

면적가중 평균법과 그래프 해법에 의한 형태계수의 해석

A solution method of view factor by the area weighted average and graphical methods

유 승 호*, 손 장 열**
S.H. Yoo , J.Y. Sohn

Key words : Radiation(복사), View factor(형태계수), Geometry(기하학), Daylighting(자연채광)

ABSTRACT

To optimize a heating and cooling system, we need an exact solution for radiant heat transfer in any form of room or building. This paper describes the solution method of view factor by the area weighted average and graphical method to calculate the radiant heat exchange or daylighting level in any form of room or building. This study shows that the area weighted average and graphical methods have many points of merits(calculation speed, correctness and calculation capability in an arbitrary form of room shapes etc.) compared with existing methods

기호설명

- $\phi_{dF1,F2}$: F2에 대한 dF1의 형태계수
- $\phi_{F1,F2}$: F2에 대한 F1의 형태계수
- $E(i,u)$: 하부 전체 면적(u)에 대한 상부 미세면 i의 형태계수 (i=1, ... n)
- f_i : 상부 미세면의 면적 (i=1,..., n)
- f : 상부 전 면적

하첨자

- p : 수평
- s : 수직
- o : 상부
- u : 하부
- F : 큰면
- dF : 미세면

1. 서론

건물에서의 열전달 경로의 해석은 크게 복사, 전도, 대류의 문제로 분리해서 해석하게 된다. 본 연구에서는 건물의 동적 에너지해석 및 쾌적한 실내공간을 창조하는데 가장 중요한 요소 중의 하나인 복사 열전달 문제 및 자연채광효과 등을 해석하기 위해 기존에 약식으로 해결해야 했던 특수한 경우에 대한 기초 방정식을 개발하고 이를 실무에서 적용하기 쉽게 도출 과정도 상세하게 기술하였다.

복잡한 건물내에서 지금까지는 이를 간략화하여 직사각형 혹은 이에 준하는 것으로 가정하는 등 임의의 형태간의 복사열전달 및 자연채광 문제를 약식으로 계산할 수 밖에 없었다.

본 연구에서는 단순평균법의 한계^(3, 5)를 보완, 면적가중 평균법에 그래프해법의 원리를 조합한 이론으로, 임의 실내에서 복사열교환 및 자연채광 정도를 정확히 계산하는데 있어, 일반적인 경우는 물론 특수한 경우에도 적용 가능한 형태계수 계산식을 개발하여 온돌난방공간 혹은 태양열

* 정회원, 대불대학교 건설공학부

**정회원, 한양대학교 건축공학부

주택 등의 열 해석시 정확하고 빠르게 계산할 수 있는 방법을 제시하고 몇가지 경우에 대한 형태계수 계산 예를 보이고자한다.

2. 이론해석

2.1 형태계수의 계산

미세한 점과 임의 면간의 형태계수란 산란복사가 일어나는 한 점 dF1으로 부터 한 면F2에 도달한 성분을 말한다. 마찬가지로 면간의 형태계수란 산란복사가 일어나는 한면 F1으로 부터 한면 F2에 도달한 성분을 말한다. 이는 단순히 기하학적 의미만 가지는 값이다.

이 형태계수의 계산법에 대해 많은 연구자들이 의하여 이를 계산하기 위한 방법들이 제시되었으나, 직각 혹은 평행 하면서 직사각형인 면들간의 해에 국한되어 있다. 그래프 해법^(1, 2) 등이 있기는 하나 최종 값을 구하는데 많은 시간과 정확도의 문제가 있다.

2.2 그래프 해법

형태계수의 정의에 따라 미세한 표면 점 dF1으로부터 면 F2로 향하여 반 공간으로 방산된 복사량을 찾아내는 방법이다. Fig.1에 그래프에 의한 해법을 나타내었다.

Fig.1에서와 같이 표면1을 구면 위에 투사시키고 거기서 생긴 1'를 dF의 바닥면에 대해 수직으로 투사시켜 1''를 얻는다. 면 1에 대한 dF의 형태계수는 원의 면적인 $\pi \cdot R^2$ 에 대한 면 1''의 비로 결정된다.

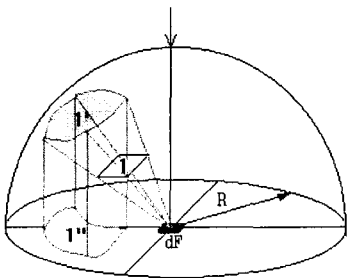


Fig. 1 Graphical method.

2.3 사진촬영법

Fig. 1의 그래프해법을 사진촬영을 통하여 구할 수 있다. 그림 주 dF 대신 점광원을 설치하고 우유빛 유리반구를 이용하여, 그래프를 그리는 대신, 이 점광원을 이용하여 유리반구에 생긴 그림자 1'를 사진을 찍는 방법에 의해 1''를 구하는 것이다. E.Eckert⁽¹⁾에 의하여 제안된 이러한 방법은 이론적으로는 매우 복잡한 물체의 형태계수를 구할 수 있는 장점이었다.

2.4 분석적 해법

2.4.1 기초 방정식

Fig.2, Fig.3, Fig.4, Fig.5는 면F2에 대한 미소면 dF1의 형태계수를 분석적인 방법으로 구하는데 필요한 그림이다. 이들 그림들에 대해 형태계수의 정의에 따라 아래식 (1)과 같은 기초방정식을 도출할 수 있다.

$$\phi_{dF1, F2} = (1/\pi) \cdot \int_{y1}^{y2} \int_{x1}^{x2} \frac{\cos(\beta1) \cdot \cos(\beta2)}{R^2} dx \cdot dy \quad (1)$$

임의 면간의 형태계수는 상기 식 (1)에 대한 일변해를 구하는 것이 된다.

2.4.2 면 F2에 수직인 미소면dF1

아래 Fig. 2에 형태계수의 정의에 입각해 해를 구하기위한 관계도를 이해하기 쉽게 그림으로 나타내었다. 아래 Fig.2와 같은 경우에 대한 해의 전 분석과정이 문헌상에 존재하지 않기 때문에 실제 적용시 이해를 돕기위해 전 유도과정을 기술한다.

Fig. 2에서 상호간의 관계를 파악하면 다음과 같은 관계를 얻을 수 있다.

즉, $S^2 = x^2 + y^2$, $R^2 = S^2 + z^2 = x^2 + y^2 + z^2$, $\cos(\beta1) = x/R$, $\cos(\beta2) = z/R$ 의 관계를 찾을 수 있는데, 이러한 관계를 Fig. 2를 참조하여, 식(1)을 x, y에 대해 이중적분을 하기위해 상기 식들을 대입하면 아래 식(2)와 같이 x, y로 표현된 식을 얻을 수 있다.

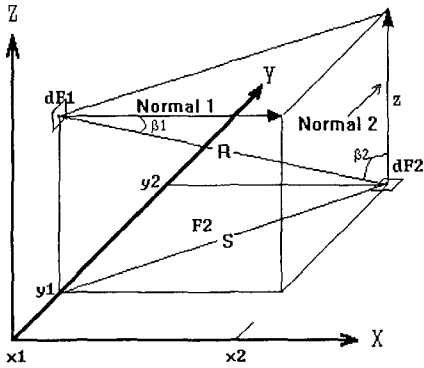


Fig. 2 A small surface dF1 perpendicular to a large surface F2.

$$\varphi_{SdF1,F2} = (1/\pi) \cdot \int_{y1}^{y2} \int_{x1}^{x2} \frac{x \cdot z}{(x^2 + y^2 + z^2)^2} dx \cdot dy \quad (2)$$

식(2)를 x에 대해 풀면 아래와 같이 될 수 있다.

$$\begin{aligned} \varphi_{SdF1,F2} &= (z/\pi) \cdot \int_{y1}^{y2} \int_{x1}^{x2} \frac{x}{(x^2 + y^2 + z^2)^2} dx \cdot dy \\ &= (z/\pi) \cdot \int_{y1}^{y2} IY \cdot dy \end{aligned}$$

단, $IY = \int_{x1}^{x2} \frac{x}{(x^2 + y^2 + z^2)^2} dx$ 이다.

$$a = y^2 + z^2 \quad a + x^2 = p$$

라고 놓고 이를 양변을 미분하면 $2 \cdot x \cdot dx = dp$ 의 관계를 얻고 이를 상기 식에 넣어 정리하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} IY &= \int_{x1}^{x2} \frac{x}{(x^2 + a)^2} dx = \int_{x1}^{x2} \frac{x}{(p)^2} \cdot \frac{dp}{2 \cdot x} \\ &= \frac{1}{2} \cdot \int_{p^2} \frac{1}{p^2} dp = -\frac{1}{2} \left(\frac{1}{x^2 + y^2 + z^2} \right)_{x1}^{x2} \\ &= \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1}{y^2 + z^2 + x_1^2} - \frac{1}{y^2 + z^2 + x_2^2} \right), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \varphi_{SdF1,F2} &= (z/(2 \cdot \pi)) \\ &\cdot \int_{y1}^{y2} \left(\frac{1}{y^2 + z^2 + x_1^2} - \frac{1}{y^2 + z^2 + x_2^2} \right) \cdot dy \end{aligned}$$

$$= (z/(2 \cdot \pi)) \cdot \int_{y1}^{y2} \left(\frac{1}{y^2 + C_1} - \frac{1}{y^2 + C_2} \right) \cdot dy$$

단, 상기 식에서 $C_1 = z^2 + x_1^2, C_2 = z^2 + x_2^2$ 이다.

이를 다시 정리해 최종적으로 아래 식(3)과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \varphi_{SdF1,F2} &= (z/(2 \cdot \pi)) \cdot [(1/\sqrt{x_1^2 + z^2}) \cdot \\ &\{ \tan^{-1}(y_2/\sqrt{x_1^2 + z^2}) - \tan^{-1}(y_1/\sqrt{x_1^2 + z^2}) \} - \\ &(1/\sqrt{x_2^2 + z^2}) \cdot \{ \tan^{-1}(y_2/\sqrt{x_2^2 + z^2}) - \\ &\tan^{-1}(y_1/\sqrt{x_2^2 + z^2}) \}] \end{aligned} \quad (3)$$

2.4.3 면 F2에 수평인 미소면 dF1

아래 Fig. 3 에 형태계수의 정의에 따른 관계도를 식의 유도과정의 이해를 돕기위해 식에 사용한 관계기호를 그대로 표현하여 나타낸다.

식(1)을 평행인 경우에 대한 일반 해를 구하기 위해 Fig. 3 에서 아래와 같은 관계를 찾아낼 수 있다.

$$S^2 = x^2 + y^2, R^2 = S^2 + z^2 = x^2 + y^2 + z^2,$$

$$\cos(\beta 1) = z/R, \cos(\beta 2) = z/R$$

이러한 관계를 식(1)에 대입하면 식(4)를 얻는다.

$$\varphi_{PdF1,F2} = (1/\pi) \cdot$$

$$\int_{y1}^{y2} \int_{x1}^{x2} \frac{z^2}{(x^2 + y^2 + z^2)^2} dx \cdot dy \quad (4)$$

식(4)를 x,y에 대해 풀면 식(5)가 된다.

$$\begin{aligned} \varphi_{PdF1,F2} &= (1/(2 \cdot \pi)) \cdot [(x_2/\sqrt{x_2^2 + z^2}) \\ &\cdot \{ \tan^{-1}(y_2/\sqrt{x_2^2 + z^2}) - \tan^{-1}(y_1/\sqrt{x_2^2 + z^2}) \} + \\ &(y_2/\sqrt{y_2^2 + z^2}) \cdot \tan^{-1}(x_2/\sqrt{y_2^2 + z^2}) - (y_1/\sqrt{y_1^2 + z^2}) \\ &\cdot \tan^{-1}(x_2/\sqrt{y_1^2 + z^2}) - (x_1/\sqrt{x_1^2 + z^2}) \cdot \{ \tan^{-1}(y_2/\sqrt{x_1^2 + z^2}) - \\ &\tan^{-1}(y_1/\sqrt{x_1^2 + z^2}) \} - (y_2/\sqrt{y_2^2 + z^2}) \cdot \\ &\tan^{-1}(x_1/\sqrt{y_2^2 + z^2}) + (y_1/\sqrt{y_1^2 + z^2}) \cdot \tan^{-1}(x_1/\sqrt{y_1^2 + z^2})] \end{aligned} \quad (5)$$

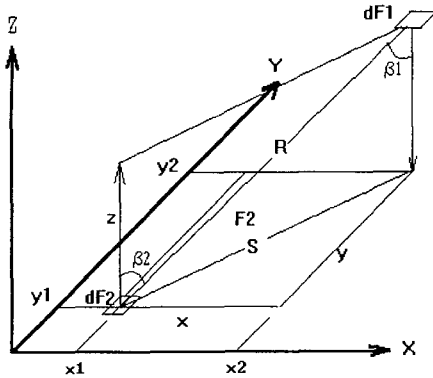


Fig. 3 A small surface dF1 parallel to a large surface F2.

2.4.4 면 F2 에 경사진 미소면 dF1

(1) 90° 보다 작은 경우, $\beta < 90^\circ$

아래 Fig.4는 90° 보다 작은 경우에 대한 관계도를 위의 경우처럼 식의 이해를 돕기위해 나타낸다.

그 유도과정을 상세히 도출해 보면 다음과 같다. Fig.4 를 잘 관찰하면 다음과 같은 관계가 성립함을 알 수 있다.

$$z = zh + 0.5 \cdot dZ \cdot \sin(\beta), \quad S^2 = x^2 + z^2, \quad R^2 = S^2 + y^2 = x^2 + y^2 + z^2, \quad B = z / \cos(\beta), \quad w = x - v,$$

$$u^2 = w^2 + y^2 = (x - v)^2 + y^2 = (x - \sqrt{B^2 - z^2})^2 + y^2,$$

$$\cos(\beta 1) = \frac{R^2 + B^2 - u^2}{2 \cdot R \cdot B},$$

$$u^2 = R^2 + B^2 - 2 \cdot R \cdot B \cdot \cos(\beta 1), \quad \cos(\beta 2) = z / R$$

이와 함께 기본방정식 (1)은 아래와 같이 된다.

$$\varphi_{dF1, F2} = (1/\pi) \cdot \int_{y1}^{y2} \int_{x1}^{x2} \frac{(R^2 + B^2 - u^2) \cdot z}{2 \cdot B \cdot R^2} dx \cdot dy$$

$$= (1/\pi) \cdot \int_{y1}^{y2} \int_{x1}^{x2} \frac{(z^3 + x \cdot z \cdot \sqrt{B^2 - z^2})}{(x^2 + y^2 + z^2)^2 \cdot B} dx \cdot dy$$

이를 한번 더 정리하면 아래식(6)을 얻는다.

$$\varphi_{dF1, F2} = \frac{z}{B} \cdot (1/\pi) \cdot \int_{y1}^{y2} \int_{x1}^{x2} \frac{z^2}{(x^2 + y^2 + z^2)^2} dx \cdot dy + \frac{\sqrt{B^2 - z^2}}{B} \cdot (1/\pi) \cdot \int_{y1}^{y2} \int_{x1}^{x2} \frac{z \cdot x}{(x^2 + y^2 + z^2)^2} dx \cdot dy \quad (6)$$

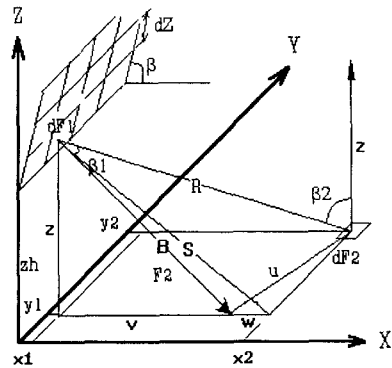


Fig. 4 A case smaller than 90° ($\beta < 90^\circ$).

상기 식(6)의 우변과 좌변은 각각 식(2)와 식(4)의 관계식과 일치함을 알 수 있다. Fig.4를 참조하여 이를 간략히 하면 $\cos(\beta) = \frac{z}{B}$, $\sin(\beta) = \frac{\sqrt{B^2 - z^2}}{B}$ 로 쓸 수 있으므로, 식(2)와 식(4)의 결과를 이용하여 아래 식(7)과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\varphi_{dF1, F2} = \cos(\beta) \cdot \varphi_p_{dF1, F2} + \sin(\beta) \cdot \varphi_s_{dF1, F2} \quad (7)$$

(2) 90° 보다 큰 경우, $\beta > 90^\circ$

90° 보다 큰 경우도 형태계수의 정의에 따라 Fig.5와 같은 관계도를 그릴 수 있다. 해를 구하기 위해 Fig.5를 참조하여 아래와 같은 사항을 얻을 수 있다.

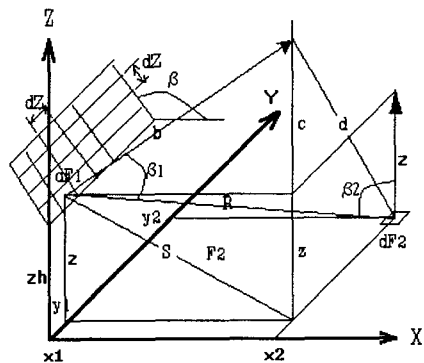


Fig. 5 A case larger than 90° ($\beta > 90^\circ$).

$$b = \sqrt{x^2 + c^2} = x \cdot \sqrt{1 + (\tan(\beta - 90))}^2 = \frac{x}{\cos(\beta - 90)}, d = \sqrt{y^2 + (z + c)^2},$$

$$\cos(\beta_1) = \frac{b^2 + R^2 - d^2}{2 \cdot R \cdot b}, \cos(\beta_2) = \frac{z}{R}$$

이를 식(1)에 대입해 x,y에 대해 정리하면 식(8)을 얻는다.

$$\varphi_{dF1,F2} = (1/\pi) \cdot \int_{y_1}^{y_2} \int_{x_1}^{x_2} \frac{(R^2 + B^2 - d^2) \cdot z}{2 \cdot B \cdot R^4} dx \cdot dy$$

$$= \cos(\beta - 90) \cdot (1/\pi) \cdot \int_{y_1}^{y_2} \int_{x_1}^{x_2} \frac{z \cdot x}{(x^2 + y^2 + z^2)^2} dx \cdot dy -$$

$$\sin(\beta - 90) \cdot (1/\pi) \cdot \int_{y_1}^{y_2} \int_{x_1}^{x_2} \frac{z^2}{(x^2 + y^2 + z^2)^2} dx \cdot dy \quad (8)$$

이를 앞에 유도한 방법과 같이 Fig.5를 참조하여 정리하면 아래식 (9)와 같이 간단히 쓸 수 있다.

$$\varphi_{dF1,F2} = -\sin(\beta - 90) \cdot \varphi_{p,dF1,F2} + \cos(\beta - 90) \cdot \varphi_{S,dF1,F2} \quad (9)$$

식 (7)과 (9)를 잘 비교하여 보면 그 형태가 같고, 이는 결국 수평, 수직, 경사진 면들에 대한 일반 해가 된다. 이는 간단히 하나의 식으로 아래식 (10)과 같이 기술 할 수 있다.

$$\varphi_{dF1,F2} = k_p \cdot \left\{ \frac{1}{(2 \cdot \pi)} \cdot \left\{ (x_2/\sqrt{x_2^2 + z^2}) \cdot \left(\tan^{-1}(y_2/\sqrt{y_2^2 + z^2}) - \tan^{-1}(y_1/\sqrt{y_2^2 + z^2}) \right) + (y_2/\sqrt{y_2^2 + z^2}) \tan^{-1}(x_2/\sqrt{y_2^2 + z^2}) - (y_1/\sqrt{y_1^2 + z^2}) \cdot \tan^{-1}(x_2/\sqrt{y_1^2 + z^2}) - (x_1/\sqrt{x_1^2 + z^2}) \cdot \left(\tan^{-1}(y_2/\sqrt{x_1^2 + z^2}) - \tan^{-1}(y_1/\sqrt{x_1^2 + z^2}) \right) - (y_2/\sqrt{y_2^2 + z^2}) \cdot \tan^{-1}(x_1/\sqrt{y_2^2 + z^2}) + (y_1/\sqrt{y_1^2 + z^2}) \tan^{-1}(x_1/\sqrt{y_1^2 + z^2}) \right\} \right\} +$$

$$k_s \cdot \left\{ \frac{z}{(2 \cdot \pi)} \cdot \left\{ \frac{1}{\sqrt{x_1^2 + z^2}} \cdot \left(\tan^{-1}(y_2/\sqrt{x_1^2 + z^2}) - \tan^{-1}(y_1/\sqrt{x_1^2 + z^2}) \right) - \frac{1}{\sqrt{x_2^2 + z^2}} \cdot \left(\tan^{-1}(y_2/\sqrt{x_2^2 + z^2}) - \tan^{-1}(y_1/\sqrt{x_2^2 + z^2}) \right) \right\} \right\} \quad (10)$$

단, 상기 식 (10) 에서 $\beta < 90^\circ$ 이고 $\beta > 0^\circ$ 일 때 Fig.4 를 참조하여 $k_p = \cos(\beta) = \frac{z}{B}$, $k_s = \sin(\beta) = \frac{\sqrt{B^2 - z^2}}{B}$ 이고, $\beta > 90^\circ$ 이고 $\beta < 180^\circ$ 일 때는 Fig.5 를 참조하여 $k_p = -\sin(\beta - 90)$ 이고 $k_s = \cos(\beta - 90)$ 이다.

2.5 수치 해석법

앞에 도출한 최종 일반식(10)은 미소한 면dF1에 대해 임의의 위치에 직각으로 위치한 면F2, 수평으로 위치한 면F2, 경사지게 위치한 면F2에 대한 형태계수의 해에 해당한다. 면F2에 대한 적분은 상기 그림들로부터 볼 수 있는 바와 같이 직사각형인 형태들에 한해 풀 수 있도록 되어 있다.

실제공간에서는 각 면들이 임의의 위치에 있을 뿐 만 아니라 임의의 형태를 갖고 있다. 그래서 마지막 2중 적분을 수학적으로 정확한 일반해를 구하는 대신 수치해석이 필수적이다. 이를 위해 앞에 유도한 미소한 면과 직사각형 면사이의 관계식(6),(7),(10)을 전 면에 대하여 점진적으로 적용, 전체 해에 도달해 가는 것이다. 최종적으로 면적가중평균법을 적용하여 시간과 정확도를 높힐 수 있다. 면적가중평균법⁽⁶⁾의 계산원리는 식 (11)과 같다.

$$\varphi_{O,u} = \frac{E(1,u) \cdot f_1 + E(2,u) \cdot f_2 + \dots + E(n,u) \cdot f_n}{f} \quad (11)$$

본 연구에서 이용한 그래프해법을 응용한 면적가중평균법⁽⁶⁾은 직각인 면들 뿐만 아니라 임의의 형태간의 해를 구하는데 적합하며, 정확도 및 계산속도 등의 문제에서도 큰 장점을 갖고 있다.

임의의 면을 해석할 때 면의 내부는 직각형으로 크게 나눌 수 있고 그 가장자리는 임의의 작은 크기로 분할하여 가중치를 줄음으로서 전분할면을 크게 줄일 수 있다. 또한 Fig.5 에서 볼 수 있는 바와 같이 하부 U 면의 경우는 실제 X-Y 축에 나란히 놓여 있어야 하는 상기 도출한 식들의 전제조건 때문에 U면을 $u_1, u_2, u_3, \dots, u_{n-1}, u_n$ 의 n 개의 X-Y 축에 나란한 작은 직사각형으로 분할 해야 한다. 그럴 경우 가장자리 부분에서

서 오차가 나게 되는데 이 오차는 앞에서 설명한 그래프 해법의 원리를 이용하여 작도한 Fig.6의 경우처럼 함으로써, 그 오차를 최대한도로 줄일 수 있다. 수치해석법에서는 임의의 면 가장자리에 대해 수학적으로 일정한 좌표하에 경계를 명시해 주어야 한다. 본 연구에서는 극좌표를 이용하여 경계를 명시한 후 최종해를 구하는 방법⁽⁶⁾을 이용하였는데, Fig.6에 그래프해법을 응용한 면적가중평균법을 그림으로 나타 내었다. 본 논문에서 사용한 방법과 기존의 단순 평균법에 의한 형태계수의 계산속도는 Samsung 노트북 컴퓨터 5850NT를 이용 하였을때, 같은 정확도의 전제하에, 본 논문에서 제시한 방법이 12초 기존의 방법이 25초로 본 논문에서 제시한 그래프해법을 응용한 면적가중평균법이 2배 이상 빠른 결과를 보인다.

단, 방의 크기는 6m x 3.5m x 2.6m (가로x세로x높이)로 가정하여 계산하였다.

3. 계산 예

3.1 부정형 공간내에서의 형태계수 계산

본 계산법의 정확도에 대해서는 프로그램 AUSYOO^(4, 6)에서 이미 검증한바 있는데, Fig.7과 같은 모델실에 대한 형태계수 매트릭스를 Table 1에 보인다. Table 1에서 보는 바와 같이 각 항의 합이 정확히 1.0000을 나타내고있어, 본 방법에 의한 계산결과는 아주 정확함을 보여 주고 있다.

3.2 임의의 형태간의 형태계수계산

본 연구에서는 하부면(U)의 좌표 a1,a2,a3,a4에 대한 상부면(O)의 좌표 b1,b2,b3,b4 간의 형태계수 계산 결과를 임의의 두 면간의 형태계수를 계산하기 위해, 본 그래프 해법을 응용한 면적가중평균법을 이용하여 개발한 프로그램 VIEW를 이용하여 몇 가지 경우에 대한 예를 보이고 그 가능성을 검증 하고자한다. 단, 좌표는 Fig.6을 참조하여 하부의 4점 a1(x1,y1,z1), a2(x2,y2,z2), a3(x3,y3,z3), a4(x4,y4,z4)와 상부의 4점 b1(x5,y5,z5), b2(x6,y6,z6), b3(x7,y7,z7), b4(x8,y8,z8)의 극좌표 형태로 나타내었다.

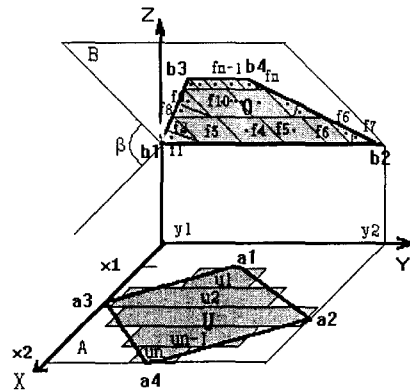


Fig. 6 Area weighted average method.

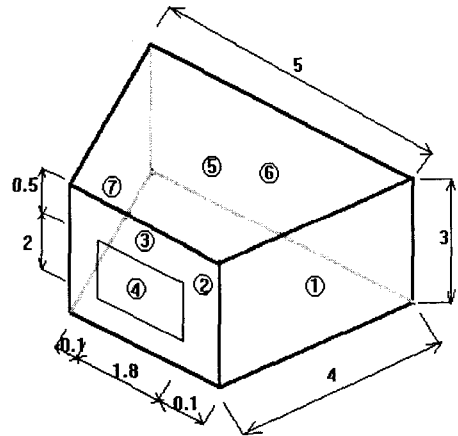


Fig. 7 Model room for view factor calculation.

Table 1 View factor matrix.

$\begin{matrix} j \\ i \end{matrix}$	1	2	3	4	5	6	7
1	0	0.2266	0.049	0.085	0.2266	0.1902	0.221
2	0.1942	0	0.0424	0.054	0.2544	0.2247	0.229
3	0.2451	0.2474	0	0	0.2474	0.1711	0.089
4	0.2857	0.2134	0	0	0.2134	0.1875	0.100
5	0.1942	0.2544	0.0424	0.054	0	0.2247	0.229
6	0.1522	0.2097	0.0274	0.045	0.2097	0	0.356
7	0.1775	0.2141	0.0142	0.024	0.2141	0.356	0

- 2면간에 경사지면서서 2면 모두 직각사각형인 경우:

a1(0,0,0), a2(0,10,0), a3(10,0,0), a4(10,10,0)
 b1(0,0,1), b2(0,10,1), b3(1,0,2), b4(1,10,2)

계산 값 : $\varphi_{u..o} = 0.0874, \varphi_{o..u} = 0.6180$

- 2면간에 경사지면서서 하부면은 마름모꼴, 상부면은 사다리꼴인 경우:

a1(0,5,0), a2(3,8,0), a3(5,2,0), a4(7,7,0)
 b1(0,2,1), b2(0,8,1), b3(1,5,2), b4(1,6,2)

계산 값 : $\varphi_{u..o} = 0.00600, \varphi_{o..u} = 0.2786$

- 2면간에 경사지면서서 하부면은 삼각형, 상부면은 사다리꼴인 경우:

a1(0,5,0), a2(0,5,0), a3(5,2,0), a4(7,7,0)
 b1(0,2,1), b2(0,8,1), b3(1,5,2), b4(1,6,2)

계산 값 : $\varphi_{u..o} = 0.0535, \varphi_{o..u} = 0.1676$

- 2면간에 수평이면서 하부면은 삼각형, 상부면은 사다리꼴인 경우:

a1(0,5,0), a2(0,5,0), a3(5,2,0), a4(7,7,0)
 b1(0,2,2), b2(0,8,2), b3(1,5,2), b4(1,6,2)

계산 값 : $\varphi_{u..o} = 0.0279, \varphi_{o..u} = 0.1237$

- 2면간에 수직이면서 하부면은 삼각형, 상부면은 사다리꼴인 경우:

a1(0,5,0), a2(0,5,0), a3(5,2,0), a4(7,7,0)
 b1(0,2,1), b2(0,8,1), b3(0,5,3), b4(0,6,3)

계산 값 : $\varphi_{u..o} = 0.0446, \varphi_{o..u} = 0.0987$

4. 맺음말

형태계수의 해법은 열전달 관련 문헌상에도 제시 되어 있으나 직각형의 형태들 사이의 계산 등 일부에 국한되어있고 적용 하는데 있어서도 많은 문제점과 한계가 있다.

본 연구에서는 계산 예에 보인 바와 같이 직사각형에 국한시키지 않고 모든 경우에 적용할 수 있는 해법을, 그 계산식은 물론 전 유도 과정을 포함해, 개발한 계산식의 적용방법 등을 연구자들이 실무에 적용시 이용하기 쉽게 하였다.

이를 기초로 건물의 에너지 소모량 시뮬레이션 및 실내 열환경을 평가하기 위해 계속 개발 발전시켜가고 있는 시뮬레이션 프로그램에 복사 냉난방 시스템의 열전달 특성 및 자연채광 평가를 위한 모델링 과정을 계속 발표할 예정이다.

참고 문헌

1. Eckert, E., 1937, Technische Strahlungsaus-tausch Rechnungen, VDI Verlag.
2. Glueck, B., 1982, Strahlungsheizung-Theorie und Praxis, Verlag C.F.Mueler Karlsruhe.
3. Raber and Hutchinson, 1947, Panel heating and cooling analysis, John Willey Sons, New-York.
4. 유 승호, 손 장열, 1994, 부정형 공간내에서의 복사열 교환량 수치해석, 공기조화냉동공학회 춘계학술발표 논문집, pp. 335-340.
5. Kollmar, A. and Liese, W., 1957, Die Strahlung sheizung, Muenchen.
6. Yoo, S.H., 1994, Raumklimatische und ener-getische Beuerteilung baukonstruktiver Massnahmen im Hinblick auf klimagerechtesbauen mit Solarenergie-nutzung, Ph.D. thesis, TU Berlin, Germany.