

비회색 가스 복사를 고려한 층류대향류 부분에혼합 화염에서의 CO₂ 및 H₂O 첨가에 따른 영향 연구

조범진* · 김태국**†

Effects of CO₂ and H₂O Additions on Partially Premixed Counterflow Flame by Considering Nongray Gas Radiation

Bum-Jin Jo* and Tae-Kuk Kim**†

ABSTRACT

Detailed flame structures of the counterflow flames of CH₄/Air formed with CO₂ and H₂O addition are studied numerically. The detailed chemical reactions are modeled by using the OPPDIF and CHEMKIN-II code. Only the CO₂ and H₂O are assumed to participate in radiative heat transfer while all other gases are assumed to be transparent. The discrete ordinates method(DOM) and the narrow band based WSGGM with a gray gas regrouping technique(WSGGM-RG) are applied for modeling the radiative transfer through non-homogeneous and non-isothermal combustion gas mixtures generated by the counter flow flames. The results compared with the SNB model show that the WSGGM-RG is successful in modeling the counterflow flames with non-gray gas mixture. The numerical results show that the addition of CO₂ and H₂O to the oxidant nozzle lowers the peak temperature and the NO concentration in flame.

Key Words : Radiative heat transfer, Counterflow flame, Combustion, Laminar Flow, WSGGM-RG, Discrete Ordinates Method, H₂O addition, CO₂ Addition

기 호 설 명

		그리스 문자	
f	격자점들 사이 보간가중치	α_i	흡수계수 모델상수 [K]
G	반경방향질량유속성분 [$\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$]	ϕ	당량비
I	복사강도 [$\text{W}/\text{m}^2\text{sr}$]	η	파동수 [cycles/s]
J	축방향질량유속성분 [$\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$]	μ	x방향 여현
κ	흡수계수 [m^{-1}]	ω_m	각도 가중치
κ_{io}	흡수계수 모델상수 [K^2/atm]	$\Delta\eta$	밴드두께 [μm]
L	통과거리 [m]	τ	통과율
M	회색가스 수		
N_i	i 번째 그룹의 회색가스 수		하첨자
P	대기압 [atm]	F	fuel
q	복사열유속 [W/m^2]	O	oxidant
T	온도 [K]	i	i 번째 회색가스
u	축방향(x) 속도	b	후제
v	반경방향(r) 속도	m	m 번째 각도
X	몰분율	mix	혼합가스
Y	질량분율	new	재조합
W	총괄 가중치 또는 분자량	p	p 번째 격자점
$W(\eta)$	회색가스의 좁은밴드별 가중치		상첨자
		—	좁은밴드 평균

* 중앙대학교 기계공학부 대학원
 ** 중앙대학교 기계공학부
 † 연락처, kimtk@cau.ac.kr

1. 서론

증류대향류화염은 연소특성을 이해하는데 있어서 실험과 수치해석의 비교가 용이하므로 많은 연구자들의 연구에서 고려되었다. 대향류화염은 특성상 1차원적인 해석이 가능하며 유동해석도 매우 간단하게 되는 장점이 있기 때문이다. 따라서 혼합기체의 속도 및 온도, 혼합비, 첨가물, 복사열손실 등의 영향을 관찰하는데 유리하다. 증류화염의 연구는 그 자체로도 유익하지만 난류화염의 연구에 있어서 필수적이라는데 더 큰 의의가 있다고 할 수 있다.

산화제 혹은 연료 측에 첨가물을 혼합할 경우 화염구조에 영향을 주게 되는데 이에 대한 연구가 이미 30여년 전부터 있었다[1]. Du 등[2]은 연소시스템에 첨가물을 더할 경우 soot 형성에 있어서 반응 화학종의 응집 감소로 인한 회색효과, 화염온도 변화에 의한 열적효과, 그리고 soot 형성과 산화에 관계되는 화학반응에 첨가물의 참여로 인한 직접적인 화학적 효과의 세 가지 경로로 영향을 줌을 밝혔다. Liu 등[3]은 대향류 C₂H₄ 확산화염에 CO₂를 첨가하였을 경우의 화학적 영향에 대한 메커니즘과 NO_x 형성에 있어서 CO₂ 첨가의 화학적 영향을 수치적으로 연구하였으며 soot 발생저감을 위한 CO₂ 첨가의 화학적 영향의 메커니즘을 제안하였다. Li 등[4]은 2단 CH₄/Air 대향류화염 실험과 적절한 반응을 상수를 도입한 수치해석을 비교하여 타당한 예측 결과를 보였으며 NO_x 형성에 있어서 다단 반응의 영향과 회색제 첨가의 영향을 연구하였다. 또한 공해물질 형성에 관한 중요한 반응들을 연구하였고 그에 대한 저감 방법을 제안하였다.

화염구조 예측에 있어서 복사열손실을 무시하는 경우가 많았으나 최근에 이를 모델링하여 보드나온 결과를 얻고 있다. Zhu 등[5]은 대향류부분예혼합화염에서 복사의 자체 흡수에 관한 영향을 연구하였다. 또한 Zhu 등[6]은 GRI-MECH 2.11과 3.0을 실험결과와 비교하여 2.11의 메커니즘이 더 나은 예측결과를 보인다는 것을 확인하였고, 같은 조건에서 Williams 메커니즘을 비교하여 복사열손실을 무시할 경우 큰 오차가 발생함을 보였다. Kim 등[8]도 OPPDIF 코드[7]를 이용한 대향류 부분예혼합 화염에 WSGGM-파장별모델을 적용하여 복사자체흡수 영향을 예측하였다. Guo 등[9]은 CH₄/CO₂/Air 및 CH₄/CO₂/O₂ 대향류예혼합화염에서 화염온도에 대한 복사열손실의 영향과 소염특성을 복사재흡수를 고려하여 연구하였다.

혼합기체의 온도 변화에 따른 영향에 대한 연구도 대향류화염을 연구하는데 중요한 분야이다. Lim 등[10]은 OPPDIF와 GRI-MECH 2.11을 이

용한 CH₄/Air 대향류확산화염에서 산화제 온도를 300~560 K 범위에서 변화시키면서 예열에 따른 화염구조의 변화를 예측하여 실험결과와 비교하였다.

본 연구에서는 대향류화염에서 CO₂ 및 H₂O 첨가에 따른 영향을 복사 열손실을 고려하여 알아보았다. 대향류화염 해석에는 OPPDIF 코드[7]를 사용하였으며 연소 계산에는 GRI-MECH 2.11 [11], 열역학적 물성치는 Chemkin-II[12] 데이터 베이스를 활용하였다. 그리고 복사열전달을 계산하는 데는 WSGGM 재조합법[10]을 사용하였다.

2. 이론적 배경

2.1 대향류 연소시스템

대향류 화염은 그림 1과 같이 연료노즐과 산화제노즐의 중심축이 일직선상에 있고, 이 둘이 서로 마주 보고 있는 상태에서 연료 및 산화제가 방출되어 만들어지는 화염이다. 따라서 축대칭 유동에 의해 두 노즐 사이에 정체면의 위치에서 확산화염이 발생하게 된다. 각각의 노즐에서 분사되는 성분들의 조합과 온도 및 속도에 따라 화염구조가 변화하며 유동이 조건을 증류로 설정한다면 각각의 변화에 따른 영향을 쉽게 파악할 수 있고 난류연소 기초 연구에 적합하다. 이런 특징으로 인해 많은 연구자들의 관심의 대상이 되어 왔다.

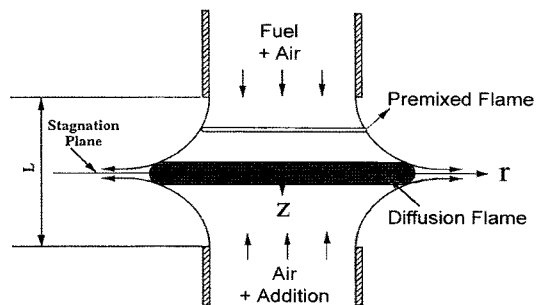


Fig. 1 Schematic diagram of the system

2.2 보존방정식

대향류 연소시스템을 해석하기 위해 그림 1의 좌표계를 고려하여 여러 보존 방정식을 나타낼 수 있다. 정상상태에서 원통좌표계를 이용한 연속방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서 u 및 v 는 축방향 및 반경방향의 속도이며, ρ 는 혼합 기체의 밀도이다. 축방향 속도를 비롯한 모든 물리량이 x 만의 함수라는 가정에 따라 연속방정식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

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

여기서 $J = \rho u/2$ 는 축 방향 질량유속 성분을 나타내고, $G = -\rho v/r$ 는 반경 방향 질량유속 성분을 각각 나타낸다.

반경방향의 운동량방정식은 다음과 같다.

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

여기서 μ 는 점성계수이며, $H = (1/\rho)(\partial p/\partial r)$ 는 반경방향 압력구배의 고유치이다. 또한 에너지방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

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

여기서 T , C_p , λ 는 온도, 혼합기체의 정압비열 및 열전도계수이다. $-\nabla \cdot q$ 은 복사열전달로 인한 복사열 생성항이며 2.3절에서와 같이 구할 수 있다. C_{pk} , Y_k , h_k , \dot{w}_k 는 k 번째 종의 정압비열, 질량분율, 생성엔탈피 화학종 생성율을 각각 나타내며 화학종의 보존방정식은 다음과 같다.

$$\rho u \frac{dY_k}{dx} - \frac{d}{dx}(\rho Y_k V_k) - \dot{w}_k W_k = 0 \quad (5)$$

여기서 W_k 는 k 번째 종의 분자량이며, V_k 는 화학종 k 의 확산속도로서 다음과 같다.

$$V_k = \frac{1}{X_k \bar{W}} \sum_j K_j D_{kj} \frac{dX_j}{dx} - \frac{D_k^T}{\rho Y_k} \frac{1}{T} \frac{dT}{dx} \quad (6)$$

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

$$p = \frac{\rho RT}{\bar{W}} \quad (7)$$

여기서 \bar{W} 는 혼합가스의 평균분자량이다. 각각 지배방정식에 대한 경계조건은 다음과 같다.

$$x=0: F = \frac{\rho E u_F}{2}, G=0, T=T_F, \rho u Y_k + \rho Y_k V_k = (\rho u Y_k)_F \quad (8)$$

$$x=L: F = \frac{\rho_0 u_0}{2}, G=0, T=T_0, \rho u Y_k + \rho Y_k V_k = (\rho u Y_k)_0 \quad (9)$$

2.3 비회색 복사가스 열전달

2.3.1 혼합가스에 대한 WSGGM

이산화탄소-수증기 혼합가스에서 좁은 파장 밴드 내에서의 각 파장의 통과율은 파장의 변화에 대한 상관관계가 크지 않다는 것이 알려져 있다[15,16]. 따라서 혼합가스의 좁은밴드 통과율은 각 가스의 좁은 밴드 통과율의 곱으로 나타낼 수 있다[17].

$$\bar{\tau}_{mix}(\eta) = \bar{\tau}_{CO_2}(\eta) \cdot \bar{\tau}_{H_2O}(\eta) \quad (10)$$

식 (10)의 좁은 밴드 통과율은 회색가스가중합을 이용하면 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$\bar{\tau}_{mix}(\eta) = \sum_{i=1}^{M_{mix}} W_{i,mix}(\eta) e^{-k_{i,mix} L} \quad (11)$$

이산화탄소-수증기 혼합가스에 있어서 통과율의 회색가중합 표현은 다음과 같다[18,19].

$$\bar{\tau}_{mix}(\eta) = \sum_{ic=1}^{M_{CO_2}} \sum_{ih=1}^{M_{H_2O}} W_{ic,CO_2}(\eta) \times W_{ih,H_2O}(\eta) e^{-(k_{ic,CO_2} + k_{ih,H_2O})} \quad (12)$$

식 (11)와 (12)을 비교하면 혼합가스의 파장별 가중치 $W_{i,mix}(\eta)$ 와 흡수계수는 다음과 같다.

$$W_{i,mix}(\eta) = W_{ic,CO_2}(\eta) \times W_{ih,H_2O}(\eta) \quad (13)$$

$$\kappa_{i,mix} = \kappa_{ic,CO_2} + \kappa_{ih,H_2O} \quad (14)$$

Kim과 Song[18]은 수증기에서 흡수계수를 다양한 형태의 온도 및 압력에 대한 함수관계를 검토하였으며, 본 연구에서는 다음과 같은 형태로 혼합가스의 흡수계수를 표현하였다.

$$\kappa_{i,mix} = \kappa_{io,CO_2} \frac{e^{-\alpha_{i,CO_2}/T}}{T^2} P X_{CO_2} + \kappa_{io,H_2O} \frac{e^{-\alpha_{i,H_2O}/T}}{T^2} P X_{H_2O} \quad (15)$$

여기서 $\kappa_{i,o}$, α_i 는 i 번째 회색가스의 모델링 상수이고 P , T , X 는 각각 압력, 온도, 몰분율이다.

Park and Kim[13,14]은 계산 결과의 정확도를 유지하면서 컴퓨터 계산 시간은 줄이기 위해 비

슷한 크기를 갖는 회색가스의 흡수계수를 그룹으로 나누어서 고려하는 회색가스 재조합(gray gas regrouping)을 제안하였다.

$$W_{i,new}(\eta) = \sum_{j=1}^{N_i} W_{j,mix}(\eta) \quad (16)$$

i 번째 그룹의 흡수계수 $\kappa_{i,\neq w}$ 는 플랑크평균 형태의 흡수계수를 이용하여 구할 수 있다. i 번째 그룹의 흑체에너지는 $W_{i,\neq w}$ 로 표현되며 $\kappa_{i,\neq w}$ 는 해당 그룹에 속하여 있는 각각의 흡수계수의 가중치의 가중된 평균으로 다음과 같다.

$$\kappa_{i,\neq w} = \frac{\sum_{j=1}^{N_i} \kappa_{j,mix} W_{j,mix}}{W_{i,\neq w}} \quad (17)$$

$$W_{i,mix} = \frac{\sum_{\eta} W_{i,mix}(\eta) \Delta\eta}{\sum_{\eta} I_b(\eta) \Delta\eta} \quad (18)$$

2.3.2 복사열전달의 해석

Figure 1과 같은 대향류 연소시스템의 해석을 위하여 두 노즐 사이의 연소 가스에 의한 복사열 전달은 1차원 무한 평판으로 가정하여 해석할 수가 있다.

거리 L 만큼 떨어진 흑체 무한평판에 실제 가스가 채워진 형상에서 임의의 방향 m 및 위치 p 에서의 복사강도를 회색가스가중합법을 이용하여 차분된 구분종좌 방정식으로 나타내면 다음과 같다[21].

$$I_{i,p,m} = \frac{\mu_m I_{i,w,m} + f W_{i,p,i,p} \Delta x_p}{\mu_m + f W_{i,p} \Delta x_p} \quad (19)$$

위 식에서 하첨자 i 는 i 번째 회색가스, p 는 위치 p 점, m 은 방향을 각각 나타낸다. μ_m 은 m 방향의 방향코사인, f 는 검사체적 요소의 동쪽 표면상의 복사강도 $I_{i,e,m}$ 을 구하기 위해 필요한 가중치이며, $I_{i,p,m}$ 는 f 를 이용하여 $I_{i,e,m}$ 및 $I_{i,w,m}$ 과 함께 다음과 같이 구할 수 있다.

$$I_{i,p,m} = f I_{i,e,m} + (1-f) I_{i,w,m} \quad (20)$$

p 점에서의 복사열 생성항은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$-\nabla \cdot q_p = -\left[\sum_{m=1}^{N_j} \mu_m (I_{w,m} - I_{e,m}) \omega_m \right] / \Delta x_p \quad (21)$$

여기서, ω_m 은 m 방향에 대한 각 가중치이며, N_j 는 계산에서 고려된 총 각도 구역의 수이다.

3. 해석결과 비교검토

본 연구에는 연료노즐과 공기노즐 사이의 거리가 2cm이고 전체 기압이 1기압인 대향류연소시스템을 고려하였다. 고려된 연료는 CH₄이며 산화제로는 공기가 사용되었다. CH₄는 연소 반응이 간단하고 실제 연료로도 많이 사용되므로 대향류화염 모사에 많이 사용되어 왔다. 대향류화염 시스템 해석에는 OPDDIF Code[7]가 사용되었으며 열역학적 물성과 반응기구로 CHEMKIN-II[12]와 GIR-MECH 2.11[11]을 이용하였다. GIR-MECH 2.11은 49개의 화학종에 대하여 279개의 화학반응으로 이루어져 있다. 반면에 GRI 3.0은 53개의 화학종에 325개의 화학반응으로 이루어져 있으나 Zhu 등[5]의 연구에서 CH₄/Air를 이용한 실험 및 수치해석 결과 GRI-MECH 2.11이 3.0보다 실험결과와 비슷함을 보였으므로 본 연구에서는 GRI-MECH 2.11을 이용하였다. 회색가스가중합법 및 SNB 모델[20]을 이용할 경우에는 계산시간을 고려하여 1차원 복사열전달의 해석은 S_{10} 의 구적적분을 활용하였다. 또한 모든 복사 모델에 있어 화학종은 이산화탄소와 수증기만이 복사열의 전달에 영향을 미치는 것으로 가정하였다. 다음은 본 연구에 사용된 각 화염별 계산조건이다.

Table 1 Operating condition for each flame

	Flame I	Flame II	Flame III
V_f, V_o [cm/s]	10		
T_f [K]	300		
T_o [K]	300		
P_{total} [atm]	1		
ϕ	2		
Fuel Composition	CH ₄ /Air		
Oxidant Composition	Air	Air+CO ₂	Air+H ₂ O
Gap between nozzles (cm)	2		

3.1 해석방법별 결과들의 비교 (Flame I)

복사를 고려하지 않은 해석결과 및 복사열전달의 엄밀해로 고려되는 SNB모델, WSGGM-RG 방법[10]을 서로 비교하였다. 연료 노즐에서 $\phi=2$ 인 연료 그리고 산화제 노즐에서는 공기가 분사되며 속도와 온도는 10 cm/s 및 300 K로 동

일하다. No Radiation 모델의 경우 복사열손실을 고려하지 않아 화염영역 전반에 걸쳐 온도 예측이 과대한 것을 볼 수 있다. Peak 온도 예측에 있어서 SNB는 1980 K, WSGGM-RG는 1965 K로 0.76 %의 상대오차를 보였다. 계산시간에 있어서 Pentium4 2.6 GHz CPU를 사용한 결과 SNB는 1982 초가 소요되는데 비해 WSGGM-RG10은 103초가 소요되는 등 매우 효율적이며 동시에 우수한 정확도를 지녔음을 확인하였다.

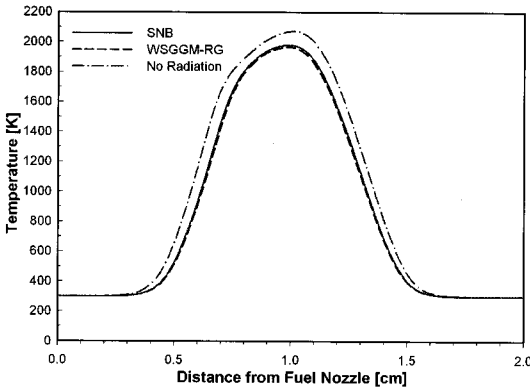


Fig. 2 Flame structure by flame I condition

수 있다. Peak NO 물분율은 CO₂ 0 %인 때와 비교하여 79 % 감소한 0.01232x10⁻³로 예측하였다. CO₂는 H₂O와 더불어 강한 복사 참여 매체이다. 산화제로의 CO₂ 첨가는 산화제 노즐로 유입되는 O₂의 양을 줄여줄 뿐 아니라 복사 효과에 영향을 주어 화염의 온도를 낮추게 된다. 위와 같은 영향을 주기 위해 N₂의 분압을 높여주는 것을 생각해 볼 수도 있으나 CO₂보다 그 효과가 적은 것으로 알려져 있다[4].

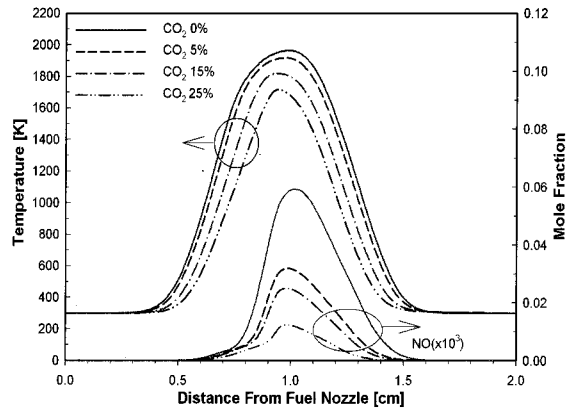


Fig. 3 Flame structure by flame II condition

Table 1 Results for different radiative models

	SNB	WSGGM-RG	No Radiation
Peak Temperature[K]	1980	1965	2072
Required time for computation[sec]	1982	103	.

Table 2 Results for CO₂ addition

	CO ₂ 0%	CO ₂ 5%	CO ₂ 15%	CO ₂ 25%
Peak Temp.[K]	1965	1918	1820	1718
Peak NO Mole Fraction [X 10 ³]	0.05934	0.04389	0.02497	0.01232

3.2 CO₂ 첨가에 따른 영향 (Flame II)

CO₂의 첨가가 대항류화염 구조에 미치는 영향에 대해 알아보았다. 연소실 내 CO₂ 첨가는 배기재순환법을 비롯한 여러 실용 연소기법에서 나타날 수 있다. 작동 조건은 Flame II와 같고 CO₂는 산화제 노즐 측에 물분율로 5 %, 15 %, 25 %씩 혼합하여 혼합비 증가에 따른 영향을 관찰하였다. 분사 속도와 혼합기체의 입구 온도는 양쪽 모두 10cm/s, 300 K이다. CO₂를 5 % 첨가한 경우 화염의 peak 온도를 CO₂ 0 %일 때보다 47 K 낮아진 1918 K로 예측하였다. Peak NO 물분율은 CO₂ 5 % 첨가 시 CO₂ 0 %와 비교하여 0.01545x10⁻³ 감소한 0.04389x10⁻³로 예측하였으며 26 % 감소하였음을 알 수 있다. CO₂를 25 % 혼합할 경우 peak 온도를 1718 K로 예측하였으며 CO₂ 0 %와 비교하여 247 K 낮아진 것을 알

3.3 H₂O 첨가에 따른 영향 (Flame III)

산화제 노즐에서 물분율로 5 %, 10 %, 15 %, 25 %의 H₂O를 공기와 혼합하여 그 증감에 따른 화염 특성을 예측하였다. 분사 속도와 입구 온도는 양측 모두 각각 10 cm/s, 300 K이다. H₂O를 5 % 혼합할 경우 peak 온도를 1938 K로 예측하였고 H₂O 0 %인 경우와 비교하여 37 K 낮아진 것을 알 수 있다. Peak NO 물분율은 H₂O 0 %인 경우 0.05934x10⁻³로 예측한 것과 비교하여 H₂O 5 %인 경우 그보다 24 % 감소한 0.045x10⁻³로 예측하였다. 산화제에 H₂O를 25 % 혼합하였을 경우 peak 온도를 1793 K로 예측하였으며 H₂O 0 %인 경우와 비교했을 때 172 K 감소한 것을 알 수 있다. Peak NO 물분율은 H₂O 0 %인 경우와 비교했을 때 79 % 감소한

0.01247x10⁻³로 예측하였다. 또한 같은 양을 첨가할 경우 CO₂가 H₂O보다 peak 온도와 peak NO를 낮추는데 더 효과적인 것으로 나타났다.

Table 3 Results for H₂O addition

	H ₂ O 0%	H ₂ O 5%	H ₂ O 15%	H ₂ O 25%
Peak Temp. [K]	1965	1938	1869	1793
Peak NO Mole Fraction [X10 ³]	0.05934	0.0450	0.02431	0.01247

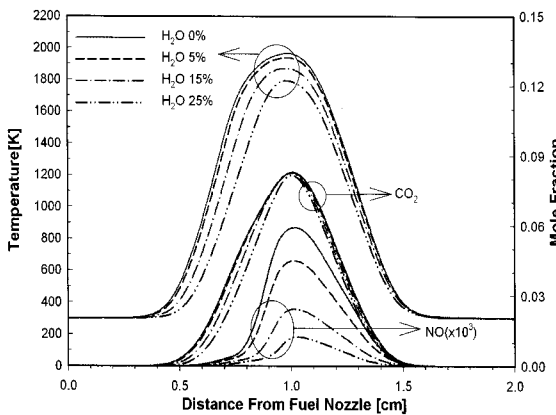


Fig. 4 Flame structure by flame III condition

4. 결론

본 연구에서는 수치적인 방법으로 CH₄/Air 대향류 층류 예혼합화염의 특성을 분석하였다. 비회색 혼합가스에 의한 복사열전달 해석은 회색가스 재조합을 고려한 WSGGM-RG 및 1차원 무한 평판을 가정한 구분종좌법을 이용하였다. CH₄/Air 대향류 예혼합화염에 No Radiation, SNB, WSGGM-RG를 고려하여 얻은 결과들을 서로 비교하였다. WSGGM-RG를 이용한 결과는 SNB를 이용한 결과와 잘 일치하였고 경제적인 방법임을 확인하였다. 산화제에 CO₂나 H₂O를 첨가할 경우 화염의 peak 온도가 낮아지고 NO의 생성이 대폭 줄어들음을 볼 수 있다. 따라서 EGR과 같이 연료에 CO₂의 함량이 높은 경우에는 반드시 복사효과를 고려해야 함을 알 수 있다.

후 기

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

참고문헌

- [1] I. S. McLintock, "The effect of various diluents on soot production in laminar ethylene diffusion flames," *Combustion and Flame*, vol.12, 1968, pp.217-225.
- [2] D. X. Du, R. L. Axelbaum, C. K. Law, "The influence of carbon dioxide and oxygen as additives on soot formation in diffusion flames," *Twenty-Third Symposium [International] on Combustion*, The Combustion Institute, Pittsburgh, PA, 1991, pp.1501-1507.
- [3] F. Liu, H. Guo, G. J. Sallwood, Ö. L. Gülder, "The chemical effects of carbon dioxide as an additive in an ethylene diffusion flame : Implications for soot and NO_x formation," *Combustion and Flame*, vol.125, 2001, pp.778-787.
- [4] S. C. Li, F. A. Williams, "NO_x formation in two-stage methane-air flames," *Combustion and Flame*, vol.118, 1999, pp.399-414.
- [5] X. L. Zhu, J. P. Gore, A. N. Karpetsis, R. S. Barlow, "The effects of self-absorption of radiation on an opposed flow partially premixed flame," *Combustion and Flame*, vol.129, 2003, pp. 342-345.
- [6] X. L. Zhu, T. Takeno, J. P. Core, "A study of the effects of chemical mechanism on the computed structure of a radiation sensitive opposed flow partially premixed flame," *Combustion and Flame*, vol.135, 2002, pp.351-355.
- [7] A. E. Lutz, R. J. Kee, J. F. Grcar, F. M. Rupley, "OPPDF : A FORTRAN program for computing opposed-flow diffusion flames," Sandia Report, 1997, SAND96-8243.
- [8] O. J. Kim, J. P. Gore, R. Viskanta, X. L. Zhu, "Prediction of self-absorption in opposed flow diffusion and partially premixed flames using a weighted sum of gray gases model [WSGGM]-Based spectral model," *Numerical Heat Transfer Part A*, vol.44, 2003, pp.335-353.
- [9] H. Guo, Y. Ju, K. Maruta, T. Niioka, F. Liu, "Numerical investigation of CH₄/CO₂/Air and CH₄/CO₂/O₂ counterflow premixed flames with radiation reabsorption," *Combustion Science and Technology*, vol.135, 1998, pp.49-64.
- [10] J. Lim, J. Gore, R. Viskanta, "A study of the effects of air preheat on the structure of methane/air counterflow diffusion flames,"

- Combustion and Flame, vol.121, 2000, pp.262-274.
- [11] GRI MECH 2.11, <http://www.me.berkeley.edu/grimech>.
- [12] R. J. Kee, F. M. Rupley, J. A. Miller, "Chemkin-II : A FORTRAN Chemical kinetics package for the analysis of gas-phase chemical kinetics," Sandia Report, 1989, SAND89-8009.
- [13] W. H. Park, T. K. Kim, "Application of the Weighted Sum of Gray Gases Model for Nonhomogeneous Gas Mixtures Having Arbitrary Compositions," Proceedings of Eurotherm 73 on Computational Thermal Radiation in Participating Media, Mons, Belgium, 2003, pp.129-137.
- [14] 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 mixture," JSME International journal Series B, vol.48, No.2, 2005.
- [15] R. M. Goody, R. West, L. Chen, D. Chrisp, "The correlated-k method for radiation calculations in non-homogeneous atmosphere," JQSRT, vol.42, No.6, 1989, pp.539-550.
- [16] 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," J. Geophys. Res., vol.96, No.D5, 1991, pp.9027-9063.
- [17] M. F. Modest, Radiative Heat Transfer, McGraw-Hill, 1993.
- [18] 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, vol.30, No.4, 1996, pp.453-468.
- [19] O. J. Kim, T. H. Song, "Data base of WSGGM-based spectral method for radiation of combustion products," JQSRT, vol.64, No.4, 2000, pp.379-394.
- [20] 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, 1997, pp.987-991.
- [21] T. K. Kim, J. A. Menart, H. Lee, "Nongray Radiative Gas Analyses Using the S-N Technique," ASME Journal of Heat Transfer, vol.113, 1991, pp.946-952.