim and S. K. Lee, "KSDS S Band Communication Link Analysis Solver Function and Verification for Low Earth Orbit and Geostationary Orbit," KSAS 2014 Spring Conference, Apr. 2014, pp.1012-1015.
- 9) J. C. Koo and J. B. Jang, "Function and Verification of the Power Analysis Solver in KARI Satellite Design System," KSAS 2014 Spring Conference, Apr. 2014, pp.1016-1020.
- 10) M. K. Kim, "Development of thermal structural temperature matching code", KSAS

2015 Spring Conference, Apr. 2015, pp.750-753.

11) S. W. Kim, "The Summary of the Thermo-Elastic Analysis of a Satellite Structure", KARI Technical memo, 2005

12) B.Cullimore, T. Panczak, J. Baumann, Victor. Genberg, Mark Kahan, "Integrated Analysis of Thermal/Structural/Optical Systems," SAE-2002-01-2444, C&R Tech, 2002.

13) Broomhead, David H.; Lowe, David.; "Multivariable Functional Interpolation and Adaptive Networks," Complex Systems, Vol.2, 1988, pp.321-355.

14) S. W. Kim, J. H. Kim, J. J. Lee and D. S. Hwang, "Thermal Pointing Error Analysis of Satellite," Journal of the Korea Society of Space Technology, Vol.1, No.2, Aug. 2007, pp.21-26.

15) D. H. Kim, H. Y. Lim, K. H. Kim, H. N. Lee, S. W. Kim, J. H. Lim and D. S. Hwang, "Development of Pre/Post Computer

Programs for Thermal Pointing Error Analysis of the Artificial Satellite Structure," KSAS 2010 Spring Conference, Apr. 2010, pp.458-461.

16) <http://ipsap.snu.ac.kr>

17) K. J. Park, Y. J. Park, J. Y. Cho, C. Y. Park and S. J. Kim, "Design Optimization of a Wing Structure under Multi Load Spectra using PSO algorithm," Journal of KSAS, Vol.40, No. 11, Nov. 2012, pp.963-971.

18) M. K. Kim, J. H. Kim, C. Y. Park and S. J. Kim, "Parallelization of Multifrontal Solution Method for Shared Memory Architecture," Journal of KSAS, Vol.40, No.11, Nov. 2012, pp.972-978.

19) M. K. Kim and S. J. Kim, "An Out of Core Linear Direct Solution Method for Large Scale Structural Analysis," Journal of KSAS, Vol.42, No.6, Jun. 2014, pp.445-452.

20) <https://pypi.python.org/pypi/py2exe>