

대향류화염에서의 회색가스재조합 회색가스가중합법의 적용

박원희* · 김태국**†

Application of Weighted Sum of Gray Gases Model with Gray Gas Regrouping for Opposed Flow Flames

Won-Hee, Park* and Tae-Kuk, Kim**†

ABSTRACT

WSGGM with gray gas regrouping is successfully applied to study the flame structure of opposed flow flames including effect of radiative transfer. The statistical narrow band model is used to obtain the benchmark solutions. Results obtained by using the optically thin model are shown to overestimate the emission and to predict the flame structures inadequately especially for optically thick and low stretch rate flames. Computed results by using the WSGGM with 10 gray gases and SNB model show reasonable agreements with each other, and the required calculation time for the WSGGM is acceptable for engineering applications.

Key Words : Opposed flow flame, Radiative heat transfer, WSGGM-RG, Flame structure, SNB Model, Optically Thin Model

기 호 설 명

I	복사강도 [W/m^2sr]		
κ	흡수계수 [m^{-1}]	α_i	그리스 문자 흡수계수 모델상수 [K]
κ_{io}	흡수계수 모델상수 [K^2/atm]	η	파동수 [cm^{-1}]
M	회색가스 수	τ	통과율
N_i	i 번째 그룹의 회색가스 수		하첨자
P	대기압 [atm]	i	i 번째 회색가스
q	복사열유속 [W/m^2]	b	혹체
T	온도 [K]	m	m 번째 각도
X	물분율	mix	혼합가스
W	총괄 가중치	new	재조합
$W(\eta)$	회색가스의 좁은밴드별 가중치		상첨자
		-	좁은밴드 평균

1. 1. 서론

복사열전달은 연소로, 보일러, 소각로 등 특히 고온의 시스템에서 중요한 열전달 모드이다. 복사열전달 특성에측은 복사열전달 방정식 해석기법과 가스 및 입자의 복사물성치 모델링 기법을 해석의 정확성 및 계산 소요시간 등을 고려하여 상황에 따라 적절히 선택하는 것이 중요하다. 가

스분자의 복사 특성은 온도, 화학종의 분압, 총압, 경로길이, 파장 등에 대하여 복잡한 함수로 표현된다. 특히 파장에 따른 복사 흡수 특성의 변화로 인하여 복사열전달 해석의 어려움이 더욱 가중된다.

복사물성 모델은 2가지 기준으로 나눌 수 있다. 첫째는 고려되는 파장의 해상도에 따라 나눌 수 있으며, 둘째는 통과율과 흡수계수를 구하는 모델로 나눌 수 있다. 먼저 파장별 해상도에 따라 선별법[1,2], 밴드모델[3-5], 총괄스펙트럼 모델로 구별될 수 있다. 선별법은 복사에 관여하는 모든 복사선을 고려하는 방법으로 매우 정확한

* 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부 환경화재연구팀

** 중앙대학교 기계공학부

† kimtk@cau.ac.kr

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. 통과율을 구하는 밴드 모델의 경우에는 임의의 복사열전달 해석기법에 사용될 수 없는 단점이 있으며 다차원에서는 해석하기가 매우 힘들며, 흑체가 아닌 경계에서는 이용되기 어렵다. 반면 파장에 대한 고려가 필요 없는 모델이 총괄 스펙트럼 모델이다. 총괄스펙트럼 모델은 밴드 모델 보다 계산량이 작은 것이 장점이지만, 비회색 입자나 비회색 경계조건에는 이용할 수 없는 단점이 있다. 종합하여 보면 비회색 경계(파장에 따라 반사율이 변하는)를 포함하지 않는 일반적인 연소현상의 해석에서는 흡수계수를 모델링하는 총괄 스펙트럼 기법이 추천될 수 있다.

본 논문에서는 최근에 제안된 총괄 스펙트럼 기법과 흡수계수를 모델링하는 기법인 회색가스 제조합 회색가스가중합법[6]을 이용하여 대향류 화염에 복사열전달이 화염구조에 미치는 영향에 대하여 검토하였으며, 비교를 위하여 임의의 연소가스 성분율에서 적용 가능한 SNB 모델[4]과 광학적으로 얇은 가정(optically thin approximation)을 이용하였다. 대향류 화염의 계산 프로그램인 OPPDIF[7]을 복사열전달 특성을 고려할 수 있도록 수정하여, 화염에 복사열전달이 미치는 영향을 검토하였다. 4종류의 화염에 대하여 계산이 수행되었으며, 각 모델에 따라 소요되는 계산 시간도 언급하였다.

2. 이론

2.1 대향류 화염의 지배방정식

대향류 화염 현상을 지배하는 여러 방정식 중 복사열전달 영향이 고려되는 방정식은 참고문헌 [7]에 자세히 정리되어 있으며, 이 중 에너지 보존을 나타내는 에너지방정식은 다음과 같다.

$$\rho u \frac{dT}{dx} - \frac{1}{c_p} \frac{d}{dx} \left(\lambda \frac{dT}{dx} \right) + \frac{\rho}{c_p} \sum_k c_{pk} Y_k V_k \frac{dT}{dx} + \frac{1}{c_p} \sum_k h_k \dot{\omega}_k + \frac{\nabla \cdot q}{c_p} = 0 \quad (1)$$

여기서 T , C_p , λ 는 온도, 혼합기체의 정압비열 및 열전도계수이다. $-\nabla \cdot q$ 은 에너지방정식 중 복사열전달 영향을 나타내는 복사열생성항이다. C_{pk} , Y_k , h_k , $\dot{\omega}_k$ 는 k 번째 종의 정압비열, 질량분율, 생성엔탈피 화학종 생성율을 각각 나

타낸다.

임의 스트레인을에 대한 화염구조를 계산하기 위해 그에 해당하는 노즐 유속을 초기조건으로 입력해야 하는데, 이 유속을 계산하기 위하여 대향류확산화염의 스트레인을을 계산한 다음과 같은 식[8]을 이용하였다.

$$a = \frac{2(-u_o)}{L} \left[1 + \frac{u_F}{(-u_o)} \sqrt{\frac{\rho_F}{\rho_o}} \right] \quad (2)$$

2.2 혼합가스에 대한 회색가스가중합법

2.2.1 혼합가스에 대한 회색가스가중합 표현

이산화탄소-수증기 혼합가스에서 각각의 좁은 밴드통과율은 상관되어 있지 않다는 것이 널리 인지되어 있는 사실이다[9,10]. 그러므로 혼합가스의 통과율은 각각의 가스의 좁은밴드 통과율을 곱함으로 다음과 같이 나타낼 수 있다[11].

$$\bar{\tau}(\eta)_{mix} = \bar{\tau}_{H_2O}(\eta) \cdot \bar{\tau}_{CO_2}(\eta) \quad (3)$$

이산화탄소-수증기 혼합가스에서 경로길이가 Δs 은 통과율의 회색가스가중합표현은 다음과 같다[6].

$$\bar{\tau}(\eta)_{mix} = \sum_{i=1}^{M_{mix}} W_{i,mix}(\eta) \tau^{-\kappa_{i,mix} \Delta s} \quad (4)$$

여기서,

$$W(\eta)_{mix} = W(\eta)_{CO_2} \times W(\eta)_{H_2O} \quad (4a)$$

$$\kappa_{i,mix} = \kappa_{iO,CO_2} \frac{e^{-\alpha_{i,CO_2}/T}}{T^2} P X_{CO_2} \quad (4b)$$

$$+ \kappa_{iO,H_2O} \frac{e^{-\alpha_{i,H_2O}/T}}{T^2} P X_{H_2O}$$

여기서 κ_{i0} , α_i 는 i 번째 회색가스의 모델링 상수이고 P , T , X 는 각각 압력, 온도, 몰분율이다. 파장별 가중치 $W_{mix}(\eta)$ 는 각 순수 가스의 가중치의 곱으로, 흡수계수는 각 순수 가스의 합으로 표현된 것이다. 실제 연소 계산에는 파장별 복사장도의 정보가 다 필요한 것이 아니고 파장별 복사특성을 적분한 총괄 값이 필요하게 된다. 좁은밴드 가중치를 파장에 대하여 적분한 총괄 가중치를 이용하면 회색가스가중합법은 총괄스펙트럼 기법 범주에 속하게 된다.

총괄 가중치는 다음과 같은 식으로 구할 수 있다.

$$W_{i,mix} = \frac{\sum_{\eta} W_{i,mix}(\eta) I_b(\eta) \Delta \eta}{\sum_{\eta} I_b(\eta) \Delta \eta} \quad (5)$$

여기서 $I_b(\eta)$ 는 η 에서의 좁은 밴드의 흑체복사강도이며, $\Delta \eta$ 는 좁은 밴드의 파동수 두께를 나타낸다.

2.2.2 회색가스 제조합

좁은밴드 회색가스가중합법을 이용하여 연소 혼합가스의 복사물성을 나타내기 위해서는 많은 수의 회색가스 수가 필요하다. Park과 Kim[6]은 정확도를 유지하며 컴퓨터 계산 시간을 줄이기 위하여 회색가스 제조합을 제안하였다. 이 방법은 비슷한 크기를 갖는 회색가스의 흡수계수를 그룹으로 나누어서 고려하는 방법이다. 제조합 전의 회색가스의 흡수계수는 식 (4.b)과 같이 온도 및 각 가스의 물분율의 함수이므로 제조합을 위하여 참조값으로 사용되는 흡수계수는 참조상태의 온도 및 물분율에 의한 값을 이용하게 된다. 제조합된 i, new 번째 그룹의 파장별 가중치는 그룹에 속하여 있는 모든 가중치를 합하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$W_{i, \neq w}(\eta) = \sum_{j=1}^{N_i} W_{j, mix}(\eta), \quad (6)$$

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

i, new 번째 그룹의 총괄가중치는 좁은밴드에서의 가중치를 구하는 식 (6)과 비슷한 형태로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$W_{i, \neq w} = \sum_{j=1}^{N_i} W_{j, mix} \quad (7)$$

i, new 번째 그룹의 흡수계수 $\kappa_{i, new}$ 는 플랑크 평균 형태의 흡수계수를 이용함으로 구할 수 있다. 플랑크평균 흡수계수는 평균될 흡수계수를 각각에 해당하는 흑체에너지로 가중합한 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.

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

2.2.3 회색가스가중합법 데이터베이스

이산화탄소의 가중치는 이산화탄소의 물분율 X_{CO_2} 에 의존하지 않는다고 가정될 수 있으며, 일반적인 탄화수소연료에 의한 연소가스에서 X_{CO_2} 는 일반적으로 약 0.1이므로, 파장별가중치는 10%CO₂-90%N₂ (투명한)가스에서 구하여 졌

다. 그러나 수증기는 분압에 대하여 복사흡수특성이 비례하지 않으므로, 수증기에 대한 파장별 가중치는 10⁻², 10⁻¹, 0.4, 0.66 및 1.0의 물분율에서 구하여졌다. 이산화탄소-수증기 혼합가스의 파장별 가중치는 식 (4.a)와 같이 각각의 파장별 가중치를 곱하므로 구할 수 있으며, 총괄가중치는 식 (5)에서 구할 수 있다. 이 총괄 가중치는 각각의 온도(300K-2500K, 100K간격)과 수증기의 물분율에 따라 데이터베이스화 되었다. 실제 임의의 복사열전달 계산의 적용을 위하여 임의의 상태에서 총괄가중치는 구축된 데이터베이스를 고려하는 온도와 수증기의 물분율의 선형 보간으로 구하였으며, 각 그룹의 제조합된 총괄가중치는 각 그룹에 총괄가중치를 식 (7)같이 더하여 구할 수 있다.

에너지방정식에 복사열전달의 영향을 나타내는 복사열생성항 $-\nabla \cdot q$ 를 구하기 위하여 충분한 회색가스로 제조합한 10개의 회색가스를 이용한 회색가스가중합법(WSGGM-RG10)을 이용하기로 한다. 이 때 기준온도는 1500K로 설정하였으며, 기준 분압은 계산 영역에서 평균값을 이용하였다.

2.3 비교를 위해 선택된 복사물성치 모델

2.3.1 광학적으로 얇은 근사 모델

간략화된 모델로서 화염 및 부근의 가스가 광학적으로 매우 얇아 복사에너지를 흡수하지 않는 가정 하에 해석하는 광학적으로 얇다고 가정하면 복사열생성항을 다음과 같이 나타낼 수 있다[12].

$$-\nabla \cdot q = 4\kappa_p \sigma (T_{p, \infty}^4 - T^4) \quad (8)$$

여기서 σ 는 스테판-볼츠만상수이며, T 는 국부 온도를, κ_p 는 가스의 플랑크 평균 흡수계수를 나타낸다. 본 연구에서는 Ju 등[13] 제안한 온도의 다항식으로 표현되는 식을 이용하여 플랑크 평균 흡수계수를 구하였다.

2.3.2 SNB모델

등온 및 등질의 경로길이 Δs 에 대한 통과율을 다음과 같이 구할 수 있다[5].

$$\bar{\tau}(\Delta s) = \exp \left(-\frac{\bar{\beta}_v}{\pi} \left(\sqrt{1 + \frac{2\pi p x \Delta s \bar{k}_v}{\bar{\beta}_v}} \right) \right) \quad (9)$$

여기서 \bar{k}_v 및 $\bar{\beta}_v$ 는 밴드내의 평균흡수계수 및 흡수선의 중첩을 나타내는 인자이며 이 데이터는 Soufiani와 Taine[14]의 데이터를 이용하였으며, p 및 x 는 총압과 해당 가스종의 물분율을 나타낸다. 성분 및 온도가 다른 가스를 통과하는 매체의 통과율은 Curtis-Godson 근사[15]로 구하였다.

3. 수치해석 및 결과

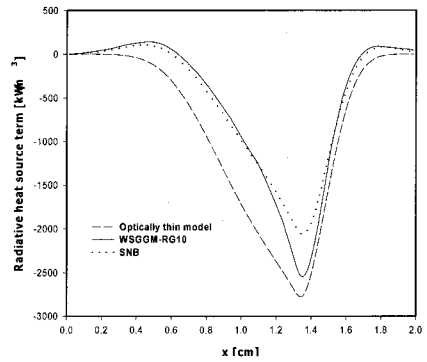
3.1 계산조건

본 연구에서는 4가지의 화염에 대하여 계산을 수행하였다. Table 1은 고려된 화염의 여러 조건들을 나타내고 있다. 모든 화염에 있어 노즐거리 는 2 cm이며, 총기압은 1기압이며 연료 및 산화제의 노즐부분의 온도는 298 K이며 산화제로는 공기가 이용되었다. 화염의 온도 등에 복사열전달이 영향을 많이 미치는 저스트레인을 영역을 선택하였다. Flame I, Flame II는 스트레인이 각각 5, 10s⁻¹인 일반 확산화염을, Flame III 및 IV는 당량비가 다른 2가지의 부분 예혼합화염이다. 여기서 당량비는 이론 공연비에 대한 실제 혼합가스의 공연비를 나타낸다. 대향류 화염을 모사하는 컴퓨터 프로그램은 OPPDIF 코드[7]를 이용하였으며, 1차원 복사열전달 계산 코드[16]를 OPPDIF에 삽입하여서 복사열전달이 1차원 대향류 화염에 미치는 영향을 고려하였다. 열역학 및 전달 물성치는 각각 Chemkin-III[17]와 Transport Package[18]를 이용하였다. 상세반응 기구로는 GRI 3.0[19]를 사용하였다. 이 반응기구는 53개의 화학종을 고려하고 있으며, 325개의 화학반응으로 이루어져 있다. 회색가스가중합법 및 SNB 모델을 이용할 경우에는 계산시간을 고려하여 S10의 구직적분을 활용하였다. 모든 복사 모델에 있어 화학종은 이산화탄소와 수증기로 국한시켜 고려하기로 한다.

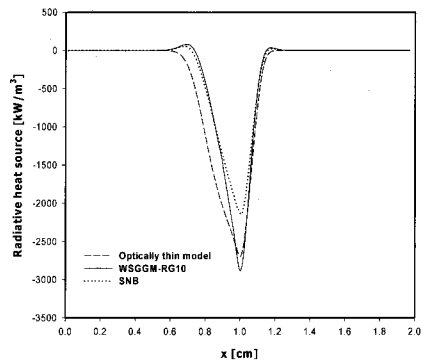
Table 1 Flames types studied

Flames	Equivalence ratio	Kind	Strain rate
Flame I	-	Diffusion	5
Flame II	-	Diffusion	10
Flame III	2	Partially Premixed	5
Flame IV	5	Partially Premixed	5

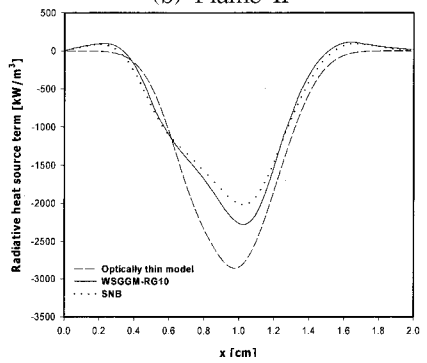
Figure 1에서는 고려된 모든 대향류 화염에 대한 광학적으로 얇은 근사 모델, SNB 및 WSGGM-RG10을 이용하여 구한 복사열생성향을 나타내고 있다. 복사열전달과 대류 및 연소에 대한 상호 연관성을 나타내는 항이 바로 복사열 생성향, 즉 $-\nabla \cdot q$ 이다. 모든 화염에 있어 화염의 온도와 연소가스의 농도가 증가하는 부분에서 복사열생성향이 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다. 그러나 광학적으로 얇은 모델은 화염내의 복사열의 재흡수 $-\nabla \cdot q > 0$ 부분을 전혀 예측하지 못하는 것을 볼 수 있다. 반면 WSGGM-RG10과



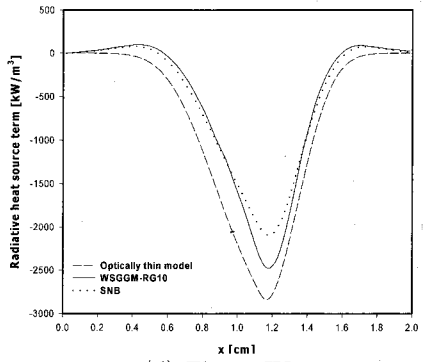
(a) Flame I



(b) Flame II



(c) Flame III



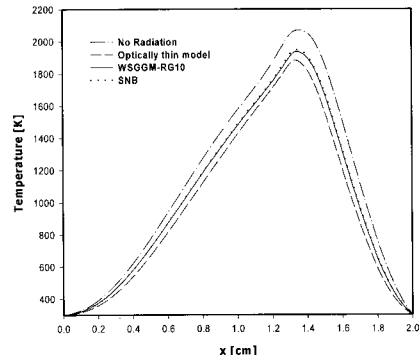
(d) Flame IV

Fig. 1 Radiative heat source terms for gas radiation models

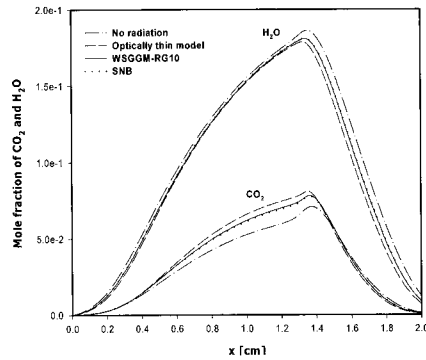
Table 2 The maximum temperature and molar fractions of various species for different flames

Item	Model	Flame I	Flame II	Flame III	Flame IV
Maximum Temperature	No radiation	2069.9	2091.5	2102.1	2089.6
	Optically thin	1882.1	1984.6	1766.6	1812.3
	WSGGM-RG10	1936.4	2003.6	1859.0	1890.6
	SNB	1949.0	2015.0	1872.0	1904.0
Maximum CO ₂	No radiation	0.0708	0.0691	0.0894	0.0772
	Optically thin	0.0809	0.0749	0.0936	0.0891
	WSGGM-RG10	0.0781	0.0739	0.0912	0.0858
	SNB	0.0775	0.0733	0.0910	0.0853
Maximum H ₂ O	No radiation	0.1862	0.1825	0.1624	0.1786
	Optically thin	0.1787	0.1788	0.1683	0.1708
	WSGGM-RG10	0.1808	0.1796	0.1689	0.1733
	SNB	0.1812	0.1799	0.1688	0.1735
Maximum CO	No radiation	0.0457	0.0491	0.0830	0.0600
	Optically thin	0.0268	0.0375	0.0429	0.0272
	WSGGM-RG10	0.0317	0.0396	0.0627	0.0367
	SNB	0.0327	0.0407	0.0638	0.0380
Maximum C ₂ H ₂	No radiation	0.0145	0.0143	7.658e-3	0.0116
	Optically thin	5.488e-3	8.959e-3	2.639e-3	3.158e-3
	WSGGM-RG10	8.201e-3	0.0101	1.902e-3	5.628e-3
	SNB	8.637e-3	0.0106	5.046e-3	5.931e-3
Maximum NO	No radiation	2.280e-4	2.537e-4	1.573e-4	2.097e-4
	Optically thin	1.176e-4	1.784e-4	4.413e-5	8.338e-5
	WSGGM-RG10	1.468e-4	1.909e-4	5.147e-5	1.108e-4
	SNB	1.536e-4	1.982e-4	5.381e-5	1.157e-4

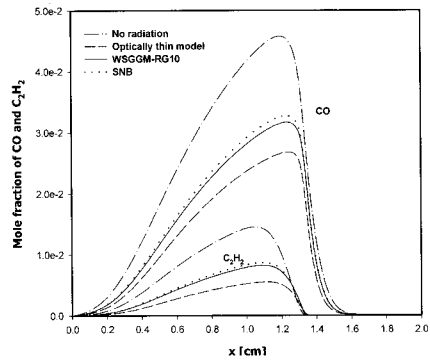
SNB 모델은 모든 화염에 있어 복사열의 재흡수를 비슷하게 예측하는 것을 볼 수 있다. 복사열의 소멸이 가장 큰 부분에서 모든 화염에 있어 WSGGM-RG10은 복사열생성량을 과대 예측하는 것을 볼 수 있다. 그러나 Flame III과 같이 화염 두께가 두껍고 온도구배가 작은 예혼합화염의 경우에 WSGGM-RG10의 오차가 비교적 작게 발생하는 것을 볼 수 있다. 광학적으로 얇은 근사 모델은 SNB 및 WSGGM-RG10 보다 복사열손실을 매우 크게 예측하는 것을 볼 수 있으며, 모든 화염에 있어 연료노즐 부분에서의 기준값으로 볼 수 있는 SNB 모델을 구하여 얻은 복사열생성량보다 과대 예측을 하는 것을 볼 수 있다. Table 2는 복사모델에 따른 화염온도와 몇 가지 성분들의 최대값을 나타내고 있다. Fig. 2는 Flame I의 화염구조를 나타내고 있다. 복사를 고려하지 않았을 경우 SNB 모델을 사용한 계산 결과보다 최대온도가 약 120 K 정도 크게 예측하게 된다. 이렇게 복사열손실을 고려하지 않을 경우에 화염의 온도는 과대 예측되고, 연소가스의 조성에도 많은 영향을 미친다. CO의 경우 최대값을 기준으로 약 20% 정도 과대 예측되며, NO의 경우에도 복사열전달을 고려하지 않을 경우 약 30% 정도 과대 예측되는 것을 볼 수 있다. 반면 광학적으로 얇은 근사 모델은 복사열손실을 크게 예측하며, 복사열의 재흡수가 고려되지 않으므로 화염의 온도가 낮게 예측 된다. WSGGM-RG10의 경우에는 Fig. 1 (a)에서와 같이 복사열손실의 1.2~1.4 cm 부분에서 최대 약



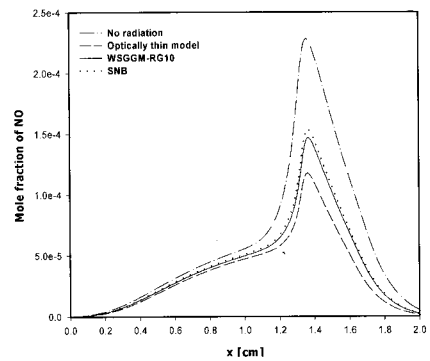
(a) Temperature profiles



(b) CO₂ and H₂O Profiles



(c) CO and C₂H₂ Profiles



(d) NO Profiles

Fig. 2 Flame structures of Flame I for different gas radiation models

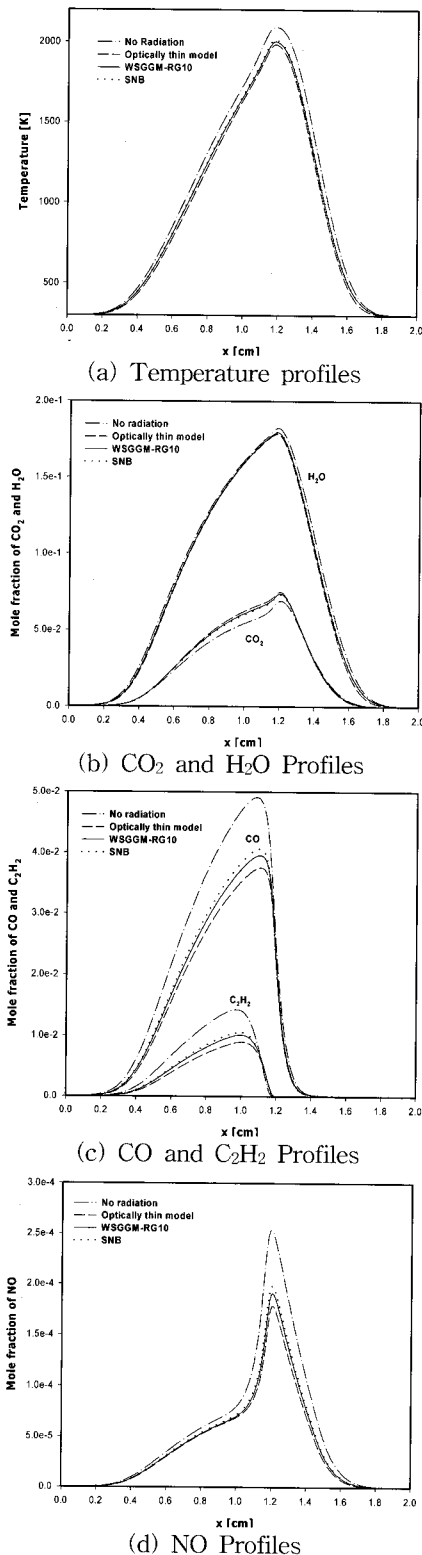
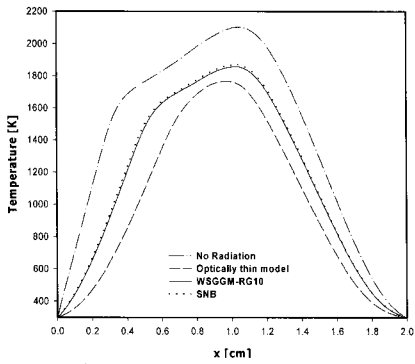


Fig. 3 Flame structures of Flame II for different gas radiation models

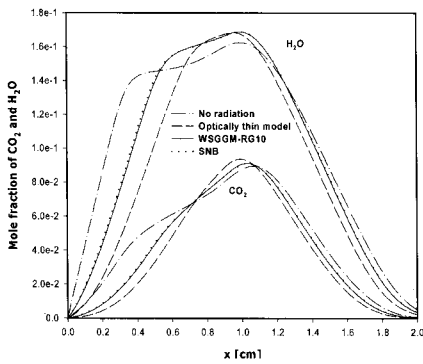
23%의 오차가 발생하지만, 그 부분을 제외한 대부분의 영역에서 SNB 결과와 매우 잘 일치하고 있는 것을 볼 수 있다. 그렇기 때문에 실제 화염에서의 온도 및 검토된 모든 가스 성분들의 분포가 SNB 결과와 매우 잘 일치하고 있으며, 이것은 Fig. 2 및 Table 2에서 확인할 수 있다.

Flame II의 경우 Flame I과 같이 산화제로 공기가 사용된 확산화염이고 노즐의 연료 및 산화제의 유입속도가 2배가 된다. 이렇게 스트레인이 증가할수록 복사열전달이 화염에 미치는 영향은 상대적으로 감소하게 된다. 이러한 현상은 Table 2의 최대 온도 값에서 확인할 수 있는데 복사를 고려하지 않은 경우에 SNB 모델을 이용하여 구한 최대 온도 보다 약 77 K 높게 예측되므로 스트레인이 낮은 Flame I에서의 최대 온도의 차이보다 작다. Fig. 3에서는 Flame II의 온도 및 몇가지 성분들의 분포를 나타내고 있는데 WSGGM-RG10를 이용하여 화염구조가 SNB 모델을 이용한 결과와 매우 잘 일치하고 있는 것을 확인할 수 있다. Flame III의 경우는 부분 예혼합 화염으로 복사를 고려하지 않았을 경우 2102.1K, SNB를 이용하였을 경우 1872K로 약 230K의 온도 차이가 발생하므로 부분 예혼합화염에서는 확산화염보다 복사효과가 더 많이 연소에 영향을 미치는 것을 볼 수 있다. 부분 예혼합화염에서 화염 두께가 두꺼워 복사열을 많이 흡수하는 매체인 이산화탄소와 수증기 등이 화염 전역에 있어 분포되어 있으며, 이런 영향으로 복사에 의한 에너지 소멸이 확산화염보다 크게 나타나는 것으로 예측될 수 있다. Flame III의 경우에 WSGGM-RG10의 경우 온도 및 여러 가스 성분들의 분포값을 SNB로 구한 기준값과 비교하여 보았을 때 매우 잘 예측하는 것을 Fig. 4에서 확인할 수 있다. 반면 광학적으로 얇은 근사 모델을 이용하여 구한 복사열생성항의 경우 SNB와 WSGGM-RG10의 결과와 매우 다른 양상의 분포값을 나타내는 것을 Fig. 1 (c)에서 확인할 수 있으며, 최대값 부분에서 약 50% 이상의 오차가 발생하는 것을 볼 수 있다. 광학적으로 얇은 모델은 매체가 광학적으로 얇아 복사에너지를 흡수하지 못한다는 가정으로 인하여 Flame III와 같이 복사참여 가스(수증기, 이산화탄소)의 농도가 큰 경우 큰 오차가 발생하게 되는 것이다. Flame III에서는 NO의 분포는 복사열전달을 고려하지 않은 경우 SNB 모델 및 WSGGM-RG10을 이용한 경우보다 약 3배 이상의 NO가 발생하게 되는 것으로 계산되었는데 여기서 Flame III의 경우에 복사열전달의 고려가 저스트레인 영역의 화염에 있어 매우 중요한 것을 확인할 수 있다.

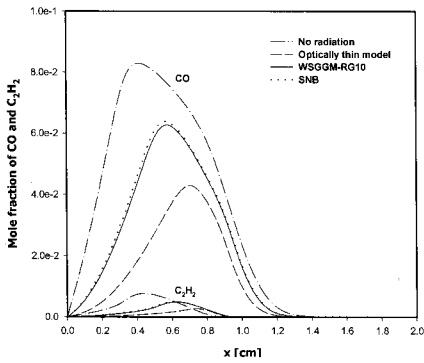
Flame IV의 경우 Flame III와 마찬가지로 부분 예혼합화염이다. 그러나 연료노즐의 당량비가



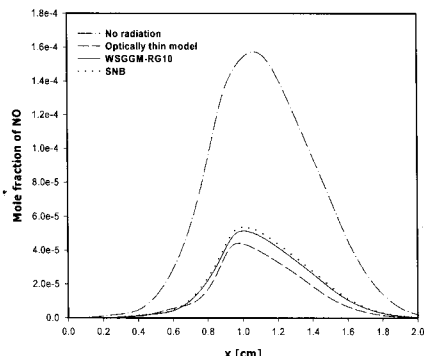
(a) Temperature profiles



(b) CO₂ and H₂O Profiles

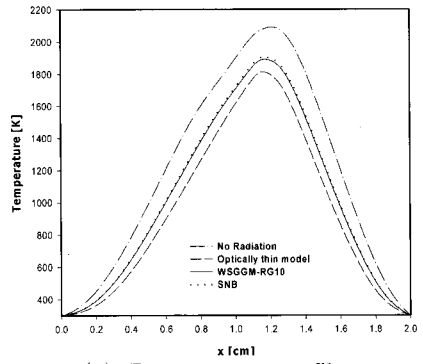


(c) CO and C₂H₂ Profiles

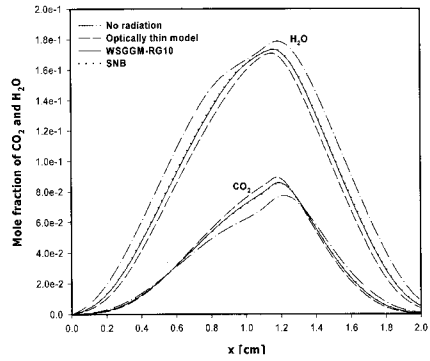


(d) NO Profiles

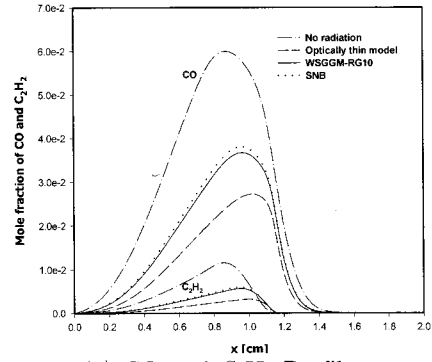
Fig. 4 Flame structures of Flame III for different gas radiation models



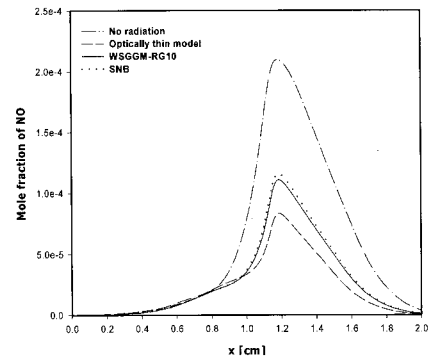
(a) Temperature profiles



(b) CO₂ and H₂O Profiles



(c) CO and C₂H₂ Profiles



(d) NO Profiles

Fig. 5 Flame structures of Flame IV for different gas radiation models

5로 연료 노즐에서 Flame III의 경우 보다 더 과농하게 연료-공기 혼합가스가 유입되는 경우이다. 이 경우 Flame III와 마찬가지로 SNB 및 WSGGM-RG10을 이용하여 구한 온도의 최대값과 복사를 고려하지 않은 경우의 최대온도와 약 190 K 정도의 온도가 차이가 많이 난다. Flame IV의 경우 Flame III의 경우보다 복사효과가 연소에 영향을 더 적게 미치지만 스트레인이율이 같고 확산화염인 Flame I와 비교하였을 때 복사효과가 연소에 더 많은 영향을 미치는 것을 볼 수 있다. Flame IV의 경우에도 복사로 인한 에너지 손실을 고려하지 않을 경우 많은 오차가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 5에서 여러 가스 복사 모델을 이용하여 구한 Flame IV의 화염구조를 보여주고 있는데 화염에서도 WSGGM-RG10이 기준모델인 SNB모델과 거의 비슷한 결과를 산출하여 내는 것을 알 수 있다.

확산화염 및 부분 에혼합화염에 적용된 WSGGM-RG10은 고려된 모든 화염에서 기준해인 SNB 모델을 이용하여 얻은 결과와 비교하였을 때 매우 정확한 계산 결과를 도출할 수 있음을 확인하였다. WSGGM-RG10을 채택한 OPPDIF를 이용하여 Flame I을 계산하였을 때 소요되는 컴퓨터 계산 시간은 총 332.5 초이며, 순수 복사열전달의 계산에 걸린 시간의 합은 2.9 초 밖에 되지 않는 반면 SNB 모델의 경우 2.4GHz의 CPU를 장착한 컴퓨터를 사용하여 걸린 계산하였을 경우 1407초의 전체 계산 시간 중 복사열전달 계산에 1082초가 소요되었다. 복사열전달 계산시간을 비교하여 볼 때 SNB에 비하여 WSGGM-RG10의 경우 약 1/370로 단축할 수 있었으며, 복사열전달 및 연소를 포함한 총계산 소요시간은 1/4정도만 소요되었다. WSGGM-RG10은 컴퓨터 계산 효율 면에서도 뛰어난 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 회색가스제조합을 이용한 회색가스가중합법을 대향류 화염을 모사하는 컴퓨터 프로그램인 OPPDIF에 적용하여 복사열전달이 대향류 화염에 미치는 영향을 고려하였다. 비교를 위하여 SNB모델, 광학적으로 얇은 가정을 이용한 모델을 사용하였다. 4종류의 저스트레인의 대향류 화염이 계산되었다. 광학적으로 얇은 모델은 계산시간은 가장 적게 걸렸으나 복사열전달의 영향이 크게 나타나는 저스트레인의 화염에 많은 오차를 보였으며, 특히 광학두께가 두꺼운 에혼합화염에 많은 오차를 나타내었다. 고려된 모든 화염에 대하여 회색가스 제조합을 이용한 회색가스가중합법은 SNB모델로 구한 기준

화염구조와 잘 일치하는 결과를 보였으며, 계산 시간도 좁은밴드모델에 비하여 매우 적게 소요되었다. 그러므로 임의의 성분비에서 적용 가능한 회색가스제조합을 이용한 회색가스가중합법은 대향류화염에 미치는 복사 열전달 영향을 고려하기에 유리한 가스 복사 물성 모델임을 알 수 있다.

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) pp.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) pp.469-507, 1992
- [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*, NASASP-3080, Scientific and Technical Information Office, Washington D. C.
- [5] D.K. Edwards, *Molecular gas band radiation*, *Advances in Heat Transfer* 12, Academic Press, New York, pp.115-193, 1976.
- [6] W. H. Park, T. K. Kim, "Development of the WSGGM using a Gray Gas Regrouping Technique for the Radiative Solution within a 3-D Enclosure filled with Nonuniform Gas Mixtures," *JSME International Journal Series B*, Vol.48, No.2, pp.310-315, 2005.
- [7] E. Lutz, J.K. Robert, F.G. Joseph, M.R. Fran, Oppdif: "a fortran program for computing opposed-flow diffusion flames," SAND96-8243, 1997
- [8] H.K. Chellian, C.K. Law, T. Uda, M.D. Smoke, F.A. Williams, "An experimental and theoretical investigation of the dilution,

- pressure, and flow-field effects on the extinction condition of methane-air-nitrogen diffusion flames," Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 23, pp.503-511, 1990.
- [9] 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), pp.539 - 550, 1989.
- [10] 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 atmosphere," Journal of Geophysical Research 96 (D5), pp.9027 - 9063, 1991.
- [11] M.F. Modest, Radiative Heat Transfer, McGraw-Hill, 1993.
- [12] C.L. Tien, Thermal radiation properties of gases, Advances in Heat Transfer, Vol. 5, pp. 253-324, 1968.
- [13] Y. Ju, H. Guo, K. Maruta, F. Liu, "On the extinction limit and flammability limit of non-adiabatic stretched methane-air premixed flames," Journal of Fluid Mechanics, Vol. 342, pp.315-334, 1997.
- [14] 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, Vol. 40, No. 4, pp.987-991, 1997.
- [15] W.L. Godson, "The evaluation of infrared radiation fluxes due to atmospheric water vapor," Quarterly Journal of Royal Meteorological Society, Vol. 79, pp.367-379, 1953.
- [16] T.K. Kim, J. A. Menart, H. Lee, "Nongray Radiative Gas Analyses Using the S-N Technique," ASME Journal of Heat Transfer, Vol. 113, pp.946-952, 1991.
- [17] R.J. Kee, F.M. Rupley, J.A. Miller, "A fortran chemical kinetics package for the analysis of gas phase chemical kinetics," SAND89-8009B, 1989.
- [18] R.J. Kee, G. Dixon-Lewis, M.E. Coltrin, J.A. Miller, "A fortran chemical kinetics package for the evaluation of gas phase multi-component transport," SAND86-8246, 1994.
- [19] GRI Mech 3.0, <http://www.me.berkeley.edu/grimech/>