

불규칙한 3차원 형상에 응용된 구분종좌표보간법

차 호 진* · 송 태 호**
(1999년 8월 23일 접수)

Discrete Ordinates Interpolation Method Applied to Irregular Three-Dimensional Geometries

Hojin Cha and Tae-Ho Song

Key Words : Radiative Heat Transfer(복사 열전달), DOIM(구분종좌표보간법), Unstructured Grid System(비구조화 격자계)

Abstract

The Discrete Ordinates Interpolation Method (DOIM) is tested in three-dimensional enclosures. The radiative transfer equation (RTE) is solved for a linear source term and the DOIM is formulated for a gray medium. Several interpolation methods can be applied to the DOIM scheme. Among them, the interpolation method applicable to an unstructured grid system is discussed. In a regular hexahedron enclosure, radiative wall heat fluxes are calculated and compared with exact solutions. The enclosure has an absorbing, emitting and nonscattering medium and a constant temperature distribution. These results are obtained with varying optical depths ($\kappa D = 0.1, 1.0, 10.0$). Also, the same calculations are performed in an irregular hexahedron enclosure. The DOIM is applied to an unstructured grid system as well as a structured grid system for the same regular hexahedron enclosure. They are compared with the exact solutions and the computational efficiencies are discussed. When compared with the analytic solutions, results of the DOIM are in good agreement for three-dimensional enclosures. Furthermore, the DOIM can be easily applied to the unstructured grid system, which proves the reliability and versatility of the DOIM.

기호설명

I : 복사강도, [W/m^2sr]
 I_b : 흑체 복사 강도, [W/m^2sr]
 I_{bw} : 벽면에서의 흑체 복사 강도, [W/m^2sr]
 n : 총 종좌표의 수
 \hat{n} : 용기에서 안쪽으로 수직인 벡터
 q_w'' : 벽면 열유속, [W/m^2]
 r : 위치 벡터, [m]
 s : 위치 변수, [m]

W_i : 각 가중치 ($i=1, \dots, n$)
 l_i : 보간점과 격자점 사이의 거리, [m]

그리스문자

β : 소멸 계수 ($= \kappa + \sigma_s$), [m^{-1}]
 ϵ : 벽면의 방사율
 κ : 흡수 계수, [m^{-1}]
 Φ : 산란 위상 함수
 σ : 스테판-볼츠만 상수, [W/m^2K^4]
 σ_s : 산란 계수, [m^{-1}]
 τ : 광학 길이 ($= \beta s$)
 ω : 산란 알베도 ($= \sigma_s / \beta$)

* 한국과학기술원 기계공학과

** 회원, 한국과학기술원 기계공학과

E-mail : thsong@sorak.kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3072 FAX : (042)869-3095

1. 서론

흡수, 방사, 산란을 하는 매질에서 복사전달방정식(radiative transfer equation : RTE)에 관한 해는 산업용으로, 보일러와 같은 여러 가지 고열 시스템의 해석에 매우 중요한 문제가 되었다. 복잡한 기하학적 형상을 갖는 실제 시스템의 열 해석을 위해서는 복잡한 형상에 잘 대응하는 비구조화 격자계를 요구하고 있다. 최근에 유한차분법(Finite Difference Method : FDM), 유한요소법(Finite Element Method : FEM), 유한체적법(Finite Volume Method : FVM) 등에 의한 다차원의 복잡한 형상에서 유동해석이나 열전달 해석에 대한 많은 연구가 이루어져 왔다. 그래서, 이런 해법과 더불어 복사전달방정식의 해도 다차원의 복잡한 형상에서도 적용되는 해법이 요구되고 있다.

지금까지 복사전달방정식을 해석하기 위한 많은 해석 방법들이 제시되었다. 예를 들어 존 방법(Zone method), 몬테 카를로 방법(Monte Carlo method), 구면조화함수법(Spherical harmonics method : PN method), 구분종좌표법(Discrete Ordinates Method : DOM) 등이 있다. 이들 중 비교적 모델 방정식을 쉽게 유도할 수 있고, 복잡한 기하학적 형상에 쉽게 적용될 수 있는 구분종좌표법이 최근 각광을 받고 있다.

Chui와 Raithby⁽¹⁾는 일반적인 DOM을 비직교 격자계에서도 적용할 수 있는 새로운 유한체적법을 소개하였다. 또한, Chai, Lee와 Patankar⁽²⁾은 Chui가 소개한 유한체적법과 약간 다른 형태의 유한체적법을 2차원의 불규칙한 형상의 문제에 성공적으로 적용하였다. Maruyama⁽³⁾는 복잡한 기하학적 형상에서 유한요소법의 이론에 기초한 복사전달방정식의 수치해를 유도하였고, Charette⁽⁴⁾ 등은 삼각요소 또는 사면체 요소들에 적용되는 새로운 DOM의 수치해법을 발전시켰다. Cheong과 Song⁽⁵⁾은 DOM에 의한 구분종좌표보간법(Discrete Ordinates Interpolation Method : DOIM)을 고안해 냈고, 착오산란(false scattering)이나 광선효과(ray effect) 등을 고려한 DOIM의 해석방법의 특성에 대해 자세히 설명하였다. 또, Koo와 Song⁽⁶⁾은 2차원 형상의 문제에 DOIM을 성공적으로 잘 적용하였고, 그에 대한

상세한 토의가 이루어 졌다. Cha와 Song⁽⁷⁾은 매우 불규칙한 형상에서의 적절한 격자계인 비구조화 격자계에서도 DOIM을 잘 적용하였다.

3차원 기하학적 형상의 문제에도 많은 시도가 이루어져 왔다. Chai와 Moder⁽⁸⁾ 등이 원기둥, 삼각기둥, 보일러 등의 3차원 형상에서 유한체적법을 적용하였다. Maruyama⁽⁹⁾ 등은 임의의 3차원 형상에서 복사요소방법(Radiation Element Method)을 적용하였고, Sakami, Charette⁽¹⁰⁾ 등도 DOM에 의한 사각요소를 이용해서 3차원 용기 내에서의 복사열전달을 계산하였다. Kim과 Seo⁽¹¹⁾ 등은 DOIM을 이용해서 3차원 용기의 문제를 다루었다. 여기서 쓰인 보간 방법은 삼각요소에서의 선형 보간법을 다루었고, 구조화 격자계의 여러 가지 형상에 대해 매우 합리적인 결과를 나타내고 있다.

본 연구에서는 DOIM이 임의의 격자계를 지닌 3차원 형상에서도 잘 적용되는가를 살펴보았다. 일반적인 산업 기기들은 매우 복잡한 형상을 가지고 있으므로 격자계가 비구조화 격자계를 요구한다. 따라서, 본 연구는 구조화 격자계뿐만 아니라 비구조화 격자계에서도 DOIM이 얼마나 잘 적용되는지를 살펴보았다.

2. 수치해법의 이론적 배경

2.1 구분종좌표법

흡수, 방사, 산란하는 매질에서의 복사전달방정식은 다음과 같다.

$$\frac{dI(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{s}})}{ds} = -\beta(\mathbf{r})I(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{s}}) + x(\mathbf{r})I_b(\mathbf{r}) + \frac{\sigma_s(\mathbf{r})}{4\pi} \int_{4\pi} I(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{s}}') \Phi(\hat{\mathbf{s}}', \hat{\mathbf{s}}) d\Omega' \quad (1)$$

식 (1)의 확산벽면에서의 벽면 조건식은 다음과 같다.

$$I(\mathbf{r}_w, \hat{\mathbf{s}}) = \epsilon(\mathbf{r}_w)I_{bw}(\mathbf{r}_w) + \frac{1-\epsilon(\mathbf{r}_w)}{\pi} \int_{\hat{\mathbf{n}} \cdot \hat{\mathbf{s}}' < 0} I(\mathbf{r}_w, \hat{\mathbf{s}}') |\hat{\mathbf{n}} \cdot \hat{\mathbf{s}}| d\Omega' \quad (2)$$

구분종좌표법에서는 식 (1)은 n 개의 서로 다른 종좌표에 대해서 해를 갖는다. 식 (1)에서의 적분은 다음과 같은 수치적분으로 대신할 수 있다.

$$\int_{4\pi} I(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{s}}') \Phi(\hat{\mathbf{s}}', \hat{\mathbf{s}}) d\Omega' \quad (3)$$

$$\simeq \sum_{j=1}^n I_j \Phi(\hat{\mathbf{s}}_j, \hat{\mathbf{s}}) W_j$$

여기서, W_j 은 $\hat{\mathbf{s}}_j$ 의 방향에 따른 구적법의 가중치를 의미한다. 이런 방법으로 식 (1)을 다음과 같은 n 개의 식으로 근사할 수 있다.

$$\frac{dI_i}{ds} = -\beta I_i + \beta \dot{S}_i \quad (4)$$

여기서, 생성항 \dot{S} 은

$$\dot{S}_i = (1-\omega)I_i \quad (5)$$

$$+ \frac{\omega}{4\pi} \sum_{j=1}^n I_j \Phi(\hat{\mathbf{s}}_j, \hat{\mathbf{s}}_i) W_j$$

복사강도 I_i 은 $\hat{\mathbf{s}}_i$ 방향으로의 \mathbf{r} 위치에서의 복사 강도를 말한다. 확산 벽면에서의 벽면의 조건은 식 (2)에서 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$I_i = \epsilon I_{bw} + \frac{1-\epsilon}{\pi} \sum_{\mathbf{n} \cdot \hat{\mathbf{s}}_j < 0} |\mathbf{n} \cdot \hat{\mathbf{s}}_j| I_j W_j, \quad (6)$$

$$\mathbf{n} \cdot \hat{\mathbf{s}}_i > 0$$

식 (4)의 지배방정식을 보면 일차상미분방정식이므로 $\mathbf{n} \cdot \hat{\mathbf{s}}_i > 0$ 조건 아래 하나의 벽면조건을 요구한다. 따라서 식 (4)는 식 (6)과 같은 벽면 조건을 가진 n 개의 연립방정식을 나타낸다.

여기서 나오는 종좌표 $\hat{\mathbf{s}}_i$ 와 각 가중치 W_j 은 Lathrop과 Brinkley⁽¹²⁾의 구적법 또는 Raithby와 Chui⁽¹³⁾의 구적법에 의해 구해지는데, 이번 연구에서는 이중 전자를 이용하였다.

위 식들에 의해 복사강도가 구해졌다면, 벽면에서의 열유속을 구할 수 있는데, 그 식은 다음과 같다.

$$q_w'' q_w'' = \sum_{j=1}^n \mathbf{n} \cdot \hat{\mathbf{s}}_j I_j W_j \quad (7)$$

2.2 구분종좌표보간법(DOIM)

3차원 비구조화 격자계의 임의의 격자점 P 에서 $\hat{\mathbf{s}}$ 의 방향의 복사강도를 고려해 보자. 이때 이 복사 강도에 대한 지배방정식은 식 (4)에 의해 다음과 같이 된다.

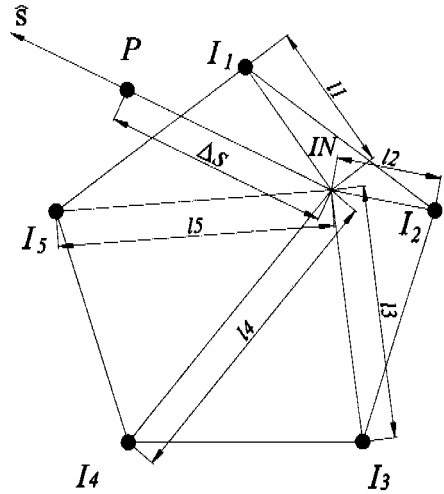


Fig. 1 Notation of grids around a point IN in an arbitrary pentagon grid surface of unstructured 3D grid system

$$\frac{dI}{ds} + \beta I = \beta \dot{S} \quad (8)$$

(여기서부터는 하첨자 i 는 생략하기로 한다.)

Raithby와 Chui⁽¹³⁾은 격자점 P 점에서 생성항 \dot{S} 은 Taylor 급수전개에 의해 다음과 같이 근사시켰다.

$$\dot{S} = \dot{S}_P + \left(\frac{d\dot{S}}{ds} \right)_P (s - \Delta s) \quad (9)$$

Fig. 1에서 $\hat{\mathbf{s}}$ 방향의 광선과 임의의 격자면과 교차했을 때 그 교차점을 IN 이라고 한다. IN 에서의 복사강도를 I_{IN} 라고 하자. I_{IN} 값을 알고,

β 값을 알고 있는 상수라고 가정하면, 1차 상미분방정식인 식 (8)은 엄밀한 해석해를 구할 수 있고, 그 식은 다음과 같다.

$$I_P = I_{IN} e^{-\beta \Delta s} + \int_0^{\Delta s} e^{-\beta(\Delta s-s)} \left[\dot{S}_P + \left(\frac{d\dot{S}}{ds} \right)_P (s - \Delta s) \right] \beta ds \quad (10)$$

식 (10)의 적분을 수행해서 완전하게 하면 다음과 같다.

$$I_P = I_{IN} e^{-\beta \Delta s} + \hat{S}_P (1 - e^{-\beta \Delta s}) - \frac{1}{\beta} \left. \frac{d\hat{S}}{ds} \right)_P [1 - e^{-\beta \Delta s} (1 + \beta \Delta s)] \quad (11)$$

그런데, 여기서 I_{IN} 값은 Fig. 1에서 보듯이 격자점에서의 값이 아니다. 식 (11)을 계산하기 위해서는 반드시 I_{IN} 값을 알아야 한다. 따라서 격자면에 있는 격자점에서의 복사강도를 통해 I_{IN} 값을 근사 시킨다. 이를 수행하기 위해 1차 보간법을 적용했는데, IN 점과 격자점 사이의 거리를 알 때 Fig. 1에서의 오각형 격자면 내의 I_{IN} 값은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{IN} = \frac{\frac{I_1}{l_1} + \frac{I_2}{l_2} + \frac{I_3}{l_3} + \frac{I_4}{l_4} + \frac{I_5}{l_5}}{\frac{1}{l_1} + \frac{1}{l_2} + \frac{1}{l_3} + \frac{1}{l_4} + \frac{1}{l_5}} \quad (12)$$

식 (12)에 나온 것처럼 1차 보간을 선택한 이유는 수치해법이 비구조화 격자계에서도 적용할 수 있도록 하기 위해서는 가장 간단한 보간법이 필요하기 때문이다. 즉, 비구조화 격자계에서는 삼각격자면, 사각격자면, 오각격자면, 육각격자면 등이 있을 수 있는데, 이런 모든 격자면에서 모두 적용하기 위해서는 보다 간단한 보간법을 선택해야 했다. 식 (12)은 Fig. 1과 같이 임의의 오각 격자면에서의 1차 보간에 의한 값을 나타낸 것이므로, 임의의 n 각 격자면에서의 보간값은 다음과 같다.

$$I_{IN} = \frac{\sum_i \frac{I_i}{l_i}}{\sum_i \frac{1}{l_i}} \quad (13)$$

식 (10)에 있는 생성항 \hat{S} 의 미분값도 차분화하면 다음과 같다.

$$\left. \frac{d\hat{S}}{ds} \right)_P = \frac{\hat{S}_P - \hat{S}_{IN}}{\Delta s} \quad (14)$$

여기서 \hat{S}_{IN} 값은 I_{IN} 값을 구하는 방법처럼 보간법을 통해서 구한다.

이런 보간 방법을 통한 P 점에서의 복사강도를 구하는 방법은 Cheong과 Song⁽⁵⁾이 처음 제안하였고, 그 명칭을 구분종좌표보간법(DOIM)이라고 이르지었다.

3. 수치해석의 결과

구분종좌표보간법을 이용해서 크게 3가지 문제를 다루었다. 다루는 문제에서 용기내의 매질은 흡수, 방사를 하나 산란을 하지 않는다. 그리고, 매질의 온도장은 일정하다고 가정한다. 이렇게 가정하는 것은 매질의 온도장이 일정할 경우 벽면 열유속의 해석해를 쉽게 구할 수 있어서, 수치해석 결과가 얼마나 정확하게 잘 맞고 있는지를 잘 조사할 수 있기 때문이다. 흑체 벽면이며 매질의 온도장이 일정하고 물성치가 균일할 때 엄밀한 복사강도의 해는 다음과 같다.

$$I(s) = I_{bw} e^{-xs} + I_b (1 - e^{-xs}) \quad (15)$$

식 (15)을 식 (7)에 대입하면 엄밀한 벽면 복사 열유속을 계산할 수 있다. 이 벽면 열유속을 통해 DOIM의 정확성에 대해 토의할 것이다. 이것을 위해서 오차를 정의할 필요가 있는데, 벽면 열유속의 평균 상대오차는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\text{Error} = \sum_{\text{node}} \frac{|q''_w - q''_{\text{exact}}| / q''_{\text{exact}}}{\text{Number of nodes}} \quad (16)$$

벽면 열유속 q''_w 는 DOIM에 대한 결과이고, q''_{exact} 은 식 (15)에서 얻어진 결과이다.

다음에 주어질 해석 결과들은 여러 가지 광학 두께 ($\tau = xD$)와 S_4 방법(종좌표의 수가 24개)으로 얻어진 결과들이다.

3.1 정육면체 용기

Fig. 2는 정육면체의 용기의 구조화 격자계의 개략도이다. 그림의 정육면체는 한 변의 길이는 1 m인 용기이다. 수치해석 결과는 개략도와 같은 $11 \times 11 \times 11$ 구조화 격자계에 DOIM을 적용하였다. 광학두께를 0.1, 1.0, 10.0으로 변화시켜가면서 결과를 출력하였다. 그리고, 해석해와 비교하였다. 비교 그림은 Fig. 3과 같다. 그래프를 보면 전체적으로 해석해와 수치해가 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

그래프에서 해석해를 나타내는 실선을 보면 모서리 쪽으로 갈수록 벽면 열유속의 값은 감소하고, 감소하는 변화율도 모서리 끝쪽으로 갈수록 크게 된다. 따라서, 전체적으로 격자계의 간격이

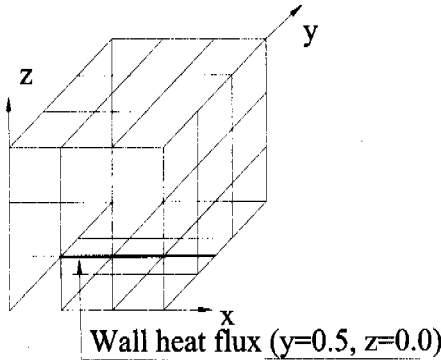


Fig. 2 Schematic of structured grids in a cubic enclosure

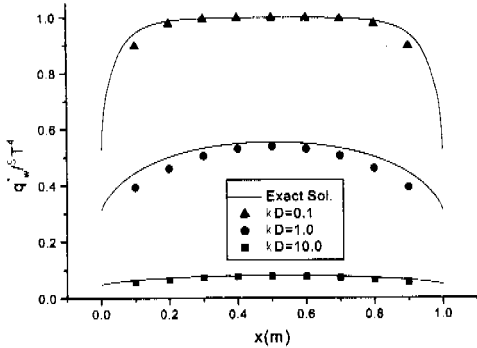


Fig. 3 Wall heat flux when using $11 \times 11 \times 11$ structured grids

일정할 경우 모서리로 갈수록 오차의 크기가 커진다. 이것은 실제 계산에도 잘 나타나고 있다. 이번 수치결과들은 광학두께가 10.0일 경우 평균 상대 오차는 1.36%이지만, 모서리에서의 최대 오차가 날 경우의 값이 4.74%로서 평균 오차보다 상당히 크다는 것을 알 수 있다. 이것은 격자계가 성기게 구성되었기 때문에 벽면의 열유속의 급격한 변화율을 따라가지 못하기 때문이다.

광학두께가 작아질수록 평균 상대 오차도 약간씩 커진다. 광학두께가 1.0일 경우 상대 오차는 6.70%, 0.1일 경우 7.89%를 갖는다. 이것으로 모서리 부분에서는 비교적 해석해와 수치해가 잘 일치하지 않지만, 전체적으로는 해석해와 수치해가 잘 맞고 있다는 것을 알 수 있다.

Table 1은 광학두께에 따라 격자계의 수와 종

Table 1 Comparison of the relative average error of the DOIM, with varying the optical depths and the numbers of grids and ordinates for the regular cubic enclosure

Optical depth (τ)	No. of grids	S_N	Error(%)
0.1	$11 \times 11 \times 11$	S_4	7.89
		S_6	4.73
	$21 \times 21 \times 21$	S_4	5.25
		S_6	6.50
1.0	$11 \times 11 \times 11$	S_4	6.70
		S_6	3.47
	$21 \times 21 \times 21$	S_4	4.57
		S_6	4.59
10.0	$11 \times 11 \times 11$	S_4	1.36
		S_6	0.70
	$21 \times 21 \times 21$	S_4	1.35
		S_6	0.69

좌표 수를 변화 시켜가면서 벽면열유속의 평균 상대오차를 나타내고 있다. 오차는 대체적으로 격자계의 수와 종좌표의 수가 증가함에 따라 감소한다. 간혹 예외의 경우가 나타나는데, 이것은 특정 문제에 관해서 나타나는 현상으로 일반적인 현상은 아니다. 그리고, 이 문제의 경우 격자계의 수의 증가보다 종좌표의 수의 증가가 오차 감소의 영향을 더 많이 미친다. 이것은 이 문제에 있어서 $11 \times 11 \times 11$ 격자계는 적당한 격자계의 수를 나타내지만, 종좌표 수는 좀더 크게 잡아야 한다는 것을 의미한다.

3.2 일반적인 육면체 용기

두 번째로 계산한 문제는 일반적인 육면체 용기 내에서의 벽면 열유속을 구하는 문제이다. Fig. 4는 일반적인 육면체 용기의 개략도와 육면체 용기의 기하학적인 치수를 나타내고 있다. 이 용기는 Z축으로의 길이가 1 m이고, 벽면 열유속은 $Z=0.5$ m일 때 계산되었다. 계산은 흡수 계수

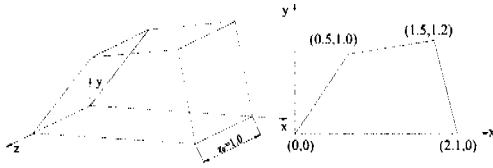


Fig. 4 Schematic of a hexahedral enclosure

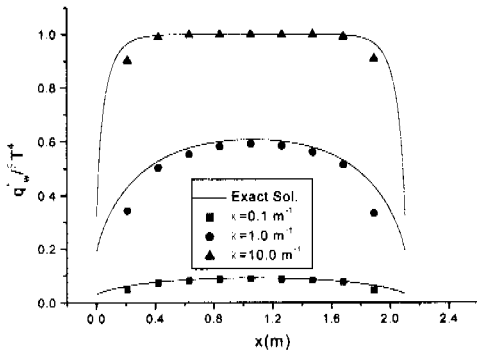


Fig. 5 Wall heat flux in the hexahedral enclosure of Fig. 4

를 0.1, 1.0, 10.0 m^{-1} 으로 변화 시켜가면서 수행하였다. 이 계산에 적용된 격자계는 정육면체 용기에서 사용된 $11 \times 11 \times 11$ 구조화 격자계가 이용되었다. 계산결과와 해석해의 비교 결과는 Fig. 5와 같다. 본 결과로부터 DOIM은 비직교 격자계에서도 잘 적용된다는 것을 알 수 있다. 이 그래프에서도 정육면체 용기에서의 결과처럼 모서리로 갈수록 해석해와 수치해의 오차가 커지고 있다.

흡수 계수에 따른 평균 상대 오차는 흡수 계수가 10.0일 때는 1.57%, 1.0 일 때는 7.47%, 0.1 일 때는 8.53%이다. 이것도 정육면체 용기와 마찬가지로 흡수계수가 작아질수록 비교적 오차가 커지는 것을 알 수 있다. 그런데, 이 오차의 크기가 정육면체 용기에서의 결과들 보다 조금씩 크게 나타나고 있다. 이것은 일반적인 육면체의 용기가 정육면체의 용기보다 비교적 복잡하기 때문에 같은 수의 격자점으로는 더 큰 오차를 수반할 수밖에 없기 때문이다. 그럼에도 불구하고 이 계산

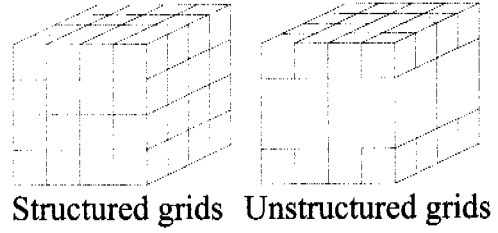


Fig. 6 Comparison of the two grid systems

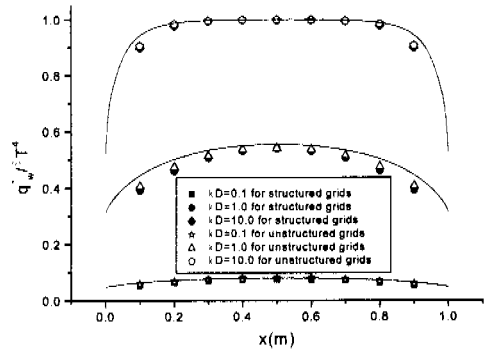


Fig. 7 Computational results in structured and unstructured grid systems

결과도 전체적으로 해석결과와 잘 맞는다는 것을 확인할 수 있다.

3.3 구조화 격자계와 비구조화 격자계에서의 계산 결과의 비교

새 번째 계산 결과는 첫 번째 계산에서 쓰었던 정육면체 용기 안의 벽면 열유속을 구하는 문제인데, 격자계를 구조화 격자계와 비구조화 격자계로 나누어서 계산결과를 비교하였다. 격자계의 대략적인 그림은 Fig. 6에 보여지고 있다. 구조화 격자계는 $11 \times 11 \times 11$ 의 1331개의 격자점을 가지고 있는 격자계이고, 비구조화 격자계는 아랫면과 윗면이 $11 \times 11 \times 11$ 구조화 격자계와 같은 구조이고, 그 사이의 격자 구조는 $11 \times 11 \times 11$ 보다 2배 이상 성긴 구조로 격자점은 386개를 갖는다. 계산결과는 Fig. 7과 같다. 그래프에서 보듯이 두 개의 수치해석 결과가 해석해와 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 먼저 살펴본 바와 같이 모서리 쪽으로 갈수록 오차가 증가하는 것은 구조화 격

Table 2 Mean relative error(%) of wall heat flux predictions when using structured and unstructured grid systems

Optical depth(τ)	0.1	1.0	10.0
Structured grids	7.89	6.70	1.36
Unstructured grids	5.34	4.79	1.02

자계나 비구조화 격자계나 같은 경향을 보이고 있다. 이것은 두 개의 격자계가 모두 격자점이 적어서 급격한 벽면 열유속의 변화를 잘 따라가지 못하기 때문이다.

다음으로 계산 시간을 비교하면, 광학의 길이가 1.0이고, 펜티엄 166Mhz CPU와 32Mb 메모리의 노트북 컴퓨터에서 계산을 수행했을 때 구조화 격자계의 경우 126.5 s가 걸렸고, 비구조화 격자계의 경우 32.5 s가 걸렸다. 이것으로 보아 계산 시간이 격자수와 대체로 비례하는 관계를 가지고 있는 것을 알 수 있다.

다음으로 계산 결과의 정확성을 비교해 보자. 구조화 격자계와 비구조화 격자계에서의 계산 결과와 해석해와의 평균 상대오차는 Table 2와 같다. Table 2에서 보는 바와 같이 구조화 격자계나 비구조화 격자계나 그 정확성이 비교적 비슷한 것으로 나왔다. 오히려 이번 문제의 경우는 격자점이 적은 비구조화 격자계가 더 정확한 결과를 나타내고 있다. 단, 이것은 벽면 열유속에서만 더 좋은 결과를 나타내고 있는 것일 뿐, 비구조화 격자계에서의 결과가 구조화 격자계에서의 결과보다 항상 좋은 결과를 나타낸다고 볼 수는 없다.

위의 결과에 의하면 풀기를 원하는 문제에 적절한 비구조화 격자계는 구조화 격자계보다 격자점이 적어서 계산 시간도 매우 작아지는 장점을 지닐 뿐만 아니라 계산 결과도 구조화 격자계에서의 결과와 비슷한 정도의 정확성을 가진다. 그러므로, 적절한 비구조화 격자계를 형성한다면 빠른 계산시간과 정확한 해를 구하는 방법이 될 수가 있다.

4. 결론

지금까지의 계산 결과로 보면, DOIM은 3차원 격자계에서의 문제에도 잘 적용된다는 것을 알

수 있다. 또, 정육면체와 같은 직교 좌표계뿐만 아니라 일반적인 육면체와 같은 비직교 좌표계에서도 잘 적용된다. 그리고, 또 하나의 매력적인 것은 DOIM이 비구조화 격자계에서도 잘 적용된다는 것이다. DOIM이 어떠한 차원이나 격자계나 좌표계에서도 잘 적용된다는 것은 DOIM이 매우 강건하고, 신뢰할 만한 수치해법이라는 것을 나타내고 있는 것이다. 또한, DOIM은 적절한 비구조화 격자계를 형성한다면 빠른 계산시간과 정확한 해를 구할 수 있는 방법을 제시한 것이다. 계산 결과의 정확성이 모든 결과에서 오차가 10% 미만으로 매우 정확함을 나타내고 있다. 이것으로 이 수치해법이 큰 정확성도 유지하고 있다는 것을 알 수 있다. 이런 이유로 볼 때 앞으로 DOIM은 복사 열전달 문제를 해석하는데, 매우 좋은 도구가 될 수 있다는 것을 알 수 있다.

앞으로 DOIM이 더 해야할 숙제는 매질의 온도장이 일정하지 않는 문제, 매질 내에서 어떠한 생성항이 존재하는 경우의 문제 등을 다루는 것이다.

참고문헌

- (1) Chui, E.H. and Raithby, G.D., 1992, "Prediction of Radiative Transfer in Cylindrical Enclosures with the Finite Volume Method," *J. Thermophys. Heat Transfer*, Vol. 6, No. 4, pp. 605~611.
- (2) Chai, J.C., Lee, H.S., and Patankar, S.V., 1994, "Treatment of Irregular Geometries Using a Cartesian Coordinates Finite-Volume Radiation Heat Transfer Procedure," *Numerical Heat Transfer, Part B*, Vol. 26, pp. 225~235.
- (3) Maruyama, S. and Ahira, T., 1995, "Radiative Heat Transfer of Arbitrary 3-D Participating Media with Non-participating Media by a Generalized Numerical Method REM," *Proc. 1st Int'l Symposium on Radiation Transfer*, Kusadasi, pp. 153~167.
- (4) Charette, A., Sakami, M. and Le Dez, V., 1997, "Analysis of Radiative Heat Transfer in Enclosures of Complex Geometry Using the Discrete Ordinates Method," *Proc. 2nd Int'l Symposium on Radiation Transfer*, Kusadasi, pp. 253~270.

- (5) Cheong, K.B. and Song, T.H., 1997, "An Alternative Discrete Ordinates Method with Interpolation and Source Differencing for Two-Dimensional Radiative Transfer Problems," *Numerical Heat Transfer, Part B*, Vol. 32, pp. 107~125.
- (6) Koo, H.M., Cheong, K.B. and Song, T.H., 1997, "Schemes and Applications of First and Second-Order Discrete Ordinates Interpolation Methods to Irregular Two-Dimensional Geometries," *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 119, No. 4, pp. 730~737.
- (7) Cha, H. and Song, T.H., 1998, "Discrete Ordinates Interpolation Method for Solution of Radiative Transfer Equation in Arbitrary 2-D Geometry and Unstructured Grid System," *Proc. of 11th IHTC*, Vol. 7, pp. 267~274.
- (8) Chai, J.C., Moder, J.P. and Parthasarathy, G., 1996, "Radiation Heat Transfer in Three-Dimensional Irregular Geometries," *31st AIAA Thermophysics Conference*, New Orleans, pp. 1~6
- (9) Maruyama, S. and Aihara, T., 1997, "Radiation Heat Transfer of Arbitrary Three-Dimensional Absorbing, Emitting and Scattering Media and Specular and Diffuse Surfaces," *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 119, pp. 129~136.
- (10) Sakami, M., Charette, A. and Le Dez, V., 1998, "Radiation Heat Transfer in Three-Dimensional Enclosures of Complex Geometry by Using the Discrete Ordinates Method," *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* Vol. 59, No. 1/2, pp. 117~136.
- (11) Kim, T.K., Seo, S.H., Min, D.H. and Son, B.S., 1998, "Study on Radiation in 3-D Irregular Systems Using the Trapezoidal Rule Approximation on the Transport Equation," *KSME Journal*, Vol. 12, No. 3, pp. 514~523.
- (12) Lathrop, K.D. and Brinkley, F.W., 1973, TWOTRAN-II : "An Interfaced, Exportable Version of the TWOTRAN Code for Two-Dimensional Transport," *Los Alamos Scientific Laboratory Report*, #LA-4848-MS.
- (13) Raithby, G.D. and Chui, E.H., 1990, "A Finite Volume Method for Predicting a Radiant Heat Transfer in Enclosures with Participating Media," *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 112, pp. 415~423.
- (14) Modest, M.F., 1993, "Radiative Heat Transfer," McGraw-Hill, New York, pp. 541~546.