

회색가스 재조합에 의한 좁은밴드 회색가스가중합법을 이용한 3차원 복사열전달 해석 연구

박원희* · 김태국† · 손봉세**

3-Dimensional Radiative Transfer Analysis by Using the Narrow Band Based WSGGM with a Gray Gas Regrouping Technique

Won-Hee Park, Tae-Kuk Kim and Bong-Sei Son

Key Words : WSGGM(회색가스가중합법), Gray gas regrouping(회색가스 재조합), Combustion gas(연소가스)

Abstract

The narrow band-averaged transmissivity of CO₂-H₂O mixtures is expressed by multiplying the transmissivities of CO₂ and H₂O. Applying the multiplication property of narrow band transmissivities for gas mixtures of CO₂-H₂O, the number of gray gases, required for accurate representation of the absorption characteristics by using the narrow band based WSGGM, is significantly increased. To reduce the computational loads by reducing the number of gray gases, we propose a gray gas regrouping process where the gray gases used for the WSGGM are regrouped into a specified number of groups according to the magnitudes of absorption coefficients. To evaluate the proposed WSGGM for gas mixtures, the radiative transfer problems through three-dimensional gas media are considered. The radiative source terms and the radiative heat fluxes obtained by using the proposed method are fairly well compared to those obtained by using the SNB model. The regrouping technique results in an excellent computational efficiency with minor loss of accuracy.

	기호설명	s	거리 [m]
T	온도 [K]	X	물분율
I	복사강도 [W/m ² sr]	x	x 좌표
κ	흡수계수 [m ⁻¹]	W	총괄 가중치
κ_{io}	흡수계수 모델 상수[K ² /atm]	$W(\eta)$	좁은밴드 가중치
κ_p	플랑크평균흡수계수 [m ⁻¹]	y	y 좌표
L	통과거리 [m]	z	z 좌표
M	회색가스 수		
N_i	i 번째 그룹의 회색가스 수	Greek symbols	
P	대기압 [atm]	α_i	흡수계수 모델 상수[K]
q	복사열유속 [W/m ²]	δ_l	l 방향의 법선단위벡터
		δ_o	복사전달 방향의 단위방향벡터
		η	단색
		μ	x 방향코사인
		ξ	y 방향코사인
		ζ	z 방향코사인

† 중앙대학교 기계공학부

E-mail : kimtk@cau.ac.kr
TEL : (02)820-5282 FAX : (02)814-9476

* 중앙대학교 대학원

** 경원전문대학교 소방시스템과

Δ 밴드두께
 τ 통과율

Subscripts

i i 번째 회색가스
 b 흑체
 CO_2 이산화탄소
 mix 혼합가스
 new 재조합
 ref 참조 상태

superscript

- 좁은밴드 평균

1. 서론

고온의 연소 장치에서 전체열전달량 중에 복사열전달이 차지하는 양은 매우 크므로 고온의 매체의 열전달을 고려할 경우 복사열전달의 정확한 해석은 필수적이다. 이러한 복사열전달을 해석하기 위하여는 복사열전달방정식을 해석하는 기법과 복사물성치를 모델링하는 기법이 필요로 한다. 복사물성치는 파장, 온도, 분압 등의 함수이며, 특히 파장에 따른 급격한 변화는 복사물성치의 예측을 매우 어렵게 한다. 선별법^(1,2)은 복사에 관여하는 모든 복사선을 고려하는 방법으로 매우 정확한 결과를 보이지만 이 방법은 너무 많은 계산량을 요구하므로 공학적인 용도로는 사용되기 어려우므로 근사적인 방법들이 많이 제시되고 있다. 한정된 밴드 구간을 평균하여 복사특성을 나타내는 밴드 모델이 있으며, 이런 밴드 모델은 그 밴드 두께에 따라서 좁은밴드모델^(3,4)과 넓은밴드모델⁽⁵⁾로 나뉘어 질 수 있다. 이와는 달리 파장에 대한 고려가 필요 없는 총괄 스펙트럼 모델도 있다. 총괄스펙트럼 모델은 밴드 모델 보다 계산량이 작은 것이 장점이지만, 비회색 입자나 비회색 경계조건에는 이용할 수 없는 단점이 있다. 이러한 모델 중 회색가스가중합법은 비교적 간단하며 높은 정확도를 보이는 모델이다. Hottel and Sarofim⁽⁶⁾이 제안하였으며, Modest⁽⁷⁾는 이 방법이 임의의 복사열전달방정식에 쉽게 적용이 가능한 것을 증명하바 있으며, Smith et al.⁽⁸⁾의 모델링 결과가 많이 사용되고 있다. Kim and Song^(9,10)는 회색가중합법을 좁은 밴드에 적용하였다. 이러한 좁은 밴드에서의 회색가스가중합법은 임의의 성분을 가지는 혼합가스에 적용⁽¹¹⁾되었으며, 계산시간을 단축하기 위한 회색가스 재조합⁽¹²⁾도 시도되어 좋은 결과를 도출하였다. 이

러한 계산들은 1 차원 시선을 통과한 후의 복사강도를 비교함으로써 검증되었다.

본 연구에서는 회색가스 재조합 시 각 그룹의 평균 흡수계수를 구하는데 플랑크 평균흡수계수를 도입하였다. 이 방법을 이용한 재조합된 회색가스가중합법을 이용하여 3 차원 밀폐공간에서의 결과를 구하였으며 이를 기존 해⁽¹³⁾와 비교함으로써 본 모델 및 데이터 베이스를 검증하고자 한다.

2. 혼합가스에 대한 회색가스가중합법

2.1 혼합가스에 대한 회색가스가중합법 표현
 이산화탄소-수증기 혼합가스에서 각각의 좁은밴드 통과율은 상관되어 있지 않다는 것이 널리 인지되어 있는 사실이다^(14,15). 그러므로 혼합가스의 통과율은 각각의 가스의 좁은밴드 통과율을 곱함으로써 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁽¹⁶⁾

$$\bar{\tau}_{mix}(\eta) = \bar{\tau}_{CO_2}(\eta) \cdot \bar{\tau}_{H_2O}(\eta) \tag{1}$$

이산화탄소-수증기 혼합가스의 통과율의 회색가중합 표현은 다음과 같다.^(11,12)

$$\bar{\tau}_{mix}(\eta) = \sum_{ic=1}^{M_{CO_2}} \sum_{ih=1}^{M_{H_2O}} W_{ic,CO_2}(\eta) \times W_{ih,H_2O}(\eta) e^{-\left(\kappa_{ic,CO_2} + \kappa_{ih,H_2O}\right)} \tag{2}$$

여기서 $W_i(\eta)$ 는 i 번째 회색가스의 파장별 가중치이며, M 은 수증가스의 회색가스의 수이고, k_i 는 i 번째 회색가스의 흡수계수를 나타낸다. 또한 식 (2)에서 보인 좁은밴드 통과율은 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$\bar{\tau}_{mix}(\eta) = \sum_{i=1}^{M_{mix}} W_{i,mix}(\eta) e^{-k_i \max L} \tag{3}$$

참고로 혼합가스에 대한 회색가스의 수 M_{mix} 는 $M = M_{CO_2} = M_{H_2O}$ 일 때 M^2 이다. 식 (2)와 (3)을 비교하면 혼합가스의 파장별 가중치 $W_{mix}(\eta)$ 와 흡수계수는 다음과 같이 표현될 수 있는 것을 알 수 있다.

$$W_{mix}(\eta) = W_{CO_2}(\eta) \times W_{H_2O}(\eta) \tag{4}$$

$$\kappa_{mix} = \kappa_{CO_2} + \kappa_{H_2O} \tag{5}$$

총괄 가중치는 혼합가스의 파장별 가중치의 플랑크평균 형태로 다음과 같이 구하여 질 수 있다.

$$W_{mix} = \frac{\sum_{\eta} W_{mix}(\eta) \Delta \eta}{\sum_{\eta} I_b(\eta) \Delta \eta} \tag{6}$$

여기서 $\Delta \eta$ 는 좁은 밴드 모델의 밴드두께를 나타낸다. Kim and Song⁽⁹⁾은 수증기에서 흡수계수를 다양한 형태의 온도 및 압력에 대한 함수관계를 검토하였으며, 본 연구에서는 정확한 결과를 보이

는 다음과 같이 형태의 흡수계수를 이용하여 혼합 가스의 흡수계수를 표현하였다.

$$\kappa_{mix} = \kappa_{i_0, CO_2} \frac{e^{-\alpha_{i, CO_2}/T}}{T^2} PX_{CO_2} + \kappa_{i_0, H_2O} \frac{e^{-\alpha_{i, H_2O}/T}}{T^2} PX_{H_2O} \quad (7)$$

여기서 k_{i_0} , α_i 는 i 번째 회색가스의 모델링 상수를 나타내며 P , T , X 는 각각 압력, 온도, 몰분율을 나타낸다.

2.2 회색가스 재조합

좁은밴드 회색가스가중합법을 이용하여 연소 혼합 가스의 복사물성을 나타내기 위해서는 많은 수의 회색가스 수가 필요하다. Park and Kim⁽¹²⁾은 정확도를 유지하며 컴퓨터 계산 시간을 줄이기 위하여 회색가스 재조합이 제안하였다. 이 방법은 비슷한 크기를 갖는 회색가스의 흡수계수를 그룹으로 나누어서 고려하는 방법이다. 이때 식 (7)과 같이 회색가스는 온도 및 각 가스의 몰분율의 함수이므로 재조합을 위한 흡수계수는 참조상태의 온도 및 몰분율에 의한 값을 이용하게 된다. 재조합된 i 번째 그룹의 그룹의 과장별 가중치는 그룹에 속하여 있는 모든 가중치를 합하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$W_{i, new}(\eta) = \sum_{j=1}^{N_i} W_{j, mix}(\eta), \quad (8)$$

여기서 N_i 는 i -번째 그룹에 속하게 되는 회색가스의 수를 나타내며 하첨자 new 는 재조합 과정 이후의 값을 나타내고 있다.

i 번째 그룹의 흡수계수 $\kappa_{i, new}$ 는 플랑크평균 형태의 흡수계수를 이용함으로 구할 수 있다. i 번째 그룹의 흑체에너지는 $W_{i, new}$ 로 나타내어지며 $\kappa_{i, new}$ 는 해당 그룹에 속하여있는 각각의 흡수계수의 가중치의 가중된 평균으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\kappa_{i, new} = \frac{\sum_{j=1}^{N_i} \kappa_{j, mix} W_{j, mix}}{W_{i, new}} \quad (9)$$

2.3 회색가스 가중합법의 상수

모델 방사율의 오차로 표현되는 목적함수를 최소화함으로 최적의 상수 κ_{i_0} , α_i 및 $W_i(\eta)$ 를 구할 수 있다. 목적함수는 주어진 온도 및 통과거리에 대한 참방사율값과 모델방사율값의 오차의 합으로 나타낼 수 있다. 참방사율은 좁은밴드모델⁽⁴⁾을 이용하여 구하였으며, 좁은밴드 상수들은 Soufiani and Taine⁽¹⁷⁾의 값들을 이용하였다. 온도 및 통과 거리는 각각 300-2500K and 0.01-10.0m 를 고려하였다. 고려된 과장 범위는 150cm^{-1} 에서 9300cm^{-1} 이며, 각각의 밴드의 두께는 25cm^{-1} 이다. 6 개의 k_{i_0}

와 5 개의 α_i 가 고려되었으며, 이들의 조합으로 30 개의 회색가스가 조합될 수 있다. 회색가스가중합법의 상수들을 구하는 자세한 과정은 참고문헌⁽¹⁰⁾를 참고하기 바란다.

이산화탄소의 가중치는 X_{CO_2} 에 의존하지 않고, 일반적인 탄화수소연료에 의한 연소가스에서 X_{CO_2} 는 일반적으로 약 0.1 이므로, 과장별가중치는 10%CO₂-90%N₂ (투명한)가스에서 구하여 졌다. 그러나 수증기에 대한 과장별가중치는 10⁻², 10⁻¹, 0.4, 0.66 및 1.0 의 몰분율에서 구하여졌다. 이산화탄소-수증기 혼합가스의 과장별 가중치는 식 (4)와 같이 각각의 과장별가중치를 곱하므로 구할 수 있으며, 총괄가중치는 식(6)에서 구할 수 있다. 이 총괄 가중치는 각각의 온도(300K-2500K, 100K 간격)과 수증기의 몰분율에 따라 데이터베이스화 될 수 있다. 임의의 상태에서 총괄가중치를 구하기 위하여서는 온도와 수증기의 몰분율이 필요하게 되며, 온도와 X_{H_2O} 의 선형 보간으로 쉽게 구할 수 있다.

2.4 복사열전달방정식

흡수, 방출 및 비산란 매체에서의 i 번째 회색가스에서의 총괄복사열전달 방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{dI_i}{ds} = \kappa_i W_i I_b - \kappa_i I_i, \quad (10)$$

여기서, W_i 는 i 번째 회색가스의 총괄가중치를 나타낸다. 흑체벽에 대해서는 다음과 같은 경계조건이 성립된다.

$$I_i = W_i I_b. \quad (11)$$

식 (10)은 DOM⁽¹⁸⁾, DOIM⁽¹⁹⁾과 같은 복사열전달 방정식 해석기법을 통하여 해석될 수 있다. 실제 c 총괄복사강도를 구하기 위하여서는 각각의 회색가스 그룹의 재조합된 흡수계수에 대하여 해석되어야 한다. 즉 복사열전달 방정식을 M_{new} 번 해석되어야 하는 것이다. 이 때 M_{new} 는 재조합후의 회색가스의 수를 나타낸다. 최종적으로 복사강도는 모든 회색가스의 복사강도를 아래와 같이 단순히 합하므로 구할 수 있다.

$$I = \sum_{i=1}^{M_{new}} I_i \quad (12)$$

복사생성항은 다음과 같이 구하여질 수 있다.

$$-\nabla \cdot \mathbf{q} = \sum_{i=1}^{M_{new}} \kappa_i \left(\int_{4\pi} I_i d\Omega - 4W_i \sigma T^4 \right). \quad (13)$$

l 방향의 복사열유속은 다음과 같이 구하여질 수 있다.

$$q_l = \int_{4\pi} \delta_l \cdot \delta_o I d\Omega = \sum_{i=1}^{M_{new}} \int_{4\pi} \delta_l \cdot \delta_o I_i d\Omega \quad l=x, y, \text{ or } z \quad (14)$$

여기서 δ_i 는 i 방향의 법선벡터를 나타내며, δ_o 는 복사열전달의 진행방향을 나타낸다.

3. 수치해석 및 결과

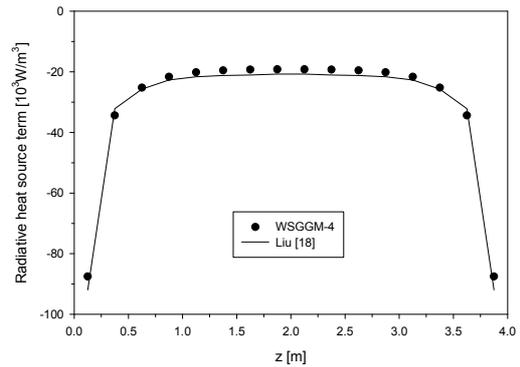
Liu⁽¹³⁾는 2 m×2 m×4 m 의 삼차원 직육면체에 순수 및 혼합가스로 채워진 경우에 복사열전달 해석을 수행하였다. 이 직육면체의 모든 벽은 300K 의 흑체이며, 대기압 상태의 순수 또는 혼합 가스가 고려되었다. 여기서 복사열전달방정식을 해석하기 위하여 T4 quadrature 를 채용한 복사선 추적법이 이용되었으며, 비회색특성은 좁은 밴드모델⁽⁴⁾로 모델링되었다. 회색가스가중합법을 검증하기 위하여 Liu⁽¹³⁾의 결과들이 비교해로 이용되었다. 본 연구에서는 복사열전달방정식을 해석하기 위하여 DOM 이 채용되었으며, 기준해와 같은 계산조건을 위하여 T4 quadrature 를 채택하였다.

3.1 등온의 순수 수증기 매체 (case 1)

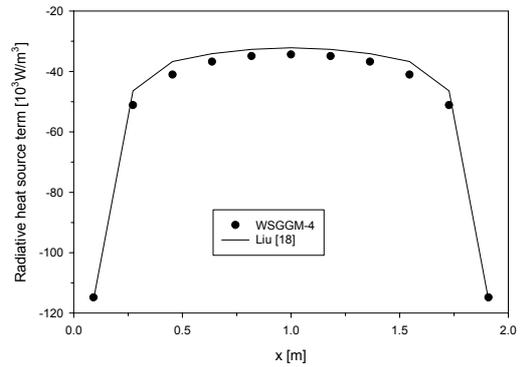
case 1 의 경우에는 직육면체에 순수한 수증기가 1000K 의 균일한 층만되었을 경우이다. 격자는 Liu⁽⁴⁾의 경우와 같이 균일한 11×11×25 의 격자가 고려되었다. 재조합을 위한 의 온도 및 분압 T_{ref} , $x_{CO_2,ref}$ 및 $x_{H_2O,ref}$ 는 각각 1000K, 0.0 와 1.0 으로 설정하였다. Fig. 1,2 는 case 1 에서의 회색가스 4 개로 재조합된 WSGGM-4 (2 m, 1 m, z)와 (x, 1 m, 4 m)에서의 복사생성향과 (1 m, 1 m, z)와 (x, 1 m, 0.375 m)에서의 복사열유속을 기준해와 비교하고 있다. WSGGM-4 를 이용할 경우 복사열유속의 평균오차는 0.5%보다 적었고 복사생성향의 경우에는 평균오차가 복사열유속의 오차보다 약간 커지지만 7.3%는 넘지 않았다. WSGGM-4 는 등온의 매체의 경우 복사생성향 및 복사열유속을 매우 잘 예측하는 것을 알 수 있었다.

3.2 수증기-질소 등온 및 불균일 성분분포매체 (case 2)

두번째 경우에는 매체의 온도는 첫번째와 마찬가지로 1000K 의 균일하게 유지되지만, 성분이 변하는 경우이다. 고려된 매체의 수증기의 물분율은 z 방향에 따라 포물선 함수($z=0,4m$ 일 때 0, $z=2m$ 일 때 1.0)로 주어지며, 나머지는 투명한 기체인 질소인 매체이다. 해석을 위한 격자는 Liu 와 마찬가지로 균일한 11×11×25 로 계산을 수행하였다. 재조합을 위한 참조 상태의 온도 및 분압 T_{ref} , $x_{CO_2,ref}$ 및 $x_{H_2O,ref}$ 는 각각 1000K, 0.0 와 0.5 로 설정하였다. Fig. 4 에서는 WSGGM-7($M_{new}=7$)을 이용하여 구한 직육면체의 중심(1 m, 1 m, z)과 (x, 1 m, 0.24 m)를 따라서 구하여진 복사생성향과 기준해와 비교하고 나타내었다. Fig. 5 는 (2 m, 1 m, z)와 (x, 1 m, 4 m)를 따른 복사열유속을 나타내고 있다. 본 case 의 경우에 재조합된 회색가스를 7 개이상 사용하여도

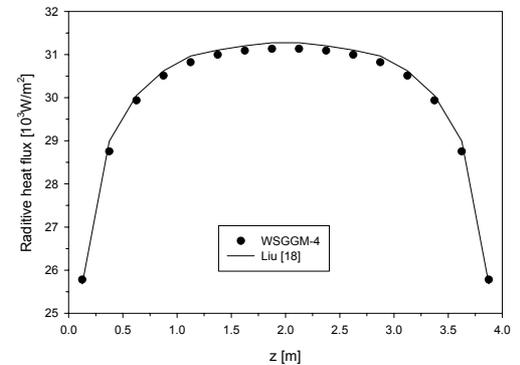


(a) Radiative heat source term along (1m, 1m, z)

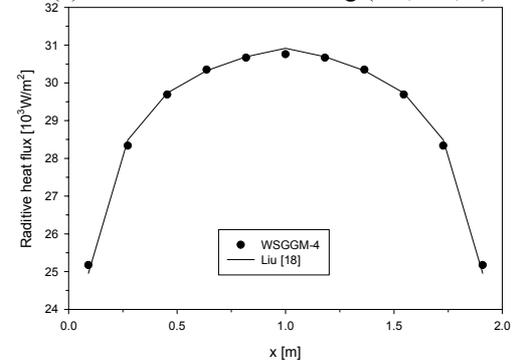


(b) Radiative heat source term along (x, 1m, 0.375m)

Fig. 1 Radiative heat source terms for the 3-D enclosure filled with an isothermal and homogeneous pure H₂O gas (case 1).

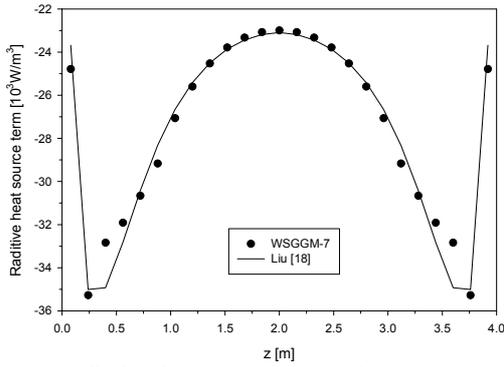


(a) Radiative heat flux along (2m, 1m, z)

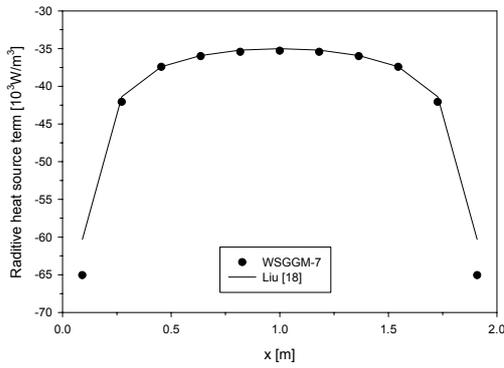


(b) Radiative heat flux along (x, 1m, 4m)

Fig. 2 Radiative heat fluxes calculated for the 3-D enclosure filled with an isothermal and homogeneous pure H₂O gas (case 1).

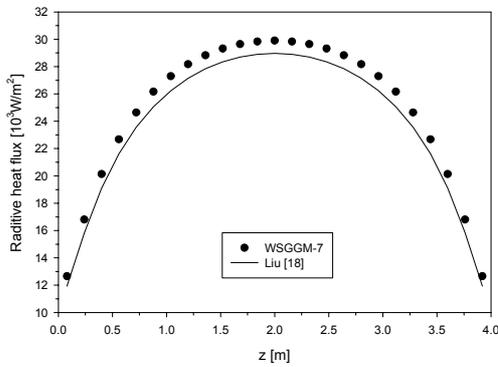


(a) Radiative heat source term along (1m, 1m, z)

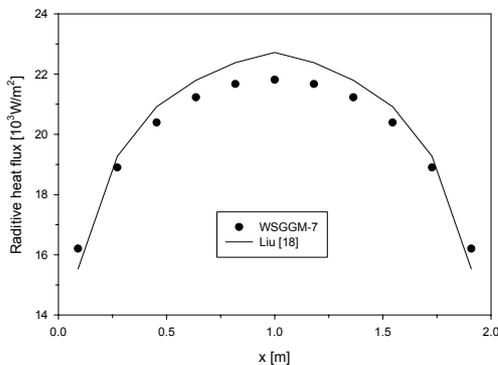


(b) Radiative heat source term along (x, 1m, 0.24m)

Fig. 3 Radiative heat source terms calculated for the 3-D enclosure filled with an isothermal and nonhomogeneous pure H₂O gas (case 2).



(a) Radiative heat flux along (2m, 1m, z)



(b) Radiative heat flux along (x, 1m, 4m)

Fig. 4 Radiative heat fluxes calculated for the 3-D enclosure filled with an isothermal and nonhomogeneous pure H₂O gas (case 2).

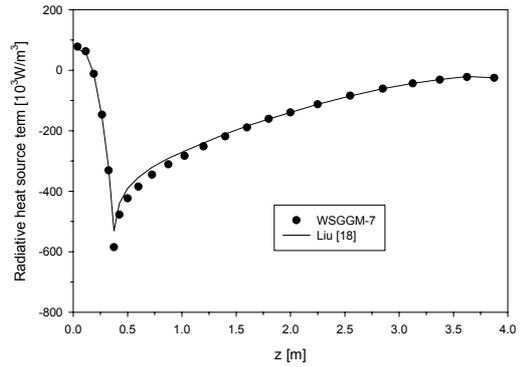


Fig. 5 Radiative heat source term along (1m, 1m, z) for 3-D enclosure filled with a nonisothermal and homogeneous H₂O-CO₂ gas (case 3).

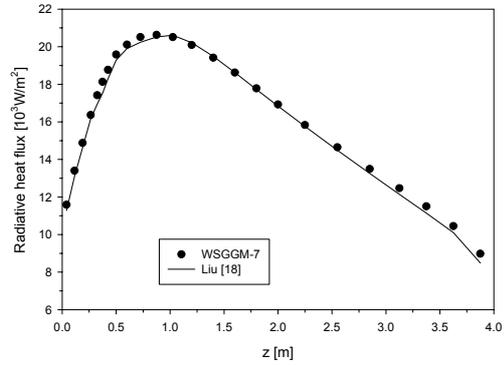


Fig. 6 Radiative heat flux along (2m, 1m, z) calculated for 3-D enclosure filled with a nonisothermal and homogeneous H₂O-CO₂ gas (case 3).

오차가 더 이상 줄어들지 않았으므로 7 개의 회색 가스로 재조합하였다. WSGGM-7은 Fig. 4, 5에서 보인 바와 같이 기준결과와 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. WSGGM7의 경우 고려한 모든 복사생성항 및 복사열유속 결과에 있어서 평균 상대오차가 5%미만 최대 오차가 8%미만의 값을 보였다.

3.3 이산화탄소-수증기-질소 비등온 및 균일 성분분포매체 (case 3)

마지막 경우로는 가스로의 온도 및 성분분포를 모사한 직육면체 밀폐계 내의 복사열전달 문제 해석이다. 매체는 10% CO₂, 20% H₂O and 70% N₂의 균일한 성분을 유지하며 매체의 온도는 참고문헌⁽¹³⁾을 참조하기 바란다. 계산 영역은 Liu⁽¹³⁾와 같이 불균일한 17 × 17 × 24의 격자를 고려하였다. 참조상태의 온도 및 분압, T_{ref} , $x_{CO_2,ref}$, $x_{H_2O,ref}$ 는 각각 1200K, 0.1 과 0.2로 설정하였다. 본 WSGGM을 검증하기 위하여 중심 (1 m, 1 m, z)에서의 (2 m, 1 m, z)에서의 복사열유속을 선택하였다. WSGGM7으로 해석하여 얻은 결과를 복사생성항을 Fig. 5에 복사열유속을 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 5-6에서 WSGGM7은 기준결과와 매우 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있다. 이 두 종류의 결과에 있어서 평균 상대오차는 5%이하로 매우 만족할 만한 결

과를 얻을 수 있는 것을 알 수 있다. 복사생성향의 극값에서의 오차는 10.7%의 비교적 큰 오차를 보이지만 평균상대오차는 4.4%의 작은 값을 보인다. 불균일한 온도 및 균일한 성분의 혼합 매체에서 WSGGM-7은 매우 만족할 만한 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 불균일 온도 및 성분의 매체로 가득찬 3차원 밀폐계에서 회색가중합법을 적용하였다. 정확도를 유지하면서 계산시간을 줄이기 위하여 회색가스 재조합법이 이용되었다. 각각의 가스그룹의 흡수계수는 플랑크평균흡수계수를 이용하여 나타내었다. 본 모델의 검증을 위하여 기존에 발표된 3차원에서의 기준해와 비교하였다. 복사열전달 방정식을 해석하기 위하여 T4 quadrature의 DOM을 이용하였으며, 이를 통해 구한 복사생성향 및 복사열유속은 등온, 비등온, 불균일 성분의 경우에 있어 기준해와 비교하였을 때 모두 정확한 결과를 보였다. 7개 이하의 회색가스만으로도 정확한 결과를 산출할 수 있음을 보였다. 본 연구에서 적용된 회색가중합법은 계산량이 적으면서도 정확한 복사열전달 특성을 예측할 수 있으므로 복사열전달을 모델링을 위한 엔지니어링 도구로 이용될 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 연소기술연구센터(CERC)의 지원에 의해 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) J.M. Hartmann, R. Levi Di Leon, J. Taine, 1984, Line-by-line and narrow-band statistical model calculations for HO, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 32 (2) 119-127.
- (2) L.S. Rothman, R.R. Gamache, R.H. Tipping, C.P. Rinsland, M.A.H., Smith, D.C. Benner, V.M. Devi, J.M. Flaud, C. Camy-Peyret, A. Perrin, A. Goldman, S.T. Massie, L.R. Brown, R.A. Toth, The HITRAN molecular database: editions of 1991 and 1992, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 48 (5) (1992) 469-507.
- (3) R.M. Goody, 1964, *Atmospheric Radiation*, Clarendon press, Oxford, pp. 122-70.
- (4) C.B. Ludwig, W. Malkmus, J. E. Readon, A. L. Thompson, 1973, *Handbook of Infrared Radiation from Combustion Gases*, NASA SP-3080, Scientific and Technical Information Office, Washington D. C.
- (5) D.K. Edwards, 1976, *Molecular gas band radiation*, *Advances in Heat Transfer* 12, Academic Press, New York 115-193.
- (6) H.C. Hottel, A.F. Sarofim *Radiative Transfer*, McGraw-Hill, 1967.
- (7) M.F. Modest, The weighted-sum-of-gray-gases model for arbitrary solution methods in radiative transfer, *Journal of Heat Transfer*, 113 (3) (1993) 650-6.
- (8) T.F. Smith, Z.F. Shen, Z.N. Friedman, Evaluation of coefficients for the weighted sum of gray gases model, *Journal Heat Transfer* 104 (4) (1982) 602-8.
- (9) O.J. Kim, T.H. Song, Implementation of the weighted sum of gray gases model to a narrow band: application and validity, *Numerical Heat Transfer Part B: Fundamentals* 30 (4) (1996) 453-68.
- (10) O.J. Kim, T.H. Song, Data base of WSGGM-based spectral method for radiation of combustion products, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 64 (4) (2000) 379-94.
- (11) W. H. Park, T.K Kim, Application of the WSGGM for arbitrary gas mixtures of water vapor and carbon dioxide, *Journal of Korean Society for Aeronautical & Space Sciences* 32 (6) 88-95.
- (12) W. H. Park, T.K Kim, Study on regrouping of gray gas in spectral WSGGM for arbitrary mixtures of CO₂ and H₂O, *Journal of Korean Society of Mechanical Engineers B* 27 (2) 227-35.
- (13) F. Liu, Numerical solutions of three-dimensional non-grey gas radiative transfer using statistical narrow-band model, *Journal of Heat Transfer* 121 (22) (1999) 200-3.
- (14) R.M. Goody, R. West, L. Chen, D. Chrisp, The correlated-k method for radiation calculations in non-homogeneous atmospheres. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 42 (6) (1989), 539-550.
- (15) A.A. Lacis, V. Oinas, A description of the correlated k-distribution method for modeling non-gray gaseous absorption, thermal emission, and multiple scattering in vertically inhomogeneous atmospheres. *Journal of Geophysical Research* 96 (D5) (1991), 9027-9063.
- (16) M.F. Modest, *Radiative Heat Transfer*, McGraw-Hill, 1993.
- (17) A. Soufiani, J. Taine, High temperature gas radiative property parameters of statistical narrow-band model for H₂O, CO₂ and CO and correlated-k model for H₂O and CO₂, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 40 (4) (1997) 987-91.
- (18) B.G. Carlson, K.D. Lathrop, Transport theory - the method of discrete-ordinates, *Computing Methods in Reactor Physics*, edited by H. Greenspan, C.N. Kelber and D. Okrent, Gordon and Breach, New York, 1968, pp. 165-266.
- (19) S.H. Seo, T.K. Kim, Study on interpolation schemes of the discrete ordinates interpolation method for 3-D Radiative Transfer with Nonorthogonal Grids, *Journal of Heat Transfer* 120 (4) (1998) 1091-4.