

< 논문 >

회색가스재조합을 이용한 회색가스가중합법 개발 및 3 차원 복사열전달에의 적용

박 원 희[†] · 김 태 국^{*}

(2005년 5월 18일 접수, 2006년 1월 3일 심사완료)

Development of the WSGGM with Gray Gas Regrouping and Application to the 3-Dimensional Radiative Transfer

Won-Hee Park and Tae-Kuk Kim

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 of the narrow band based WSGGM (weighted sum of gray gases model), 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 3-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 previous results obtained by using the SNB model and other models. The regrouping technique results in an excellent computational efficiency with minor loss of accuracy.

기호설명

T : 온도[K]
 I : 복사강도[W/m²sr]
 κ : 흡수계수[m⁻¹]
 κ_{i0} : 흡수계수 모델 상수[K²/atm]
 κ_p : 플랑크평균흡수계수[m⁻¹]
 L : 통과거리[m]
 M : 회색가스 수
 N_i : i 번째 그룹의 회색가스 수
 P : 대기압[atm]

q : 복사열유속[W/m²]
 X : 물분율
 W : 가중치

그리스문자

α_i : 흡수계수 모델 상수[K]
 η : 단색
 Δ : 밴드두께
 τ : 통과율

하첨자

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

[†] 책임저자, 회원, 한국철도기술연구원 레도토목연구본부
 환경화재연구팀

^{*} 회원, 중앙대학교 기계공학부

E-mail : kimtk@cau.ac.kr

TEL : (02)820-5282 FAX : (02)814-9476

상첨자

- : 좁은밴드 평균

1. 서 론

과장별 특성을 고려한 복사열전달을 해석하기 위해서는 복사열전달 방정식(RTE, Radiative transfer equation)의 해석기법 및 복사물성치모델이 필요하다. 복사물성치는 파장, 온도, 분압 등의 함수이며, 특히 파장에 따른 급격한 변화는 복사물성치의 예측을 매우 어렵게 한다. 이러한 복사 모델은 파장의 해상도에 따라 3 가지의 구별될 수 있다. 이 중 첫번째 부류인 선별법^(1,2)은 복사에 관여하는 모든 복사선을 고려하는 방법으로 매우 정확한 결과를 보이지만 너무 많은 계산량을 요구하는 등 공학적인 용도로는 사용되기 어려우므로 근사적인 방법들이 많이 제시되고 있다. 일정 밴드 구간을 평균하여 복사특성을 나타내는 밴드모델이 있으며, 이런 밴드 모델은 고려하는 밴드 두께에 따라서 좁은밴드모델^(3,4)과 넓은밴드모델⁽⁵⁾로 나뉘어 질 수 있다. 이와는 달리 파장에 대한 고려가 필요 없는 총괄스펙트럼 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⁾은 이 방법이 임의의 복사열전달방정식에 쉽게 적용이 가능한 것을 증명함바 있으며, Smith et al.⁽⁸⁾의 모델링 결과가 많이 사용되고 있다. Kim 과 Song^(9,10)은 회색가스가 중합법을 좁은 밴드에 적용하였다. 이러한 좁은 밴드에서의 회색가스가중합법은 임의의 성분을 가지는 혼합가스에 적용⁽¹¹⁾될 수 있도록 보완되었으며, 계산시간을 단축하기 위한 회색가스 재조합⁽¹²⁾도 시도되어 좋은 결과를 도출하였다. 이러한 계산들은 좁은 밴드별 1 차원 시선을 통과한 후의 복사장도를 비교함으로써 검증되었다.

본 연구에서는 회색가스 재조합 시 각 그룹의 평균 흡수계수를 구하는데 플랑크 평균흡수계수를 도입하였으며, 이를 이용하기 위한 임의의 수증기-이산화탄소 혼합가스에서 추가의 데이터 구축 없이 사용 가능한 총괄가중치를 수록한 데이터베이스를 제시하였다. 이 방법을 이용한 재조합된 회색가스가중합법을 이용하여 3 차원 밀폐공간에서의 결과를 구하였으며 이를 기존 해⁽¹⁴⁾와 비교하였으며, 여러 복사 모델을 사용하였을 경우와의 오차를 비교하여 본 모델 및 데이터 베이스를 검

증 및 계산정확도를 검토하고자 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.^(15,16) 혼합가스의 통과율은 각각의 가스의 좁은밴드 통과율을 곱함으로써 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁽¹⁷⁾

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

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

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

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

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

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 과장별 가중치 $W_{mix}(\eta)$ 와 흡수계수는 다음과 같이 표현될 수 있다.

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

$$\kappa_{mix} = \kappa_{CO_2} + \kappa_{H_2O}. \quad (5)$$

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

$$W_{mix} = \frac{\sum W_{mix}(\eta) I_b(\eta) \Delta\eta}{\sum I_b(\eta) \Delta\eta} \quad (6)$$

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 보이는 Kim and Song⁽⁹⁾이 제안한 흡수계수를 이용하여 혼합가스의 흡수계수를 다음과 같이 표현하였다.

$$\kappa_{mix} = \kappa_{i0,CO_2} \frac{e^{-\alpha_i,CO_2/T}}{T^2} - P X_{CO_2} + \kappa_{i0,H_2O} \frac{e^{-\alpha_i,H_2O/T}}{T^2} - P X_{H_2O} \quad (7)$$

여기서 k_{i0} , α_i 는 i 번째 회색가스의 모델링 상수를 나타내며 P , T , X 는 각각 압력, 온도, 몰분율을 나타낸다.

2.2 회색가스 제조합

좁은밴드 회색가스가중합법을 이용하여 연소 혼합가스의 복사물성을 나타내기 위해서는 많은 수의 회색가스 수가 필요하다. Park and Kim⁽¹²⁾은 정확도를 유지하며 컴퓨터 계산 시간을 줄이기 위하여 회색가스 제조합을 제안하였다. 이 방법은 비슷한 크기를 갖는 회색가스의 흡수계수를 그룹으로 나누어서 고려하는 방법이다. 제조합 전의 회색가스를 회색가스는 식 (7)과 같이 온도 및 각가스의 물분율의 함수이므로 제조합을 위하여 참조값으로 사용되는 흡수계수는 참조상태의 온도 및 물분율에 의한 값을 이용하게 된다. 제조합된 i 번째 그룹의 그룹의 파장별 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 제조합 과정 이후의 값을 나타내고 있다.

i 번째 그룹의 흡수계수 $\kappa_{i,new}$ 는 플랑크평균 형태의 흡수계수를 이용함으로 구할 수 있다. Park⁽¹³⁾은 이산화탄소-수증기의 중첩 좁은밴드에서 기존의 흡수계수를 구하는 방법⁽¹²⁾과 비교하여 더 만족할 만한 결과를 얻어내었다. 플랑크평균 흡수계수는 평균된 흡수계수를 각각에 해당하는 흑체에너지가중합한 값을 해당하는 온도에서의 전체 흑체에너지로 나눈 값으로 표현된다. 이 개념을 회색가스가중합법에 적용하면 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.

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

2.3 회색가스 가중합법의 상수

모델 방사율의 오차로 표현되는 목적함수를 최소화함으로 최적의 상수 κ_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 Soufiani와 Taine⁽¹⁷⁾의 값들을 이용하였다. 온도 및 통과거리는 각각 300-2500K 와 0.01-10.0m 를 고려하였다. 고려된 파장 범위는 150cm^{-1} 에서 9300cm^{-1} 이며, 각각의 밴드의 두께는 25cm^{-1} 이다. 6 개의 k_0 와 5 개의 α_i 가 고려되었으며, 이들의 조합으로 30 개의 회색가스가 조합될 수 있다. 회색가스가중합법의 상수들을 구하는 자세한 과정은 참고문헌⁽¹⁰⁾의 프로그램을 이용하였다.

이산화탄소의 가중치는 X_{CO_2} 에 의존하지 않고 고정될 수 있으며, 일반적인 탄화수소연료에 의한 연소가스에서 X_{CO_2} 는 일반적으로 약 0.1 이므로, 파장별가중치는 10%CO₂-90%N₂ (투명한)가스에서 구하여 졌다. 그러나 수증기는 분압에 대하여 복사흡수특성이 비례하지 않으므로, 수증기에 대한 파장별가중치는 10⁻², 10⁻¹, 0.4, 0.66 및 1.0 의 물분율에서 구하여졌다. 이산화탄소-수증기 혼합가스의 파장별 가중치는 식 (4)와 같이 각각의 파장별가중치를 곱하므로 구할 수 있으며, 총괄가중치는 식 (6)에서 구할 수 있다. 이 총괄 가중치는 각각의 온도(300K-2500K, 100K 간격)과 수증기의 물분율에 따라 데이터베이스화 되었다. 실제 임의의 복사열전달 계산의 적용을 위하여 임의의 상태에서 총괄가중치가 필요하게 되며, 이는 구축된 데이터베이스를 고려하는 온도와 수증기의 물분율의 선형 보간으로 구하였다.

2.4 복사열전달방정식

흡수, 방출 및 비산란 매체에서의 i 번째 회색가스에서의 회색가스가중합법 적용형태의 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. 모든 방향으로 균일한 반사를 하는 불투명한 벽면 (diffusely reflecting opaque walls) 적용하면 경계조건이 성립된다.

$$I_{iw} = \epsilon_w W_i I_{bw} + \frac{\rho_w}{\pi} \int_{\delta_l, \delta_o < 0} \delta_l \cdot \delta_o I_{iw} d\Omega. \quad (11)$$

하첨자 w 는 경계를 나타내며, δ_o 및 δ_l 는 복사 에너지 진행방향 및 l 방향(경계면)에서의 법선벡터를 나타낸다. 식 (11)에서 흑체의 경우에 방사율 (ϵ_w)이 1 이고 반사율(ρ_w)이 0 이므로 우측 두번째 각도에 대한 적분항은 사라지고 간단하게 표현될 수 있다. 식 (10)은 DOM⁽¹⁹⁾ DOIM⁽²⁰⁾과 같은 복사열전달 방정식 해석기법을 통하여 삼차원 시스템에 대하여 해석될 수 있다. 파장별 복사강도를 전체 파장에 대하여 적분한 총괄복사강도를 구하기 위하여서는 각각의 회색가스 그룹의 제조합된 흡수계수에 대하여 각각 해석되어야 한다. 즉 복사열전달 방정식을 제조합된 회색가스 그룹의 개수 (M_{new})만큼 해석되어야 한다. 최종적으로 복사강도는 모든 제조합된 회색가스 그룹의 복사강도를 아래와 같이 단순히 합하므로 구할 수 있다.

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

복사생성항은 제조합된 회색가스의 흡수계수와 가중치를 이용하여 다음과 같이 구하여질 수 있다.

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

l 방향 복사열유속은 다음과 같이 구할 수 있다.

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

3. 수치해석 및 결과

Liu⁽¹⁴⁾는 Malkmus SNB 모델⁽⁴⁾을 3 차원 직육면체 내부의 회색 복사열전달을 해석하였다. 통과율을 구하기 위하여 밴드상수 값들은 Soufiani and Taine⁽¹⁸⁾의 결과를 이용하였으며, 비균질 또는 비등온 매체에 대하여서는 Curtis-Godson 근사⁽²¹⁾를 사용하였다. 복사강도는 T_4 (128 개의 각도구역)⁽²²⁾을 채용한 복사선 추적법으로 구하여졌다. Coelho⁽²³⁾는 SLW^(24,25) 및 Smith et al.⁽⁸⁾ 모델 상수를 이용한 회색가스가중합법 등의 여러 총괄 모델을 이용하여 Liu의 계산 결과와 비교를 하였다.

본 연구에서 제안한 회색가스제조합을 이용한 회색가스가중합법을 검증하기 위하여 Liu가 해석하였던 3 차원 밀폐계 내에서의 복사열전달 방정식을 해석하여 Liu 및 Coelho의 결과와 비교하고자 한다. Coelho는 복사열전달 방정식 해석 기법으로 복사선추적법 및 구분중좌법을 사용하여 계산을 했으나, 본 연구에서의 회색가스가중합법 적용에 있어서 구분중좌법을 이용하였으므로, Coelho의 계산 결과 중 구분중좌법에 의한 계산 결과만 언급하고자 한다. 비교를 위하여 Liu와 Coelho이 고려한 같은 각도차수인 T_4 구적 적분을 이용하였다. 격자계는 모든 경우에 있어 Liu와 동일하게 구성하였다. 해석하고자 하는 시스템은 $2m \times 2m \times 4m$ 의 직육면체이며, 모든 벽은 300K의 흑체로 가정하였다. 밀폐공간 내의 압력은 1 기압으로 주어졌으며, 매체의 상태는 3 가지의 경우가 고려되었으며, 각각의 온도 및 분압 조건은 Table 1과 같다.

3.1 등온 순수 수증기매체(case 1)

이 경우에 가스의 온도 및 성분이 일정하므로 회색가스제조합을 위한 기준 온도 및 분압은 각각 $T_{ref}=1000K$, $x_{CO_2,ref}=0$, $x_{H_2O,ref}=1$ 로 설정하여, 회색가스제조합이 수행되었다. 계산된 결과를 비교하기 위하여 복사열생성항의 경우 (1m, 1m, z) 및 (x, 1m, 0.375 m), 복사열유속의 경우 (2m, 1m, z) 및 (x, 1m, 4m)의 값들이 선택되었다. Table 2에 제조합을 수행하지 않은 경우 및 제조합 회색가스 수에 따른 복사열생성항 및 복사열유속의 결과와 Liu의 결과와의 평균 오차(ave로 표기)와 오차의 최대값(max로 표기) 및 2.8GHz의 CPU를 장착한 PC를 사용하여 걸린 계산 시간을 나타내고 있다.

Table 1 Profiles of temperature and partial gas pressure considered for the 3-D rectangular enclosure

	Temperature (K)	Partial Pressure
Case 1 Uniform (1000K)		Uniform, Pure H ₂ O
		$X_{H_2O}=1.0$
Case 2 Uniform (1000K)		$X_{H_2O}=4(z/L_2)(1-z/L_2)$
		where $L_2=4m$ $X_{N_2}=1-X_{H_2O}$
	$(x-1)^2+(y-1)^2 < 1;$	
	$T(x,y,z)=[T_{cen}(z)-800]f(x,y)+800$	
	$(x-1)^2+(y-1)^2 \geq 1;$	
	$T=800$	
	where,	$X_{CO_2}=0.1,$
Case 3	$z < 0.375;$	$X_{H_2O}=0.2,$
	$T_{cen}(z)=1400z/0.375+400$	$X_{N_2}=0.7$
	$z > 0.375;$	
	$T_{cen}(z)=1000(4-z)/3.625+800$	
	$f(x,y)=1-3\left\{\sqrt{(x-1)^2+(y-1)^2}\right\}^2$	
	$+2\left\{\sqrt{(x-1)^2+(y-1)^2}\right\}^3$	

Note) $T_{cen}(z)$ is the gas temperature along the centerline ($x=1.0, y=1.0$)

제조합된 회색가스의 수를 4 개 이상으로 늘려도 오차가 그다지 많이 줄어들지 않는 것을 Table 2에서 볼 수 있다. Fig. 1(a)에서는 (1 m, 1 m, z), Fig. 1(b)에서는 (x, 1 m, 0.375 m)에서의 4 개로 제조합된 회색가스를 이용한 회색가스가중합법(WSGGM-RG4)을 이용하여 구한 복사열생성항이, Fig. 1(c) 및 Fig. 1(d)에서는 (2m, 1m, z) 및 (x, 1m, 4m)에서의 WSGGM-RG4를 이용하여 구한 복사열유속을 기준해와 비교하여 나타내고 있다. 이들 그림에서 보면 기준해와 WSGGM-RG4를 이용하여 구한 결과와 잘 일치하고 있는 것을 볼 수 있다. Table 3에는 여러 모델을 이용하여 구한 오차(Coelho) 및 WSGGM-RG4의 오차를 비교하고 있다. 여기서 SLW-20⁽²⁵⁾은 투명한 가스(흡수계수가 0)를 포함하여 21개의 회색가스를, SLW-3은 주어진 문제에 대하여 최적화된 3개의 회색가스(투명한 가스를 포함하여는 4개)를 이용한 결과이며, WSGGM-smith는 4개의 회색가스를 이용하여 계산한 결과이다. WSGGM-RG4를 이용한 복사열생성항의 경우 중심에서의 평균오차는 SLW-3보다 작지만, (x, 1 m, 0.375 m)의 경우에는 평균 오차가 SLW-3보다 약간 큰 것을 볼 수 있다. WSGGM-RG4를 이용하여 구한 복사열유속의 경우 비교된 모든 위치에서의 평균 상대오차가 0.5%보다 더 적은 것을 볼 수 있다. 반면에 최대 상대오차는 약간 크지만 7.3%를 넘지 않는 것을 볼 수 있다. 복사열유속의 경우 SLW-3보다 더 정확한 결과를 도출할 것으로 예측되는 SLW-20의 평균 상대오차보다 더 작은 것을 볼 수 있다. 컴퓨터 계산소요 시간을 비교하면 WSGGM-RG4의 계산 시간과 SLW-3의 계산 시간이 거의 비슷할 것으로 예상된다. 이것은

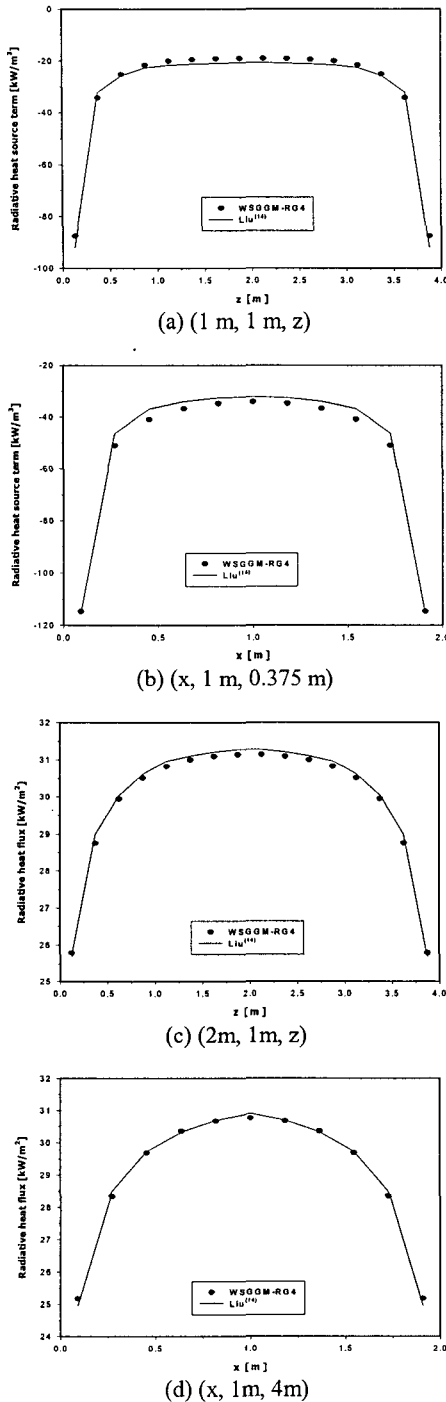


Fig. 1 Radiative heat source term and heat fluxes (case 1)

두 복사물성 모델의 경우 모두 복사열전달 방정식을 4 번 풀기 때문이고, 본 회색가스가중합법을 이용할 경우 모든 격자계에서 회색가스가중합법의 적용에 있어 필요한 상수(재조합된 가중치 및 흡수

Table 2 Average and maximum relative errors at different locations for various numbers of gray gases(case 1)

Locations (m)	(%)	Regrouped number of gray gases							No- grouping
		3	4	5	7	10	15	20	
Radiative heat	(1,1,z)	ave 73.61	6.04	8.60	9.77	6.21	6.44	6.46	6.45
		max 87.60	8.26	12.16	13.88	8.03	8.33	8.37	8.35
source term	(x,1,0.375)	ave 69.53	7.33	5.27	4.67	6.14	6.17	6.19	6.17
		max 85.43	11.74	8.96	8.19	8.40	8.38	8.40	8.37
Radiative heat	(2,1,z)	ave 34.54	0.45	1.76	2.21	3.56	3.66	3.65	3.66
		max 36.27	0.82	2.16	2.57	4.05	4.13	4.12	4.14
flux	(x,1,4)	ave 32.00	0.36	1.54	1.96	3.57	3.69	3.68	2.25
		max 34.16	0.89	2.07	2.51	3.98	4.08	4.07	2.73
CPU time(s)		3.4	4.1	4.8	6.2	8.3	11.9	15.2	612

Table 3 Average and maximum relative errors(case 1)

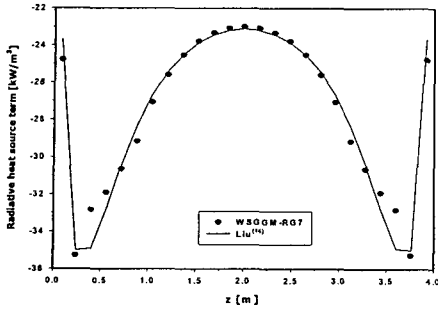
Locations (m)	(%)	WSGGM	WSGGM	SLW	SLW
		-RG4	-smith *	-20*	-3*
Radiative heat	(1, 1, z)	ave 6.04	28.30	3.82	10.10
		max 8.26	40.06	6.37	14.45
source term	(x, 1, 0.375)	ave 7.33	33.94	6.33	4.05
		max 11.74	42.04	9.20	8.18
Radiative heat	(2, 1, z)	ave 0.45	11.47	2.20	1.29
		max 0.82	11.89	5.04	5.46
flux	(x, 1, 4)	ave 0.36	10.93	2.33	2.26
		max 0.89	11.95	4.64	5.66

* from Coelho⁽²³⁾

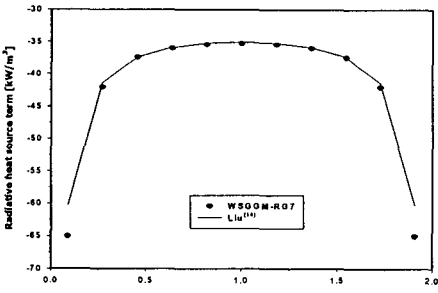
계수)를 구하는데 걸리는 계산시간은 1 초 미만이기 때문에 이러한 예측이 가능하다. WSGGM-RG4의 경우 재조합을 수행하지 않았을 경우보다 계산시간을 1/120 로 단축할 수 있었다.

3.2 등은 및 불균일 성분분포매체(case 2)

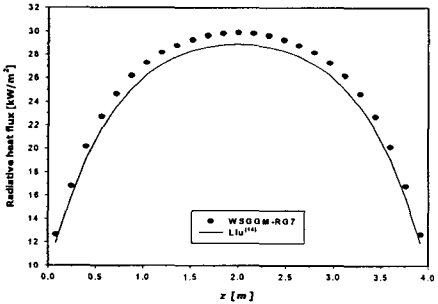
본 경우에 회색가스재조합을 위하여 $T_{ref}=1000K$, $x_{CO_2,ref}=0$, $x_{H_2O,ref}=0.5$ 로 설정하였다. 복사열생성항의 경우에는 (1 m, 1 m, z) 및 (x, 1 m, 0.24 m)의 결과가 복사열유속의 경우에는 (2 m, 1 m, z), (x, 1 m, 4m)의 결과가 비교값으로 사용되었다. Table 4 에 재조합된 회색가스 수에 따라 계산된 복사열생성항 및 복사열유속의 결과와 Liu의 결과와의 평균 상대오차와 상대오차의 최대오차 및 컴퓨터 계산에 소요된 시간을 나타내고 있다. Table 4 에서 보면 회색가스 3 개를 사용하였을 때 평균오차는 매우 크나, 회색가스를 4 개 이상으로 재조합하면 그 오차가 많이 줄어드는 것을 알 수 있다. 회색가스의 수를 7 개 이상으로 조합하여도 정확도가 그다지 많이 향상되지 않으므로, 본 경우에는 7 개의 회색가스로 재조합한 회색가스가중합법(WSGGM-RG7)를 이용하여 얻은 결과에 대하여 비교 분석하고자 한다. Fig. 2(a)에서는 (1 m, 1 m, z)에서의 복사열생성항의 결과를 Liu의 결과와 비교하고 있는데 기준해인 Liu의 결과와 매우 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. Fig. 2(b)는 (x, 1 m, 0.24 m)에서의



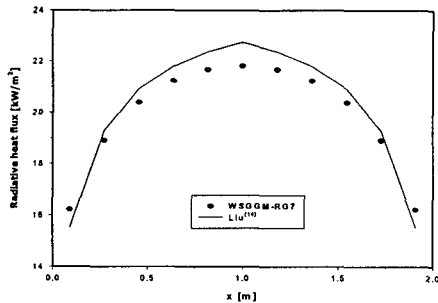
(a) (1 m, 1 m, z)



(b) (x, 1 m, 0.24 m)



(c) (2 m, 1 m, z)



(d) (x, 1 m, 4 m)

Fig. 2 Radiative heat source term and heat fluxes (case 2)

복사열생성항을 나타내고 있는데 벽 부근에서 약간 큰 오차가 발생하나 매체 내부에서는 기존 결과와 매우 잘 일치한다. Fig. 2 (c), (d)에서는 직육면체의 측면벽(x=2 m) 및 윗벽(z=4 m)에서의 복사열유속 값을 Liu의 계산 결과와 비교하고 있으며,

Table 4 Average and maximum relative errors at different locations for various numbers of gray gases (case 2)

Locations (m)	Regrouped number of gray gases								
	(%)	3	4	5	7	10	15	20	No-grouping
Radiative heat source term (1, 1, z)	ave	63.06	3.38	1.81	1.74	2.71	3.59	3.60	3.62
	max	86.95	6.69	5.64	5.98	5.39	7.78	7.81	7.77
source term (x, 1, 0.24)	ave	15.43	4.02	2.11	2.00	2.79	1.22	1.21	1.21
	max	17.30	8.94	7.91	7.86	3.86	1.53	1.52	1.53
Radiative heat flux (2, 1, z)	ave	38.81	6.86	4.58	4.35	3.03	2.64	2.64	2.63
	max	42.30	8.69	6.36	6.17	4.05	3.70	3.70	3.69
flux (x, 1, 4)	ave	27.65	1.58	2.90	3.02	3.51	3.65	3.64	3.64
	max	34.92	6.93	4.53	4.34	4.65	4.90	4.90	4.90
CPU time(s)		5.5	6.5	7.7	10.0	13.2	17.9	21.5	954

Table 5 Average and maximum relative errors (case 2)

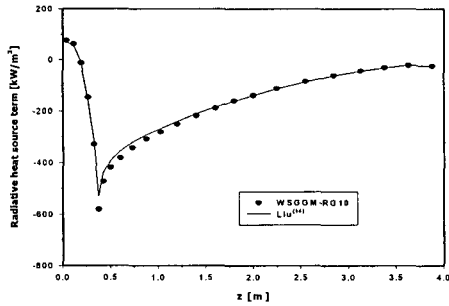
Locations (m)	(%)	WSGGM	WSGGM	SLW	SLW
		-RG7	-Smith*	-20*	-3*
Radiative heat source term (1, 1, z)	ave	1.74	30.04	3.35	8.09
	max	5.98	50.40	9.68	23.09
source term (x, 1, 0.24)	ave	2.00	8.45	8.86	6.26
	max	7.86	19.53	10.65	8.75
Radiative heat flux (2, 1, z)	ave	4.35	6.11	2.57	3.17
	max	6.17	12.52	2.84	5.26
flux (x, 1, 4)	ave	3.02	1.81	1.23	2.21
	max	4.34	4.26	2.03	3.00

* from Coelho⁽²³⁾

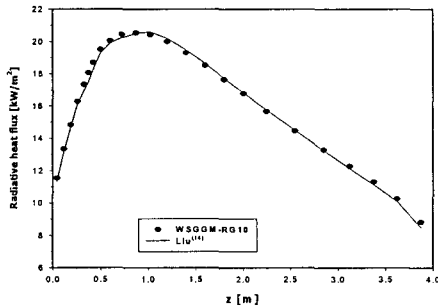
이 결과도 기존 결과와 잘 일치하고 있는 것을 볼 수 있다. Table 5에서는 WSGGM-RG7으로 구한 복사열생성항 및 복사열유속의 기준값에 대한 평균 상대오차와 최대 상대오차를 나타내고 있으며, WSGGM-Smith, SLW-20 및 SLW-3의 오차들에 대하여 비교하고 있다. 비교된 모든 복사열생성항의 경우 WSGGM-RG7의 경우 SLW-20의 결과보다 최대 및 평균 오차가 더 작으며, 평균 상대오차가 2% 미만으로 비교되는 모델 중 가장 뛰어난 정확하나, (x, 1 m, 4 m)에서는 모든 다른 모델로부터 얻은 도를 보이는 것을 볼 수 있다. 최대 오차도 8% 미만으로 비교적 만족할 만한 결과를 얻은 것을 볼 수 있다. 반면, 복사열유속을 비교하여 보면 (2 m, 1 m, z)에서 WSGGM-Smith보다 좋은 결과를 보이 결과보다 오차가 크다. 그러나 고려된 모든 복사열유속의 경우 모두 5% 이하의 비교적 만족할 만한 오차 범주 안에 속하였다.

3.3 비등온 및 균일 성분분포매체 (case 3)

가스의 성분이 일정하므로, $x_{CO_2,ref} = 0.1$, $x_{H_2O,ref} = 0.2$ 로 하였으며, 기준온도는 $T_{ref} = 1200K$ 으로 하여 재조합을 수행하였다. 비교를 위하여 복사열생성항은 중심선(1m, 1m, z)에서의 값이 선택되었으며 복사열유속은 (2m, 1m, z)에서의 값이 선택되었다. 재조합된 회색가스 수에 따른 Liu의 결과를 기준



(a) (1 m, 1 m, z)



(b) (2 m, 1 m, z)

Fig. 3 Radiative heat source term and heat fluxes (case 3)

으로 한 평균 오차 및 최대 오차에 대하여 Table 6에 나타내었다. 회색가스의 수를 증가 시키면 오차가 계속 줄어드는 경향을 보였으나 회색가스 10개 이후에 그 오차의 감소 폭이 미미하였다. 따라서 회색가스 10 개를 이용하여 제조합한 회색가스가중합법(WSGGM-RG10)의 결과에 검토를 수행하였다. 제조합을 수행하지 않은 경우 복사열생성항의 최대오차는 비교적 큰 값을 보이는데 이는 $z=0.19m$ 에서 기준값이 0에 근접하므로 오차가 상대적으로 크게 나타나며, 이 점을 제외한 값의 최대오차는 약 7%로 비교적 작다. Fig. 3(a)에서는 WSGGM-RG10으로 구한 직육면체 중심에서 z축 방향으로의 복사열생성항을 SNB 모델을 이용한 Liu의 결과와 비교하고 있으며, Fig. 3(b)은 측벽(2 m, 1 m, z)에서 계산된 복사열유속을 나타내고 있으며, 두 결과 모두 기준해와 매우 잘 일치하고 있는 것을 볼 수 있다. 본 경우에 대하여 WSGGM-RG10를 이용한 계산 결과와 다른 모델을 이용한 계산 결과와의 정량적인 비교를 위하여 Table 7에서 WSGGM-RG10 및 여러 모델을 이용한 계산 결과의 오차를 나타내었다. SLW-cv 및 SLW-di라고 표기된 오차는 SLW 모델로 혼합가스를 고려하는 방법에 따라 표기한 것이다. SLW-cv(SLW with convolution approach)는 혼합가스를 구성하는 각각의 참여 가스의 성분이 일정한 비율로 존재한다는 가정하에서 혼합가스의 복사 특성을 나타내는 방법이고, SLW-di(SLW with double integration approach)는 CO_2 와 H_2O 의 혼합가스에

Table 6 Average and maximum relative errors at different locations for various numbers of gray gases (case 3)

Locations (m)	Regrouped number of gray gases							No-grouping	
	(%)	3	4	5	7	10	15		20
Radiative heat source term (1,1,z)	ave	70.77	17.28	6.56	4.44	4.05	4.26	3.48	3.51
	max	428.89	68.79	12.80	12.24	10.90	11.62	8.79	35.4
Radiative heat flux (2,1,z)	ave	71.04	12.21	4.79	1.90	1.33	1.27	1.20	0.84
	max	75.64	15.78	9.81	6.04	3.92	3.81	3.47	2.30
CPU time(s)		12.0	14.3	16.7	21.6	28.9	40.4	52.2	2100

Table 7 Average and maximum relative errors (case 3)

Errors (%)	WSGGM	WSGGM	SLW	SLW	SLW	SLW
	-RG10	-smith*	-di20*	-di3*	-cv20*	-cv3*
Source term (1, 1, z)	ave 4.05	21.60	3.16	8.23	10.25	6.35
	max 10.90	30.04	14.54	29.03	17.55	33.92
Heat Flux (2, 1, z)	ave 1.33	6.02	1.73	9.83	5.33	5.28
	max 3.92	9.59	4.20	12.85	8.31	14.34

* from Coelho⁽²³⁾

대하여 이러한 가정 없이 혼합가스의 복사 특성을 예측하는 방법으로 자세한 내용은 참고문헌⁽²⁴⁾에 설명되어 있다. SLW에서 단일 가스에 대하여 회색가스의 수를 M이라 할 때 SLW-cv는 M번의 복사열전달 방정식의 해석이 필요하며, SLW-di의 경우에는 M^2 의 복사열전달 방정식을 해석하여야 한다. 그러므로 일반적으로 SLW-di는 SLW-cv보다 오랜 계산 시간을 요구하며, 참고로 Coelho⁽²²⁾에서 언급한 본 조건에서의 계산 시간을 비교하였을 때 SLW-di가 SLW-cv보다 약 6배에서 25배의 계산 시간이 소요된 것을 확인할 수 있다. WSGGM-RG10을 이용할 경우 복사열생성항에 있어서 최대 값에서 상대 오차가 약 5.8%로 크지만 평균 상대 오차의 경우 약 4.05% 정도로 계산시간이 훨씬 많이 요구될 것으로 예측되는 SLW-di20을 제외한 어떤 모델보다 정확한 것을 볼 수 있다. 최대 상대오차의 경우에는 SLW-di20을 포함한 다른 모든 경우보다 더 작은 것을 볼 수 있다. 복사열유속의 경우에는 평균 상대오차가 1.33%로 Coelho에서 고려한 다른 어떤 총괄모델을 이용한 결과보다 더 정확한 것을 Table 7에서 확인할 수 있다. 10개의 회색가스로 제조합한 회색가스가중합법의 경우 화로 내부의 온도 분포를 모사한 균일 성분의 $CO_2-H_2O-N_2$ 복사 특성을 효율적으로 계산할 수 있는 것을 알 수 있다. WSGGM-RG10의 경우 제조합을 수행하지 않은 경우와 비교하였을 때 계산시간이 약 1/70로 단축되었다.

4. 결론

본 연구에서는 좁은밴드 회색가스가중합법을 이

용하여 임의의 성분비의 연소가스에서 적용할 수 있도록 회색가스가중합법 데이터 베이스를 구축하였으며, 정확도를 유지하면서 계산시간을 줄이기 위하여 회색가스 재조합법을 제안하였다. 이를 검증하기 위하여 불균일 온도 및 성분의 매체로 총만된 3 차원 밀폐계에서 회색가스재조합을 이용한 회색가스가중합법을 적용하였다. 회색가스재조합을 이용하기 위하여 각각의 가스그룹의 흡수계수는 플랑크평균흡수계수를 이용하여 나타내었다. 본 모델의 검증을 위하여 기존에 발표된 3 차원에서의 SNB 모델 및 복사선추적법을 이용하여 구한 기준해와 비교하였는데 복사생성항 및 복사열유속은 등은, 비등온, 불균일 성분의 경우에 있어 기준해와 비교하였을 때 모두 정확한 결과를 보였다. 10 개 이하의 회색가스 재조합법을 이용하였을 경우 재조합을 이용하지 않은 경우보다 약 1/130~1/70 로 계산시간을 단축하는 동시에 정확한 결과를 산출할 수 있음을 보였다. 본 연구에서 제안된 회색가스재조합을 이용한 회색가스가중합법은 계산량이 적으면서도 정확한 복사열전달 특성을 예측할 수 있으므로 복사열전달 예측하기 위한 엔지니어링 도구로 훌륭히 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

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

참고문헌

- (1) Hartmann, J.M., Levi Di Leon, R. and Taine, J., 1984, "Line-by-line and Narrow-band Statistical Model Calculations for HO," *JQSRT*, Vol. 32, No. 2, pp. 119~127.
- (2) Rothman, L.S., Gamache, R.R., Tipping, R.H., Rinsland, C.P., Smith, M.A.H., Benner, D.C., Devi, V.M., Flaud, J.M., Camy-Peyret, C., Perrin, A., Goldman, A., Massie, S.T., Brown, L.R. and Toth, R.A., 1992, "The HITRAN Molecular Database: Editions of 1991 and 1992," *JQSRT*, Vol. 48, No. 5, pp. 469~507.
- (3) Goody, R.M., 1964, *Atmospheric Radiation*, Clarendon press, Oxford, pp. 122~170.
- (4) Ludwig, C.B., Malkmus, W., Readon, J.E. and Thompson, A.L., 1973, *Handbook of Infrared Radiation from Combustion Gases*, NASA SP-3080, Scientific and Technical Information Office, Washington D. C.
- (5) Edwards, D.K., 1976, "Molecular Gas Band Radiation," *Advances in Heat Transfer*, Vol. 12, Academic Press, New York, pp. 115~193.
- (6) Hottel, H.C. and Sarofim, A.F., 1967, *Radiative Transfer*, McGraw-Hill.
- (7) Modest, M.F., 1993, "The Weighted-sum-of-gray-gases Model for Arbitrary Solution Methods in Radiative Transfer," *J. of Heat Transfer*, Vol. 113, No. 3, pp. 650~656.
- (8) Smith, T.F., Shen, Z.F. and Friedman, Z.N., 1982, "Evaluation of Coefficients for the Weighted Sum of Gray Gases Model," *J. Heat Transfer*, Vol. 104, No. 4, pp. 602~608.
- (9) Kim, O.J. and Song, T.H., 1996, "Implementation of the Weighted Sum of Gray Gases Model to a Narrow Band: Application and Validity," *Numerical Heat Transfer (B)*, Vol. 30, No. 4, pp. 453~468.
- (10) Kim, O.J. and Song, T.H., 2000, "Data Base of WSGGM-based Spectral Method for Radiation of Combustion Products," *JQSRT*, Vol. 64, No. 4, pp. 379~394.
- (11) Park, W.H. and Kim, T.K., 2003, "Application of the WSGGM for Arbitrary Gas Mixtures of Water Vapor and Carbon Dioxide," *J. of Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, Vol. 32, No. 6, pp. 88~95.
- (12) Park, W.H. and Kim, T.K., 2003, "Study on Regrouping of Gray Gas in Spectral WSGGM for Arbitrary Mixtures of CO₂ and H₂O," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 27, No. 2, pp. 227~235.
- (13) Park, W.H., 2004, *Study on the radiative transfer characteristics by nongray gas mixtures and application on combustion systems*, Doctoral Thesis, Chung-Ang Univ.
- (14) Liu, F., 1999, "Numerical Solutions of Three-dimensional Non-grey Gas Radiative Transfer Using Statistical Narrow-band Model," *J. of Heat Transfer*, Vol. 121, No. 22, pp. 200~203.
- (15) Goody, R.M., West, R., Chen, L. and Chrisp, D., 1989, "The Correlated-k Method for Radiation Calculations in Non-homogeneous Atmospheres," *JQSRT*, Vol. 42, No. 6, pp. 539~550.
- (16) Lacis, A.A. and Oinas, V., 1991, "A Description of the Correlated k-distribution Method for Modeling Non-gray Gaseous Absorption, Thermal Emission, and Multiple Scattering in Vertically Inhomogeneous Atmospheres," *J. of Geophysical Research*, Vol. 96, No. D5, pp. 9027~9063.
- (17) Modest, M.F., 1993, *Radiative Heat Transfer*, McGraw-Hill.
- (18) Soufiani, A. and Taine, J., 1997, "High Temperature Gas Radiative Property Parameters of Statistical Narrow-band Model for H₂O, CO₂ and CO and Correlated-k Model for H₂O and CO₂," *Int. J. of Heat and Mass Trans.*, Vol. 40, No. 4, pp. 987~991.
- (19) Carlson, B.G. and Lathrop, K.D., 1968, *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, pp. 165~266.
- (20) 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," *J. of Heat Transfer*, Vol. 120,

- No. 4, pp. 1091~1094.
- (21) 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.
- (22) Thurgood, C.P., Pollard, A. and Becker, H.A., 1995, "The T_N Quadrature Set for the Discrete Ordinates Method," *J. of Heat Transfer*, Vol. 117, pp. 1068~1070.
- (23) Coelho, P.J., 2002, "Numerical Simulation of Radiative Heat Transfer from Non-grey Gases in Three-dimensional Enclosures," *JQSRT*, Vol. 74, No. 3 pp. 307~328.
- (24) Denison, M.K. and Webb, B.W., 1993, "A Spectral Line-based Weighted-sum-of-gray-gases Model for Arbitrary RTE Solvers," *J. of Heat Transfer*, Vol. 115, pp. 1004~1011.
- (25) Denison, M.K. and Webb, B.W., 1995, "The Spectral-lined Weighted-sum-of-gray-gases Model for H_2O/CO_2 Mixtures," *J. of Heat Transfer*, Vol. 117, pp. 788~792.