

비균일 농도 분포를 갖는 비회색 혼합가스로 충만된 정육면체 내의 좁은 파장모델을 이용한 복사열전달 해석 연구

박원희* · 천석현* · 김태국** · 손봉세***

Study on Narrow Band Solution of the Radiative Transfer within a Cubical Enclosure by Nongray Gas Mixtures with Nonuniform Concentration Profiles

W.H. Park, S.H. Chun, T.K. Kim and B.S. Son

Key Words: Radiation(복사), Nongray gas(비회색가스), Ray-tracing method(복사선추적법), Narrow band model(좁은파장모델), Exact solution(엄밀해), Curtis-Godson approximation(커티스-가슨 근사)

Abstract

Radiative transfer by nongray gas mixtures with nonuniform concentration and temperature profiles were studied by using the statistical narrow-band model and ray-tracing method with the sufficiently accurate T_{60} quadrature set. Transmittances through the nonhomogeneous gas mixtures were calculated by using the Curtis-Godson approximation. Three different cases with different temperature and concentration profiles were considered to obtain benchmark solutions for nongray gas mixtures with nonuniform concentration and temperature profiles. The solutions obtained from this study were verified and found to be very well matched with the previous solutions for uniform gas mixtures. The results presented in this paper can be used in developing various solution methods for radiative transfer by nongray gas mixtures.

1. 서론

산업용 노, 연소기, 보일러 등은 고온에서 작동되는 시스템으로써 복사열전달은 전체 열전달에서 중요한 부분을 차지한다. 이러한 복사열전달을 해석하는 방법에는 여러 가지가 있으며, 직교격자를 이용하는 방법으로는 zonal method⁽¹⁾, Monte Carlo method^(2,3), PN method⁽⁴⁾, flux method⁽⁴⁾와 구분종좌법^(5,6,7) 등이 있으며, 비직교격자계를 고려할 수 있는 방법으로는 유한체적법(FVM)^(8,9)과 구분종좌보간법(DOIM)^(10,11,12) 등이 있다. 가스에 의한 복사열전달은 파장에 따라 흡수 특성이 심하게 변화하는 비회색(nongray) 특성을 가지며, 가스 성분과 온도에 따라 상이한 흡수특성을 가지고 있어서 해석의 어려움을 더 하고 있다. 다차원 복사열전달을 해석하는 많은 방법들이 제안되고 있으나, 비회색가스를 고려한 해석 결과들은 그 정확성을 충분히 검증받지 못하고 있는 실정이다. 이것은 비교할 만한 비회

색 가스복사에 대한 엄밀해가 제시되어 있지 않는 것이 원인이라 할 수 있다. 최근에는 온도와 성분이 일정한 3차원 정육면체 내에서 비회색가스의 엄밀 해석이 이루어졌다⁽¹³⁾.

본 연구에서는 흑체벽으로 구성된 정육면체 내부에 채워진 비균일 농도 및 온도 분포를 갖는 비회색 혼합가스에 의한 복사열전달을 해석하고자 한다. 임의 위치에서의 복사강도 값은 벽에서 출발하는 복사선을 따라 계산하는 구분전달법(discrete transfer method)⁽¹⁴⁾으로 구하였으며, T_{60} (28800개의 각도구역) quadrature set⁽¹⁵⁾을 이용하였다. 흑체벽으로부터 출발하는 복사선은 온도와 성분이 일정하지 않은 매체를 통과하게 되며 이러한 불균일한 매체의 영향은 Curtis-Godson법⁽¹⁶⁾으로 근사화할 수 있으며, 매체의 통과율은 RADCAL⁽¹⁷⁾을 이용하여 구하였다. 여기서, 고려된 파동수 범위는 $\lambda = 50\text{cm}^{-1}$ 에서 9300cm^{-1} 이다.

본 연구에서는 1) 매체의 온도와 성분이 일정한 경우, 2) 매체의 온도와 분압이 선형으로 주어 진 경우 3) 실제 화로의 온도와 성분을 가정한 경우(높이에 대한 3차식)에 대하여 각각 복사열 유속과 평균복사강도를 구하였으며, 본 연구의 결과는 다차원 비회색 가스복사 열전달에 대한 기준자료로 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

* 중앙대학교 대학원
** 중앙대학교
*** 경원전문대학교

2. 이론

흡수, 방출 및 비등방 산란하는 참여 매체 내에서 임의의 방향 Ω 를 따라 s_u 로부터 s_p 로 전달되는 복사에너지를 고려하면 다음과 같은 복사열전달방정식이 유도된다.^(18,19)

$$I_{\lambda,p}(s_p, \Omega) = I_{\lambda,u}(s_u, \Omega) e^{-\int_{s_u}^{s_p} \beta_\lambda(s) ds} \quad (1)$$

$$+ \int_{s_u}^{s_p} S_\lambda(s, \Omega) e^{-\int_s^{s_p} \beta_\lambda(s') ds'} ds$$

여기서, 복사 생성항은 다음과 같다.

$$S_\lambda(s, \Omega) = a_\lambda(s) \cdot I_{\lambda b}(s) \quad (2)$$

$$+ \frac{\sigma_{\text{sc}}(s)}{4\pi} \int_{4\pi} I_\lambda(s, \Omega') \Phi_\lambda(\Omega, \Omega') d\Omega'$$

또한, a_λ 와 σ_{sc} 는 각각 흡수계수와 산란 계수이며, 소멸계수 β_λ 는 이들의 합으로 나타낼 수 있다. Φ 는 산란위상함수이며, $I_{\lambda b}$ 는 위치 s 에서의 흑체복사강도이다.

비산란 매체의 경우 $\beta_\lambda = a_\lambda$, $\sigma_{\text{sc}} = 0$ 이므로 식(1)과 (2)는 다음과 같이 간단하게 나타낼 수 있다.

$$I_{\lambda,p}(s_p, \Omega) = I_{\lambda,u}(s_u, \Omega) e^{-\int_{s_u}^{s_p} a_\lambda(s) ds} \quad (3)$$

$$+ \int_{s_u}^{s_p} a_\lambda(s) I_{\lambda,b}(s) \cdot e^{-\int_s^{s_p} a_\lambda(s') ds'} ds$$

여기서, s_u 에서 s_p 까지의 통과율(transmittance)은 다음과 같이 정의된다.

$$\tau_{\lambda, s_u \rightarrow s_p} = e^{-\int_{s_u}^{s_p} a_\lambda(s) ds} \quad (4)$$

통과율을 이용하여 나타내면 식(3)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$I_{\lambda,p}(s_p, \Omega) = I_{\lambda,u}(s_u, \Omega) \tau_{\lambda, s_u \rightarrow s_p} \quad (5)$$

$$+ \int_{s_u}^{s_p} a_\lambda(s) I_{\lambda,b}(s) \tau_{\lambda, s \rightarrow s_p} ds$$

좁은 밴드 모델을 이용하기 위하여 밴드 구간 $\Delta\lambda$ 내에서 식 (5)를 다음과 같이 평균을 하여 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{\Delta\lambda} \int_{\lambda_L}^{\lambda_U} [식(5)] d\lambda \quad (6)$$

여기서, 식(5)의 파장에 대한 평균을 취하기 위한 파장 범위는 $\lambda_L = \lambda - \Delta\lambda/2$ 와 $\lambda_U = \lambda + \Delta\lambda/2$ 로 고려하고 있으며, $\Delta\lambda$ 는 좁은 밴드 모델(narrow band model)의 파장범위를 나타낸다. 표현을 간결하게 하기 위하여 밴드내의 평균값(예; 복사강도)을 다음과 같이 나타내기로 하자.

$$\bar{I}_\lambda = \int_{\lambda_L}^{\lambda_U} I_\lambda d\lambda \quad (7)$$

따라서 식(6)은 다음과 같은 수식으로 표현된다.

$$I_{\lambda,p}(s_p, \Omega) = I_{\lambda,u}(s_u, \Omega) \tau_{\lambda, s_u \rightarrow s_p} \quad (8)$$

$$+ \int_{s_u}^{s_p} a_\lambda(s) I_{\lambda,b}(s) \tau_{\lambda, s \rightarrow s_p} ds$$

여기서, 통과율은 대부분의 가스에서 파장에 따라 심하게 변하며, 이것이 파장에 따라 심하게

변하는 다른 변수와 곱해진 상태로 파장에 대하여 평균할 때 주의를 기울여야 한다.⁽²⁰⁾ 반면에 흑체의 복사강도는 파장에 따라 부드럽게 변하므로 흑체 복사강도와 통과율 사이의 상관관계는 무시할 수가 있다.^(21,22) 흑체 복사강도와 통과율 사이의 상관관계를 무시할 경우 식(8)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{\lambda,p}(s_p, \Omega) = I_{\lambda,u}(s_u, \Omega) \tau_{\lambda, s_u \rightarrow s_p} \quad (9)$$

$$+ \int_{s_u}^{s_p} a_\lambda(s) \tau_{\lambda, s \rightarrow s_p} \cdot \bar{I}_{\lambda b}(s) ds$$

통과율의 정의를 살펴보면 통과율의 경로 길이에 대한 미분(Leibnitz rule 적용)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{\partial \tau_{\lambda, s \rightarrow s_p}}{\partial s} = \frac{\partial}{\partial s} \left(e^{-\int_s^{s_p} a_\lambda(s') ds'} \right) = -a_\lambda(s) \tau_{\lambda, s \rightarrow s_p} \quad (10)$$

식(9)에 식(10)을 대입하면 다음과 같다.

$$I_{\lambda,p}(s_p, \Omega) = I_{\lambda,u}(s_u, \Omega) \tau_{\lambda, s_u \rightarrow s_p} \quad (11)$$

$$+ \int_{s_u}^{s_p} \frac{\partial \tau_{\lambda, s \rightarrow s_p}}{\partial s} \cdot \bar{I}_{\lambda b}(s) ds$$

본 연구에서는 식(11)의 s_u 점이 흑체벽 위에 있는 것으로 생각하여 복사에너지의 전달을 계산하기 때문에 $I_{\lambda,u} = I_{\lambda,bu}$ 가 되며, 따라서 식(11)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{\lambda,p}(s_p, \Omega) = I_{\lambda,bu} \cdot \tau_{\lambda, s_u \rightarrow s_p} \quad (12)$$

$$+ \int_{s_u}^{s_p} \frac{\partial \tau_{\lambda, s \rightarrow s_p}}{\partial s} \cdot \bar{I}_{\lambda b}(s) ds$$

한편, 식(12)는 흑체분율(blackbody fraction)을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수도 있다.

$$\bar{I}_{\lambda,p}(s_p, \Omega) = \frac{\sigma T_w^4}{\pi \Delta\lambda} F_{T_{\lambda L} - T_{\lambda U}} \tau_{\lambda, s_u \rightarrow s_p} \quad (13)$$

$$+ \int_{s_u}^{s_p} \frac{\partial \tau_{\lambda, s \rightarrow s_p}}{\partial s} \frac{\sigma T_g^4}{\pi \Delta\lambda} F_{T_{\lambda L} - T_{\lambda U}} ds$$

여기서, $\bar{I}_{\lambda,p}$, τ_{λ} , $F_{T_{\lambda L} - T_{\lambda U}}$ 는 각각 밴드 평균 복사강도, 밴드 평균 통과율 및 온도 T_g 에서 λ_L 와 λ_U 사이의 흑체분율을 나타내며 이들은 다음과 같이 정의된다.

$$\bar{I}_{\lambda,p}(s_p, \Omega) = \frac{1}{\Delta\lambda} \int_{\lambda_L}^{\lambda_U} I_{\lambda,p}(s, \Omega) d\lambda \quad (14)$$

$$\tau_{\lambda} = \frac{1}{\Delta\lambda} \int_{\lambda_L}^{\lambda_U} \tau_{\lambda}(s) d\lambda \quad (15)$$

$$F_{T_{\lambda L} - T_{\lambda U}} = \int_{\lambda_L}^{\lambda_U} \frac{\pi I_{\lambda b}}{\sigma T_g^4} d\lambda \quad (16)$$

Fig. 1은 임의의 방향 Ω 로 진행하는 복사선을 나타내며, 식(13)을 수치적으로 계산하기 위해 경로를 일정한 온도 및 성분으로 근사화 할 수 있는 미소 구간으로 나누었다. 따라서, Fig. 1을 참고하면 식(13)에 포함된 경로길이에 적분항은 다음과 같이 차분식으로 나타낼 수 있다.⁽²²⁾

$$\int_{s_u}^{s_p} \frac{\partial \tau_{\lambda, s \rightarrow s_p}}{\partial s} F_{T_{\lambda L} - T_{\lambda U}} ds \quad (17)$$

$$= \sum_{k=0}^{MM} (\tau_{i, k+1-MM} - \tau_{i, k-MM}) F_{T_{\lambda L} - T_{\lambda U}}$$

여기서, $F_{T_p \lambda_L - T_e \lambda_U}$ 는 위치 $s_{k+1/2}$ 에서 결정되는 값이다. 따라서 식(13)은 다음과 같이 근사화될 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{I}_{\lambda, p} (s_p, \Omega) &= \frac{\sigma T_w^4}{\pi \Delta \lambda} F_{T_e \lambda_L - T_e \lambda_U} \overline{\tau_{\lambda, s_w - s_p}} \\ &+ \sum_{k=0}^{MM} (\overline{\tau_{\lambda, k+1-MM} - \tau_{\lambda, k-MM}}) \frac{\sigma T_{g, k}^4}{\pi \Delta \lambda} F_{T_p \lambda_L - T_p \lambda_U} \end{aligned} \quad (18)$$

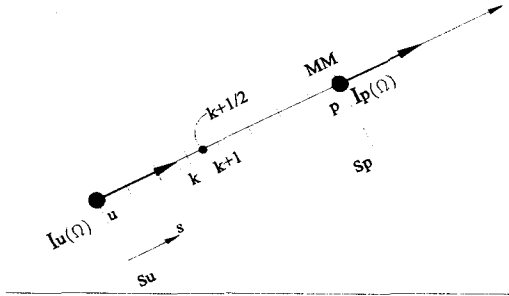


Fig. 1 Schematic diagram of radiative intensity along a path.

온도 및 성분의 변화를 z 축만의 함수로 가정할 경우 구간의 크기는 성분과 온도의 변화가 있는 z 축으로 투영하여 고려하는 것이 합당하다. 내부 온도와 성분이 일정할 경우에 식 (17)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \sum_{k=0}^{MM} (\overline{\tau_{\lambda, k+1-MM} - \tau_{\lambda, k-MM}}) &= \overline{\tau_{\lambda, MM-MM} - \tau_{\lambda, 0-MM}} \\ &= 1 - \overline{\tau_{\lambda, s_w - s_p}} \end{aligned} \quad (19)$$

만약, 여기서 매체의 온도와 성분이 일정하다고 가정할 경우 식 (18)은 참고문헌⁽¹³⁾에 나타나는 식과 같은 모양이 되는 것을 알 수 있다.

따라서, m 번째 방향 및 중심 파동수 λ_i 를 고려할 경우 식 (18)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{I}_{\lambda_i, p, m} &= \frac{\sigma T_w^4}{\pi \Delta \lambda_i} F_{T_e \lambda_i L - T_e \lambda_i U} \overline{\tau_{\lambda_i, s_w - s_p}} \\ &+ \sum_{k=0}^{MM} (\overline{\tau_{\lambda_i, k+1-MM} - \tau_{\lambda_i, k-MM}}) \frac{\sigma T_{g, k}^4}{\pi \Delta \lambda_i} F_{T_p \lambda_i L - T_p \lambda_i U} \end{aligned} \quad (20)$$

식 (20)을 이용하여 임의의 p 점에서 각각의 밴드 복사강도가 구해지면 전체 파장에 걸친 총괄 복사강도는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$I_{p, m} = \sum_{i=1}^M \bar{I}_{i, p, m} \Delta \lambda_i \quad (21)$$

3. 해석 시스템 및 조건

본 연구에서 고려한 시스템은 Fig. 2와 같이 $L \times L \times L$ ($L=1m$)의 정육면체이며, 모든 벽들은 흑체인 것으로 가정하였다. 여기서 무차원 좌표들은 각각 $x^* = x/L$, $y^* = y/L$ 및 $z^* = z/L$ 로 고려하였다.

본 연구에서는 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 매체 및 벽면의 온도가 z 축을 따라 변하는 3가지의 다른 온도 분포를 고려하였다. 각각의 경우에 있어서 복사가스는 CO_2, H_2O 및 N_2 의 조합으로 구성되어 있으며, 가스의 총 압력은 1기압 ($P_{CO_2} + P_{H_2O} + P_{N_2} = 1atm$)으로 고려하였다.

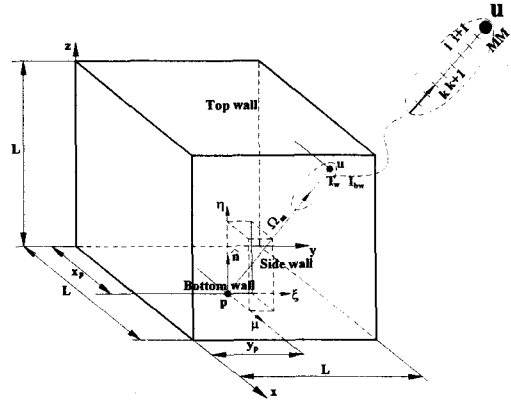


Fig. 2 Schematic drawing of the cubical enclosure.

Case 1 : 매체 및 벽의 각각 온도가 일정하게 유지된 경우로서 참고문헌⁽¹³⁾과 동일한 조건(외벽을 제외한 모든 벽 및 매체의 온도를 500K로 일정하게 외벽의 온도를 1000K로 일정하게 유지)으로 고려하였다. 여기서, 매체의 성분 분율 또한 $P_{CO_2} = 1.0$ 및 $P_{H_2O} = P_{N_2} = 0.0$ 으로 일정하게 고려하였다.

Case 2 : 매체 및 벽의 온도가 500K에서 1500K로 z 축에 따라 선형적으로 증가하는 것으로 가정하였다. 여기서, 매체의 분압도 $P_{CO_2} = 0.0$ 에서 1로 선형적으로 증가한다. 단, $P_{N_2} = 0.0$ 및 $P_{H_2O} = 1 - P_{CO_2}$.

Case 3 : 매체 및 벽의 온도를 실제 연소로의 온도 분포를 고려하여 다음과 같은 식으로 고려하였다⁽²³⁾.

$$z^* \leq z_{max}^* :$$

$$\begin{aligned} T(z^*) &= T_{max} - 3(T_{max} - T_{min}) \left(\frac{z_{max}^* - z^*}{z_{max}^*} \right)^2 \\ &+ 2(T_{max} - T_{min}) \left(\frac{z_{max}^* - z^*}{z_{max}^*} \right)^3 \end{aligned} \quad (22a)$$

$$z_{max}^* \leq z^* \leq 1 :$$

$$\begin{aligned} T(z^*) &= T_{max} - 3(T_{max} - T_e) \left(\frac{z^* - z_{max}^*}{1 - z_{max}^*} \right)^2 \\ &+ 2(T_{max} - T_e) \left(\frac{z^* - z_{max}^*}{1 - z_{max}^*} \right)^3 \end{aligned} \quad (22b)$$

여기서, z_{max}^* 는 시스템 내에서 최대의 온도를 갖는 z 위치로서 본 연구에서는 $z_{max}^* = 0.5$ 로 취하였다. 또한, T_e 는 $z^* = 1$ 에서의 온도로서 $T_e = 1200 K$ 로, T_{min} 및 T_{max} 는 최대 및 최소 온도로서 각각 500K 및 1500K로 하였다. 여기서, 매체의 분압 P_{CO_2} 는 다음 수식과 같이 변하는 것으로 가정하였다.

$$z^* \leq z_{max}^* :$$

$$\begin{aligned} P_{CO_2}(z^*) &= \frac{1}{3} \\ &- \left(\frac{z_{max}^* - z^*}{z_{max}^*} \right)^2 + \frac{2}{3} \left(\frac{z_{max}^* - z^*}{z_{max}^*} \right)^3 \end{aligned} \quad (23a)$$

$$z^*_{max} \leq z^* \leq 1 :$$

$$P_{CO_2}(z^*) = \frac{1}{3} \quad (23b)$$

그리고, $P_{H_2O} = 2P_{CO_2}$, $P_{N_2} = 1 - P_{CO_2} - P_{H_2O}$ 로 하였다.

이와 같은 각 case 별 온도 및 농도 분포를 그림으로 나타내면 Fig 3에 나타낸 바와 같다.

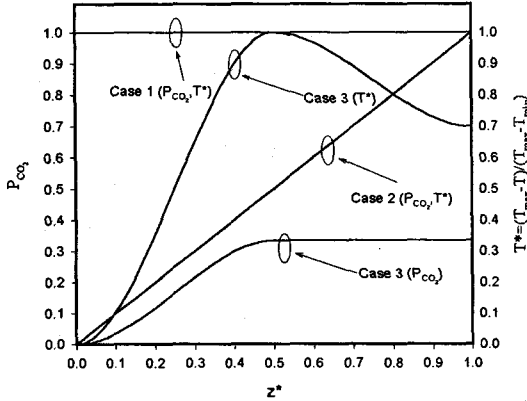


Fig. 3 Profiles of concentration and temperature along the z axis.

4. 수치해석 결과 및 고찰

복사강도가 구해진 경우 복사열유속과 평균복사강도는 각각 다음과 같이 계산될 수 있으며, 이들은 T_{max} 로 무차원화하여 나타내었다.

$$q_w^* = \frac{q_w}{\sigma T_{max}^4} \quad (24)$$

$$= \frac{1}{\sigma T_{max}^4} \sum_{m=1}^M \bar{I}_{p,m} \eta_m w_m$$

$$G^* = \frac{\pi G}{\sigma T_{max}^4} \quad (25)$$

$$= \frac{1}{4\sigma T_{max}^4} \sum_{m=1}^M \bar{I}_{p,m} w_m$$

여기서, 열유속은 벽으로부터 나가는 방향을 양의 값으로 정의하였다.

이러한 계산은 복사열유속의 경우 아래벽, 윗벽 및 측면벽의 중심선들을 따라 계산되었으며, 평균복사강도의 경우에는 z축을 따라 매체의 중심을 통과하는 선을 따라 계산하였다. 각 case 별 대표적인 계산 소요시간은 Pentium III 733MhzPC를 이용하였을 때 약 230시간 정도 소요되었다. Case 1은 본 연구에서 계산하고 있는 Curtis-Godson법과 T_{60} quadrature set의 적용

하여 얻은 해의 정확도를 확인하기 위하여 참고 문헌⁽¹³⁾에서 발표된 결과를 재현하기 위하여 고려되었다. Table 1 및 2는 본 연구에서 비균일 매체를 고려하여 해석하고 있는 Curtis-Godson법으로 해석한 열유속 및 평균복사강도 값들이 균일한 매체를 고려하여 구한 해와 잘 일치하고 있는 것을 보여주고 있다. 복사열유속의 경우에는 참고문헌⁽¹³⁾의 결과에 대한 오차가 0.02% 이하로 나타났으며, 평균복사강도인 경우에는 최대오차가 0.6% 정도로 나타났다. 이러한 결과로부터 본 연구에서 고려하고 있는 Curtis-Godson법과 T_{60} quadrature set의 적용은 정확도가 높은 해

를 구하는데 사용할 수 있다는 결론을 내렸다.

Table 1 Top and bottom wall heat flux distributions.

x^*	bottom wall heat flux		top wall heat flux	
	present	Ref[13]	present	Ref[13]
0.00	9.37509E-01	9.37509E-01	1.48265E-01	1.48269E-01
0.05	9.37509E-01	9.37509E-01	1.55611E-01	1.55615E-01
0.10	9.37509E-01	9.37509E-01	1.63750E-01	1.63754E-01
0.15	9.37509E-01	9.37509E-01	1.70777E-01	1.70781E-01
0.20	9.37509E-01	9.37509E-01	1.77227E-01	1.77232E-01
0.25	9.37509E-01	9.37509E-01	1.83201E-01	1.83206E-01
0.30	9.37509E-01	9.37509E-01	1.87733E-01	1.87738E-01
0.35	9.37509E-01	9.37509E-01	1.91484E-01	1.91488E-01
0.40	9.37509E-01	9.37509E-01	1.94508E-01	1.94428E-01
0.45	9.37509E-01	9.37509E-01	1.96096E-01	1.96101E-01
0.50	9.37509E-01	9.37509E-01	1.96509E-01	1.96514E-01
0.55	9.37509E-01	9.37509E-01	1.96096E-01	1.96101E-01
0.60	9.37509E-01	9.37509E-01	1.94508E-01	1.94024E-01
0.65	9.37509E-01	9.37509E-01	1.91484E-01	1.91488E-01
0.70	9.37509E-01	9.37509E-01	1.87733E-01	1.87738E-01
0.75	9.37509E-01	9.37509E-01	1.83201E-01	1.83206E-01
0.80	9.37509E-01	9.37509E-01	1.77227E-01	1.77232E-01
0.85	9.37509E-01	9.37509E-01	1.70777E-01	1.70781E-01
0.90	9.37509E-01	9.37509E-01	1.63750E-01	1.63577E-01
0.95	9.37509E-01	9.37509E-01	1.55611E-01	1.55615E-01
1.00	9.37509E-01	9.37509E-01	1.48265E-01	1.48269E-01

Table 2 Side wall flux and average intensity distributions.

z^*	side wall heat flux		average intensity	
	present	Ref[13]	present	Ref[13]
0.00	4.68737E-01	4.68747E-01	5.31236E-01	5.31246E-01
0.05	3.94059E-01	3.94069E-01	4.53738E-01	4.53024E-01
0.10	3.57148E-01	3.57157E-01	4.11710E-01	4.11794E-01
0.15	3.23905E-01	3.23913E-01	3.74557E-01	3.74509E-01
0.20	2.93115E-01	2.93123E-01	3.41487E-01	3.41119E-01
0.25	2.64564E-01	2.64570E-01	3.09803E-01	3.09816E-01
0.30	2.38916E-01	2.38922E-01	2.82137E-01	2.82230E-01
0.35	2.15210E-01	2.15215E-01	2.58255E-01	2.57611E-01
0.40	1.93724E-01	1.93729E-01	2.36246E-01	2.36236E-01
0.45	1.74406E-01	1.74410E-01	2.17577E-01	2.17115E-01
0.50	1.57062E-01	1.57066E-01	2.03853E-01	2.02546E-01
0.55	1.41533E-01	1.41536E-01	1.85990E-01	1.86094E-01
0.60	1.27746E-01	1.27749E-01	1.73647E-01	1.73582E-01
0.65	1.15236E-01	1.15239E-01	1.62883E-01	1.62743E-01
0.70	1.04093E-01	1.04096E-01	1.53072E-01	1.53031E-01
0.75	9.41356E-02	9.41380E-02	1.44721E-01	1.44637E-01
0.80	8.53385E-02	8.53407E-02	1.37523E-01	1.37317E-01
0.85	7.73403E-02	7.73422E-02	1.30489E-01	1.30565E-01
0.90	7.02038E-02	7.02056E-02	1.24717E-01	1.24751E-01
0.95	6.41308E-02	6.41324E-02	1.20002E-01	1.19751E-01
1.00	5.77781E-02	5.77795E-02	1.15068E-01	1.15093E-01

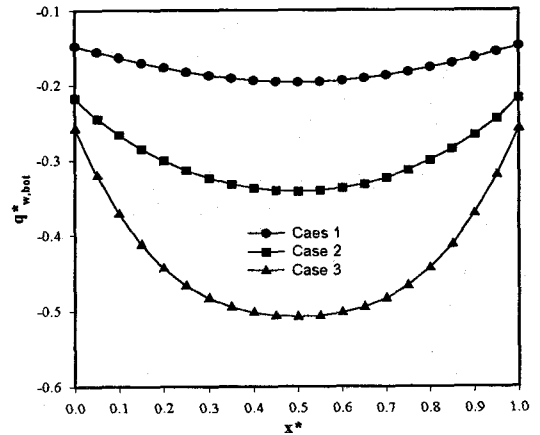


Fig. 4 Net bottom wall heat fluxes ($z^* = 0.0, y^* = 0.5$).

Fig. 4는 아랫벽($z^*=0.0$)에서의 무차원 열유속을 나타내고 있다. Case 1의 경우 고온의 윗벽에서 방출된 복사에너지가 매체를 통하여 긴 경로를 통과하여 아랫벽으로 전달되므로 작은 열유속으로 나타나는 것을 알 수 있다. 반면에 Case 3의 경우에는 고온의 영역이 아랫벽에 가깝게 분포하므로 고온가스 및 흑체벽에서 방출된 복사에너지가 아랫벽으로 Case 1보다 많이 입사되어서 복사열유속은 크게 되는 것을 알 수 있다. 온도 분포가 거의 중간적인 크기를 보이는 Case 2의 경우는 Case 1과 Case 3의 중간적인 복사열유속 분포를 나타내고 있다.

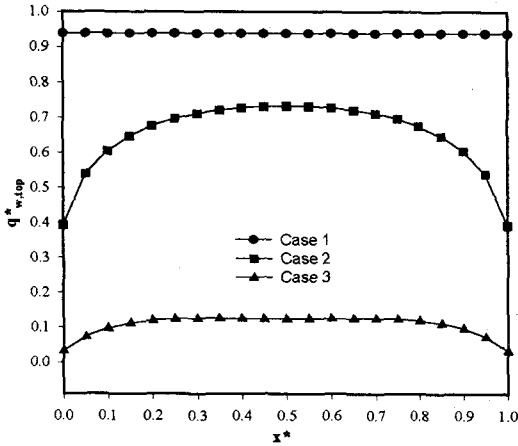


Fig. 5 Net top wall heat fluxes ($z^*=1.0, y^*=0.5$).

Fig. 5는 윗벽($z^*=1.0$)에서의 복사열유속을 나타내고 있다. Case 1의 경우 윗벽이 극단적으로 뜨거우므로 방출되는 복사열유속이 가장 크게 나타나고 있으며 이는 이론적 엄밀해 $q_{w, hot} = \sigma(T_{max}^4 - T_{min}^4) = 0.9375$ 와 0.00096%의 오차를 갖는다. Case 3의 경우에는 Case 1 및 2의 경우보다 윗벽의 온도가 상대적으로 낮기 때문에 윗벽으로 부터의 복사열유속은 작다. 또한 Case 2인 경우 $x^*=0.5$ 일 때 가장 큰 열유속 값을 가지나, Case 3의 경우는 $x^*=0.5$ 부근에서 열유속 값이 오히려 감소하는 경향을 갖는다. 이는 Case 3의 경우 온도가 매체 내부에서 최고값을 가지므로 매체에 더 많은 복사에너지가 흡수되어 이러한 결과를 보인다고 할 수 있다.

Fig. 6은 측면벽($y^*=0.5$)에서의 복사열유속을 나타내고 있다. Case 1의 경우 z^* 가 증가할수록 열유속이 증가함을 알 수 있다. Case 2의 경우에는 입사되는 열유속이 증가하다가 z^* 가 커지면서 오히려 벽에서 열유속이 방출됨을 알 수 있다. Case 3의 경우는 저온의 영역에서는 벽이 에너지를 흡수하지만 고온의 영역으로 갈수록 벽에서 방출하는 에너지가 증가하여 $z^*=0.5$ 일 때 복사열유속이 가장 많이 방출되다가 온도가 떨어지면서 다시 감소하는 것을 나타내고 있다.

Fig. 7에는 매체내부에서의 무차원 평균복사강도를 아랫벽의 중심으로부터 z^* 축을 따라 변하는 경향을 나타내고 있다. Case 2와 Case 3은 z^* 의 증가에 따라 단조 증가를 하나, 매체의 온도가 증가하다가 감소하는 Case 3의 경우에는 온도 분포와 비슷한 양상으로 평균복사강도 분포

를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이러한 평균복사강도 값은 복사에너지 생성량의 크기와 비례한다는 것을 알 수 있다.

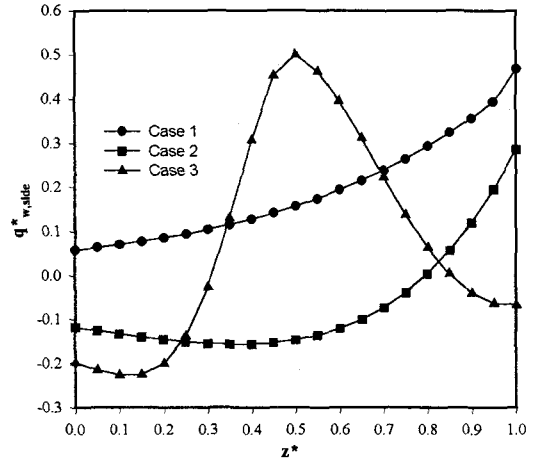


Fig. 6 Net side wall heat fluxes ($x^*=0.5, y^*=0.5$).

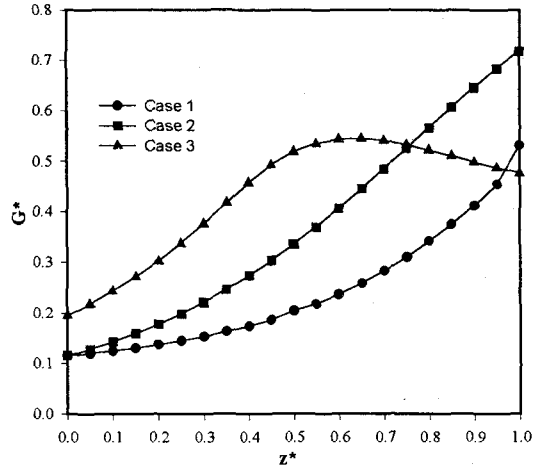


Fig. 7 Average intensities ($x^*=0.5, y^*=0.5$).

5. 결론

본 연구에서는 비균일 농도 및 온도 분포를 갖는 비회색 혼합가스로 충전된 흑체벽을 가진 정육면체 내에서의 복사열전달에 대한 해를 구하였으며, 매체의 온도 및 분압이 일정한 경우, 온도와 분압이 선형적으로 증가하는 경우, 실제 연소로 내의 온도 및 분압을 고려한 경우를 각각 고려하여 해를 구하였다. 본 연구에서 고려한 모든 계산은 불균일한 온도 및 분압을 고려하여 Curtis-Godson 법을 이용하였으며 또한 계산 시간 및 정확도를 고려하여 T_{60} (28800개의 각도구역) quadrature set⁽¹⁵⁾을 이용하였다. 일정한 온도 및 분압을 갖는 경우에 대하여 기존에 발표된 해석 결과와 비교하였을 때 매우 잘 일치하는 것을 확인하였다. 이러한 결과들은 다차원공간 내에서 공학적으로 복사열전달을 해석하는 도구의 기

준자료로 활용될 수 있을 것이다.

후기

본 연구는 한국과학재단의 지원으로 설립된 연소기술연구센터(CERC)의 지원에 의해 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1)Hottel, H.C. and Sarofim, A.F., 1967, Radiative Transfer, McGraw-Hill.
- (2)Howell, J.R. and Perlmutter, M., 1964, "Monte Carlo Solution of Thermal Transfer through Radiant Media Between Gray Walls," ASME Journal of Heat Transfer, Vol. 86, No. 1, pp. 116-122.
- (3)Menguc, M.P. and Viskanta, R., 1985, "Radiative Transfer In Three-Dimensional Rectangular Enclosures Containing Inhomogeneous, Anisotropically Scattering Media" J. of Quant. Spectro. and Radiative Trans., Vol. 33, No. 6, pp. 533-549.
- (4)Lockwood, F.C. and Spalding, D.B., 1971, "Prediction of a Turbulent Duct Flow with Significant Radiation," Proc. Thermodynamics Colloquium.
- (5)Carlson, B.G. and Lathrop, K.D., 1968, "Transport Theory-The Method of Discrete Ordinates," computing methods in reactor physics, Greenspan, H., Kelber, C. N., and Okrent, D. eds., Gordon and breach, New York.
- (6)Fiveland, W.A., 1984, "Discrete-Ordinates Solutions of the Radiative Transport Equation for Rectangular Enclosures," ASME Journal of Heat Transfer, Vol. 106, pp. 699-706.
- (7)Kim, T.K. and Lee, H., 1988 "Effect of Anisotropic Scattering on Radiative Heat Transfer in Two-Dimensional Rectangular Enclosures," Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 31, No. 8, pp. 1711-1721.
- (8)Raithby, G.D. and Chui, E.H., 1990, "A Finite-Volume Method for Predicting a Radiant Heat Transfer in Enclosure with Participating Media," ASME J. Heat Transfer, Vol. 112, pp. 415-423.
- (9)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.
- (10)Cheung, K.B. and Song, T.H. 1997, "Discrete Ordinates Interpolation Method for Numerical Solution of Two-Dimensional Radiative Transfer Problems," Numerical Heat Transfer, Part B, Vol. 32, pp. 107-125.
- (11)Seo, S.H. and Kim, T.K., 1998, "Study on interpolation schemes of the discrete ordinates interpolation method for 3-D Radiative Transfer with Nonorthogonal Grids," ASME J. of Heat Transfer, Vol. 120, pp. 1091-1094.
- (12)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 international Journal, Vol. 12, No. 3, pp. 514-523.
- (13)Kim T.K., Park W.H. and Lee C.H., 2001, "Radiative Transfer Solutions for Pure Absorbing Gray and Nongray Gases within a Cubical Enclosure," KSME International Journal, accepted for publication
- (14)Lockwood, F.C. and Shah, N.G., 1981, "A New Radiation Solution Method for Incorporation in General Combustion Predictions Procedure", in 18th Symposium on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburg, PA, pp. 1405-1414.
- (15)Thurgood, C.P., Pollard, A. and Becker, H.A., 1995 "The T_N Quadrature Set for the Discrete Ordinates Method," ASME J. of Heat Transfer, Vol. 117, pp. 1068-1070.
- (16)Godson, W. L., 1953, The evaluation of infrared radiation fluxes due to atmospheric water vapor, Quarterly Journal of Royal Meteorological Society, Vol. 79, pp 367-379.
- (17)Grosshandler W.L., 1980, Radiative Heat Transfer in Nonhomogeneous Gases: A Simplified Approach, ASME J. of Heat Transfer, Vol. 23, pp. 1068-1070.
- (18)Siegel, R. and Howell, J. R., 1992, Thermal Radiation Heat Transfer, McGraw-Hill Book Co., 3rd Ed.
- (19)Modest, M.F., 1993, Radiative Heat Transfer, McGraw-Hill, Inc..
- (20)Zhang, L., Soufiani, A. and Taine, J., 1988, "Spectral Correlated and Noncorrelated Radiative Transfer in a Finite Axisymmetric System Containing an Absorbing and Emitting Real Gas-Particle Mixture," Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 18, pp. 2261-2272.
- (21)Soufiani, A. and Taine, J., 1989, "Experimental and Theoretical Studies of Combined Radiative and Convective Transfer in CO_2 and H_2O Laminar Flows," Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 32, No. 3, pp. 447-486.
- (22)Kim, T.K., Menart, J.A. and Lee, H., 1991, "Nongray Radiative Gas Analyses Using the S-N Technique," ASME J. of Heat Transfer, Vol. 113, pp. 946-952.
- (23)Kim, T.K., 1990, "Radiation and Combined Mode Heat Transfer Analyses in Absorbing, Emitting, and Mie-Anisotropic Scattering Media Using The S-N Discrete Ordinates Method," Ph. D Thesis, University of Minnesota.
- (24)N.Selcuk, 1985, "Exact Solution for Radiative Heat Transfer in Box-Shaped Furnaces," ASME J. of Heat Transfer, Vol. 107, pp648-655.