

가스 복사 모델에 따른 대향류화염에서의 화염 구조 연구

박원희[†] · 김동현^{*} · 김태국^{**}

Study on the Flame Structures of Counter Flow Flames by Using Different Gas Radiation Models

Won-Hee Park, Dong-Hyun Kim, Tae-Kuk Kim

Key Words : Counter flow flame(대향류화염), Radiative heat transfer(복사열전달), Gray gas regrouping(회색가스재조합), Flame structure(화염구조)

Abstract

WSGGM with gray gas regrouping is successfully applied to study the flame structure of counter 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.

1. 서 론

복사열전달은 연소로, 보일러, 소각로 등 특히 고온의 시스템에서 중요한 열전달 모드이다. 복사열전달 특성을 예측하기 위하여서는 복사열전달 방정식 해석기법과 가스 및 입자의 복사물성치 모델링 기법을 상황에 따라 적절히 선택하는 것이 필요하다. 가스분자의 복사 특성은 온도, 화학종의 분압, 총압, 경로길이, 파장 등에 대하여 복잡한 함수로 표현된다. 특히 파장에 따른 복사 흡수 특성의 변화로 인하여 복사열전달 해석의 어려움을 더욱 가중된다.

복사물성 모델은 2 가지 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 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.

통과율을 구하는 모델인 밴드모델의 경우에는 임의의 복사열전달 해석기법에 사용될 수 없는 단점이 있으며 다차원에서는 해석하기가 매우 힘들며, 흑체가 아닌 경계에서는 이용될 수 없다. 종합하여 보면 비회색 경계(파장에 따라 반사율이 변하는)를 포함하지 않는 일반적인 연소현상의 해석에서는 흡수계수를 모델링하는 총괄 스펙트럼 기법이 추천될 수 있다.

본 논문에서는 상세한 화학반응 및 화염구조

[†] 한국철도기술연구원 레도토목연구본부 공기유동연구그룹

E-mail : whpark@krri.re.kr

TEL : (031)460-5358 FAX : (031)460-5319

^{*} 한국철도기술연구원 레도토목연구본부 공기유동연구그룹

^{**} 중앙대학교 기계공학부

에 대한 실험연구를 수행할 수 있는 대향류 화염을 선택하였으며, 복사열전달에 의한 영향을 고려하기 위하여 임의의 연소가스 성분율에서 적용 가능한 2 가지의 총괄 스펙트럼기법과 좁은 밴드모델⁽⁴⁾을 사용하였다. 좁은밴드모델로 얻은 결과는 기준해로 이용되었다. 총괄스펙트럼 모델은 광학적으로 얇은 가정(optically thin model)을 이용한 모델과 최근 제안된 회색가스재조합을 이용한 회색가스가중합법모델⁽⁶⁻⁸⁾을 이용하였다. 대향류 계산 프로그램인 OPPDIF⁽⁹⁾을 복사열전달 특성을 고려할 수 있도록 수정하였으며 이를 이용하여, 화염에 복사열전달이 미치는 영향을 검토하였다. 4 종류의 대향류 화염조건이 계산되었으며, 각 모델에 대한 계산 시간도 언급하였다.

2. 본 론

2.1 대향류화염에서의 지배방정식

대향류화염은 중심이 일직선 상에 있고 서로 바라보게 장착되어 있는 노즐에서 연료 및 산화제가 방출되어 생성되는 화염을 말한다. 대향류 화염은 화염의 상세한 화학반응 및 화염구조에 대한 실험연구를 수행할 수 있어 매우 매력적이며, 여기서 얻은 층류화염의 특성은 여러 연소장치에서 광범위하게 적용될 수 있다. 층류화염을 이해하는 것 자체로서 중요한 의미를 가지지만 보다 더 중요한 사실은 이러한 층류 화염을 이해하는 것이 난류 화염을 연구하는데 필수적이라는 것이다. 대향류 화염 현상을 지배하는 여러 방정식에 대해 간단히 언급하고자 한다.⁽⁹⁾ 원통좌표계에서의 정상상태의 연속방정식은

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho v r) = 0 \quad (1)$$

과 같으며, 여기서 u 및 v 는 축방향 및 반경방향의 속도이며, ρ 는 혼합 기체의 밀도이다. 축방향 속도를 비롯한 온도 및 모든 물리량이 x 만의 함수라는 가정에 따라 연속방정식을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{dJ}{dx} - G = 0 \quad (2)$$

여기서 J 는 축방향 질량유속, G 는 반경방향 질량유속 성분으로 다음과 같다.

$$J = \rho u / 2 \quad (3)$$

$$G = -\rho v / r \quad (4)$$

H 는 반경방향의 압력 구배의 고유치로 다음과

같이 정의되며,

$$H = \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} \quad (5)$$

이들은 이용하여 반경방향의 운동량방정식을 나타내면 다음과 같다.

$$H - 2 \frac{d}{dx} \left(\frac{JG}{\rho} \right) + \frac{3G^2}{\rho} + \frac{d}{dx} \left[\mu \frac{d}{dx} \left(\frac{G}{\rho} \right) \right] = 0 \quad (6)$$

식 (5) 및 (6)에서의 p 와 μ 는 압력 및 점성계수이다. 또한 에너지방정식은 다음과 같다.

$$\rho u \frac{dT}{dx} - \frac{1}{c_p} \frac{d}{dx} \left(\lambda \frac{dT}{dx} \right) + \frac{\rho}{c_p} \sum_k c_{pk} Y_k V_k \frac{dT}{dx} + \frac{1}{c_p} \sum_k h_k \dot{\omega}_k + \frac{\nabla \cdot q}{c_p} = 0 \quad (7)$$

여기서 T , c_p , λ 는 온도, 혼합기체의 정압비열 및 열전도계수이다. c_{pk} , Y_k , h_k , $\dot{\omega}_k$ 는 k 종의 정압비열, 질량분율, 생성엔탈피와 화학종의 생성율을 나타낸다. 또한 $-\nabla \cdot q$ 은 복사열전달로 인한 복사열생성항이며, 복사열전달을 무시할 경우 이 항은 0이 된다. 화학종방정식은 다음과 같다.

$$\rho u \frac{dY_k}{dx} - \frac{d}{dx} (\rho Y_k V_k) - \dot{\omega}_k W_k = 0 \quad (8)$$

여기서 W_k 는 k 종의 분자량이며, V_k 는 화학종 k 의 확산속도로 다음과 같이 구하여진다.

$$V_k = \frac{1}{X_k \bar{W}} \sum_{j=1}^K W_j D_{kj} \frac{dX_j}{dx} - \frac{D_k^T}{\rho Y_k T} \frac{dT}{dx} \quad (9)$$

여기서 D_{kj} 및 D_k^T 는 각각 다성분확산계수 및 열확산 계수이며, X_k 는 화학종 k 의 몰분율이고, K 는 혼합기체에 존재하는 가스 종의 수이다. 그리고 상태방정식은 다음과 같다.

$$p = \frac{\rho RT}{\bar{W}} \quad (10)$$

여기서 \bar{W} 는 혼합가스의 평균 분자량이다. 각각 지배방정식에 대한 경계조건은 다음과 같이 표현된다.

Fuel:

$$F = \frac{\rho_F u_F}{2}, G=0, T=T_F, \rho u Y_k + \rho Y_k V_k = (\rho u Y_k)_F \quad (11a)$$

Oxidant:

$$F = \frac{\rho_O u_O}{2}, G=0, T=T_O, \rho u Y_k + \rho Y_k V_k = (\rho u Y_k)_O \quad (11b)$$

하첨자 F 및 O 는 연료 및 산화제 노즐에서의 값을 나타낸다. 임의 스트레인을에 대한 화염구조를 계산하기 위해 그에 해당하는 노즐 유속을 초기조건으로 입력해야 하는데, 이 유속을 계산하기 위하여 대향류확산화염의 스트레인을을 계

산한 다음과 같은 식⁽¹⁰⁾을 이용하였다.

$$a = \frac{2(-u_o)}{L} \left[1 + \frac{u_F}{(-u_o)} \sqrt{\frac{\rho_F}{\rho_o}} \right] \quad (11)$$

여기서 첨자 F 및 O 는 연료 및 산화제 노즐을 나타낸다.

2.2 복사물성 모델

2.2.1 좁은밴드모델(Statistical narrow band model)

등온 및 등질의 경로길이 Δs 에 대한 통과율을 다음과 같이 구할 수 있다.⁽¹¹⁾

$$\bar{\tau}(\Delta s) = \exp \left(-\frac{\bar{\beta}_v}{\pi} \left(\sqrt{1 + \frac{2\pi p x \Delta s \bar{k}_v}{\bar{\beta}_v}} \right) \right) \quad (13)$$

여기서 \bar{k}_v 및 $\bar{\beta}_v$ 는 밴드내의 평균흡수계수 및 흡수선의 중첩을 나타내는 인자이며 이 데이터는 Soufiani, Taine⁽¹²⁾를 이용하였으며, p 및 x 는 총압과 해당 가스종의 몰분율을 나타낸다. 성분 및 온도가 다른 가스를 통과하는 매체의 통과율은 Curtis-Godson 근사⁽¹³⁾로 구하였다.

2.2.2 광학적으로 얇은 근사를 이용한 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.⁽⁸⁸⁾

$$-\nabla \cdot \mathbf{q} = 4\kappa_{pl} \sigma (T_\infty^4 - T^4) \quad (14)$$

여기서 σ 는 스테판-볼츠만(Stefan-boltzmann) 상수이며, T 는 국부 온도를, κ_{pl} 는 가스의 플랑크 평균 흡수계수를 나타낸다. 본 연구에서는 Ju 등 [89]이 제안한 온도의 다항식으로 표현되는 식을 이용하여 플랑크 평균 흡수계수를 구하였다.

2.2.3 회색가스재조합을 이용한 회색가스가중합 모델

이산화탄소-수증기 혼합가스의 파장별 가중치 $W_{mix}(\eta)$ 와 흡수계수는 다음과 같이 표현될 수 있다.⁽¹²⁾

$$W_{mix}(\eta) = W_{CO_2}(\eta) \times W_{H_2O}(\eta), \quad (15)$$

$$\kappa_{mix} = \kappa_{i0,CO_2} \frac{e^{-\alpha_{i,CO_2}/T}}{T^2} PX_{CO_2} + \kappa_{i0,H_2O} \frac{e^{-\alpha_{i,H_2O}/T}}{T^2} PX_{H_2O}. \quad (16)$$

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

$$W_{mix} = \frac{\sum_{\eta} W_{mix}(\eta) I_b(\eta) \Delta \eta}{\sum_{\eta} I_b(\eta) \Delta \eta} \quad (17)$$

여기서 $\Delta \eta$ 는 좁은 밴드 모델의 밴드두께를 나타낸다. 좁은밴드 회색가스가중합법을 이용하여 연소 혼합가스의 복사물성을 나타내기 위해서는 많은 수의 회색가스 수가 필요하다. Park and Kim⁽⁷⁾은 정확도를 유지하며 컴퓨터 계산 시간을 줄이기 위하여 회색가스 재조합이 제안하였다. 이 방법은 비슷한 크기를 갖는 회색가스의 흡수계수를 그룹으로 나누어서 고려하는 방법이다. 재조합된 i 번째 그룹의 그룹의 파장별 가중치는 그룹에 속하여 있는 모든 가중치를 합하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$W_{i,new}(\eta) = \sum_{j=1}^{N_i} W_{j,mix}(\eta), \quad (18)$$

$\kappa_{i,new}$ 는 해당 그룹에 속하여 있는 각각의 흡수계수의 가중치의 가중된 평균으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\kappa_{i,new} = \frac{\sum_{j=1}^{N_i} \kappa_{j,mix} W_{j,mix}}{W_{i,new}} \quad (19)$$

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

3. 수치해석 및 결과

3.1 계산 조건

Table1 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

본 연구에서는 4가지의 화염에 대하여 계산을 수행하였다. Table 1은 고려된 화염의 여러 조건들을 나타내고 있다. 모든 화염에 있어 노즐거리는 2 cm이며, 총기압은 1기압이며 연료 및 산화제의 노즐부분의 온도는 298 K이며 산화제로는 공기가 이용되었다. 화염의 온도 등에 복사열전달이 영향을 많이 미치는 저스트레이놀 영역을

선택하였다. Flame I, Flame II 는 스트레인이율이 각각 $5, 10s^{-1}$ 인 일반 확산화염을, Flame III 및 IV 는 당량비가 다른 2 가지의 부분 예혼합화염이다. 여기서 당량비는 이론 공연비에 대한 실제 혼합 가스의 공연비를 나타낸다. 1 차원 복사열전달 계산 코드를 OPPDIF⁽⁹⁾에 삽입하여서 복사열전달이 1 차원 대향류 화염에 미치는 영향을 고려하였다. 열역학 및 전달 물성치는 각각 Chemkin-II⁰와 Transport Package⁰를 이용하였다. 상세반응 기구로는 GRI 3.0⁰를 사용하였다. 이 반응기구는 53 개의 화학종을 고려하고 있으며, 325 개의 화학반응으로 이루어져 있다. 회색가스가중합법 및 SNB 모델을 이용할 경우에는 계산시간을 고려하여 S_{10} 의 구적적분을 활용하였다. 모든 복사 모델에 있어 화학종은 이산화탄소와 수증기로 국한시켜 고려하기로 한다.

3.2 수치해석 결과

Figure 1 에서는 고려된 모든 대향류 화염에 대한 광학적으로 얇은 근사 모델, SNB 및 WSGGM-RG10 을 이용하여 구한 복사열생성향을 나타내고 있다. 복사열전달과 대류 및 연소에 대한 상호 연관성을 나타내는 항이 바로 복사열생성향, 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-RG10 과 SNB 모델은 모든 화염에 있어 복사열의 재흡수를 비스하게 예측하는 것을 볼 수 있다. 복사열의 소멸이 가장 큰 부분에서 모든 화염에 있어 WSGGM-RG10 은 복사열생성향을 과대 예측하는 것을 볼 수 있다. 그러나 Flame III 과 같이 화염 두께가 두껍고 온도구배가 작은 예혼합화염의 경우에 WSGGM-RG10 의 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 복사열생성향보다 과대 예측을 하는 것을 볼 수 있다. Table 2 및 3 은 복사모델에 따른 화염온도와 몇 가지 성분들의 최대값을 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. CO 의 경우 최대값을 기준으로 약 20% 정도 과대 예측되며, NO 의 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 과소 평가되게 된다. WSGGM-RG10 을 이용하여 Flame I 에 대하여 계산한 경우 복사열손실의 1.2~1.4 cm 부분에서 최대 약 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 있는 것을 확인할 수 있었다.

Flame II 의 경우 Flame I 과 같이 산화제로 공기가 사용된 확산화염이고 노즐의 연료 및 산화제의 유입속도가 2 배가 된다. 이렇게 스트레인이율이 증가할수록 복사열전달이 화염에 미치는 영향은 감소하게 된다. 이러한 현상은 Table 2 의 최대 온도 값에서 확인 할 수 있는데 복사를 고려하지 않은 경우에 SNB 모델을 이용하여 구한 최대 온도 보다 약 77 K 높게 예측되므로 스트레인이율이 낮은 Flame I 에서의 최대온도의 차이보다 작다.

Flame III 의 경우는 부분 예혼합화염으로 복사를 고려하지 않았을 경우 2102.1K, SNB 를 이용하였을 경우 1872K 로 약 230K 의 온도차이가 발생하므로 부분 예혼합화염에서는 확산화염보다 복사효과가 더 많이 연소에 영향을 미치는 것을 볼 수 있다. 부분 예혼합화염에서 화염 두께가 두꺼워 복사열을 많이 흡수하는 매체인 이산화탄소와 수증기가 화염 전역에 있어 분포되어 있으며, 이런 영향으로 복사에 의한 에너지 소멸이 확산화염보다 크게 나타나는 것으로 예측될 수 있다. Flame III 의 경우에 WSGGM-RG10 의 경우 온도 및 여러 가스 성분들의 분포값을 SNB 로 구한 기준값과 비교하여 보았을 때 매우 잘 예측하였다. 반면 광학적으로 얇은 근사 모델을 이용하여 구한 복사열생성향의 경우 SNB 와 WSGGM-RG10 의 결과와 매우 다른 양상의 분포값을 나타내는 것을 Fig 2 에서 확인할 수 있으며, 최대값부분에서 약 50% 이상의 오차가 발생하는 것을 볼 수 있다. 광학적으로 얇은 모델은 매체가 광학적으로 얇아 복사에너지를 흡수하지 못한다는 가정으로 인하여 Flame III 와 같이 복

사참여 가스(수증기, 이산화탄소)의 농도가 큰 경우 큰 오차가 발생하게 되는 것이다. Flame III에서는 NO의 분포를 주목할 필요가 있는데, 복사열전달을 고려하지 않은 경우 SNB 모델 및 WSGGM-RG10을 이용한 경우보다 약 3배 이상의 NO가 발생하게 되는 것으로 계산되므로 Flame III의 경우에 복사의 영향이 연소에 많은 영향을 미치는 것을 다시 한번 확인할 수 있다.

Flame IV의 경우 Flame III와 마찬가지로 부분 예혼합화염이다. 그러나 연료노즐의 당량비가 5로 연료 노즐에서 Flame III의 경우보다 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 스트레인을 같이 갖고 확산화염인 Flame I와 비교하였을 때 복사효과가 연소에 더 많은 영향을 미치는 것을 볼 수 있다. Flame IV의 경우에도 복사로 인한 에너지

Table.2 Comparison of the maximum temperature and molar fractions of CO₂ and H₂O for different flames

Item	Model	Flame I	Flame II	Flame III	Flame IV
Maximum temperature	Noradiation	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	Noradiation	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	Noradiation	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

Table.3 Comparison of the maximum molar fractions of CO, C₂H₂ and NO for different flames

Item	Model	Flame I	Flame II	Flame III	Flame IV
Maximum CO	Noradiation	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	Noradiation	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	Noradiation	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

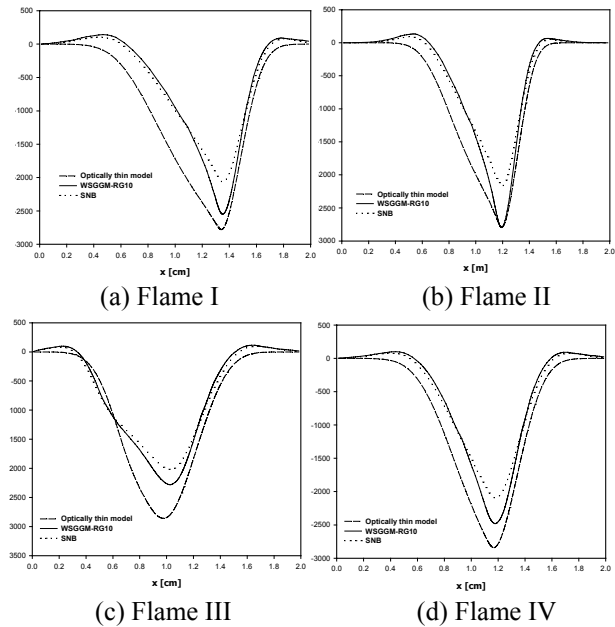


Fig.1 Radiative heat source terms of Flames I, II, III, and for different radiative solution method

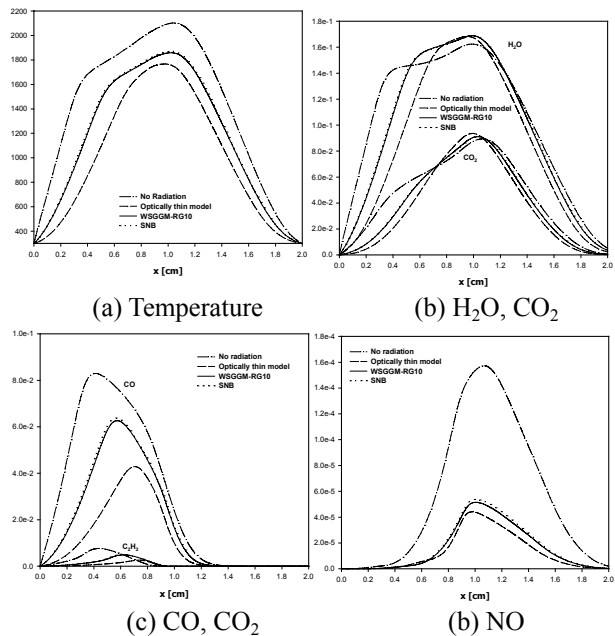


Fig.2 Flame structures of Flame III for different radiative solution methods

손실을 고려하지 않을 경우 많은 오차가 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

확산화염 및 부분 예혼합화염에 적용된 WSGGM-RG10은 고려된 모든 화염에서 기준해인 SNB 모델을 이용하여 얻은 결과와 비교하였을 때 매우 정확한 계산 결과를 도출할 수 있음을

확인하였다. WSGGM-RG10 을 채택한 OPPDIF 를 이용하여 Flame I 을 계산하였을 때 소요되는 컴퓨터 계산 시간은 총 332.5 초이며, 순수 복사열 전달의 계산에 걸린 시간의 합은 2.9 초 밖에 되지 않는 반면 SNB 모델의 경우 1407 초의 전체 계산 시간 중 복사열전달 계산에 1082 초가 소요되었다. 복사열전달 계산시간을 비교하여 볼 때 WSGGM-RG10 의 경우 약 1/370 로 단축할 수 있었으며, WSGGM-RG10 은 컴퓨터 계산 효율 면에서도 뛰어난 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 대향류 화염을 모사하는 컴퓨터 프로그램인 OPPDIF 코드^[86]를 이용하여 복사열전달이 대향류 화염에 미치는 영향을 고려하였다. 복사 흡수특성을 고려하기 위하여 좁은밴드모델, 광학적으로 얇은 가정을 이용한 모델과 회색가스재조합을 이용한 회색가스가중합법모델⁰을 사용하였다. 4 종류의 다른 조건의 대향류 화염이 계산되었다. 광학적으로 얇은 모델은 계산 시간은 가장 적게 걸렸으나 복사열전달의 영향이 크게 나타나는 저스트레이인율 영역이나 광학두께가 두꺼운 예혼합화염에 많은 오차를 나타내었다. 고려된 모든 화염에 대하여 회색가스 재조합을 이용한 회색가스가중합법은 좁은밴드모델로 구한 기준 화염구조와 잘 일치하는 결과를 보였으며, 계산 시간도 좁은밴드모델에 비하여 매우 적게 소요되었다. 그러므로 임의의 성분비에서 적용 가능한 회색가스재조합을 이용한 회색가스가중합법은 대향류화염에 미치는 복사열 전달 영향을 고려하기에 유리한 복사 물성치 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) 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) 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.
- (7) 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.
- (8) W.H. Park, Study on the radiative characteristics by Nongray gas mixtures and application on combustion systems, Doctoral Thesis, Chung-Ang Univ., 2003.
- (9) E. Lutz, J.K. Robert, F.G. Joseph, M.R. Fran, Oppdif: a fortran program for computing opposed-flow diffusion flames, SAND96-8243, 1997
- (10) 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.
- (11) C.B. Ludwig, W. Malkmus, J.E. Readon, A.L. Thompson, Handbook of Infrared Radiation from Combustion Gases, NASA SP-3080, Scientific and Technical Information Office, Washington D.C., 1973.
- (12) 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.
- (13) 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.
- (14) 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.
- (15) 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.
- (16) GRI Mech 3.0, <http://www.me.berkeley.edu/grimech/>