

대향류 메탄/공기 확산화염에서 복사모델이 소화한계에 미치는 영향

문선여 · 조재호 · 황철홍[†] · 오창보* · 박원희**

대전대학교 소방방재학과, *부경대학교 안전공학과, **한국철도기술연구원

Effect of Radiation Models on the Suppression Limits in Counterflow Methane/Air Diffusion Flames

Sun-Yeo Mun · Jae-Ho Cho · Cheol-Hong Hwang[†] · Chang Bo Oh* · Won-Hee Park**

Department of Fire & Disaster Prevention, Daejeon University

*Department of Safety Engineering, Pukyong National University

**Korea Railroad Research Institute

(Received February 6, 2014; Revised May 8, 2014; Accepted June 13, 2014)

요 약

대향류 메탄/공기 확산화염에서 복사모델이 소화한계에 미치는 영향이 수치적으로 검토되었으며, 수치결과의 검증을 위하여 기초실험이 병행되었다. 소화약제로는 N₂와 CO₂가 고려되었으며, 다른 정확도를 갖는 복사모델 OTM과 SNB에 따른 소화농도의 차이가 검토되었다. 주요 결과로서, N₂가 첨가된 경우, 복사모델의 정확도에 따라 소화농도의 큰 차이가 발생되지 않는다. 그러나 강한 복사효과를 갖는 CO₂가 낮은 신장율의 화염에 첨가되었을 때, SNB와 같은 예측 정확도가 높은 복사모델이 고려되어야 한다. 특히 연료에 첨가된 CO₂의 경우 복사모델 SNB와 OTM에 의한 소화농도는 큰 차이를 갖게 된다. 따라서 소화농도 예측을 위해서는 수치해의 정확도와 계산시간을 고려한 합리적인 복사모델의 선택이 필수적이라 할 수 있다.

ABSTRACT

Effect of radiation models on the suppression limits in counterflow CH₄/air diffusion flame was numerically investigated with fundamental experiments for the numerical validation. N₂ and CO₂ were considered as extinguishing agents. The differences in extinguishing concentration between OTM and SNB radiation models which have different accuracy levels were examined. As a result, there is no considerable difference in extinguishing concentration for the N₂ dilution as the radiation models with different accuracy levels were used. As the CO₂ having strong radiative effect was diluted in the low strain flames, however, the radiation model with high predictive accuracy such as SNB should be used. In particular, the CO₂ dilution in fuel stream leads to the significant difference in extinguishing concentration between OTM and SNB models. Therefore, it is necessary that the radiation model should be reasonably chosen with the consideration of numerical accuracy and computational time for the prediction of extinguishing concentration.

Keywords : Counterflow diffusion flame, Extinguishing concentration, Suppression limit, Radiation model

1. 서 론

한정된 연소영역에 소화약제의 분사는 일시적으로 냉각 효과, 질식효과 및 화학적 부촉매효과 등에 의한 소화현상을 발생시킬 수 있다. 이러한 소화과정은 대향류버너(counterflow burner)를 통해 체계적으로 연구될 수 있다⁽¹⁾. 대향류 버너는 유속과 관련된 화염의 신장율(strain rate)을 직접 조절하기 용이하고, 화염면의 위치를 조절하기 편리한 특성을 가지고 있기 때문에 화염신장율에 따른 소화특성을 검토하는데 많이 이용되고 있다⁽²⁾. 이를 통해 제어된

화염면을 대상으로 소화약제의 종류 및 연소조건의 변화에 따른 가스계 소화약제의 평가 및 설계를 위한 유용한 정보를 얻을 수 있다.

화재에서의 화염은 주로 부력이 지배적인 낮은 유속조건에서 생성되기 때문에 대향류화염에서의 소화현상에 관한 선행연구는 주로 낮은 화염신장율에서 다양한 가스계 소화약제의 소화원리 및 소화농도의 예측에 초점을 두고 있다. 높은 화염신장율에서의 소화현상은 연료/공기의 체류시간 감소 및 화염 수직방향으로의 열손실 증가에 의해 주로 발생된다고 알려진 반면에, 낮은 신장율에서의 화염

[†]Corresponding Author, E-Mail: chehwang@dju.ac.kr
TEL: +82-42-280-2592, FAX: +82-42-280-2596

은 증가된 화염온도 및 화염체적에 의한 복사 열손실에 의해 주로 소멸된다고 알려져 있다^(3,4). 결과적으로 낮은 화염신장에서 소화현상 및 소화농도의 정확한 예측을 위해서는 가스 복사모델의 높은 정확도가 요구된다.

화염에서의 복사 열전달을 보다 정확히 예측하기 위하여 다양한 복사모델이 제시되었으며, 물리적 가정의 타당성을 포함한 예측 정확도와 계산시간의 관점에서 화염온도 및 화학종의 농도를 포함한 화염구조의 예측에 관한 연구가 진행되었다. Park 등^(5,6)은 대향류 유동장에서 예혼합, 부분예혼합 및 확산화염을 포함한 다양한 연소조건에 대하여 가장 간단한 모델인 광학적으로 얇은 근사를 이용한 모델, 좁은 밴드모델, 단색선 회색가스가중합법 및 회색가스 재조합을 이용한 회색가스 가중합법의 차이를 비교·검토하였다. Bedir 등⁽⁷⁾ 역시 낮은 화염신장의 대향류 확산화염에서 다양한 복사모델에 대한 비교를 수행하였다. 이들 연구들은 가장 높은 정확도를 갖는 좁은 밴드모델을 기준으로 추가적인 가정이 적용된 다양한 복사모델에 대한 온도 및 열손실량의 값을 비교하였으며, 정확도와 계산비용을 고려한 효율성의 관점에서 적절한 복사모델의 선정에 초점을 두었다. 그러나 낮은 화염신장의 조건에서 실험결과와의 직접적인 비교·검증이 이루어지지 않았으며, 특히 현재까지 소화농도의 관점에서 다양한 복사모델에 대한 예측 정확도 및 적용한계에 관한 충분한 연구결과가 제공되지 못한 실정이다.

이러한 배경 하에 본 연구는 대향류 메탄/공기 확산화염에서 연료류 및 공기류에 첨가된 N₂ 및 CO₂ 소화약제를 대상으로, 가장 높은 정확도를 갖는 좁은 밴드모델과 가장 간략화된 광학적으로 얇은 근사모델의 소화농도 예측결과를 실험결과와 비교·검토하였다. 이를 통해 대향류 화염의 수치계산에서 가장 많이 적용되고 있는 광학적으로 얇은 근사모델이 적용될 수 있는 조건 및 한계를 확인하고자 한다. 이러한 복사모델의 선정기준은 향후 다양한 연소조건에서 가스계 소화약제의 소화농도 및 소화원리를 규명하는데 유용한 정보를 제공할 것으로 기대된다.

2. 실험방법 및 조건

본 연구는 대향류 확산화염에서 복사모델에 따른 소화농도의 예측 정확도를 평가하기 위하여 수치계산과 동시에 검증을 위한 실험연구가 수행되었다. 연료는 메탄(CH₄)이 사용되었으며, 가스계 소화약제로는 N₂와 CO₂가 고려되었다. Figure 1은 대향류 확산화염의 개략도와 이를 구현한 대향류 버너의 사진을 제시한 것이다. 상부측 및 하부측 노즐에서는 1 atm과 298 K의 공기 및 연료가 각각 공급되었다. 하부측 연료노즐 주위에는 N₂를 추가적으로 공급하여 연료가 상부 노즐에서 공급된 공기가 아닌 주위 공기와의 부차적인 화염이 형성되지 않도록 하였다. 이때 상부측 노즐의 가열로 인한 공기류의 예열을 최소화시키기

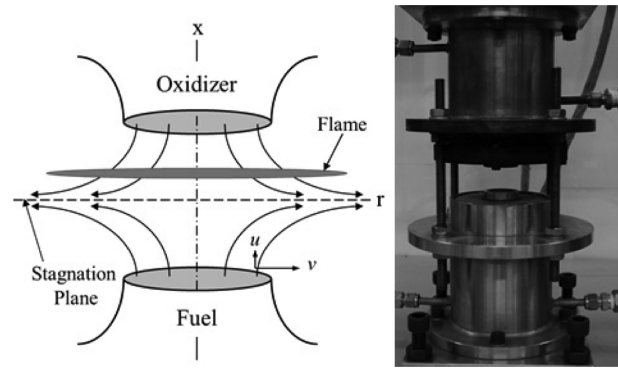


Figure 1. Schematic and photo of counterflow burner.

위하여 온도 제어장치를 통해 냉각수의 온도가 일정하도록 하였다. 공기 및 연료노즐의 내경은 2.7 cm이며, 노즐 간의 거리는 2.5 cm로 고정하였다. 노즐 출구에서의 유속 분포가 균일하도록 스테인레스 스틸로 만들어진 메쉬(mesh)와 직경 3 mm의 유리구슬이 노즐 내부에 설치되었다.

연료, 공기 및 소화약제는 버블 유량계에 의해 보정된 질량유량계(MFC)를 통해 공급되었으며, 대향류 확산화염의 주요 변수로서 아래 식(1)과 같은 총괄신장률(a_g)이 적용되었다.

$$a_g = \frac{2|u_o|}{L} \left(1 + \frac{|u_f|}{|u_o|} \sqrt{\frac{\rho_f}{\rho_o}} \right) \quad (1)$$

여기서, u와 ρ는 반응물의 속도와 밀도, L은 노즐간의 거리를 나타낸다. 하첨자 f와 o는 연료류 및 공기류를 의미한다. 이때 u_f와 u_o의 절대값은 동일하게 설정되었다. a_g의 범위는 부력이 지배적인 화재에서의 화염조건에 해당될 수 있는 (10~80) s⁻¹이 고려되었다. 소화약제인 N₂와 CO₂는 연료류 또는 공기류에 공급되었으며, 소화한계 근처에서 정확한 소화농도 측정을 위하여 1 ml/min 간격으로 미세 조절되었다. 동일조건에 대하여 5회 반복실험을 통해 소화농도의 평균값 및 표준편차가 측정되었다.

Figure 2는 a_g = 40 s⁻¹의 조건에서 순수 메탄/공기 확산화염과 공기류에 N₂ 몰분율 증가에 따른 화염사진을 제시한 것이다. 그림에서 노즐의 직경 외부에 위치한 화염은 부력에 의해 곡률을 갖게 되지만, 노즐의 직경 내부에서는

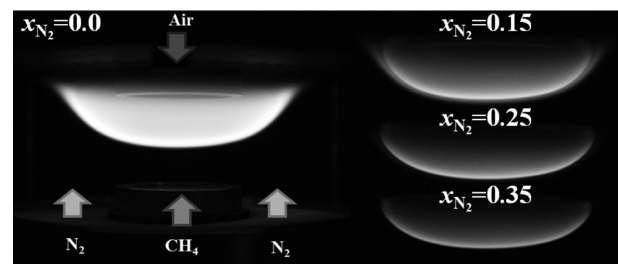


Figure 2. Photos of pure CH₄/air diffusion flame (left side) and the flames diluted with N₂ in air stream (right side) for a_g = 40 s⁻¹.

비교적 균일한 면의 화염이 생성됨을 볼 수 있다. 순수 메탄/공기 화염은 soot의 생성으로 인하여 화염면 반면에, 공기류에 N_2 증가에 따라 화염은 점차적으로 청염으로 변화됨을 알 수 있다. 이러한 현상은 수치계산 측면에서 soot의 생성 및 이로 인한 복잡한 복사 열전달의 문제점을 배제시킬 수 있는 부수적인 효과를 갖게 되며, 그 결과 소화농도 예측을 위한 수치계산의 정확도 개선에 큰 도움이 될 것으로 사료된다.

3. 수치계산 방법

1차원 대향류 확산화염에서 소화농도의 예측을 위하여 OPPDIF Code⁽⁸⁾가 사용되었다. 수치계산에 필요한 열역학적 물성치와 전달 물성치는 각각 CHEMKIN-II⁽⁹⁾와 TRANFIT Package⁽¹⁰⁾를 이용하였으며, 상세반응기구로는 53개의 화학종과 325개의 소반응으로 구성된 GRI-v3.0⁽¹¹⁾이 적용되었다. 모든 연소조건은 실험과 동일하게 설정되었으며, 정확한 소화농도 및 소화 직전의 최대 화염온도를 얻기 위하여 소화한계 근처에서 N_2 및 CO_2 의 몰분율은 1.0×10^{-4} 간격으로 변화되었다. 격자 민감도 분석을 통해 최종 격자는 약 550개가 사용되었으며, 이때 격자수의 조절변수인 GRAD와 CURV는 각각 0.03과 0.15가 적용되었다.

낮은 화염신장율의 조건에서 중요시되는 복사 열손실 및 첨가된 CO_2 의 추가적인 복사 열손실을 고려하기 위한 복사모델로는 다른 정확도를 갖는 optically thin model (OTM)⁽¹²⁾과 statistical narrow band (SNB) 모델⁽¹³⁾이 검토되었다.

OTM은 간략화 된 복사모델로서 화염 및 부근의 가스가 광학적으로 매우 얇아 복사에너지를 흡수하지 않는다는 가정이 적용되었으며, 복사열의 생성항은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$-\nabla \cdot \mathbf{q} = 4k_{pl}\sigma(T_{\infty}^4 - T^4) \quad (2)$$

여기서, σ 는 스테판-볼츠만(Stefan-Boltzmann) 상수이며, T 는 국부온도를, k_{pl} 은 가스의 플랑크 평균 흡수계수를 나타낸다. 본 연구에서는 Ju 등⁽¹²⁾이 제안한 온도의 다항식으로 표현되는 식을 이용하여 플랑크 평균 흡수계수를 구하였다.

좁은 밴드모델(narrow band models)은 좁은 영역의 파장 밴드두께를 설정하여 그 밴드의 평균 방사율 및 흡수계수를 나타내는 방법들로, 이들 중 SNB 모델이 가장 널리 사용되고 있으며, 상당히 정확한 복사 열전달의 해를 제공한다 알려져 있다. 등은 및 등질의 경로길이 Δs 에 대한 통과율은 다음과 같이 구할 수 있다⁽¹³⁾.

$$\bar{\tau}(\Delta s) = \exp\left(-\frac{\bar{\beta}_v}{\pi} \left(\sqrt{1 + \frac{2\pi x \Delta s \bar{k}_v}{\bar{\beta}_v}} \right)\right) \quad (3)$$

여기서 \bar{k}_v 및 $\bar{\beta}_v$ 는 밴드 내의 평균 흡수계수 및 흡수선

의 중첩을 나타내는 인자이며, 이 데이터는 Soufiani 등⁽¹⁴⁾의 제안한 결과를 적용하였으며, p 및 x 는 총압과 해당 화학종의 몰분율을 나타낸다. 성분 및 온도가 다른 가스를 통과하는 매체의 통과율은 Gurtis-Godson 근사⁽¹⁵⁾를 통해 구하였다⁽⁵⁾.

4. 결과 및 고찰

4.1 순수 메탄/공기 확산화염에 대한 복사모델의 영향

소화한계에 대한 복사모델의 영향을 검토하기 이전에, Figure 3은 상대적으로 높은 화염온도를 갖는 순수 메탄/공기 확산화염에서 복사모델에 따른 최대 화염온도의 차이를 도시한 결과이다. 복사모델이 적용되지 않은 단열(adiabatic)조건에서는 총괄신장률(a_g)의 감소에 따라 최대 화염온도는 점차적으로 증가되는 현상을 보여주고 있다. 반면에 SNB 모델이 적용되었을 때 a_g 의 감소에 따라 최대 화염온도는 증가되다가 $a_g = 20 \text{ s}^{-1}$ 의 조건에서 최고값을 보이며, 그 이후 복사 열손실에 의해 최대 화염온도는 감소하게 된다. OTM의 경우 역시 SNB 모델의 결과와 유사한 경향을 보이지만, $a_g = 30 \text{ s}^{-1}$ 에서 최대 화염온도의 최고값을 보여주고 있다. 즉 OTM은 SNB 모델에 비해 전반적으로 더 증가된 복사 열손실을 초래하며, 그 차이는 a_g 의 감소에 따라 더욱 증가되고 있음을 알 수 있다. SNB 모델을 기준으로 단열조건 및 OTM 적용에 따른 최대 화염온도의 정량적 차이를 비교해보면, $a_g = 80 \text{ s}^{-1}$ 에서 단열조건 및 OTM은 각각 13 K와 2 K의 큰 차이를 보이지 않는 반면에, 가장 큰 차이가 발생하는 $a_g = 10 \text{ s}^{-1}$ 에서는 각각 72 K의 과대 예측과 29 K의 과소 예측결과를 보여주고 있다.

화염온도와 더불어 확산화염의 구조를 결정짓는 화학종 분포에 대한 복사모델의 영향을 확인하기 위하여, Figure 4는 비교적 높은 총괄신장율 $a_g = 80 \text{ s}^{-1}$ 조건에서 주요 화

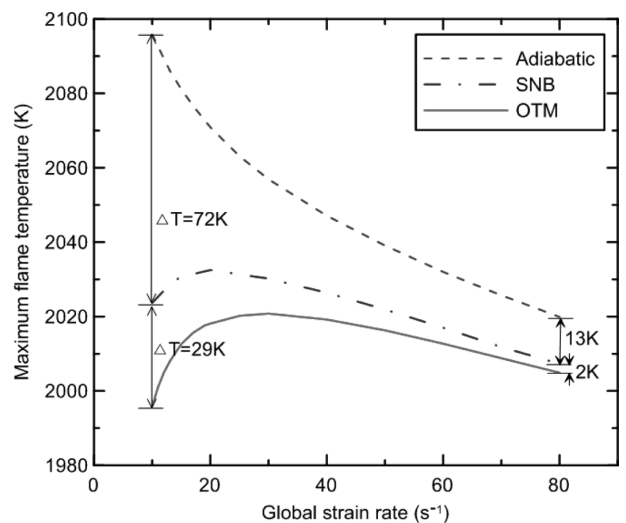


Figure 3. Maximum flame temperatures as a function of global strain rate with different radiation models.

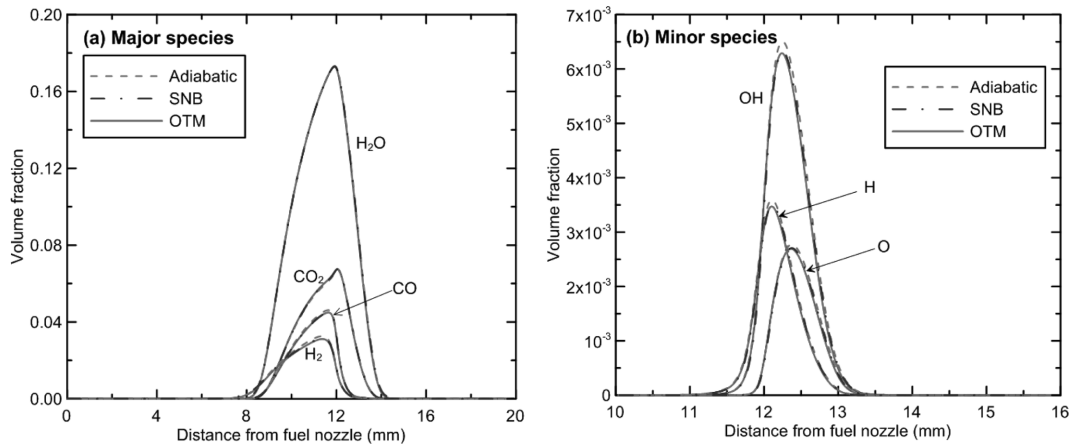


Figure 4. Volume fractions of major and minor species with distance from fuel nozzle for $a_g = 80 \text{ s}^{-1}$.

학종과 부 화학종의 몰분율을 도시한 결과이다. 먼저 주요 화학종의 분포(Figure 4(a))를 살펴보면 복사모델의 고려 유무 및 종류와 상관없이 H_2O , CO_2 , CO 및 H_2 의 분포에는 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 화염의 열발생, 반응속도 및 소화현상과 직접적으로 관련될 수 있는 OH, H 및 O와 같은 부화학종(또는 radical)의 분포(Figure 4(b))를 살펴보면, SNB 모델 결과를 기준으로 OTM의 결과는 거의 차이가 없는 반면에, 단열조건과는 최대 농도의 관점에서 미세한 차이가 발생되고 있음을 볼 수 있다. 이러한 결과는 Figure 3에서 언급된 최대 화염온도에서 SNB 모델과 OTM은 큰 차이가 없는 반면에, 단열조건은 13 K의 미세한 차이가 발생된 현상을 충분히 반영하고 있다.

Figure 5는 복사 열손실이 중요시되는 총괄신장을 $a_g = 20 \text{ s}^{-1}$ 조건에서 주요 화학종과 부 화학종의 몰분율을 도시한 결과이다. 주요 화학종의 경우, SNB 모델과 OTM은 큰 차이가 없는 반면에 단열조건은 복사모델이 적용된 결과들과 미세한 차이를 보이고 있다. 구체적으로 단열조건인 경우 복사모델이 적용된 결과에 비해 낮은 CO_2 및 높은 CO , H_2 몰분율을 갖게 된다. 부 화학종의 경우에 SNB 모델과 OTM의 차이가 발생되고 있으며, 단열조건과는 더

욱 증가된 차이를 나타내고 있다. OH, H 및 O의 최대농도 경향은 Figure 3에서의 최대 화염온도의 순서인 단열조건 $> \text{SNB} > \text{OTM}$ 과 동일함을 볼 수 있다. 참고로 Figure 2에서 확인되었듯이 순수 메탄/공기 확산화염에서 발생하는 soot의 생성 및 이로 인한 복사효과가 고려된다면 Figure 3~Figure 5를 통해 확인된 복사모델의 유무 및 종류에 따른 최대 화염온도 및 화학종의 농도는 정량적으로 더욱 큰 차이가 발생할 것으로 예측된다. 위 결과로부터 총괄신장이 감소됨에 따라 화염두께의 증가로 인한 복사 열손실의 중요성이 크게 증가되며, 화재와 같이 부력이 지배적인 낮은 화염신장율의 조건에서 소화현상에 직접적으로 관여하는 화염온도와 부 화학종의 농도를 정확히 고려하기 위해서는 복사모델의 중요성이 강조되어야 함을 충분히 확인할 수 있다.

4.2 N_2 및 CO_2 희석에 의한 소화한계 근처에서 복사 모델의 영향

소화약제가 첨가된 화염대의 온도분포에 대한 수치해의 검증 및 복사모델의 영향을 검토하기 위하여 Figure 6은 Oh 등⁽¹⁶⁾에 의해 수행된 실험결과와 복사모델에 따른 수치

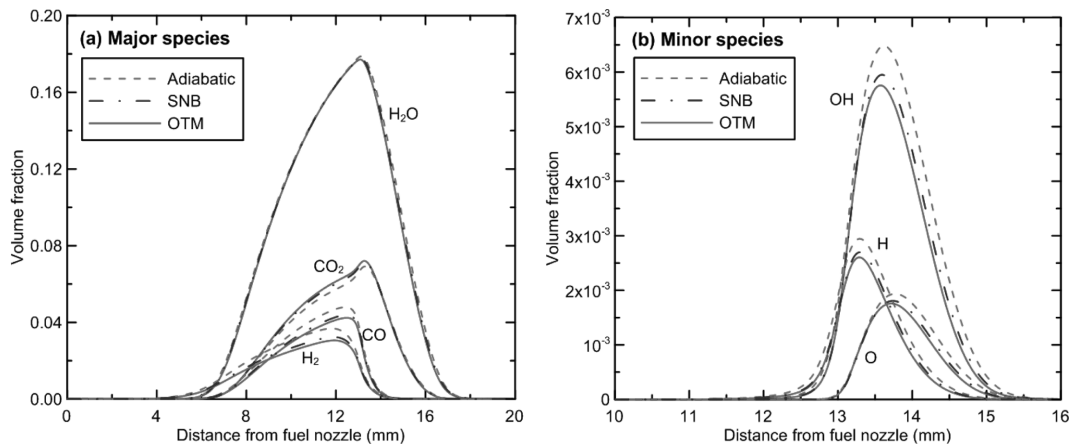


Figure 5. Volume fractions of major and minor species with distance from fuel nozzle for $a_g = 20 \text{ s}^{-1}$.

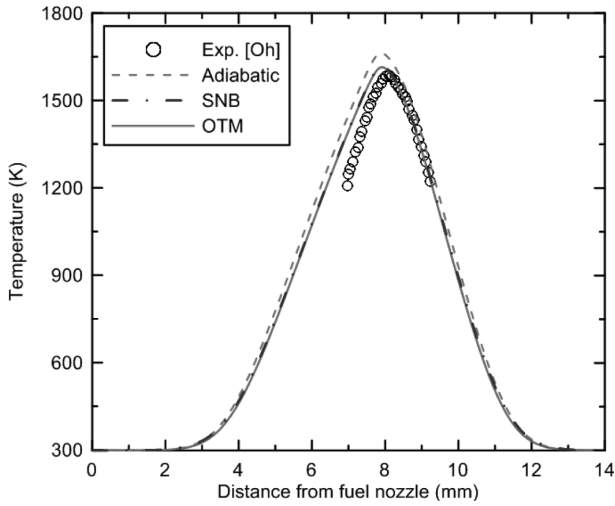


Figure 6. Temperatures of CH₄/N₂-air flame with 81% dilution of N₂ in fuel stream for $a_g = 20 \text{ s}^{-1}$ (nozzle distance was changed to 15 mm to compare between experimental⁽¹⁶⁾ and numerical data).

해석 결과를 비교·도시한 결과이다. 계산조건은 실험조건과 동일하게 $a_g = 20 \text{ s}^{-1}$, 연료류에 81%의 N₂ 첨가 그리고 노즐간의 거리는 1.5 cm로 변경되었다. 그 외의 모든 조건은 3.2절에 제시된 계산조건과 동일하다. 그림에서 복사모델 SNB와 OTM에 의한 온도분포는 매우 유사한 결과를 보이며, 화염면의 위치가 산화제 노즐방향으로 약간 이동된 것을 제외하고 실험결과를 매우 잘 예측하고 있다. 반면에 단열조건이 적용된 수치결과는 최대 화염온도 및 화염 두께를 다소 과대 예측하고 있다. 연료에 첨가된 N₂에 의해 소화가 발생되기 위한 물분율이 약 84%임을 고려할 때, 81%의 첨가량은 소화발생 전의 양으로서, 화염의 최대온도가 약 1,620 K으로 매우 낮은 값을 갖게 된다. 그 결과 $a_g = 20 \text{ s}^{-1}$ 이 복사 열손실이 중요시되는 조건임에도 불구하고 복사모델 SNB와 OTM에 의한 온도분포는 정량적으로 유사한 값이 예측되고 있다. 소화 직전의 조건에서

최대 화염온도는 a_g 에 따라 다소 차이를 보이지만, 약 1,500 K 근처임을 고려할 때 복사모델에 의한 차이는 더욱 감소할 것으로 예상된다. 그럼에도 불구하고 매우 높은 복사 흡수계수를 갖는 CO₂가 첨가된 경우에는 복사모델의 종류에 따른 소화농도의 예측정확도에 대한 추가적인 검토가 요구되며, 이에 대한 결과는 Figure 7에서 논의될 것이다.

복사모델의 정확도 차이가 소화농도에 미치는 영향을 검토하기 위하여, Figure 7은 a_g 의 변화에 따른 공기류 및 연료류에 첨가된 N₂와 CO₂의 소화농도(물분율)를 도시한 것이다. 수치결과의 검증에 위하여 선행연구의 실험결과와 본 연구를 통해 수행된 실험결과를 동시에 비교하였다. 먼저 Figure 7(a)의 공기류에 첨가된 N₂ 소화농도에 대한 실험결과를 살펴보면, 본 연구를 통해 측정된 소화농도는 Bundy 등⁽¹⁷⁾에 의해 측정된 결과와 매우 유사함을 알 수 있다. N₂의 소화농도는 a_g 감소에 따라 증가하다가 $a_g \approx 35 \text{ s}^{-1}$ 근처에서 전환점(즉, 최대 소화농도)이 발생하는 전형적인 C-곡선 형상을 보여주고 있다. 반면에 부력향이 고려되지 않은 수치결과들은 $a_g = 10 \text{ s}^{-1}$ 까지 지속적으로 증가되는 결과를 보이고 있다. 낮은 범위의 화염 신장율에서 실험과 수치결과의 차이는 기존 연구결과^(16,18)들을 통해 충분히 설명되고 있다. 즉, 중력장에서의 실험결과는 부력에 의한 곡률효과와 유한 직경의 버너를 통해 생성된 화염의 반경방향 전도 열손실에 의해 화염강도가 감소되며, 그 결과 1차원 수치결과보다 낮은 소화농도에서 소화가 발생하게 된다. 또한 이들 다차원 효과가 무시될 수 있는 충분한 직경(5 cm)을 갖는 버너가 적용되었을 때, 순수 복사 열손실에 의한 전환점의 발생이 $a_g < 10 \text{ s}^{-1}$ 조건에서 발생된다는 알려져 있다. 이를 통해 $a_g \geq 10 \text{ s}^{-1}$ 조건이 고려된 본 계산에서는 a_g 가 감소함에 따라 본 연구의 수치결과의 소화농도는 점차적으로 증가되는 원인을 명확히 이해할 수 있다. 따라서 중력장에서 대향류 버너의 실험결과가 갖는 본질적인 한계로 인하여 $a_g < 35 \text{ s}^{-1}$ 의 조건에서 1차원

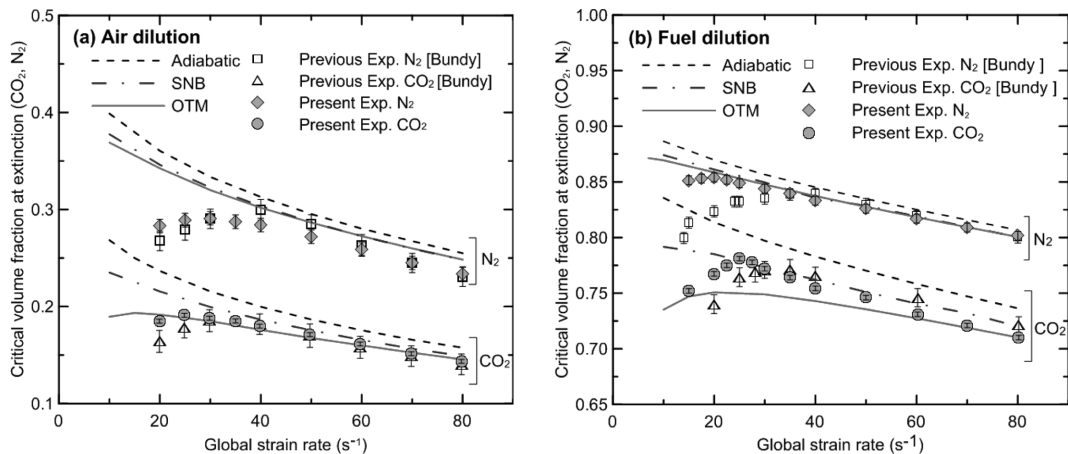


Figure 7. Comparison of extinction limits between experimental and numerical data using different radiation models for (a) air dilution and (b) fuel dilution.

수치결과와의 직접적인 비교는 한계가 있다. 그럼에도 불구하고 $a_g \geq 35 \text{ s}^{-1}$ 의 조건에서 수치결과는 실험결과를 매우 잘 예측하고 있으며, 복사모델 SNB와 OTM은 매우 유사한 결과를 보이는 반면에, 단열조건은 가장 높은 소화농도를 예측하고 있다. N_2 에 비해 복사 참여도가 강한 CO_2 의 경우에, 복사모델 SNB와 OTM에 의한 소화농도의 차이는 약간 증가되지만, 실험결과를 비교적 잘 예측하고 있다. 반면에 단열조건 결과는 실험결과를 과대 예측하는 결과를 확인할 수 있다.

연료류에 소화약제가 첨가된 Figure 7(b)의 결과를 살펴보면, N_2 가 첨가되었을 때는 공기류에 첨가된 조건과 유사하게 수치결과는 실험결과를 매우 잘 예측하고 있으며, 복사모델 SNB와 OTM의 결과는 실험측정의 표준편차를 고려할 때 큰 차이가 없음을 확인할 수 있다. 그러나 CO_2 가 첨가된 경우에는 SNB의 결과가 실험결과를 가장 잘 예측하는 반면에, OTM과 단열조건은 소화농도를 각각 과소 및 과대 예측하는 결과를 보여주고 있다. 이들의 원인은 공기류에 비해 연료류에 첨가된 CO_2 의 농도가 크게 높다는 실험 및 수치결과에서 찾아볼 수 있다. 즉, 공기류에 첨가된 CO_2 의 소화 물분율은 약 0.2 이하인 반면에, 연료류에 첨가된 경우 약 0.75로서 큰 차이를 보이며 CO_2 에 의한 복사 열손실의 중요성이 크게 증가되었기 때문이다.

Figure 8에서는 상대적으로 높은 총괄신장율($a_g = 80 \text{ s}^{-1}$)과 낮은 총괄신장율(20 s^{-1})의 조건에서 공기류에 N_2 및

CO_2 가 첨가되었을 때 복사모델에 따른 에너지방정식에 포함된 복사 열손실항의 정량적인 비교가 검토되었다. N_2 와 CO_2 의 절대적인 비교를 위하여 소화농도보다 낮은 10%의 동일한 양이 첨가되었으며, x축은 최대 화염온도를 이용한 상대좌표로 표현되었다. 먼저 $a_g = 80 \text{ s}^{-1}$ 의 조건에서 CO_2 가 첨가된 경우 강한 복사 열전달 참여로 인하여 N_2 가 첨가된 경우에 비해 더욱 큰 복사 열손실이 발생됨을 알 수 있다. 또한 복사모델 SNB가 적용되었을 때, CO_2 가 첨가된 방향의 화염대의 경계 근처에서 추가적인 복사열 재흡수 현상이 발생하는 반면에, OTM의 경우에는 이를 전혀 예측하지 못함을 확인할 수 있다. SNB에 비해 OTM이 고려된 경우에 화염대 전반에 걸쳐 더욱 증가된 복사 열손실이 발생되며, N_2 에 비해 CO_2 가 첨가될 때 그 차이는 약간 증가된다. 이러한 현상은 Table 1에 제시된 최대 화염온도의 비교를 통해서도 확인될 수 있다. 즉 $a_g = 80 \text{ s}^{-1}$ 의 조건에서 N_2 와 CO_2 가 공기류에 첨가된 경우에 복사모델 SNB와 OTM에 의한 최대 화염온도의 차이는 각각 4.6 K과 9.4 K이다. 물론 이들의 값은 정량적으로 큰 차이가 없으며, 이로 인하여 SNB와 OTM에 의한 소화농도의 차이가 크지 않음을 Figure 7(a)를 통해 재확인될 수 있다. $a_g = 20 \text{ s}^{-1}$ 의 조건에서는 N_2 에 비해 CO_2 가 첨가될 때 복사모델 SNB와 OTM의 복사 열손실량의 차이가 더욱 증가하게 된다. 복사모델에 의한 최대 온도차를 살펴보면 CO_2 가 첨가될 때 36.3 K으로 N_2 (14.0 K)에 비해 크게 증가하게 된

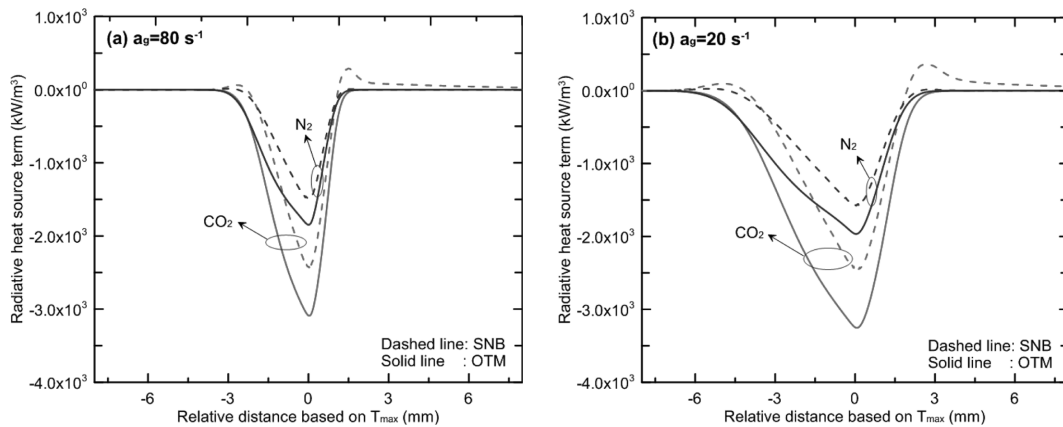


Figure 8. Radiative heat source terms as a function of relative distance based on T_{max} with 10% dilutions of N_2 and CO_2 in air stream for (a) $a_g = 80 \text{ s}^{-1}$ and (b) $a_g = 20 \text{ s}^{-1}$.

Table 1. Maximum Flame Temperatures with 10% and 70% Dilutions of N_2 and CO_2 in Air and Fuel Streams, Respectively, for $a_g = 80$ and 20 s^{-1}

	$a_g \text{ (s}^{-1}\text{)}$	N_2 dilution (K)			CO_2 dilution (K)		
		SNB	OTM	ΔT	SNB	OTM	ΔT
Air stream	80	1901.9	1897.3	4.6	1810.4	1801.0	9.4
	20	1933.5	1919.5	14.0	1846.0	1809.7	36.3
Fuel stream	80	1755.1	1750.9	4.2	1621.3	1592.9	28.4
	20	1793.7	1778.5	15.2	1667.0	1593.4	73.6

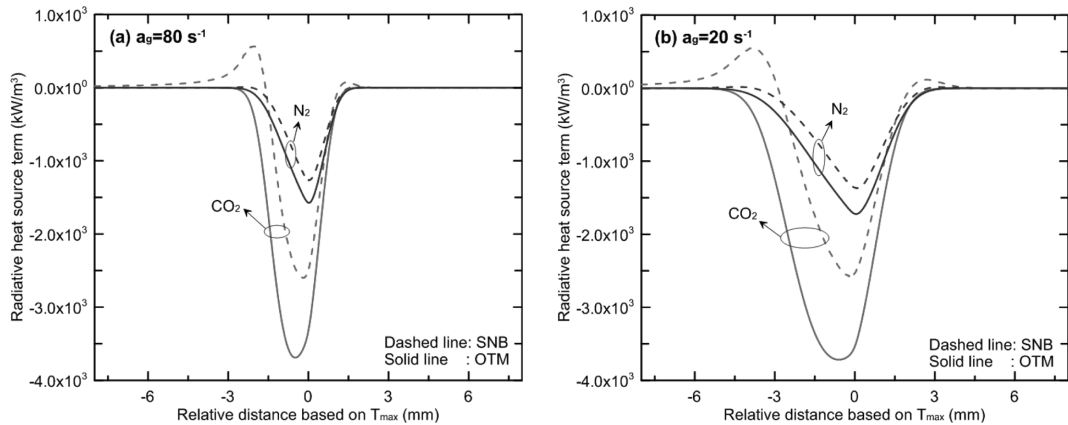


Figure 9. Radiative heat source terms as a function of relative distance based on T_{max} with 70% dilutions of N_2 and CO_2 in fuel stream for (a) $a_g = 80 \text{ s}^{-1}$ and (b) $a_g = 20 \text{ s}^{-1}$.

다. 이들 결과들은 Figure 7(a)에서 N_2 에 비해 CO_2 가 첨가될 때 복사모델에 따른 소화농도의 차이가 증가되는 현상을 명확히 설명해 주고 있다.

Figure 9는 동일한 70%의 N_2 및 CO_2 가 연료류에 첨가되었을 때 복사모델에 따른 열손실항의 값을 도시한 결과이다. Figure 9(a)의 $a_g = 80 \text{ s}^{-1}$ 조건에서 N_2 가 첨가될 때 복사모델에 따른 복사 열손실량의 차이는 공기류에 첨가된 결과(Figure 8(a))와 유사하지만, CO_2 가 첨가된 경우에는 그 차이가 증가되었음을 볼 수 있다. 이러한 원인은 Figure 7에서 언급되었듯이 연료류 첨가의 조건에서는 공기류 첨가에 비해 훨씬 많은 양의 CO_2 가 공급되었기 때문에 복사모델에 따른 열손실량의 차이가 증가된 것이다. 추가로 복사모델 SNB가 적용된 경우에 연료류의 CO_2 첨가로 인하여 상당한 양의 복사 재흡수가 발생되고 있음을 알 수 있다. 복사모델에 따른 최대온도의 차이를 살펴보면 CO_2 가 첨가된 경우에 28.4 K으로 공기류에 첨가된 조건과 비교할 때 소화농도의 차이가 증가되고 있음을 Figure 7(b)를 통해 확인될 수 있다. 마지막으로 Figure 9(b)의 복사 열손실이 보다 중요시되는 $a_g = 20 \text{ s}^{-1}$ 조건에서 CO_2 가 첨가된 경우 SNB와 OTM에 의한 복사 열손실량의 차이는 가장 크게 발생되고 있다. 복사모델에 따라 최대 화염 온도의 차이 역시 73.6 K으로 가장 크며, Figure 7(b)에서와 같이 소화농도의 가장 큰 차이가 발생되었음을 재확인할 수 있다. 위 결과들을 통해 복사 열전달에 관여하지 않는 소화약제의 경우에는 SNB 또는 OTM의 적용이 소화농도에 미치는 영향이 크지 않지만, CO_2 와 같이 복사 참여도가 높은 소화약제가 연료류에 첨가되었을 때는 SNB와 같이 보다 높은 정확도를 갖는 복사모델의 적용이 요구된다는 결론을 얻을 수 있다.

4.3 복사모델에 따른 계산시간 비교

가스계 소화약제가 적용된 대항류 확산화염에서 복사열 전달의 중요성은 총괄신장율과 소화약제의 종류 및 공급

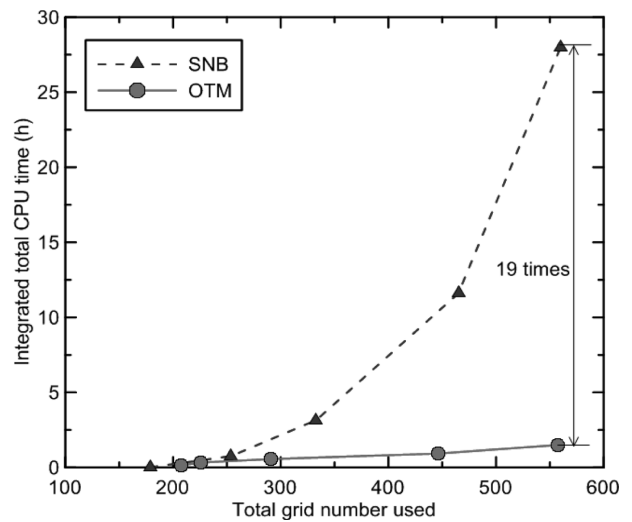


Figure 10. Comparison of integrated total CPU time between SNB and OTM.

방법(공기류 또는 연료류)에 따라 큰 차이를 보이게 된다. 4.2절에서 언급되었듯이 낮은 신장율의 조건에서 CO_2 가 첨가된 경우에 높은 정확도의 복사모델이 요구되며, 다량의 CO_2 소화농도를 갖는 연료류의 첨가는 그 중요성이 더욱 크게 강조된다. 그러나 높은 정확도의 복사모델은 급격하게 증가된 계산비용(시간)을 요구하기 때문에 적절한 수치해의 정확도와 계산비용을 고려한 합리적인 복사모델의 선택은 필수적이라 할 수 있다. Figure 10은 복사모델 SNB와 OTM이 각각 적용되었을 때 적용된 격자수에 따른 총적분된 CPU 시간을 도시한 결과이다. 격자수의 증가는 OPPDIF 코드에 적용된 GRAD와 CURV의 감소를 통해 수행되었다. 가장 단순한 복사모델에 해당되는 OTM의 경우에, 격자수의 증가에 따라 계산시간은 선형적으로 증가한다. 격자 민감도 분석을 통해 선정된 약 550개의 격자수는 약 1.5 h의 시간이 요구하고 있다. 반면에 높은 정확도를 갖는 복사모델인 SNB가 적용되었을 때는 격자수의 증

가에 따라 계산시간이 2차함수의 형태로 급격하게 증가된다. 또한 약 550개의 격자수에 대하여 약 28.0 h의 계산시간이 소요되었다. 결과적으로 1차원 대향류 확산화염에서 복사모델 SNB의 선택은 OTM에 비해 약 19배의 계산시간이 요구됨을 확인하였다. 본 연구의 결과는 복사모델의 정확도가 크게 요구되는 화염조건에 대한 명확한 구분과 계산비용을 고려한 적절한 복사모델의 선정기준을 제시할 수 있으며, 향후 다양한 연소조건에서 가스계 소화약제의 소화농도 및 소화원리를 규명하는데 매우 유용한 정보를 제공할 것으로 기대된다.

5. 결 론

1차원 대향류 메탄/공기 확산화염에서 가스복사모델이 소화한계에 미치는 영향이 수치해석을 통해 검토되었으며, 수치결과의 검증에 대한 실험이 병행되었다. 소화약제로는 N_2 및 CO_2 가 고려되었으며, 연료 및 공기류의 첨가에 따른 소화농도가 평가되었다. 주요 결과는 다음과 같다.

소화한계에 대한 복사모델의 영향을 검토하기 이전에, 순수 메탄/공기 확산화염구조에 대하여 복사 열전달의 높은 정확도를 갖는 SNB 모델, 간략화된 OTM 그리고 단일조건의 결과가 비교·검토되었다. 총괄신장율이 감소됨에 따라 화염두께의 증가로 인한 복사 열손실의 중요성이 크게 증가되며, 화재와 같이 부력이 지배적인 낮은 화염신장율의 조건에서 소화현상에 직접적으로 관여하는 화염온도와 부 화학종(radical)의 농도를 정확히 고려하기 위해서는 복사모델의 중요성이 강조되어야 함을 확인하였다.

연료류 및 공기류에 첨가된 N_2 및 CO_2 의 소화농도에 대한 수치 및 실험결과의 비교를 통해, 복사 열전달에 관여하지 않는 소화약제인 N_2 의 경우에는 복사모델 SNB 또는 OTM의 적용이 소화농도에 미치는 영향이 크지 않음을 확인하였다. 그러나 CO_2 와 같이 복사 참여도가 높은 소화약제가 낮은 화염신장율 조건에서 첨가되었을 때 SNB와 같은 보다 높은 정확도의 복사모델이 고려되어야 한다. 특히 연료에 첨가된 CO_2 의 경우 높은 소화농도로 인하여 복사모델 SNB와 OTM에 의한 소화농도는 상당한 차이를 보이게 된다.

소화농도 예측을 위한 적정 격자계에서 SNB 모델은 OTM에 비해 약 19배의 계산비용(시간)이 요구됨을 고려할 때, 적절한 수치해의 정확도와 계산비용을 고려한 합리적인 복사모델의 선택이 필수적이라 할 수 있다. 본 연구 결과를 통해 제시된 복사모델의 선정기준은 향후 다양한 연소조건에서 가스계 소화약제의 소화농도 및 소화원리를 규명하는데 유용한 정보를 제공할 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로

한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. NRF-2012R1A1A1009708).

References

1. S.-Y. Mun, C.-H. Park, C.-H. Hwang and C. B. Oh, "A Numerical Study on the Extinguishing Effects of CO_2 in Counterflow Diffusion Flames with the Concept of Local Application System", *Journal of Korean Institute of Fire Science Engineering*, Vol. 26, No. 4, pp. 55-62 (2012).
2. H.-H. Lee, C. B. Oh and C.-H. Hwang, "CO₂ Suppression Characteristics of the Nitrogen-diluted Methane Counterflow Non-premixed Flame", *Journal of Korean Society of Safety*, Vol. 28, No. 2, pp. 42-48 (2013).
3. J. S. T'ien, "Diffusion Flame Extinction at Small Stretch Rates: The Mechanism of Radiative Loss", *Combustion and Flame*, Vol. 65, No. 1, pp. 31-34 (1986).
4. K. Maruta, M. Yoshida, H. Guo, Y. Ju and T. Niioka, "Extinction of Low-stretched Diffusion Flame in Microgravity", *Combustion and Flame*, Vol. 112, No. 1-2, pp. 181-187 (1998).
5. W.-H. Park, "Study on the Radiative Transfer Characteristics by Nongray Gas Mixtures and Application on Combustion Systems", Ph.D. Dissertation, Chung-Ang University (2003).
6. W.-H. Park, D.-H. Kim, M.-H. Shin and T.-K. Kim, "Comparison of Different Radiative Gas Property Models for One-dimensional Premixed Opposed Flames", p. 114, *The Third National Congress on Fluids Engineering*, Jeju, Korea (2004).
7. H. Bedir, J. S. T'ien and H. S. Lee, "Comparison of Different Radiation Treatments for a One-dimensional Diffusion Flame", *Combustion Theory and Modelling*, Vol. 1, No. 4, pp. 395-404 (1997).
8. A. E. Lutz, R. J. Kee, J. F. Grcar and F. M. Rupley, "OPPDIF: A Fortran Program for Computing Opposed-flow Diffusion Flame", SAND 96-8243 (1997).
9. R. J. Kee, F. M. Rupley and J. A. Miller, "A Fortran Chemical Kinetic Package for The Analysis of Gas Phase Chemical Kinetics", SAND 89-8009B (1989).
10. R. J. Kee, G. Dixon-Lewis, J. Warnatz, M. E. Coltrin and J. A. Miller, "A Fortran Computer Code Package for the Evaluation of Gas Phase Multicomponent Transport Properties", SAND86-8246 (1986).
11. C. T. Bowman, R. K. Hanson, D. F. Davidson, W. C. Gardiner, V. Lissianski, G. P. Smith, D. M. Golden, M. Frenklach and M. Goldenburg, http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/ (1999).
12. Y. Ju, H. Guo, K. Maruta and F. Liu, "On the Extinction Limit and Flammability Limit of Nonadiabatic Stretched Methane-air Premixed Flames", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 342, pp. 315-334 (1997).

13. C. B. Ludwig, W. Malkmus, J. E. Readon and A. L. Thompson, "Handbook of Infrared Radiation from Combustion Gas", NASA SP-3080, Scientific and Technical Information Office, Washington D.C. (1973).
14. A. Soufiani and 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 Infra-red Radiation Fluxes due to Atmospheric Water Vapor", Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Vol. 79, pp. 367-379 (1953).
16. C. B. Oh, A. Hamins, M. Bundy and J. Park, "The Two-dimensional Structure of Low Strain Rate Counterflow Nonpremixed Methane Flames in Normal and Microgravity", Combustion Theory and Modelling, Vol. 12, No. 2, pp. 283-302 (2008).
17. M. Bundy, A. Hamins and K. Y. Lee, "Suppression Limits of Low Strain Rate Nonpremixed Mixed Methane Flames", Combustion and Flame, Vol. 133, No. 3, pp. 299-310 (2003).
18. C. B. Oh, E. J. Lee and J. Park, "Effects of the Burner Diameter on the Flame Structure and Extinction Limit of Counterflow Nonpremixed Flames", International Journal of Spray and Combustion Dynamics, Vol. 2, No. 3, pp. 199-218 (2010).