

정사각형 계의 전도-복사열전달에서 정반사면의 영향

변기홍* · 한동천†

(2001년 3월 15일 접수, 2001년 7월 25일 심사완료)

Effects of a Specularly Reflecting Wall in an Infinite Square Duct on Conductive-Radiative Heat Transfer

Ki-Hong Byun and Dong Chun Han

Key Words: Specularly Reflecting(정반사), Participating(참여), Direct Discrete Ordinates Method(직접구분종좌법), Square(정사각형), Conductive -Radiative (전도-복사)

Abstract

The effects of a specularly reflecting surface on the wall heat flux and medium temperature distribution are studied. The system is an infinite square duct enclosing an absorbing and emitting medium. The walls are opaque, and black or gray. The walls emit diffusely but reflect diffusely or specularly. Heat is transferred by the combined effect of conduction and radiation. The radiative heat transfer is analyzed using direct discrete-ordinates method. The parameters under study are conduction to radiation parameter, optical depth, wall emissivity, and reflection characteristics. The specular reflection and diffuse reflection show sizeable differences when the conduction to radiation parameter is less than around 0.01. The differences appear only either on the side wall heat flux or on the medium temperature profiles for the range of this study. The differences on the side wall heat flux are observed for optical thickness less than around 0.1. However, the differences on the medium temperature profiles are found for optical thickness greater than around 1. The difference increases with increasing reflectance. The specular reflection increases the wall heat flux gradient along the side wall.

기호설명

I, G : (무차원) 복사강도, W/m^2-sr

k : 열전도율, $W/m-K$

L : 계의 높이, 길이, m

M : 1사분면당 종좌의 수

\bar{N} : 전도-복사계수, $\frac{k\alpha}{4\sigma T_r^3}$

q, Q : (무차원) 열유속, $\frac{q}{\sigma T_r^4}$

T, T_r : (기준) 온도, K

α : 흡수계수 (m^{-1})

ϵ : 방사율

σ : Stefan-Boltzmann 상수

θ : 무차원 온도, $\frac{T}{T_r}$

μ, ξ : x, y 방향여현

τ_L : 광학두께, αL

ω_m : m 방향 종좌의 가중치

첨자

m : 종좌의 방향

* 책임저자, 회원, 동국대학교 기계공학과

E-mail: khbyun@dongguk.edu

TEL:(02)2260-3701 FAX:(02)2263-9379

† 동국대학교 기계공학과

1. 서론

소재 및 완성품의 가열 및 건조, 건물의 냉난

방, 에너지시스템 등에는 복사, 전도 및 대류 열 전달이 복합적으로 발생하고 있다. 열전달이 있는 계의 경계면들의 대부분은 난반사와 난방사를 하지만, 태양열 집열기, 태양광 덕트, 초코랄 스키 로, 플라즈마의 용기, 마이크로웨이브오븐, 사우나 시설 등의 계에서 정반사를 하는 경우도 찾을 수 있다.

복사열전달해석에는 Zone 방법, Monte Carlo 방법, P-N구조화 근사법, 유한요소법, S-N 구분종좌법, 유한체적법 등 다양한 방법들이 사용되어 많은 논문들이 발표되었으며, 참고문헌 [1]에 잘 정리되어 있다. 이중 Monte Carlo 방법과 S-N 구분종좌법을 제외하고는, 방향성을 고려하기 힘들다.

전도-복사 열전달과 관련된 논문들은 다음과 같다. Yuen 과 Takara⁽²⁾는 직사각형 계 안에 놓인 흡수와 방사를 하는 매질에 의한 전도-복사 열전달을 해석하였다. 복사 흡수 항을 대수함수로 표현하여 지배방정식에 대한 수치 해석을 하였다. 김과 백⁽³⁾은 사각형 계 안에 놓인 방사, 흡수와 산란을 하는 참여매질에 의한 전도와 복사열전달을 S-4 구분종좌법을 사용해서 해석하여 온도와 열유속 분포를 발표하였다.

Sparrow 와 Lin,⁽⁴⁾ Plamondon 과 Horton⁽⁵⁾ 등은 정반사면을 가진 계의 복사형태계수와 복사 전달식을 유도했다. Maruyama^(6,7)는 Radiation Element Method (REM)를 사용하여 정반사면 및 난반사 난방사를 하는 면이 흡수, 방사와 산란하는 참여매질을 둘러싼 계의 열전달에 미치는 영향에 대하여 연구하였다.

이 연구의 목적은 직사각형 계의 정반사면이 계의 온도분포와 열유속분포에 미치는 영향을 알아보고자 하는 것이다. 주요변수는 전도-복사비, 광학두께, 벽면의 방사율 및 면의 반사특성이다.

2. 해 석

2.1 계와 경계조건

이 연구에서 해석하고자 하는 계는 한 변의 길이가 L인 정육면체로써, Fig. 1과 같다. 계 안에는 흡수와 방사를 하는 참여매질로 채워져 있으며, 비투과 벽면은 난반사와 난방사를 하거나 정반사와 난방사를 한다. 계에서는 복사와 전도

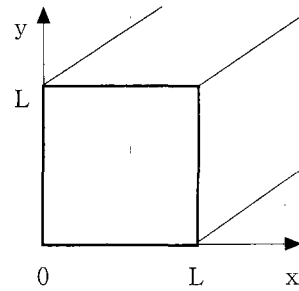


Fig. 1 System description

열전달이 복합적으로 일어난다.

복사와 전도에 의하여 지배되는 매질내의 에너지 방정식은 다음과 같다.

$$k\nabla^2 T - 4a(\sigma T^4 - \frac{1}{4} \int_{4\pi} I d\Omega) = 0 \quad (1)$$

여기서 k 는 열전도율(Thermal conductivity), T 는 온도, I 는 복사강도, a 는 흡수계수, σ 는 Stefan-Boltzmann 상수, Ω 는 입체각이다. 식 (1)에서 첫 번째 항은 전도에 의한 에너지 발산항을 의미하며, 두 번째 항과 세 번째 항은 각각 매질이 방사하고, 흡수하는 복사에너지를 나타낸다. 복사강도는 복사전달방정식 (Radiative Transfer Equation)을 사용하여 구할 수 있다. 식 (1)을 다음과 같은 무차원 변수⁽³⁾들을 사용하여 무차원화한 후, 복사항은 직접구분종좌법(Direct Discrete Ordinates Method: DS_N)^(8,9)으로, 전도항은 유한차분법을 사용하여 이산화하였다.

$$X = \frac{x}{L}, \quad Y = \frac{y}{L}, \quad \tau_L = aL, \quad G = \frac{I}{\sigma T_r^4}$$

$$\bar{N} = \frac{ka}{4\sigma T^3}, \quad \theta = \frac{T}{T_r}, \quad Q = \frac{q}{\sigma T_r^4}$$

여기서 τ_L 은 광학두께이며, T_r 은 기준온도이다.

또한 \bar{N} 는 전도-복사 계수이며, θ 와 G 는 각각 무차원 온도와 무차원 복사강도이다.

위의 무차원 변수를 사용하여 식 (1)을 무차원

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} = \frac{\tau_L^2}{N} \left(\theta^4 - \frac{1}{4} \sum_{m=1}^M \omega_m G_m \right) \quad (2)$$

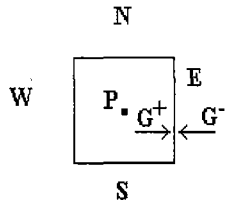


Fig. 2 Control volume

화하면, 식 (2)가 된다. ω_m 은 m 방향 구분중좌가중치이며, M 은 1 사분면당 중좌의 수이다. 비참여매질의 경우 $\alpha = 0$ 이므로, 우변항은 0이 된다.

2.2 복사항

Fig. 1의 계를 가로, 세로 방향으로 n_i, n_j 등분하여 생성된 임의의 검사체적은 Fig. 2 와 같다. 검사체적의 중앙점을 P, 점 P에서 보아 각각 북, 남, 동, 서쪽에 위치한 면에 하첨자 N, S, E, W 를 붙이기로 한다. 그리고 점 P에서 회전각 $\frac{\pi}{2}$ 를 M 개로 균일 등분하여 임의의 회전각의 방향을 m 으로 표시한다. 검사체적의 유출량에 +, 유입량에 -위첨자를 사용하였다.

점 P에서 임의의 m 방향 복사강도를 (W, S) 면의 m 방향 복사강도를 사용하여 정리하면 식 (3)이 된다. 식 (3)과 유사한 다른 세 개의 식을 (E, S), (W, N), (E, N) 면의 m 방향 복사강도를 사용하여 구할 수 있다.

$$G_P = \frac{\frac{\mu_m \Delta Y}{\tau_L} G_W^- + \frac{\xi_m \Delta X}{\tau_L} G_S^- + 0.5 V_P S}{\frac{\mu_m \Delta Y}{\tau_L} + \frac{\xi_m \Delta X}{\tau_L} + 0.5 V_P} \quad (3)$$

여기서 μ 와 ξ 는 X, Y 방향 방향코사인이며, G 는 무차원 복사강도이다. V_P 는 $\Delta X \Delta Y$ 이고,

S 는 $\frac{\sigma \theta_P^4}{\pi}$ 이다.

검사체적의 동쪽면을 나가는 m 방향 복사강도를 (P, W) 면의 m 방향 복사강도를 사용하여 표현하면 식 (4)와 같다. 나머지 서, 북, 남쪽면에서도 유사한 식을 유도할 수 있다.

$$G_{E^+} = 2G_P - G_W^- \quad (4)$$

식 (3, 4)는 일반적인 구분중좌법^(3,10)에서 사용하는 복사강도에 관한 식들에서 finite difference weighting factor의 값을 0.5로 택한 경우와 같다. 계산 과정은 일반적인 구분중좌법의 계산과정과 동일하나, 정반사의 경우 계산순서에 주의를 해야한다.

2.3 경계조건

벽면은 모두 비투과적이다. 벽면이 난반사와 난방사를 하는 경우, 임의의 m 방향으로, 벽면을 떠나는 복사강도의 식은 다음과 같다.

$$G_{wall}^+ = \epsilon_W \frac{\theta_{wall}^4}{\pi} + \frac{(1 - \epsilon_W)}{\pi} \sum_m^M \omega_m C_m G_m^- \quad (5)$$

벽면이 흑체이면 $\epsilon_W = 1$ 이고 회체이면 $0 \leq \epsilon_W < 1$ 사이의 값을 가진다. 여기서 ϵ_W 는 벽면방사율, ω_m 은 가중치이며, wall은 N, S, E, W 가 된다. C_m 은 W, E 면에서는 μ_m , S, N 면에서는 ξ_m 이다.

정반사 경계면의 경우, 임의의 m 방향으로, 벽면을 떠나는 복사강도는 식 (6)과 같다.

$$G_{wall}^+ = \epsilon_W \frac{\theta_{wall}^4}{\pi} + (1 - \epsilon_W) G_m^- \quad (6)$$

2.4 구분중좌의 방향 및 가중치

Sanchez 와 Smith⁽¹¹⁾가 제시한 직접구분중좌의 가중치와 방향여현은, 식 (7)과 같다.

$$\begin{aligned} \phi_m &= \frac{\Delta \phi}{2} + (m-1) \Delta \phi, \quad m=1, 2, \dots, M \\ \Delta \phi &= \frac{\pi}{2M} \\ \omega_m &= \frac{\pi}{2 \sum_{m=1}^M \cos \phi_m} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 $\cos \phi_m$ 은 방향여현, ω_m 은 가중치이다. S-4 구분중좌법의 방향과 가중치는 Fiveland⁽¹⁰⁾ 김과 백⁽³⁾의 연구에서 사용된 값을 이용하였다.

2.5 열유속

매질의 전도와 복사에 의한 X, Y 방향 무차원 열유속 (Radiative Flux)은 식 (8)과 같다.⁽³⁾

$$Q_x = -\frac{4\bar{N}}{\tau_L} \frac{\partial \theta}{\partial X} + \sum_{m=1}^{4M} \omega_m \mu_m G_m$$

$$Q_y = -\frac{4\bar{N}}{\tau_L} \frac{\partial \theta}{\partial Y} + \sum_{m=1}^{4M} \omega_m \xi_m G_m$$

$$Q = \sqrt{Q_x^2 + Q_y^2} \tag{8}$$

계의 북쪽과 동쪽 경계면에서의 무차원 열유속 식은 식 (9)와 같다.

$$Q_N = -\frac{4\bar{N}}{\tau_L} \frac{\partial \theta}{\partial Y} \Big|_{wall} + \sum_{m=1}^{2M} \omega_m \mu_m (G_m^- - G_m^+)$$

$$Q_E = -\frac{4\bar{N}}{\tau_L} \frac{\partial \theta}{\partial X} \Big|_{wall} + \sum_{m=1}^{2M} \omega_m \xi_m (G_m^- - G_m^+)$$

$$\tag{9}$$

3. 결과 및 토의

결과에 영향을 미치는 무차원 변수들은 광학두께, 전도-복사비, 벽면의 방사율이다. 이 무차원 변수들이 온도분포와 열유속분포에 미치는 영향을 계산했다. 결과에 사용된 조건은 별도의 언급이 없는 한 다음과 같다. 계는 정사각형이며, 경계면에서의 온도는 $T_S = 600K$, $T_N = T_E = T_W = 300 K$ 이다. 기준온도는 $T_r = 600 K$ 이다. 따라서, 남쪽면의 무차원 온도는 1이고, 나머지 면들의 무차원 온도는 0.5이다. 북쪽 경계면 외에는 모두 흑체인 비투과면이다. 계의 가로세로 분할 수 n_x, n_y 는 50개이며, 1사분면당 직접구분종좌의 수는 256개다.

Table 1(a) 와 1(b)에는 직접구분종좌법(DSN)에 의한 결과를 참고문헌 [2]의 결과와 S-4 구분종좌법의 결과와 비교하였다. 이 연구에 사용된 프로그램에 Fiveland⁽¹⁰⁾의 S-4 가중치를 사용하여 계산한 결과가 Table 1의 S4이다. Finite difference weighting factor 값은 0.5이다. 참고문헌 [12]에 김과 백⁽³⁾ 등의 연구 결과와의 비교가 그림으로 발표되어 있다. 경계면들은 모두 흑체인 비투과면이고, $\tau_L=1$ 이다. 계의 가로세로 분할 수 n_x, n_y 는 25개이며, 1사분면 당 종좌 수는

Table 1(a) Dimensionless temperature distribution along X=0.5 axis at $\tau=1$

Y	\bar{N}				
	1.0	0.1	0.01	0.001	
0.3		0.730	0.762	0.790	0.793
	[2]	0.737	0.763	0.807	0.794
	S4	0.737	0.759	0.786	0.786
0.5		0.631	0.668	0.728	0.736
	[2]	0.630	0.661	0.726	0.736
	S4	0.630	0.663	0.724	0.736
0.7		0.565	0.599	0.671	0.688
	[2]	0.564	0.589	0.653	0.685
	S4	0.564	0.594	0.669	0.692

Table 1(b) Dimensionless temperature distribution along Y=0.5 axis at $\tau=1$

X	\bar{N}				
	1.0	0.1	0.01	0.001	
0.6		0.625	0.661	0.724	0.734
	[2]	0.624	0.654	0.721	0.733
	S4	0.624	0.656	0.720	0.733
0.8		0.580	0.609	0.684	0.713
	[2]	0.580	0.603	0.669	0.711
	S4	0.580	0.605	0.675	0.709

M=64 이다.

Table 1(a)에는 대칭축인 X=0.5 축 위의 Y=0.3, 0.5, 0.7에서의, Table 1(b)에는 Y=0.5 축 위에서 X=0.6, 0.8에서의 무차원 온도가 비교되어 있다. \bar{N} 가 1 또는 0.001인 경우, 참고문헌 [2]의 결과에 대한 차이는, DSN 과 S-4 모두 1.0(0.3)% 이내이다. 괄호 안의 수는 Table 1(b)의 결과이다. \bar{N} 가 0.1 또는 0.01인 경우 차이는 DSN의 경우 2.8(1.5)%, S-4의 경우 2.6(0.9)% 이내이다.

Table 2(a)와 2(b)에는 매질의 무차원 열유속 분포(식 (8))가 비교되어 있다. 입력 조건은 Table 1(a) 와 1(b)에서와 같다. \bar{N} 가 1인 경우, Table 2(a)에서의 최대오차는, DSN의 경우 2.0(2.4)%, S-4의 경우 5.2(2.2)%이며, 괄호 안의 수는 Table 2(b) 결과이다. \bar{N} 가 1이 아닌 경우, Table 2(a)에서의 최대 오차는, DSN의 경우 9.6%, S-4 의 경우 25.8%이며, Table 2(b)에서 $Q_x(Q_y)$ 의 최대오차는, DSN 의 경우 8.9(6.8)

Table 2(a) Dimensionless heat flux distribution along $X=0.5$ axis at $\tau=1$

Y	\bar{N}				
	1.0	0.1	0.01	0.001	
0.3		3.347	0.876	0.631	0.602
	[2]	3.315	0.860	0.610	0.556
	S4	3.265	0.793	0.542	0.511
0.5		2.135	0.632	0.478	0.459
	[2]	2.112	0.609	0.463	0.423
	S4	2.106	0.604	0.452	0.434
0.7		1.379	0.464	0.366	0.353
	[2]	1.352	0.430	0.344	0.322
	S4	1.422	0.510	0.417	0.405

Table 2(b) Dimensionless heat flux distribution $QY(QX)$ along $Y=0.5$ axis at $\tau=1$

X	\bar{N}				
	1.0	0.1	0.01	0.001	
0.6		2.067(.503)	0.618(.110)	0.471(.068)	0.453(.063)
	[2]	2.050(.491)	0.595(.107)	0.454(.070)	0.416(.059)
	S4	2.050(.483)	0.602(.092)	0.455(.052)	0.436(.047)
0.8		1.484(1.456)	0.501(.320)	0.401(.196)	0.388(.180)
	[2]	1.489(1.422)	0.478(.305)	0.381(.195)	0.357(.171)
	S4	1.464(1.391)	0.482(.259)	0.384(.143)	0.374(.129)

%, S4의 경우 4.8(26.7)%이다. 열유속분포의 오차는 온도분포의 오차 보다 크며, \bar{N} 값이 작으면 증가하는 경향을 보였다.

Fig. 3에는, 열전달이 순수하게 전도에 의해서만 일어나는 경우 (PC) 와 전도-복사에 의해서 일어나는 경우에 대한, 매질의 온도분포가 비교되어 있다. 전도-복사의 경우 $\bar{N}=0.01$ 이고 $\tau=1.0$ 이다. 무차원 온도 간격은 0.1이다. 순수 전도 경우에 비해, 전도-복사 경우에 대한 등온선이 저온 면 쪽으로 확장되어 있는 것을 볼 수 있다. 고온 면에 접근 해갈 수록, 두 등온선 사이의 차이가 줄고 있다. 따라서, 면의 복사와 매질의 흡수와 방사에 의해 고온 영역의 확장이 이루어졌음을 알 수 있다. 저온벽 근처를 제외하면, 전도-복사 경우의 X 축 방향 온도기울기는 순수전도 경우에 비해서 감소하였다. 저온벽 근처의 온도기울기가 순수전도에 비해서 크게 증가되었으나, 고온벽 근처에서의 온도기울기의 변화는 작았다.

Fig. 4는 회색인 북쪽 벽면의 방사율이 북쪽

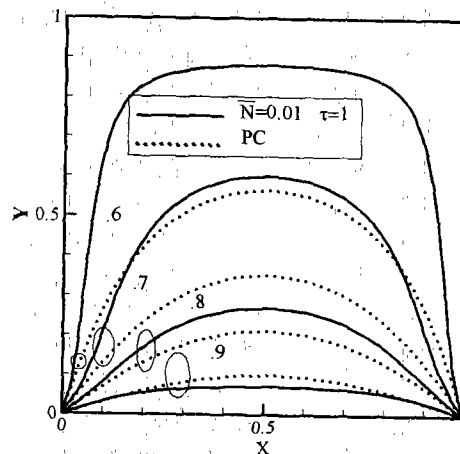


Fig. 3 Dimensionless temperature contours for pure conduction(PC) and conductive-radiative case ($\bar{N}=0.01, \tau=1$)

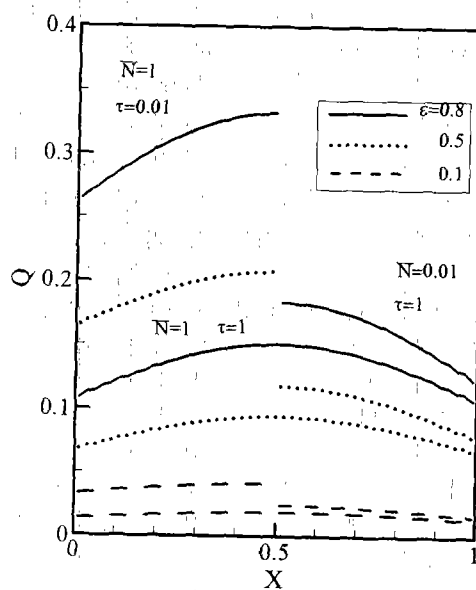


Fig. 4 Net radiative flux at the north wall

면의 순수입 복사열유속에 미치는 영향에 대한 결과이다. 순수입량은 입사량 (irradiation)과 출사량(radiosity)의 차이이다. 세 (\bar{N}, τ)에 대한 결과에서, 실선, 점선, 일점쇄선은, 각각 $\epsilon=0.8, 0.5, 0.3$ 인 경우다. 대칭축인 $X=0.5$ 축 좌측에는 $\bar{N}=1$ 에서 북쪽 경계면의 방사율 및 광학두께의

영향이, 우측에는 $\tau=1.0$ 일 때, 북쪽 경계면의 방사율과 매질의 전도-복사계수가 열유속에 미치는 영향이 발표되어 있다. $\bar{N}=1$ 에서 북쪽면의 방사율이 일정한 경우 광학두께가 감소하면, 북쪽면으로의 순유입 복사열유속이 증가하고 있다.

광학두께와 \bar{N} 값이 일정할 때, 북쪽면의 방사율이 감소하면 북쪽면으로의 순유입 복사열유속이 감소하며 벽면 위의 열유속 분포가 균일해지려는 경향이 있다. 이는 반사율의 증가로 출사량이 증가하고 입사량이 감소되므로 순유입량이 감소하기 때문이다. 광학두께와 북쪽면의 방사율이 일정한 경우, \bar{N} 값이 감소하면 북쪽면으로의 순유입 복사열유속이 증가하고 있다. 북쪽면이 정반사를 하는 경우에도 북쪽면에서의 열유속 분포에 대한 결과는 Fig. 4와 동일하다.

Fig. 5는 회체의 난반사와 난방사를 하는 북쪽 벽면의 방사율이 매질의 온도분포에 미치는 영향에 대한 결과이다. $\bar{N}=0.01$, $\tau=1.0$ 조건 외에 계와 온도 및 이산화에 대한 조건은 변동이 없다. 왼쪽 X축이 무차원 온도가 1.0인 고온의 남쪽면이며 오른쪽 X축이 무차원 온도가 0.5인 북쪽면이다. 기준온도와 흡수계수가 일정한 경우에서, 조건이 $\bar{N}=1.0$, $\tau=1.0$ 에서 $\bar{N}=0.01$, $\tau=1.0$ 로 바뀌면, 열전도율은 1/100으로 감소한다. $\bar{N}=0.01$, $\tau=1.0$ 의 조건에서는 복사와 전도가 복합적으로 매질의 온도 분포에 영향을 미치고 있음을 Table 1(a)와 1(b), Fig. 3에서 볼 수 있다. 북쪽면의 방사율이 감소하면 반사율이 증가한다. 반사량이 매질에 흡수되면 매질온도가 상승하여, 결과적으로는 매질의 고온 영역이 확장되게 된다. 방사율이 감소할수록 고온 영역 확장의 정도는 증가하나, 반사면 근처나, 고온의 남쪽면 근처에서, 방사율의 변화가 매질의 온도에 미치는 영향은 작았다. Fig. 5의 경우, 대략 반사면으로부터의 광학거리 0.1-0.7 사이에서 방사율의 영향이 가장 크게 나타났다.

Fig. 5에서, 저온인 북쪽면의 방사율이 감소함에 따라 저온벽 근처의 법선 방향 온도기울기가 증가하였으나, 고온벽 근처에서 법선 방향 온도기울기 변화는 작았다. 그러므로 저온 벽면에서의 전도열유속은 순수전도의 경우에 비해 복사와 전도에 의한 열전달의 경우가 더 크다. 두 경우에 대한 고온 벽면에서 전도열유속을 비교해보면

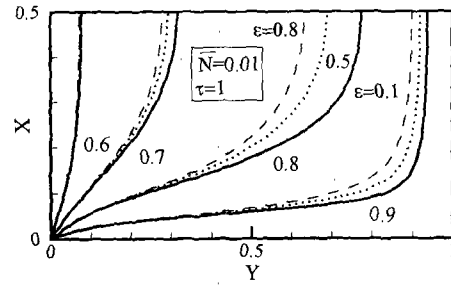


Fig. 5 Effects of the north wall emissivity on dimensionless temperature contour

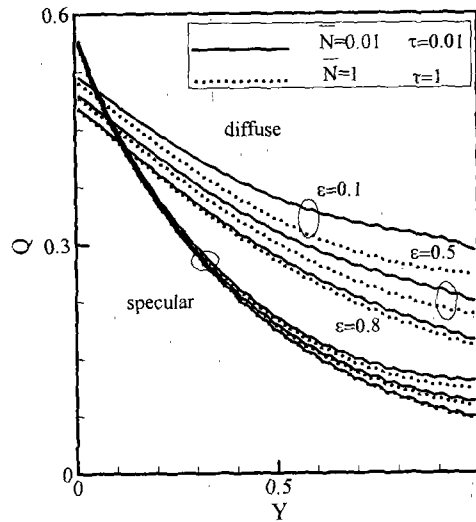


Fig. 6 Dimensionless net radiative flux on west wall

그 차이는 적었다. 따라서 고온영역의 확장은 매질의 복사 에너지 흡수 및 방사와 벽면의 방사 및 반사를 통해서 이루어졌음을 유추할 수 있으며, 고온벽면 근처의 등온선은 전도에 의해 결정된다고 할 수 있다.

Fig. 6 에는 북쪽 벽면의 방사율 및 반사 특성과 광학두께, 매질의 전도-복사계수가 서쪽 벽면의 순유입 복사열유속에 미치는 영향이 발표되어 있다. 계의 형상, 온도분포, 이산화 조건은 변동 없다. 난반사 경우가 정반사 경우 뒷조에 발표되어 있다. 각 조에서 방사율은 밑에서부터 위로 각각 $\epsilon_w = 0.8, 0.5, 0.1$ 이다. 한 방사율에서, 실선은 ($\bar{N}=0.01$, $\tau=0.01$) 경우이고, 점선은 ($\bar{N}=1$, τ

=1) 경우이며 실선 바로 아래에 있다. 대칭성에 의해서, 동쪽 벽면에서의 결과는 서쪽 벽면에서의 결과와 동일하며 이를 확인하였다. 전도-복사 비와 광학두께가 일정한 경우, 북쪽벽면의 방사율이 감소하면, 반사량이 증가하므로 서쪽벽면으로 유입되는 순복사열유속이 증가하고 있다.

북쪽면이 정반사를 하면, 서쪽벽면으로 유입되는 순복사열유속은 고온인 남쪽면에 인접한 일부를 제외하고는 북쪽면이 난반사와 난방사를 하는 경우에 비해서 감소하고 있다. 주어진 기하학적 형상 및 온도조건에서, 남쪽면의 코너쪽으로 반사되는 반사량의 크기가, 정반사의 경우 난반사에 비해서 크기 때문이라고 생각된다. 반면에 이외의 각도로 반사되는 양의 크기는 난반사의 경우에 비해서 작다. 난반사의 경우, 북쪽벽면에서의 반사량의 방향평균값이 반사되어 측벽으로 입사하고 있다. 결과적으로 Fig. 6에서, 정반사하는 경우에 대한 측벽에서의 순유입 복사열유속의 구배는 난반사 경우에 비해서 커졌다. 면의 반사율이 적어도 일정 값 이상이어야, 반사방법에 따른 측벽에서의 열유속 차이를 구별할 수 있으며, Fig. 6의 경우 이 값은 0.5 근방이다. 반사율이 증가할수록 차이는 증가하고 있다.

계의 형상 및 온도조건과 매질의 전도율이 일정한 경우, 매질의 흡수계수가 감소하면 광학두께와 \bar{N} 가 동시에 감소하며, 서쪽벽면에서의 순복사 열유속이 증가하고 있다. 전도에 대한 복사의 상대적 크기가 증가했으며, 광학두께가 감소하면, 북쪽벽면과 서쪽벽면 사이에 놓인 매질의 투과율이 증가하기 때문이다. Fig. 6에서, 흡수계수의 변화가 열유속에 미치는 영향은, 정반사의 경우 난반사에 비해서 작게 나타났다.

Fig. 7은 북쪽 면의 반사 특성이 매질의 온도 분포에 미치는 영향에 대한 결과이다. 계의 형상, 온도분포, 이산화 조건은 이전과 같다. $\bar{N}=0.01$, $\tau=1.0$ 이고 북쪽 벽면의 방사율은 1.0, 0.5, 0.3이다. 방사율이 감소할 수록 고온의 영역이 더 저온영역으로 확장되어 있음을 볼 수 있다. 난반사의 경우, 정반사에 비해 매질 내에서의 고온영역이 저온영역으로 더 확장되어 있음을 알 수 있다. 주어진 조건에서 난반사면이 정반사면보다 입사된 복사에너지를 저온의 서(동)쪽 벽면으로 반사하는 경향이 크므로 북쪽면과 서(동)쪽 벽면 사이에 놓인 매질의 온도가 상승되었기 때문이

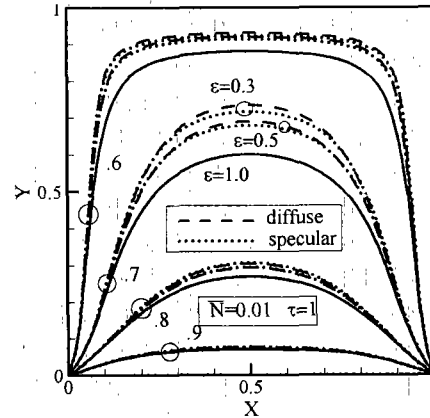


Fig. 7 Effects of reflection mode on dimensionless temperature distribution

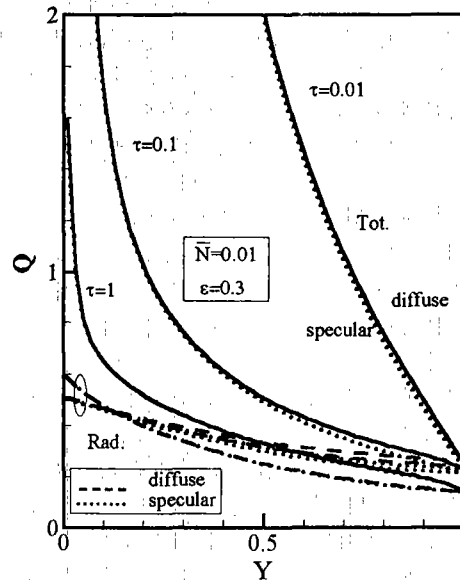


Fig. 8 Effects of optical thickness on west wall total and radiative heat flux distribution

다. 이 흡수된 에너지는 매질의 전도 복사를 통해서 다시 저온 벽면으로 전달된다. 고온벽면에서의 전도 열전달은 정반사의 경우나 난반사의 경우나 차이가 거의 없다. 저온벽면에서의 전도열전달량은, 면이 난반사를 하는 경우가 정반사를 하는 경우에 비해서 크다.

Fig. 8에는 북쪽 벽면의 방사율, 반사 특성과 광학

두께가 서쪽 벽면의 전체열유속 및 순복사열유속에 미치는 영향이 $\bar{N}=0.01$, $\epsilon_w=0.3$ 의 조건에서 제시되어 있다. 계의 형상, 온도분포, 이산화 조건은 동일하다. 세 광학두께에서, 전체열유속(Tot.)은 실선(난)과 점선(정)을, 순복사열유속(Rad.)은 긴 점선(난)과 점선(정)을 사용해서 난반사와 정반사를 구분했다. 광학두께가 두꺼워지면, 투과량이 감소하여 전체 및 복사열유속의 크기가 감소하고 있으며, 반사 특성에 기인한 열유속에서의 차이 또한 감소해서, 광학두께 1에서는 차이를 찾을 수 없었다. 반면에, 결과는 제시하지 않았지만, 광학두께가 1에서 0.1로 감소하면, 반사 특성에 기인한 매질에서의 온도 분포 차이가 사라져서, 온도분포가 거의 일치했다.

4. 결론

정반사면이 참여매질을 가진 정사각형계의 전도-복사 열전달에 미치는 영향을 직접구분종좌법을 사용하여 연구하였다. 모든 면이 흑체인 경우 계산 결과는 다른 연구 결과들과 잘 일치했다. 북쪽 벽면을 제외한 나머지 면이 흑체이고, 남쪽 벽면만이 고온인 경우에 대한 결과를 요약하면 다음과 같다. 정 및 난반사에 기인한 결과에서의 차이는 복사열전달이 상대적으로 우세한 $\bar{N}=0.01$ 이하인 경우 관찰할 수 있었다. 광학두께가 대략 1 이상이 되면, 이 차이는 온도분포에 나타났으며, 벽면 열유속에는 나타나지 않았다. 광학두께가 대략 0.1 보다 작으면, 이 차이는 측벽면 열유속분포에 나타났으며, 온도분포에는 나타나지 않았다. 반사율이 클수록 차이는 증가했다. 정반사의 경우, 난반사인 경우에 비해서 매질의 고온영역이 넓어 확장되었다. 정반사의 경우, 난반사인 경우에 비해서, 측벽면에 유입되는 열유속은 감소되었으며, 측벽 열유속의 기울기가 증가하였다.

후 기

이 논문의 일부는 1999년 한국학술진흥재단의 학술연구비(KRF-99-041-E00006)에 의해서 지원되었으며, 저자들은 지원에 대해서 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Siegel, R., and Howell, J. R., 1981, *Thermal Radiation Heat Transfer*, Hemisphere Publishing Co., Washington D. C.
- (2) Yuen, W. and Takara, E. E., 1988, "Analysis of Combined Conductive-Radiative Heat Transfer in a Two-dimensional Rectangular With a Gray Medium," *J. of Heat Transfer*, Vol. 110, pp. 468~474.
- (3) 김택영, 백승욱, 1991, "구분종좌법에 의한 사각형매질내의 복사 및 전도열전달 해석," 대한기계학회논문집 제15호, 제1권, pp. 341~348.
- (4) Sparrow, E. M., and S. L. Lin., 1965, "Radiation Heat Transfer at a Surface Having Both Specular and Diffuse Reflectance Components," *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 8, pp. 769~779.
- (5) Plamondon, J. A., and T. E. Horton, 1967, "On the Determination of the View Function to the Images of Surface in a Nonplaner Specular Reflector," *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 10, No. 5, pp. 665~679.
- (6) Maruyama, S. and Aihara, T., 1994, "Radiative Heat Transfer of a Czochralski Crystal Growth Furnace with Arbitrary Specular and Diffuse Surfaces," *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, No. 12, pp. 1723~1731.
- (7) Maruyama S. and Higano, M., 1997, "Radiative Heat Transfer of Tours Plasma in Large Helical Device by Generalized Numerical Method REM," *Energy Conversion*, Vol. 38, No. 10-13, pp. 1187~1195.
- (8) Byun, K. H., Smith, T. F. and Sanchez, A., 1997, "View Factors for Infinite Rectangular Duct Enclosing a Transparent Medium by the Discrete Ordinates Method," *KSME Int. Journal*, Vol. 11, No. 3, pp. 331~338.
- (9) Byun, K. H. and Smith, T. F., 1997, "View Factors for Rectangular Enclosures Using the Direct Discrete-Ordinates Method," *J. of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 11, No. 4, pp. 593~595.
- (10) Fiveland, W. A., 1988, "Three-Dimensional Radiative Transfer Solutions by the Discrete Ordinate Method," *J. of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 12, No. 4, pp. 309~316.
- (11) Sanchez, A. and Smith, T. F., 1992, "Surface Radiation Exchange for Two-Dimensional Rectangular Enclosures Using the Discrete ordinates Method," *J. of Heat Transfer*, Vol. 114, pp. 465~472.
- (12) 한동천, 1998, 거울반사면이 있는 직사각형계의 전도와 복사열전달, 석사학위 논문, 동국대학교.