

격자 세분화 방법을 고려한 복사열전달 형상계수 계산 기법 연구

김 동 건,¹ 한 국 일,¹ 최 준 혁,¹ 이 장 준,² 김 태 국^{*1}

¹중앙대학교 기계공학부

²한국항공우주연구원 위성 열/추진팀

STUDY ON VIEW FACTOR CALCULATION FOR RADIATIVE HEAT TRANSFER BY USING THE MESH SUBDIVISION METHOD

D.G. Kim,¹ K.I. Han,¹ J.H. Choi,¹ J.J. Lee² and T.K. Kim^{*1}

¹Dept. of Mechanical Engineering, Chung-Ang Univ.

²Thermal/Propulsion Dept., Korea Aerospace Research Institute Satellite

Since experiments on the actual operational status are said to be very impractical because of their economic and repeatability problems, it is difficult to understand the thermal profiles of aerospace or military equipments. Thus, the CFD codes with considering the radiation heat transfer are used to compensate the defect. In case, analyzing the radiation exchanges between the object surfaces are very important. Because the temperature and the IR signal distributions of the object surface are significantly affected by the radiative heat transfer. To achieve accurate thermal radiation exchange between surfaces, it is important to calculate the radiation view factor precisely. Finer subdivision of meshes can be used to increase the accuracy of radiation view factor, but if the mesh is subdivided infinitely, the time required for calculation increases significantly and thus decreasing the efficiency. If the subdivision is not sufficient, assurance of accuracy is not guaranteed. In this paper, optimal mesh subdivision method using the solid angle has been successfully tested and found to be useful in increasing the efficiency of calculating the shape factors.

Key Words : 복사형상계수(Radiation View Factor), 입체각(Solid Angle), 격자 세분화(Mesh Subdivision)

1. 서 론

대기 환경에서 운용되는 대다수의 항공, 우주, 군사 관련 장비들은 태양 복사에너지와 같은 외부 열원과 엔진, 발전기에서 자체적으로 발생하는 열과 같은 내부 열원을 포함하고 있다. 특히 태양 주위 궤도에서 운용되는 인공위성은 진공 환경에서 내, 외부 복사열에 의한 극한의 고온과 저온에서 구동되기 때문에 각 구성 요소가 갖는 작동 허용 온도를 벗어나지 않도록 설계되어야 한다. 또한, 위성이 발사된 이후에는 직접적인 부품의 수리, 교체가 사실상 불가능하므로 사전에 각 구성품에 대한 열적 신뢰성이 충분히 확보되어야 한다. 더

불어 이러한 열적 특성을 군사적으로 응용하는 대표적인 분야로 적외선 대역의 신호 탐지, 은폐 등이 있다. 각 체계는 내, 외부로부터 열에너지를 방출하기 때문에 적외선 센서를 이용하면 시계 조건이 불량한 환경에서도 쉽게 탐지, 인지될 수 있다. 이러한 적외선 센서에 쉽게 노출될 경우 적군으로부터 요격 당할 확률이 높아져 아군의 생존성에 큰 문제가 야기될 수 있다. 따라서 항공, 우주, 군사 관련 장비들의 열유체적 특성을 파악하는 것은 설계, 운용 상 필수적인 과정이다.

그러나 우주 환경 혹은 전장의 경우 실체를 모사하는 것이 매우 어렵고 대기 중에 노출되어 있는 경우는 복사열교환에 영향을 미치는 다수의 인자가 실시간으로 변화하기 때문에 재현성을 확보하기 어렵다. 즉, 실제 운용 상태의 실험은 소요되는 비용과 시간 등의 경제적, 효율적 측면을 고려하였을 때 상당히 비현실적이라고 할 수 있다. 이러한 이유로 최근에는 시뮬레이션 방법을 이용한 전산열유체 해석, 예측 방법이 각광받고 있다[1]. 위성체 열설계에 대한 검증을 비롯하여 물

Received: September 12, 2013, Revised: February 17, 2014,

Accepted: February 17, 2014.

* Corresponding author, E-mail: kimtk@cau.ac.kr

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2014.19.1.001>

© KSCFE 2014

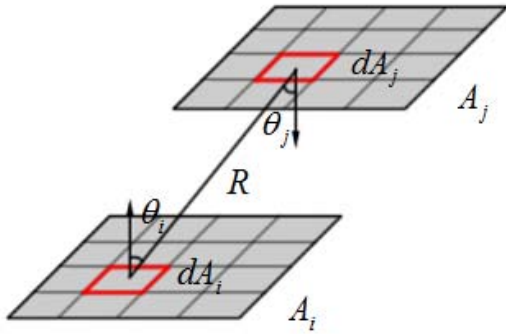


Fig. 1 Radiative heat exchange between two surface meshes

체 표면의 태양 복사에너지 반사 성분 분석 등을 통한 적외선 신호 특성 분석에 대한 검증에 있어 효율성을 도모하기 위한 해석적 방법을 이용한 사례가 대표적이라고 할 수 있다 [2,3]. 이러한 전산열유체 해석에는 열전달 계산을 함께 수행하게 되며 이 과정에서 전도, 대류에 의한 에너지뿐만 아니라 외부 열원으로부터 입사되는 복사에너지 성분을 비롯해 내부 열원에 의한 영향도 함께 고려할 수 있도록 물체 내, 외부 표면의 상호 복사열교환을 필수적으로 고려해야 한다. 특히, 우주 공간의 물체를 해석하는 경우에는 오로지 복사에 의해서만 열전달이 이루어지기 때문에 복사열전달 계산 과정은 필수적이다[4-6].

표면 간의 복사열교환을 계산하기 위해서는 대상의 기하학적 특성을 반영할 수 있도록 복사형상계수(radiation view factor)의 개념을 도입하여 계산을 수행한다. 복사열교환을 정확하게 계산하기 위해서는 방사된 복사에너지가 해당 격자에 도달하는 비율을 나타내는 복사형상계수를 정확하게 계산해야 한다. 이를 위해 주어진 표면 요소를 미세한 크기의 세부 격자로 나누어 계산하는 격자 분할 방법이 자주 이용된다. 그러나 무제한적으로 격자를 세분화할 경우 계산 시간이 기하급수적으로 증가하게 되어 효율성 측면에서 문제가 발생하고, 격자가 적절한 수준으로 세분화되지 않을 경우 계산의 정확성 측면에서 문제가 발생될 수 있다. 계산 시간과 정확성의 두 요소는 서로 상충되는 부분이 있어 이 두 가지 요소를 합리적으로 고려할 수 있는 계산 방법이 요구된다. 이전 연구에서는 다양한 형태에 대한 형상계수를 수치해석적 방법을 이용해 계산하여 데이터베이스화 하여 나타낸 결과[7]를 참조하여 이용하였다. 그러나 이러한 방법은 응용할 수 있는 형태에 한계가 있고 전산열유체 해석 과정에 적용하기에도 적절하지 못하다. 따라서 면(area) 혹은 경계선(contour)을 수치적으로 적분하여 형상계수를 얻어내는 방법이 주로 이용되어 왔으며[8], 광선추적법을 이용해 얻어내는 방법[9], 몬테카를로 방법과 같은 통계학적 방법[10] 등도 함께 소개되었다. 본 논문에서

는 입체각(solid angle)의 크기를 기준으로 하는 격자 세분화 방법을 고려하여 계산 시간과 정확도를 모두 고려할 수 있는 복사형상계수 계산 방법에 대해 연구하였다. 더불어 간단한 형태의 두 격자 혹은 표면 내부의 형상계수 계산 결과를 엄밀해 및 상용 코드의 계산 결과와 비교하여 제시된 방법의 타당성을 검증하였다.

2. 이론적 배경

2.1 복사 열교환량 및 형상계수 계산

Fig. 1과 같이 물체 표면을 구성하는 요소 i 와 임의의 상대 요소 j 간의 복사 열교환량 Q_{ij} 는 다음의 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 단, 여기서 물체의 표면은 회색 확산 표면으로 가정한다[11].

$$Q_{ij} = F_{ij} A_i \epsilon_i \epsilon_j \sigma (T_i^4 - T_j^4) \quad (1)$$

여기서 A 는 격자의 면적, ϵ 는 표면의 방사율, σ 는 스테판-볼츠만 상수, T 는 표면온도, F_{ij} 는 격자 i 와 격자 j 간의 형상계수로써 격자 i 를 떠나는 복사에너지 중 임의의 격자 j 에 의해 차단되는 분율을 뜻하며 수식으로 나타내면 다음과 같이 표현된다.

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_j} \int_{A_i} \frac{\cos\theta_i \cos\theta_j}{\pi R^2} dA_i dA_j \quad (2)$$

여기서 θ 는 두 격자의 중심 간의 벡터와 격자의 표면 법선 간의 각도를 뜻하며, R 은 격자 간의 거리를 나타낸다. 본 연구에서는 격자를 충분히 미소한 요소로 가정하여 식 (2)의 이중 적분 항을 식 (3)과 같이 이중 합으로 근사화하여 계산을 수행하였다.

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \sum_{A_j} \sum_{A_i} \frac{\cos\theta_i \cos\theta_j}{\pi R^2} dA_i dA_j \quad (3)$$

물체의 표면을 구성하고 있는 격자의 크기가 큰 경우 계산의 정확성 확보를 이를 세분화할 필요가 있다. 또한 앞서 언급한 식 (3)을 이용하기 위해서는 격자 요소가 충분히 작아야 정확한 계산 결과를 얻어낼 수 있다. 그러나 이러한 격자가 무제한적으로 작아질 경우 계산 시간이 기하급수적으로 증가되기 때문에 효율적인 측면에서 문제를 야기할 수 있다. 따라서 최적화된 격자 세분화가 필요하다.

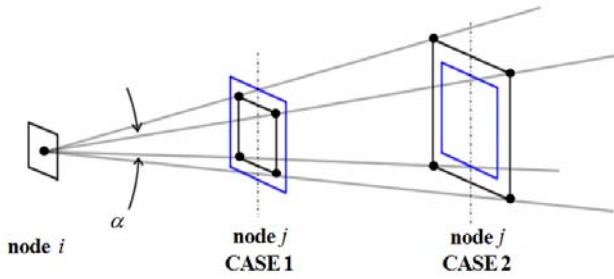


Fig. 2 Examples of the mesh subdivision with a certain solid angle

2.2 격자 세분화 방법

격자의 세분화 정도에 대한 판단을 위해서는 기본적으로 격자의 크기가 고려된다. 그러나 격자와 격자간의 거리에 따라서는 그 크기에 변화가 요구된다. 예를 들면 격자 간의 거리가 가까울 경우에는 더 세분화된 격자가 계산의 정확도를 위해 필요하다. 따라서 격자의 면적과 크기를 함께 고려할 수 있도록 입체각을 그 기준으로써 활용할 수 있다. 본 연구에서는 입체각에 대한 임의의 기준치 α 에 대해 다음의 조건을 만족할 때까지 세분화하여 형상계수 계산에 이용한다.

$$\frac{dA_i}{R^2} \leq \alpha \quad \frac{dA_j}{R^2} \leq \alpha \tag{4}$$

예를 들어 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 격자 i 로부터 입체각 α 를 기준으로 설정하고 동일한 크기의 상대 격자 j 가 놓여있는 두 가지 경우를 생각해보면, 상대적으로 격자와의 거리가 가까운 CASE 1에서는 격자 j 의 크기가 입체각 기준 α 를 초과하기 때문에 격자 j 를 세분화하는 것으로 판단하고, 격자와의 거리가 상대적으로 먼 CASE 2에서는 격자 j 의 크기가 입체각 기준 α 보다 작기 때문에 격자 j 를 세분화하지 않는 것으로 판단한다.

격자 세분화는 미국에서 개발된 적외선 신호 예측 프로그램인 RadthermIR[12]에서 이용하는 방법을 이용하였다. 격자 세분화 방법은 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 격자의 한 변을 N 등분한 후 각 격자의 중점을 기준으로 세분화하는 것으로 격자의 수는 단계($K=1,2,3,\dots$)에 따라 삼각형의 경우 $3N^2$ 개, 사각형의 경우 $4N^2$ 개로 세분화된다.

3. 적용 조건 및 결과 분석

3.1 격자 세분화 기준 설정

본 연구에서 제시하는 입체각을 기준으로 한 격자 세분화 방법을 이용하기에 앞서 최적의 입체각을 찾는 과정이 필요

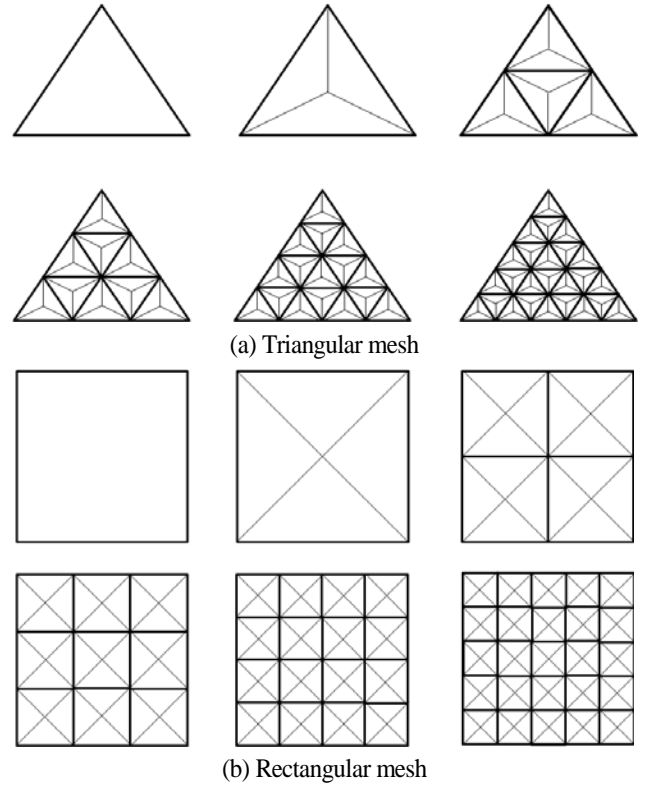


Fig. 3 Examples of the mesh subdivision method

하다. 엄밀해를 구할 수 있는 형태를 취하기 위해 1×1 m 크기의 두 격자를 1 m 거리를 두고 정확하게 마주보도록 설정한 후 다양한 입체각 조건을 이용하여 격자 세분화 과정을 거친 후 엄밀해와의 오차 분석을 수행하였다. 엄밀해는 참고 문헌 [13]의 부록으로 수록되어 있는 view factor catalogue내에서 참조하였으며 다음과 같은 수식으로 계산된다.

$$F_{12} = \frac{1}{\pi xy} \left[\ln \frac{x_1^2 y_1^2}{x_1^2 + y_1^2 - 1} + 2x \left(y_1 \arctan \frac{x}{y_1} - \arctan x \right) + 2y \left(x_1 \arctan \frac{y}{x_1} - \arctan y \right) \right] \tag{5}$$

여기서 $x = W_1/H$, $y = W_2/H$, $x_1 \equiv \sqrt{1+x^2}$, $y_1 \equiv \sqrt{1+y^2}$ 이며 W_1 , W_2 는 각각 격자의 가로, 세로 길이를 나타내고 H 는 격자 간에 수직으로 마주보는 거리를 나타낸다.

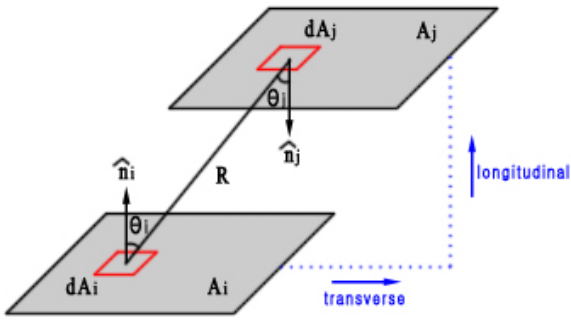


Fig. 4 The method for considering the different longitudinal and transverse distance

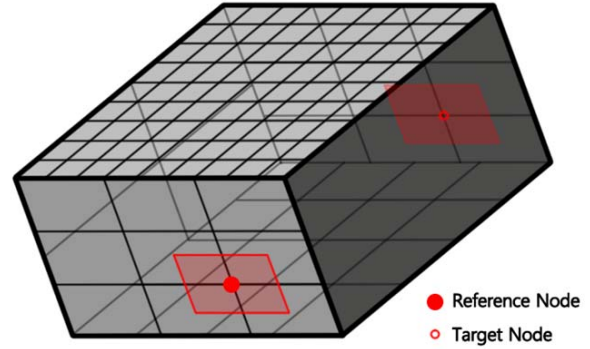


Fig. 5 Applied model for comparing with a exact value

Table 1의 결과를 살펴보면 입체각 기준치를 0.01 이하로 설정한 경우 엄밀해와의 오차가 1% 미만으로 나타남을 확인할 수 있다. 따라서 정확한 형상계수 계산 결과를 얻기 위해서는 0.01 이하의 입체각을 기준으로 이용하는 것이 좋다.

3.2 두 격자 간의 형상계수 계산 및 분석

3.1절의 결과로부터 얻어낸 입체각 0.01 기준에 대해 두 격자를 Fig. 4와 같이 각각 종방향, 횡방향으로 이동하여 그 거리에 따른 형상계수를 계산하고 엄밀해와의 오차를 Table 2와 Table 3에 각각 나타내었다.

결과를 분석해보면, 입체각 0.01을 적용한 경우 종방향, 횡방향의 거리에 따른 형상계수 계산 결과는 엄밀해와 약 1% 내외의 오차를 갖는 것으로 나타났다. 따라서 입체각 0.01은 형상계수를 정확하게 계산하는데 타당한 기준으로 활용할 수 있음을 확인하였다.

Table 1 The results of view factor calculation with considering different solid angles

No. of Elements	Solid angle	View Factor	Relative Error(%)
Exact Soln.		0.199843	-
1 X 1	1	0.318310	59.29
2 X 2	0.25	0.216804	8.49
5 X 5	0.04	0.202275	1.23
10 X 10	0.01	0.200430	0.29
20 X 20	0.0025	0.199979	0.08
50 X 50	0.0004	0.199849	0.01

Table 2 The results of view factor calculation with considering the different longitudinal distance

Distance [m]	View Factor		Relative Error(%)
	Exact	Calculated	
0.5	0.415120	0.415807	0.16
1	0.199843	0.200430	0.29
2	0.068589	0.068938	0.51
5	0.012403	0.012483	0.64
10	0.003162	0.003183	0.66

3.3 단순 형상 내부 격자간의 형상계수 계산 및 상용 코드 결과 비교, 분석

본 연구에서는 앞서 제시한 형상계수 계산 방법의 정확도를 추가적으로 분석하기 위해서 Fig. 5와 같이 형상계수 엄밀해를 얻을 수 있는 서로 마주보는 동일한 면적의 격자에 대해 형상계수 계산을 수행하여 그 결과를 엄밀해와 비교, 분석하였다. 형상 모델은 직육면체 형태이며 크기는 1×1×0.5 m이다. 형상계수 계산은 입체각 0.01을 기준으로 격자를 세분화한 경우, 격자 세분화를 고려하지 않은 경우에 대해 수행하였고, 더불어 상용 코드의 Direct View Factor 방법을 이용해 계산을 수행하였다. 엄밀해는 앞서 언급한 방법을 다시 적용하여 계산하였다.

Table 4에 나타난 바와 같이 엄밀해를 기준으로 하였을 때 상용 코드의 계산 결과는 약 1.3%, 본 연구에서 제시하는 방법은 격자 세분화 수행 시 약 1.4%, 미 수행시 약 4.5%의 오차를 보이는 것으로 확인되었다. 따라서 상용 코드의 계산 방법과 본 연구에서 제시하는 형상계수 계산 방법은 복사 열전

Table 3 The results of view factor calculation with considering the different transverse distance

Distance [m]	View Factor		Relative Error(%)
	Exact	Calculated	
0.5	0.086050	0.086053	0.003
1	0.015275	0.015214	0.40
2	0.000494	0.000487	1.58
5	0.000032	0.0000031	0.43

Table 4 Comparison of the view factor results with the exact value

View factor			
Exact	Commercial S/W	No mesh subdivision	Mesh subdivision
0.016917	0.016683	0.01768	0.01716
Error(%)			
Exact	Commercial S/W	No mesh subdivision	Mesh subdivision
-	1.37	4.51	1.44

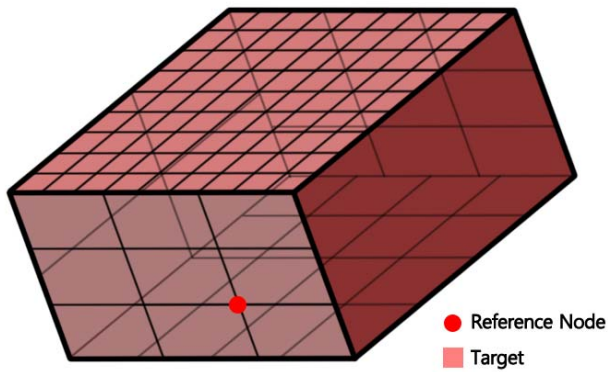


Fig. 6 Applied model for calculating view factors using with a solid angle

달량 계산에 이용되기 타당한 것으로 판단되며 본 연구 방법에서 제시하는 방법에 의한 격자 세분화 수행 시 더 높은 정확도를 갖는 것을 알 수 있다.

3.4 단순 형상 내부 전체에 대한 형상계수 계산 및 상용 코드 결과 비교, 분석

본 연구에서는 격자 세분화의 기준으로 입체각을 이용하는 방법을 제시하였으며 이 기준을 최적화하기 위해 앞서 해석한 동일한 단순 직육면체 형상의 내부 표면에 대한 형상계수 계산을 수행하였다. 마찬가지로 형상 모델은 직육면체 형태로 1×1×0.5 m의 크기를 가지고 있으며 절점의 개수는 총 149개이다. Fig. 6에 나타낸 바와 같이 하나의 기준 절점에 대해 나머지 전체의 절점을 계산 대상으로 하였으며, 이 경우 엄밀해의 획득은 불가능하기 때문에 전 세계적으로 널리 이용되고 있는 상용 코드의 계산 결과와의 차이를 비교하는 것으로 본 연구에서 이용한 계산 방법의 타당성을 입증하고자 한다. 형상계수 계산은 격자 세분화를 고려하지 않은 경우와 입체각 기준을 0.1, 0.01, 0.005로 설정한 경우에 대해 이뤄졌으며 이를 상용 S/W의 계산 결과와 각각 비교하여 Fig. 7과 Table 5에 나타내었다.

결과를 살펴보면 본 연구에서 제안하는 계산 방법을 이용한 형상계수 계산 값이 상용 코드의 결과와 10%대의 차이 내에서 매우 유사한 경향을 갖는 것으로 확인되었다. 입체각의

Table 5 The difference and computation time according to the different solid angle

Radiation view factor	Difference w/ commercial S/W	Computation time
No subdivision	16.5%	0.6sec
Solid angle 0.1	13.1%	1.4sec
Solid angle 0.01	11.3%	149.3sec
Solid angle 0.005	11.2%	634.5sec

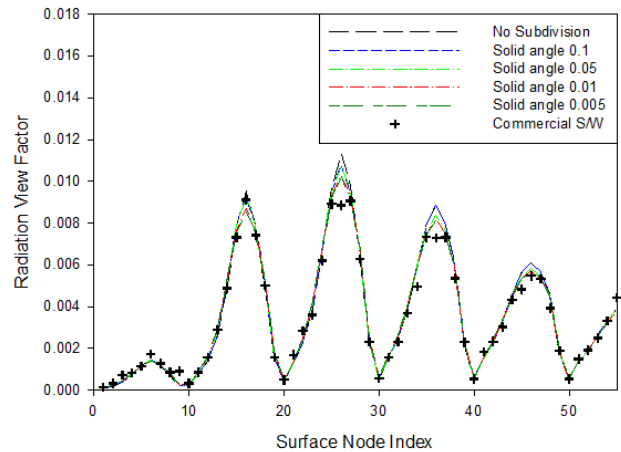


Fig. 7 The radiation view factor distribution with considering the different solid angle

기준이 점점 작아질수록 상용 코드의 결과와의 차이가 점점 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 계산 시간은 경우에 따라 다소 큰 폭으로 증가하는 것을 알 수 있다. 또한, 입체각의 기준을 0.01 미만으로 설정할 경우 계산 시간의 증가폭에 비해 계산 결과의 변화는 상대적으로 작게 나타나는 것으로 확인된다. 따라서 정확도를 우선 시 하는 해석의 경우 입체각 0.01을 기준으로 이용할 시 가장 효율적으로 결과를 얻어낼 수 있다고 판단된다.

4. 결 론

본 논문에서는 항공, 우주, 군사 분야에 주로 응용되는 전산열유체 해석 과정에 포함되는 물체의 표면온도 및 적외선 신호 예측과 같은 열적외선 시뮬레이션의 정확성에 큰 영향을 미치는 인자인 복사형상계수의 효율적인 계산 방법에 대해 연구하였다. 형상계수 계산에서 정확도와 계산 시간은 상충되는 특성을 지니고 있으므로 이 두 요소를 모두 고려하는 격자 세분화 방법이 요구되며 본 연구에서는 입체각을 격자 세분화 기준으로 이용하여 계산을 수행하였으며 이를 엄밀해 및 상용 코드를 이용한 결과와 비교하였다. 분석 결과, 입체각을 기준으로 하여 격자를 세분화하고 이를 미소요소 적분 방법으로 형상계수를 계산 시 엄밀해와 1% 내의 상대 오차를 보였으며, 격자 세분화를 위한 입체각 기준이 0.01인 경우 격자 세분화를 고려하지 않은 경우에 비해 계산 결과 정확도의 향상이 있음을 확인하였다. 추후 본 연구 방법을 적용해 열해석 시뮬레이션을 수행할 경우 정확성과 효율성을 겸비한 물체 내, 외부의 복사열전달 계산 결과를 획득할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 한국항공우주연구원에서 주관하는 연구과제 “위성시스템 가상설계 S/W 개발”의 일환으로 수행되었습니다.

References

- [1] 2004, Raimundo, A., Gaspar, A. and Quintela, D., "Numerical Modelling of Radiative Heat Exchanges Between the Human Body and Surrounding Surfaces," *Mediterranean Congress of Climatization*, 1-10, Lisboa, Portugal.
- [2] 2005, Lee, J.J., Kim, H.K., Hyun, B.S. and Choi, J.M., "A Verification of Satellite Thermal Analysis Code by using Analytical Method," *The Korea Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol.05-1713, pp.610-613.
- [3] 2011, Kim, D.G., Choi, J.H. and Kim, T.K., "Characteristic Analyses of the Reflected Components of IR Signals due to Multiple Reflection on Object Surfaces," *Proceedings of SPIE*, Vol.8180-818016.
- [4] 2010, Choi, J.H., Kim, J.H., Jung, I.H., Lee, P.H. and Kim, T.K., "Study on IR Signature Characteristics for different Transmittance over the Korean South Sea during Summer and Winter Seasons," *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, Vol.13, No.2, pp.320-327.
- [5] 2002, Gilmore, D.G., "Spacecraft Thermal Control Handbook," *American Institute of Aeronautics & Ast.*, Vol.1, pp.36-47.
- [6] 2009, Hassanzadeh, P., Raithby, G.D. and Chui, E.H., "Efficient Calculation of Radiation Heat Transfer in Anisotropically Scattering Media Using the Q_L Method," *Computational Thermal Sciences*, Vol.1, pp.189-206.
- [7] 1978, Sparrow, E.M. and Cess, R.D., "Radiation Heat Transfer," Augmented Edition, Washington : *CRC Press*.
- [8] 1992, Siegel, R. and Howell, J.R., *Radiation Heat Transfer*, 3rd ed., Hemisphere, New York, USA.
- [9] 2010, Walker, T., Xue, S.-C. and Barton, G.W., "Numerical Determination of Radiation View Factors Using Ray Tracing," *Journal of Heat Transfer*, Vol.132, 072702-1~6.
- [10] 1997, Howell, J.R., "The Monte Carlo Method in Radiative Heat Transfer," *Journal of Heat Transfer*, Vol.120, pp.547-560.
- [11] 1995, Allen, R.C., Keith, R.J. and Eric, A.M., "Automated Radiation Modeling for Vehicle Thermal Management," *SAE International Congress and Exposition*.
- [12] RadthermIR, <http://www.thermoanalytics.com>
- [13] 2003, Modest, M.F., "Radiative Heat Transfer," Academic Press, pp.762-778.