論文 J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 45(10), 898-906(2017)
DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2017.45.10.898
ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

고정확도의 인공위성 궤도 열하중 계산 기법

김민기*

High Fidelity Calculation of Thermal Load in a Satellite Orbit

Min-Ki Kim*
Korea Aerospace Research Institute*

ABSTRACT

This paper discusses the efficient high fidelity calculation of external thermal loads of a spacecraft on its orbit. Thermal loads to a spacecraft consist of three major components, direct solar radiation, earth reflection of solar rays, and earth irradiation. With the assumption that both earth reflection and earth emission are diffuse, thermal loads from earth surface divided into pieces of segments to satellite surfaces are individually calculated and summed over. By using analytical integration of both reflected and emitted heat load by earth, high rate of numerical convergence is achieved and the results are even exactly calculated in special cases. Moreover, KD tree ray tracing is employed in the calculation of thermal load to determine whether the radiated ray is obstructed or not by satellite structure.

초 록

본 논문은 우주선의 우주궤도 상에서 받는 외부 열원을 효과적이고 정확하게 계산할 수 있는 방법에 대해 논한다. 우주 외부 열원은 크게 태양직사광, 지구반사광, 지구복사열 세 가지로 구분할 수 있다. 본 논문은 지구반사광과 지구복사열이 확산반사 및 방사를 따른다고 가정하고 지구표면을 다수의 구역들로 분할하여 이들과 인공위성 표면과의 반사/복사열을 계산하여 합산하였다. 본 연구에는 이들의 엄밀 적분식을 적용하여 수렴성을 극대화하였으며 많은 경우 정확한 결과를 가져올 수 있음을 알 수 있다. 그리고 외부 열원과 위성 표면 사이의 광선 차폐를 판단하기 위해 KD Tree Ray Tracing을 적용한 인공위성 궤도 열하중 계산 알고리즘을 개발하였다.

Key Words : Thermal Load to Satellite(인공위성 열하중), Earth Reflection Heat(지구 반사열), Earth Irradiation Heat(지구 복사열), Analytical Integration(엄밀 적분), KD Tree Ray Tracing

Ⅰ. 서 론

인공위성 등의 우주선의 설계에 있어서 우주궤도상의 극한 환경을 예측하기 위한 열해석이 필요하다. 우주공간의 열전달은 전도와 복사의 두 방식으로 이루어지기에 이를 해석하기 위해서

† Received : August 6, 2017 Revised : September 18, 2017 Accepted : September 21, 2017
* Corresponding author, E-mail : mkkim12@kari.re.kr

비열, 전도도와 함께 흡수율, 방사율의 광학 열물성치, 복사형상계수와 우주 궤도상의 외부 열원으로부터의 열하중[1]이 필요하다. 이 중에서 복사형상계수는 열해석 모델의 기하학적인 형상에 따라 정의되기에 열물성치나 외부 환경에 무관하게 수치적으로 계산할 수 있으며 참고문헌[2]에서 이의 병렬계산을 포함한 효과적인 계산 방법론을 제안한 바 있다.

본 논문은 우주 궤도상 외부 열원을 계산하는 방법에 관한 논문[3]에서 출발하여 그보다 더욱 정확한 계산기법을 제시한다. 논문[3]의 방법은 계산 효율성을 위해 위성체를 둘러싸는 가상의 정육면체를 통과하여 위성체로 전달되는 열을 단순 수치적분으로 계산하는 반면 본 연구는 지구표면과 위성체와의 직접 열전달을 엄밀 적분을 활용하여 더욱 정확한 열하중을 얻고자 한다. 그리고 태양전지판 등의 위성구조물로 인한 외부 열원의 차폐효과를 고려하기 위해 컴퓨터 그래픽스에서 많이 활용되는 KD Tree Ray Tracing[4-7]을 적용하였다.

II. 본 론

일반적으로 우주물체에 가해지는 외부 열원은 태양직사광, 지구반사열, 지구복사열의 세 가지로 나눌 수 있다. 이 중에서 가장 큰 비중을 차지하는 것은 태양직사광이지만 지구반사 및 지구복사의 비중도 결코 작지 않으며 위성의 고도가 낮을수록 지구와 연관된 열원의 비중이 커지게 된다. 본 연구내용을 소개하기 위해 선행연구인 논문[3]을 먼저 언급한다.

2.1 태양직사/지구반사/지구복사 열모델

모든 물체는 그 온도에 따라 복사열을 방사함과 동시에 외부열을 흡수/투과/반사하는데 본 연구에서는 완전확산(Perfect Diffuse)한다고 가정한다. 완전확산 열모델은 입사열에너지의 방향과 관계없이 표면에 방사/반사된 복사열의 휘도(Luminance)가 모든 방향에서 그 강도가 동일한 것으로서, 모든 방향의 미소각에서 방출되는 미소열유속 성분이 표면법선벡터와 방향벡터 사잇각의 cos함수값과 비례하는 열모델을 의미한다.

그리고 지구를 완전구체로 가정하고 수치적분을 위해 유한한 조각들로 분할한다. 이 때 태양열유속은 식 (1)로 간단하게 표현할 수 있으며, 각 미소면적에 따른 지구반사/복사 미소열유속은 다음 식 (2), (3)과 같다.

$$q_S = S_S \alpha_S \cos\theta_S \tag{1}$$

$$dq_a = \frac{S_S \rho_E \alpha_a \cos\theta_1 \cos\theta_2 \cos\theta_3}{\pi |R_{Es}|^2} dA_E \tag{2}$$

$$dq_E = \frac{S_E \alpha_E \cos\theta_2 \cos\theta_3}{\pi |R_{Es}|^2} dA_E \tag{3}$$

Figure 1과 Table 1에서 보듯이 벡터 R_{Es}는 지구표면과 인공위성 표면을 잇는 벡터이고 Θ_1은

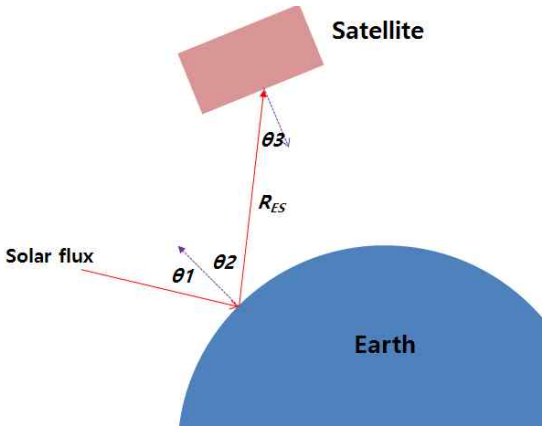

Fig. 1. Earth reflection and irradiation[3]

Table 1. Description of symbols in equation (1) to (3)[3]

Symbol	Description
q_S	Absorbed solar heat flux
q_a	Absorbed solar heat flux reflected by Earth
q_E	Absorbed heat flux irradiated by Earth
S_S	External solar heat flux (*Solar flux constant*)
S_E	External heat flux irradiated by Earth (*Earth IR constant*)
R_{ES}	Vector from Earth surface to the satellite surface
a_S	*Absorptivity* of solar heat flux
a_a	*Absorptivity* of solar heat flux reflected by Earth
ε	*Emissivity* of the satellite
a_E	*Absorptivity* of heat flux irradiated by Earth
Θ_s	Angle between sunlight and normal to satellite surface
Θ_1	Angle between sunlight and normal to Earth surface
Θ_2	Angle between Earth IR and normal to Earth surface
Θ_3	Angle between Earth IR and normal to satellite surface
ρ_E	Reflectivity of Earth (*Albedo constant*)

지구표면의 법선과 태양광선이 이루는 각도, Θ_2는 지구표면 법선과 벡터 R_{Es}의 각도, Θ_3는 인공위성 표면 법선과 벡터 R_{Es}의 각도이다. Table 1에 정리된 바와 같이 식 (1)-(3)의 물리량 q, S, ρ, a는 각각 위성 표면에 흡수되는 열유속(Heat Flux), 태양/지구의 열유속, 반사율(Reflectivity), 흡수율(Absorptivity)을 의미하며, 하첨자 S, s, a, E는 각각 태양(Sun), 우주선(SpaceCraft), 지구반사(Albedo), 지구(Earth)를 의미한다. 여기서 태양열과 지구반사열은 그 파장이 비슷하다는 가정하에 동일한 흡수율을 적용할 수 있고, 지구복사열은 위성체의 열복사 파장과 비슷하다고 가정하고 그 흡수율이 위성체의 방사율(Emissivity)과 동일하다고 생각할 수 있다.

$$\alpha_a = \alpha_S \tag{4}$$

$$\alpha_E = \epsilon \tag{5}$$

식 (1)의 태양열도 (3)과 유사한 식으로 전개할 수 있지만, 태양-위성간의 거리는 태양 직경에 비해 무척 크기에 식(1)과 같은 식으로 모델링하는 것이 계산 효율성 측면에서 더욱 유리하다. 식 (2)~(3)을 이산화된 지구표면 조각들에 대해 수치적분을 수행하고 모두 더하면 위성체에 도달하는 총 열유속을 구할 수 있다.

한편 위성이 식(Eclipse)기간에 돌입하게 되면 태양광선이 지구에 의해 가려지므로 이 때의 태양직사열 및 지구반사열은 모두 0이 된다. 식기간 여부를 판단하는 방법은 Fig. 2에 도시되었으며 식 (6)과 같다.

$$v_S \cdot v_E > \sqrt{1-\left(\frac{R_E}{R_s}\right)^2} \tag{6}$$

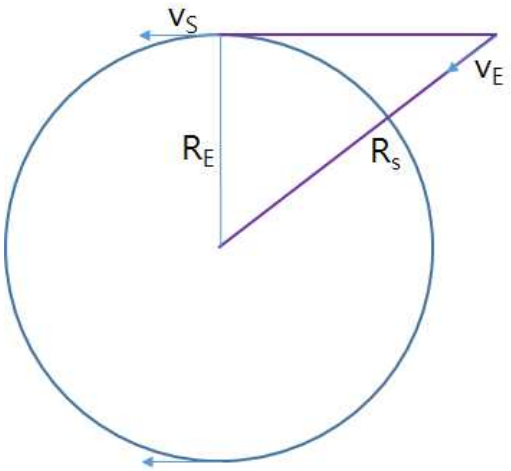

Fig. 2. Determining the Eclipse

여기서 v_S, v_E는 각각 위성으로부터 태양지향, 지구중심지향 단위벡터이며, R_E, R_s는 각각 지구반경, 위성고도를 의미한다. 태양지향벡터와 지구중심지향벡터 사잇각이 식기간 임계각도보다 작아야 하므로 벡터의 내적을 이용하면 식 (6)을 판별 기준으로 활용할 수 있다.

2.2 열하중 성분 분해

식 (2), (3)을 이해하기 쉽게 전개하기 위해 Fig. 3과 같이 좌표축을 설정하기로 하자. Fig. 3에서 지구중심을 원점, 위성은 y축의 R_s에 위치하고 태양지향벡터가 xy평면에 놓이도록 좌표계를 설정하면 적분 영역은 Fig. 3의 유색 영역이 된다. 그리고 n_E, n_s는 각각 지구표면과 위성표면의 법선벡터이다. 그리고 r_E, r_s를 각각 지구표면과 위성표면의 위치벡터라고 할 때, 지구표면으로부터 위성표면으로 향하는 벡터 R_{Es}, 역방향벡터 R_{sE}, 이들의 단위벡터와 식 (2), (3)의 $\cos\Theta_i$들은 다음과 같다.

$$R_{Es} = r_s - r_E \tag{7}$$

$$R_{sE} = -R_{Es} = r_E - r_s \tag{8}$$

$$r_{Es} = R_{Es} / |R_{Es}| \tag{9}$$

$$r_{sE} = R_{sE} / |R_{sE}| \tag{10}$$

$$\cos\theta_1 = v_S \cdot n_E \tag{11}$$

$$\cos\theta_2 = r_{Es} \cdot n_E \tag{12}$$

$$\cos\theta_3 = r_{sE} \cdot n_s \tag{13}$$

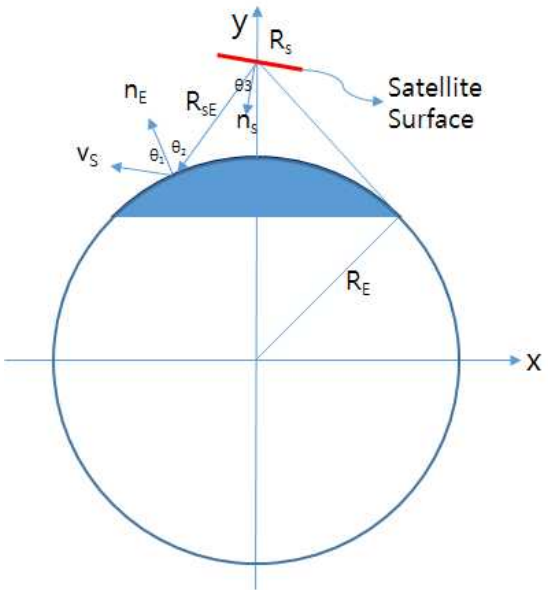

Fig. 3. Coordinate for Calculating Heat Load

여기서 각 벡터들을 좌표축 성분 별로 분해하면 식 (2), (3)의 cosΘi들은 다음과 같다.

$$v_S = (v_{Sx}, v_{Sy}, v_{Sz}) \tag{14}$$

$$n_E = (n_{Ex}, n_{Ey}, n_{Ez}) \tag{15}$$

$$n_s = (n_{sx}, n_{sy}, n_{sz}) \tag{16}$$

$$r_{sE} = (r_{sEx}, r_{sEy}, r_{sEz}) \tag{17}$$

$$\cos\theta_1 = v_{Sx}n_{Ex} + v_{Sy}n_{Ey} + v_{Sz}n_{Ez} \tag{18}$$

$$\cos\theta_3 = r_{sEx}n_{sx} + r_{sEy}n_{sy} + r_{sEz}n_{sz} \tag{19}$$

여기서 태양지향벡터는 xy평면에 위치하므로 z축 성분은 0이다. 식 (2)에 식 (7)-(19)를 대입하여 정리하면 다음 식 (20)-(25)의 6개의 독립적인 성분의 선형합 (26)으로 표현할 수 있다.

$$q_{axx} = \int_A \frac{n_{Ex}r_{sEx}\cos\theta_2}{\pi|R_{Es}|^2}dA_E \tag{20}$$

$$q_{axy} = \int_A \frac{n_{Ex}r_{sEy}\cos\theta_2}{\pi|R_{Es}|^2}dA_E \tag{21}$$

$$q_{axz} = \int_A \frac{n_{Ex}r_{sEz}\cos\theta_2}{\pi|R_{Es}|^2}dA_E \tag{22}$$

$$q_{ayx} = \int_A \frac{n_{Ey}r_{sEx}\cos\theta_2}{\pi|R_{Es}|^2}dA_E \tag{23}$$

$$q_{ayy} = \int_A \frac{n_{Ey}r_{sEy}\cos\theta_2}{\pi|R_{Es}|^2}dA_E \tag{24}$$

$$q_{ayz} = \int_A \frac{n_{Ey}r_{sEz}\cos\theta_2}{\pi|R_{Es}|^2}dA_E \tag{25}$$

$$\begin{aligned} q_a = {} & v_{Sx}n_{sx}q_{axx} + v_{Sx}n_{sy}q_{axy} + v_{Sx}n_{sz}q_{axz} \\ & + v_{Sy}n_{sx}q_{axx} + v_{Sy}n_{sy}q_{axy} + v_{Sy}n_{sz}q_{axz} \end{aligned} \tag{26}$$

위 식들 (20)-(26)의 첫 번째 하첨자는 지구반사열을 의미하는 a이고 두 번째, 세 번째는 각각 태양지향벡터, 지구-위성 간 벡터의 성분을 가리킨다. 마찬가지로 식 (3) 역시 세 독립적인 성분들 (27)-(29)의 선형합 (30)으로 표현할 수 있다.

$$q_{Ex} = \int_A \frac{r_{sEx}\cos\theta_2}{\pi|R_{Es}|^2}dA_E \tag{27}$$

$$q_{Ey} = \int_A \frac{r_{sEy}\cos\theta_2}{\pi|R_{Es}|^2}dA_E \tag{28}$$

$$q_{Ez} = \int_A \frac{r_{sEz}\cos\theta_2}{\pi|R_{Es}|^2}dA_E \tag{29}$$

$$q_E = n_{sx}q_{Ex} + n_{sy}q_{Ey} + n_{sz}q_{Ez} \tag{30}$$

2.3 열하중 성분 별 엄밀 적분

Figure 3에서 구면좌표계와 유사하게 y축과 임의의 벡터의 각도를 Θ, 해당 벡터를 xz평면에 투영 후 x축과 이루는 각도를 ϕ라고 하면 지구-위성 간 벡터와 지구표면 법선벡터는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} R_{Es} = (& -R_E\sin\theta\cos\phi, \\ & R_s - R_E\cos\theta, \\ & -R_E\sin\theta\sin\phi) \end{aligned} \tag{31}$$

$$n_E = (\sin\theta\cos\phi, \cos\theta, \sin\theta\sin\phi) \tag{32}$$

그리고 지구표면 법선벡터와 지구-위성 간 단위벡터의 내적인 cosΘ2는 다음과 같다.

$$\cos\theta_2 = \frac{R_s\cos\theta - R_E}{|R_{Es}|} \tag{33}$$

한편 미소면적 dA_E를 두 적분변수로 나타내면 다음과 같다.

$$dA_E = R_E^2\sin\theta d\theta d\phi \tag{34}$$

식 (31)-(34)를 식 (20)-(25), (27)-(29)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} q_{aij} = {} & \int_0^{2\pi}\int_0^{\theta_e}\frac{R_E^2}{\pi}sin\theta \\ & \frac{n_{Ei}(R_s\cos\theta - R_E)R_{sEj}}{|R_{Es}|^4}d\theta d\phi \\ = {} & \frac{R_E^2}{\pi}\int_0^{\theta_e}f_a(\theta)d\theta\int_0^{2\pi}g_a(\theta)d\phi \end{aligned} \tag{35}$$

$$\begin{aligned} q_{Ei} = {} & \int_0^{2\pi}\int_0^{\theta_e}\frac{R_E^2}{\pi}sin\theta \\ & \frac{(R_s\cos\theta - R_E)R_{sEi}}{|R_{Es}|^4}d\theta d\phi \\ = {} & \frac{R_E^2}{\pi}\int_0^{\theta_e}f_E(\theta)d\theta\int_0^{2\pi}g_E(\theta)d\phi \end{aligned} \tag{36}$$

$$|R_{Es}|^2 = R_s^2 - 2R_sR_E\cos\theta + R_E^2 \tag{37}$$

$$\theta_e = \sin^{-1}\frac{R_E}{R_s} \tag{38}$$

식 (35), (36)의 피적분함수 f_a, f_E의 분자 및 분모를 cosΘ의 다항함수로 간주하고 삼각함수의 공식을 활용하여 분자를 전개하면 최대 4차 다항식이고 이를 조립제법으로 나누면 다음과 같은 두 형식으로 분류할 수 있다.

$$f_1 = \sum_{i=0}^{4} \frac{P_i \cos^i\theta}{|R_{Es}|^4} \tag{39}$$
$$= p_2\cos\theta + p_1\cos\theta + p_0 + \frac{p_{-1}}{|R_{Es}|^2} + \frac{p_{-2}}{|R_{Es}|^4}$$

$$f_2 = \left\{\sum_{i=0}^{3} P_i\cos^i\theta\right\}\frac{\sin\theta}{|R_{Es}|^4} \tag{40}$$
$$= \left\{p_1\cos\theta + p_0 + \frac{p_{-1}}{|R_{Es}|^2} + \frac{p_{-2}}{|R_{Es}|^4}\right\}\sin\theta$$

식 (39)에서 분모에 cosΘ의 일차식 및 그의 제곱이 등장하는데, 이와 관련된 부정적분은 다음과 같다.

$$\int \frac{d\theta}{p+q\sin a\theta} \tag{41}$$
$$= \frac{2}{a\sqrt{p^2-q^2}}\tan^{-1}\left\{\frac{p\tan(a\theta/2)+q}{\sqrt{p^2-q^2}}\right\}$$

$$\int \frac{d\theta}{(p+q\sin a\theta)^2} = \frac{q\cos a\theta}{a(p^2-q^2)(p+q\sin a\theta)} \tag{42}$$
$$+ \frac{p}{p^2-q^2}\int \frac{d\theta}{p+q\sin a\theta}$$

식 (41), (42)은 sin함수에 관한 공식이지만 삼각함수의 공식 및 적분변수를 치환하면 cos함수일 때도 해당 공식을 적용할 수 있다.

$$\cos(a\theta) = \sin(a\theta+\pi/2) \tag{43}$$

$$a\Theta = a\theta + \pi/2,\ d\Theta = d\theta \tag{44}$$

$$\int_{\theta_1}^{\theta_2} f(\cos a\theta)d\theta = \int_{\theta_1}^{\theta_2} f(\sin(a\theta+\pi/2))d\theta \tag{45}$$
$$= \int_{\Theta_1}^{\Theta_2} f(\sin a\Theta)d\Theta$$
$$= \int_{\theta_1+\pi/2a}^{\theta_2+\pi/2a} f(\sin a\theta)d\theta$$

한편 식 (40)에는 sin함수가 있으므로 적분변수 치환을 다음과 같이 수행할 수 있다.

$$T = |R_{Es}|^2 = R_s^2 - 2R_sR_E\cos\theta + R_E^2 \tag{46}$$
$$dT = 2R_sR_E\sin\theta d\theta$$
$$\sin\theta d\theta = \frac{dT}{2R_sR_E}$$

식 (46)을 이용하여 식 (40)을 적분하면 다음과

Table 2. Coefficients P_i of f_a and Integrand g_a of q_{aij}(Equation (35))

Function	P_i of f_a	g_a	f-Type
q_{axx}	$P_3 = -R_ER_s$ $P_2 = R_E^2$ $P_1 = R_ER_s$ $P_0 = -R_E^2$	$\cos^2\phi$	(40)
q_{axy}	$P_4 = -R_ER_s$ $P_3 = R_s^2 + R_E^2$ $P_2 = 0$ $P_1 = -(R_s^2 + R_E^2)$ $P_0 = R_sR_E$	$\cos\phi$	(39)
q_{axz}	$P_3 = -R_ER_s$ $P_2 = R_E^2$ $P_1 = R_ER_s$ $P_0 = -R_E^2$	$\cos\phi\sin\phi$	(40)
q_{ayx}	$P_4 = -R_ER_s$ $P_3 = R_E^2$ $P_2 = R_ER_s$ $P_1 = -R_E^2$ $P_0 = 0$	$\cos\phi$	(39)
q_{ayy}	$P_3 = R_ER_s$ $P_2 = -(R_s^2 + R_E^2)$ $P_1 = R_sR_E$ $P_0 = 0$	1	(40)
q_{ayz}	$P_4 = -R_ER_s$ $P_3 = R_E^2$ $P_2 = R_ER_s$ $P_1 = -R_E^2$ $P_0 = 0$	$\sin\phi$	(39)

Table. 3. Coefficients P_i of f_E and Integrand g_E of q_{Ei}(Equation (36))

Function	P_i of f_E	g_E	f-Type
q_{Ex}	$P_3 = -R_ER_s$ $P_2 = R_E^2$ $P_1 = R_ER_s$ $P_0 = -R_E^2$	$\cos\phi$	(39)
q_{Ey}	$P_2 = R_ER_s$ $P_1 = -(R_s^2 + R_E^2)$ $P_0 = R_sR_E$	1	(40)
q_{Ez}	$P_3 = -R_ER_s$ $P_2 = R_E^2$ $P_1 = R_ER_s$ $P_0 = -R_E^2$	$\sin\phi$	(39)

같다.

$$\int_{\theta_1}^{\theta_2} f_2 d\theta = \int_{\theta_1}^{\theta_2} p_1 \cos\theta \sin\theta d\theta + \frac{1}{2R_sR_E}\int_{T_1}^{T_2}\left\{p_0 + \frac{p_{-1}}{T} + \frac{p_{-2}}{T^2}\right\}dT = \frac{p_1 \sin^2\theta}{2}\Bigg|_{\theta_1}^{\theta_2} + \frac{1}{2R_sR_E}\left\{p_0 T + p_{-1}\ln|T| - \frac{p_{-2}}{T}\right\}\Bigg|_{T_1}^{T_2} \quad (47)$$

식 (39), (40)의 cos다항식의 계수들 P_i와 식 (35), (36)의 g_a, g_E는 각각 Table 2, 3과 같다.

2.4 알고리즘 구현

적분식 (35), (36)은 각 적분변수 Θ, Φ에 대해 전체 영역을 유한개의 구간으로 분할하여 수행한다. 태양열을 받는 지구 표면영역이 Fig. 3에 유색으로 도시된 적분영역을 포함하고, 위성표면을 지나는 평면이 지구면과 닿지 않는 경우 위 식은 정확한 결과를 보증한다. 다만 일반적으로는 이러한 조건을 모두 만족하지 않을 수 있고, 위성 구조물로 인한 열원 차폐를 고려해야 하므로 지구표면을 유한개의 영역으로 이산화하여 각 영역에 대해 적분을 수행 후 이들을 모두 합하게 된다. 그렇기 때문에 이산화된 지구 표면 조각들 각각의 중앙점을 기준으로 태양지향벡터와 위성표면 법선벡터와의 내적이 양수인 경우에 위의 적분을 수행한다.

그리고 위성표면 요소들은 그 법선벡터 및 원점과의 거리를 바탕으로 그들을 통과하는 평면을 정의한 후 이들 성분들이 일정 기준치 이내이면 동일면에 있다고 가정하고 이들을 그룹화하여 한 그룹 당 위의 적분을 1회만 수행하도록 하여 전체적인 계산량을 절감하고자 하였다.

한편 위성 구조물로 인한 외부 열원의 차폐를 탐지하는 알고리즘으로는 참고문헌 [2]에도 적용한 바 있는 KD-Tree Ray Tracing 알고리즘[4-7]을 적용하였다. KD-Tree는 이진 트리(Binary Tree)를 3차원 공간에 적용한 자료구조의 일종으로, 절점(Vertex)을 포함한 삼각형, 구 등의 도형 및 그래픽 객체를 트리 자료구조에 저장하고, 탐색공간 내의 광선 추적 등에 상당히 넓게 적용되는 3차원 공간 탐색 기법 중 하나이다. 본 연구에 적용한 KD-Tree 알고리즘은 참고문헌 [5]의 코드를 이식(Porting)한 것으로, 광선추적 목적으로 SAH(Surface Area Heuristic)라는 개념을 도입하여 공간을 분할한 후 분할된 공간에 걸치는(Intersection) 객체들을 각 공간에 해당하는 하부 트리에 포함시킨다. 최적의 공간 분할을 찾기 위해 SAH 비용함수를 최소화하는 절단면의 축과 좌표값을 계산한다. 탐색 전 트리를 구축 후 탐색 함수에 드는 계산복잡도는 대략 $O(\log N)$으로 생각할 수 있으며, 쓰레드 안전(Thread-Safe)하게 구현되었으므로 추후 병렬계산에도 쉽게 적용할 수 있다.

Table 4. Earth Reflection and Earth Irradiation Thermal Load Results of Various Sun Pointing Vectors and Satellite Surface Normal Vectors

Earth Reflection Thermal Load						
	+X	-X	+Y	-Y	+Z	-Z
+X	2.7701E-02	0.0000E+00	0.0000E+00	2.7937E-02	8.8176E-03	8.8176E-03
-X	0.0000E+00	2.7701E-02	0.0000E+00	2.7937E-02	8.8176E-03	8.8176E-03
+Y	2.3726E-01	2.3726E-01	0.0000E+00	8.1659E-01	2.3726E-01	2.3726E-01
-Y	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
+Z	8.8176E-03	8.8176E-03	0.0000E+00	2.7937E-02	2.7701E-02	0.0000E+00
-Z	8.8176E-03	8.8176E-03	0.0000E+00	2.7937E-02	0.0000E+00	2.7701E-02
Earth Irradiation Thermal Load						
+X	2.4067E-01	2.4067E-01	0.0000E+00	8.2355E-01	2.4067E-01	2.4067E-01
-X	2.4067E-01	2.4067E-01	0.0000E+00	8.2355E-01	2.4067E-01	2.4067E-01
+Y	2.4067E-01	2.4067E-01	0.0000E+00	8.2355E-01	2.4067E-01	2.4067E-01
-Y	2.4067E-01	2.4067E-01	0.0000E+00	8.2355E-01	2.4067E-01	2.4067E-01
+Z	2.4067E-01	2.4067E-01	0.0000E+00	8.2355E-01	2.4067E-01	2.4067E-01
-Z	2.4067E-01	2.4067E-01	0.0000E+00	8.2355E-01	2.4067E-01	2.4067E-01

KD-Tree Ray Tracing을 차폐 알고리즘으로 적용한 지구반사 및 지구복사열의 평균 계산복잡도는 식 (48)과 같다. 위성 표면의 모든 요소들에 대한 단순 탐색의 계산복잡도는 식 (49)로서, 섬세한(Fine Grid) 위성 모델일수록 (48)보다 더욱 많은 계산량이 필요하다는 것을 알 수 있다. 이 식들에서 N_s는 위성 의 요소 개수, N_E는 지구 표면 조각 개수이다.

$$O(N_s N_E \log(N_s)) \tag{48}$$

$$O(N_s^2 N_E) \tag{49}$$

2.5 엄밀적분 및 차폐 검증

본 연구결과로 구현된 알고리즘을 검증하기 위해, 좌표계 및 지구중심은 Fig. 3과 같고 태양지향벡터와 위성표면법선벡터를 다양하게 설정한 지구반사열, 지구복사열의 적분식 (35), (36)의 결과는 표 4와 같다. 위성고도는 7028km, 지구반경은 6378km로 입력했으며 태양지향벡터 및 위성표면법선벡터를 각 좌표축의 양수/음수 방향의 총 6개의 방향으로 설정하여 그 결과를 확인하였다. Table 4의 가로는 위성표면 법선벡터이고 세로는 태양지향벡터이다. 즉 Table 4의 가로 행은 동일한 태양지향벡터를 가지며, 세로 열은 동일한 위성표면 법선벡터이다.

우선 지구반사열을 살펴보기로 한다. 위성 기준에서 지구중심은 -Y방향이므로, 위성표면 법선벡터가 +Y일 때는 그 값은 모두 0이다. 마찬가지로 태양지향벡터가 +Y일 때도 그 값은 모두 0이다. 그리고 태양지향벡터와 법선벡터의 방향이 반대일 경우에도 0이 되며, 두 벡터가 각각 X, Z일 때와 그 반대의 경우는 서로 동일한 값(8.8176E-03)을 가지며, 마찬가지로 두 벡터가 모두 X이거나 Z일때도 양자가 동일한 값(2.7701E-02)임을 확인할 수 있다. 그리고 법선벡터가 -Y일 때, 즉 표면이 지구를 바라보고 있을 때 모든 태양지향벡터의 경우에 대해 최대값을 가짐을 쉽게 확인할 수 있으며, 이 들 중에서도 태양지향벡터가 +Y일 때 최대(8.1659E-01)가 되며, 태양지향벡터가 X, Z일 경우 모두 동일한 값(2.7937E-02)을 가짐을 확인할 수 있다. 마찬가지로 태양지향벡터가 +Y일 때 법선벡터가 X, Z일 경우 모두 동일한 값(2.3726E-01)을 갖는다.

한편 지구복사열은 태양지향벡터와 무관하고 위성표면 법선벡터만 연관이 있음을 확인할 수 있다. 여기서도 법선벡터가 지구를 가리키고 있을 때 최대값(8.2355E-01)을 가짐을 알 수 있으며, 이 값은 이론적 값과 일치한다. 그리고 법선벡터가 X, Z일 때 양자의 결과(2.4067E-01)는 동일하다.

다음으로 지구 표면 이산화에 따른 두 열량의 수렴성을 확인하기 위해, 격자 크기 별로 엄밀적분식을 적용한 경우와 단순 수치적분, Nusselt Analog의 결과를 태양지향벡터와 법선벡터 별로 구분하여 Table 5, 6에 각각 표시하였다. 각 적분

Table 5. Convergence of Earth Reflection Thermal Loads of Analytic and Simple Integration among Various Mesh Size

	S=+Y, N=-Y		S=+X, N=-Y		S=+X, N=+X		S=+Y, N=+X		S=+X, N=+Z	
	Exact	Simple	Exact	Simple	Exact	Simple	Exact	Simple	Exact	Simple
5	8.1659E-01	9.4722E-01	2.7937E-02	2.9498E-02	2.7701E-02	2.7651E-02	2.3726E-01	2.5244E-01	8.8176E-03	8.8128E-03
2	8.1659E-01	8.2768E-01	2.7937E-02	2.7949E-02	2.7701E-02	2.7129E-02	2.3726E-01	2.3732E-01	8.8176E-03	8.8231E-03
1	8.1659E-01	8.1925E-01	2.7937E-02	2.7940E-02	2.7701E-02	2.7055E-02	2.3726E-01	2.3728E-01	8.8176E-03	8.8194E-03
0.5	8.1659E-01	8.1722E-01	2.7937E-02	2.7938E-02	2.7701E-02	2.7702E-02	2.3726E-01	2.3727E-01	8.8176E-03	8.8180E-03
0.1	8.1659E-01	8.1662E-01	2.7937E-02	2.7937E-02	2.7701E-02	2.7701E-02	2.3726E-01	2.3726E-01	8.8176E-03	8.8176E-03

Table 6. Convergence of Earth Irradiation Thermal Loads of Analytic, Simple and Nusselt Analogue Integrations among Various Mesh Size

	N=-Y			N=+X		
	Exact	Simple	Nusselt	Exact	Simple	Nusselt
5.0	0.8235	0.9542	0.8225	0.2407	0.2559	0.2147
2.0	0.8235	0.8346	0.8234	0.2407	0.2407	0.2372
1.0	0.8235	0.8262	0.8235	0.2407	0.2407	0.2398
0.5	0.8235	0.8242	0.8235	0.2407	0.2407	0.2405
0.1	0.8235	0.8236	0.8235	0.2407	0.2407	0.2407

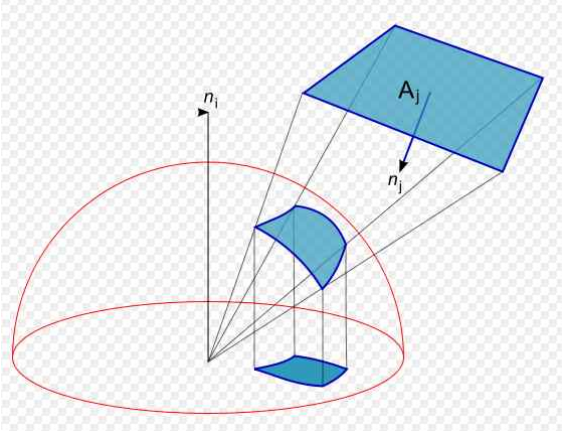

Fig. 4. Nusselt Analog[8]

변수 Θ, ϕ의 영역을 각각 5도, 2도, 1도, 0.5도, 0.1도로 분할하여 지구표면을 이산화할 때 엄밀 적분식과 단순 수치적분의 결과와 비교한 것이 각각 Table 5, 6이다. 두 표의 S는 태양지향벡터를, N은 위성표면 법선벡터를 의미한다.

지구복사열의 경우 단순 수치적분과 함께 Nusselt Analog방식의 계산 결과도 수록하였다. Nusselt Analog방식은 Wihelm Nusselt이 고안한 복사형상계수 계산 방식으로, Fig. 4와 같이 계산하고자 하는 면 A_j의 입체각(Solid Angle)을 A_i의 법선면에 투영 시 생성되는 도형의 면적을 π로 나눈 값이 복사형상계수가 된다.

두 표에서 확인할 수 있듯이 모든 태양지향벡터와 위성표면 법선벡터에 대해, 엄밀 적분식의 경우 분할 크기에 무관하게 일정한 값을 나타내고, 단순 수치적분 및 Nusselt Analog방식의 경우 격자를 세밀화 할수록 엄밀 적분식의 결과로 수렴함을 확인할 수 있다.

Figure 5, 6은 태양지향벡터=+Y, 법선벡터=-Y일 때의 지구반사열의 두 적분 결과값과 오차 비율을, Fig. 7, 8은 법선벡터=-Y일 때의 지구복사

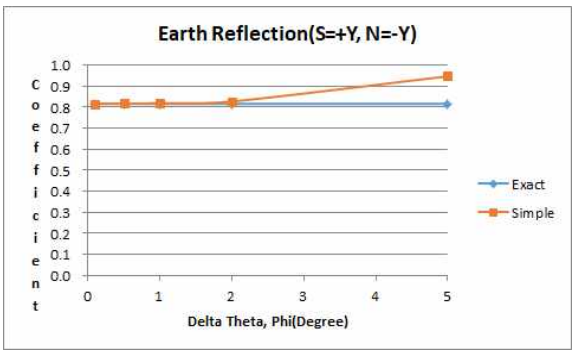

Fig. 5. Coefficient of Earth Reflection of Analytic and Simple Integration

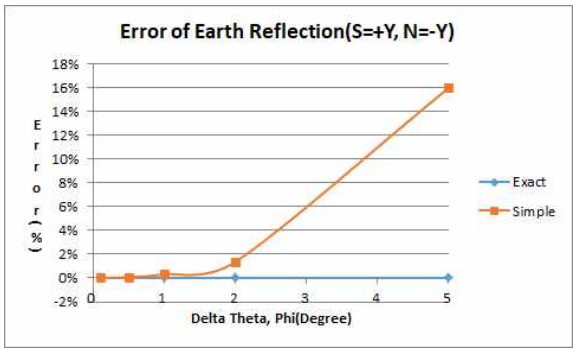

Fig. 6. Error(%) of Earth Reflection of Analytic and Simple Integration

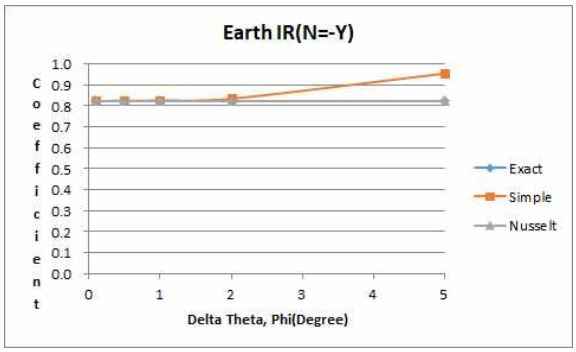

Fig. 7. Coefficient of Earth Irradiation of Analytic, Nusselt Analog and Simple Integration

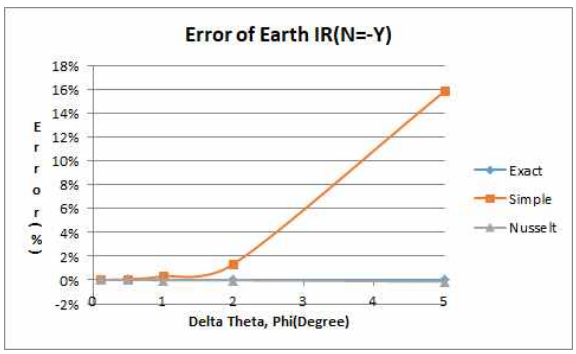

Fig. 8. Error(%) of Earth Irradiation of Analytic, Nusselt Analog and Simple Integration

열의 적분 기법에 따른 결과값과 오차 비율을 각각 그래프로 나타낸 것이다.

차폐의 영향을 확인하기 위해 1x1x1크기의 정육면체 8면이 1의 크기로 배치된 예제 문제를 통해 검증하였다. 해당 예제는 태양지향벡터가 양의 Z방향이고, 지구중심은 음의 Y(-Y)방향이며 본지에는 지면 관계상 태양직사광의 영향만을 수록하였다. Fig. 9에서 보듯이 태양직사광이 양의 Z축을 바라보는 면만이 받음을 알 수 있고, 해당

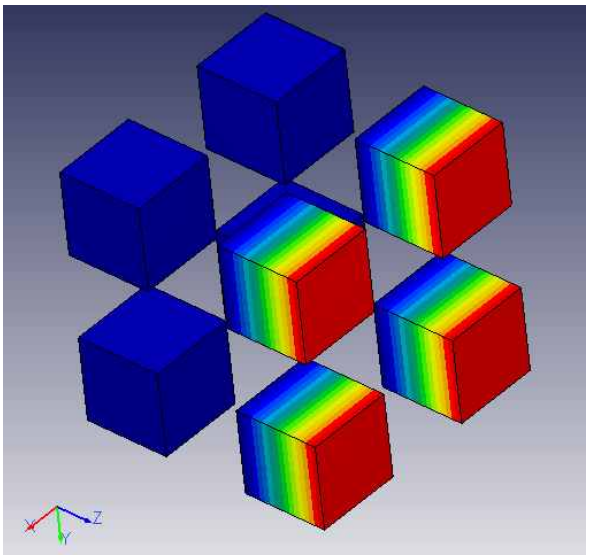

Fig. 9. Thermal Load of Z+ Sun Pointing Vector by Solar Direct Ray

면의 후방에 위치한 면의 경우 비록 그 방향이 동일하더라도 전면의 구조물에 차단되어 열을 받지 않음을 확인할 수 있다. 본지에는 생략했지만 지구반사열 및 지구복사열 또한 비슷한 결과를 보이는 것으로서 본지의 광선 차폐 알고리즘이 적절하게 구현되었음을 확인할 수 있다.

Ⅲ. 결 론

본 논문은 인공위성의 외부 열하중을 계산하기 위해 지구반사열 및 지구복사열을 계산하는 방법론을 제시하였다. 지구반사열 및 지구복사열이 완전확산이라고 할 때 해당 식의 수학적 엄밀적분을 구하여 보다 정확한 결과를 가져올 수 있음을 확인할 수 있으며, 열원 별 출처에 대해 효율적인 KD-Tree 광선 추적법을 도입하여 위성 구조물의 차폐를 포함한 알고리즘으로 확장하였다.

Ⅳ. 추후 계획

본 연구단계에서는 알고리즘 구현 및 수치적 수렴성 확인에 주안점을 두었고 이후에 궤도 열해석 SW[11]와의 열하중 결과를 비교하여 궤도상 열하중 계산 결과를 비교 검증할 예정이다. 이후에 해당 알고리즘은 한국항공우주연구원에서 개발한 위성종합설계 SW[9,10]에 구현될 예정이다.

References

1) Lee, J. J., Hyun, B. S., Choi, J. H., and Kim, T. K., "Introduction and Verification about Solver of View Factor and External Heat Source in KSDS," *Proceeding of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences Spring Conference*, April 2014, pp. 952-955.

2) Kim, M. K., "Studies of Parallelism and Performance Enhancements of Computing View Factor for Satellite Thermal Analysis," *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 43, No. 12, 2015, pp. 1079-1088.

3) Kim, M. K., "Calculating Space Heat Loads for Thermal Analysis of a Satellite," *Proceeding of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences Fall Conference*, November 2016, pp. 1014-1015.

4)http://www.flipcode.org/archives/Raytracing_Topics_Techniques-Part_7_Kd-Trees_and_More_Speed.shtml

5)http://www.flipcode.org/archives/raytracer7.zip

6) Ingo Wald, "Realtime Ray Tracing and Interactive Global Illumination", Ph.D Thesis, Saarland University, 2004.

7) Vlastimil Havran, "Heuristic Ray Shooting Algorithms," Ph.D Thesis, Czech Technical University, 2001.

8) https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/c/c3/Nusselt_analog.svg/629px-Nusselt_analog.svg.png

9) Kim, J. H., Woo, J. M., Cho, J. Y., and Kim, M. K., "Development of a Heat Transfer Analysis Program for Satellite Design," *Proceeding of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences Fall Conference*, November 2013, pp. 741-744.

10) Kim, M. K., Hyun, B. S., Kim, J. H., Woo, J. M., and Cho, J. Y., "Functionalities and Verification of the Satellite Thermal Analysis Solver Based on Finite Element Method," *Proceeding of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences Spring Conference*, April 2014, pp. 948-951.

11) Thermal Desktop, https://www.crtech.com/ products/thermal-desktop