

국소방출방식 개념의 대향류 확산화염에서 CO₂ 소화효과에 관한 수치해석 연구

문선여 · 박총화 · 황철홍[†] · 오창보*

대전대학교 소방방재학과, *부경대학교 안전공학과

A Numerical Study on the Extinguishing Effects of CO₂ in Counterflow Diffusion Flames with the Concept of Local Application System

Sun-Yeo Mun · Chung-Hwa Park · Cheol-Hong Hwang[†] · Chang-Bo Oh*

Dept. of Fire & Disaster Prevention, Daejeon University

*Dept. of Safety Engineering, Pukyong National University

(Received June 20, 2012; Revised August 2, 2012; Accepted August 13, 2012)

요 약

소화약제의 국소방출방식 개념이 적용될 수 있는 대향류 확산화염을 대상으로 CO₂ 소화약제의 소화기구를 재조명하기 위한 연구가 시도되었다. 이를 위해 연료 또는 공기류에 CO₂가 첨가된 낮은 총괄신장율의 CH₄/air 대향류 확산화염이 상세반응을 이용한 수치해석을 통해 검토되었다. 첨가된 CO₂를 포함한 복사 참여 화학종의 복사 열손실을 고려하기 위하여 optically thin model(OTM)이 적용되었다. 주요 결과로서, 공기류에 첨가된 CO₂의 소화농도 예측결과는 문헌에 보고된 실험결과를 적절하게 예측하고 있으나, 연료류에 첨가된 경우 다소 과소 예측된 결과를 확인하였다. 소화효과에 대한 정량적 분석을 위하여 가상의 소화약제의 개념이 도입되었다. CO₂ 소화효과의 분석을 통해 총괄신장율(a_g)에 따른 순수 희석효과, 복사 열손실 및 열용량에 의한 열적효과 그리고 CO₂의 연쇄반응 억제를 통한 화학적 효과의 정량적 기여도를 구체적으로 확인할 수 있었다.

ABSTRACT

The suppression mechanisms of carbon dioxide (CO₂) as a representative fire suppression agent were revisited using a counterflow diffusion flame which could be applied the concept of a local application system. To end this, the low strain rate CH₄/air counterflow diffusions with CO₂ addition in either fuel or oxidizer stream were examined numerically using detailed-kinetic chemistry. Radiative heat loss due to radiating gas species including CO₂ added was considered by the optically thin model (OTM). As a result, the critical CO₂ volume fractions in the oxidizer stream required to extinguish the flame were in good agreement with the experimental data reported in the literature, while somewhat under-prediction was observed with CO₂ added in the fuel stream. The surrogate agents were adopted to estimate the quantitative contribution with changing in global strain rate (a_g) on the flame extinguishment among pure dilution effect, thermal effects including radiation heat loss and chemical effect due to the CO₂ fire suppression agent.

Keywords : CO₂ fire suppression agent, Local application system, Counterflow diffusion flame

1. 서 론

국소방출방식(local application system)은 소방대상물에 커다란 개구부가 있어 전역방출방식(total flooding system)으로 소화가 곤란한 경우, 한정된 연소영역에 소화약제를 집중적으로 분사하여 일시적으로 차단하는 소화방법이다. 전역방출방식과는 달리 화염면에 소화약제가 직접 공급되어 소화약제의 물리적인 냉각효과, 산소 차단으로 인한 질

식효과 및 화학적 부족매효과 등에 의한 소화현상이 발생하게 된다. 국소방출방식에 의한 소화현상은 대향류버너(counterflow burner)를 통해 연구될 수 있으며, 이를 통해 제어된 화염면을 대상으로 소화약제의 종류 및 공급량에 따른 소화특성의 이해는 다양한 원인에 의한 소화약제의 소화성능을 검토 할 수 있는 매우 유용한 기회를 제공한다.

본 연구에서 검토되는 대표적 가스계 소화약제인 CO₂의

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

첨가효과는 초기 연소공학적 관점에서 내연기관 및 산업용 보일러의 배기가스 재순환(EGR)의 최적화를 위해 주로 연구되었다. 또한 다량의 CO₂를 포함한 매립지(landfill) 가스 및 산업공정에서 발생하는 저 발열량 연료의 활용을 위한 화염안정성에 대한 검토가 수행되었다⁽¹⁾. 그 결과 연소장에 첨가된 CO₂는 유동 및 화염구조, 화염안정성뿐만 아니라 NO_x, CO 그리고 soot의 생성특성에 큰 변화를 초래한다고 알려져 있다^(2,3). 최근 화재안전에 관한 증가된 관심과 함께 이러한 해석방법은 부력에 의해 지배되는 낮은 신장율의 화염에서 CO₂ 소화약제에 의한 소화현상 규명을 위해 확대·적용되고 있다⁽⁴⁾.

연료/공기의 체류시간 감소 및 화염 수직방향으로의 열손실 증가에 의한 높은 화염신장율에서의 소염현상과는 달리, 낮은 신장율에서의 화염은 주로 증가된 화염온도 및 화염체적에 의한 복사 열손실에 의해 소염된다고 알려져 있다^(5,6). 결과적으로 낮은 화염신장율에서 CO₂ 첨가에 의한 소화는 화염 자체의 복사 열전달뿐만 아니라 CO₂ 소화약제의 다양한 소화효과들이 동시에 발생하는 매우 복잡한 현상을 보이게 된다.

CO₂가 갖는 소화효과로는 반응물의 농도를 감소시켜 반응물의 충돌 횟수(collision frequency)를 저감시키는 희석효과(dilution effect), 높은 열용량에 의한 온도 저감효과(thermal effect), 그리고 CO₂의 강한 복사참여로 인한 복사 열손실효과(radiation effect)로 구분될 수 있다. 추가로 CO₂+H → CO+OH의 개시반응을 통한 H 라디칼(radical)의 소모로 기본 연쇄반응인 H+O₂ → O+OH의 반응속도를 감소시켜, 결국 소화를 촉진시키는 CO₂의 화학적효과(chemical effect)가 확인된 바 있다⁽⁷⁾. 이들 CO₂의 소화효과는 본질적으로 분리되어 설명될 수 없으나, 최근 상세 반응기구를 이용한 수치해석의 적용을 통해 연료 및 공기류에 첨가된 CO₂의 복사 열손실 및 화학반응의 참여 유무에 따른 화염구조, 소염, NO_x 및 soot 생성특성 차이에 관한 많은 연구들이 진행되고 있다^(2,8-10). 그러나 국소방출방식의 개념이 적용된 대향류 확산화염을 대상으로 연료 및 공기류에 첨가된 CO₂의 복잡한 소화효과들에 대한 정량적 평가 및 분석은 시도된 바 없다.

이러한 배경 하에 본 연구에서는 CH₄/air 대향류 확산화염을 대상으로 연료 및 공기류에 첨가된 CO₂의 복잡한 소화효과에 관한 수치해석적 연구가 수행되었다. 화재공학의 관점에서 복사 열손실의 효과가 중요시 되는 낮은 신장율의 화염을 대상으로 하였으며, 문헌에 보고된 실험결과와의 비교를 통해 수치결과의 타당성을 검증하였다. 이후 CO₂에 의한 소화효과로서 희석효과, 복사효과를 포함한 열적효과 및 화학적효과를 정량적으로 분리하기 위하여 가상의 소화약제(surrogate agent) 개념을 도입하였다. 본 연구의 체계적인 접근법은 향후 사용목적 및 적용대상에 따른 혼합 청정소화약제의 효율적인 개발에 유용한 정보를 제공할 것으로 기대된다.

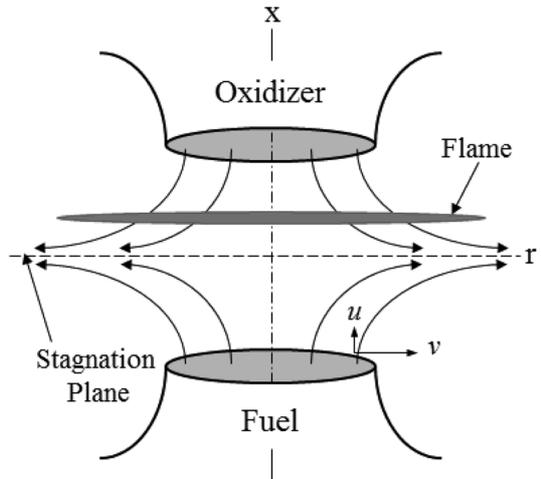


Figure 1. Schematic configuration of counterflow diffusion flame.

2. 수치해석 방법 및 조건

2.1 수치해석 방법

층류 확산화염에서 연료 및 공기류에 첨가된 CO₂의 소화현상을 규명하기 위하여 Figure 1과 같은 대향류 확산화염을 대상으로 하였다. 1차원 확산화염의 계산을 위하여 수정된 Oppdif code⁽¹¹⁾가 사용되었으며, 열역학 및 전달물성치는 각각 Chemkin-II⁽¹²⁾와 Transport Package⁽¹³⁾가 사용되었다. 상세반응 기구로는 GRI ver. 3.0⁽¹⁴⁾이 사용되었다. 연료(CH₄) 및 공기는 1 atm과 298 K의 조건에서 공급되었다. 본 연구에서 주요 변수로 사용된 총괄신장율(a_g)은 식(1)과 같이 정의되었으며, 부력이 지배적인 낮은 총괄신장율을 갖는 화염을 대상으로 $a_g < 80 \text{ s}^{-1}$ 의 범위에서 계산이 수행되었다. 하첨자 F와 O는 각각 연료 및 공기류를 의미하며, L은 연료 및 공기 노즐 간의 거리로서 2.5 cm로 고정되었다. 또한 동일 총괄신장율에서 연료류와 공기류의 유속은 동일하게 설정되었다. 보다 정확한 소염농도 및 소염 직전의 최대 화염온도를 얻기 위하여, 소염점 근처에서 CO₂의 몰분율은 1.0×10^{-4} 간격으로 변화되었다. 수치해의 격자 민감도 해석을 통해 최대 약 600개의 격자가 사용되었다.

$$a_g = \frac{2(-u_O)}{L} \left(1 + \frac{u_F}{-u_O} \sqrt{\frac{\rho_F}{\rho_O}} \right) \quad (1)$$

낮은 화염신장율의 조건에서 중요시되는 복사 열손실 및 첨가된 CO₂의 추가적인 복사 열손실을 고려하기 위하여, 간략화된 모델로서 화염 및 부근의 가스가 광학적으로 매우 얇아 복사에너지를 흡수하지 않는다는 가정이 적용된 Optically Thin Model(OTM)⁽¹⁵⁾이 사용되었다.

2.2 CO₂ 소화효과의 정량적 분석기법

CO₂의 소화효과에 대한 정량적 분석을 위하여 가상의

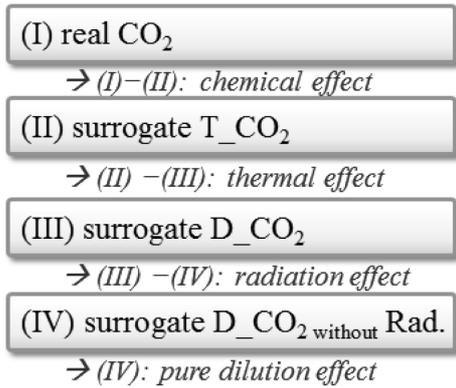


Figure 2. Strategy for estimation of the quantitative contribution on the flame extinguishment due to the CO₂ fire suppression agent.

소화약제 개념을 도입하여, Figure 2에 표기된 바와 같이 동일 총괄신장율에서 4번의 계산을 반복하게 된다; (I) 실제 CO₂를 첨가, (II) CO₂ 대신에 반응에 참여하지 않은 ‘T_CO₂’를 첨가(이때 열역학 및 복사 물성치는 동일하게 설정)^(7,8), (III) 반응에 참여하지 않고 비열(열용량)이 0인 ‘D_CO₂’를 첨가(이때 복사 물성치는 동일), (IV) ‘D_CO₂’에서 복사 열전달이 배제된 ‘D_CO₂ without Rad.’는 복사 효과, 열적효과 및 화학적 효과가 고려되지 않은 순수한 희석효과를 갖게 된다. ‘D_CO₂ without Rad.’와 ‘D_CO₂’의 차이(Figure 2의 (III)-(IV)를 의미)는 순수한 복사 열손실효과를 의미하며, ‘D_CO₂’와 ‘T_CO₂’의 차이는 복사 열손실을 제외한 열적효과 그리고 ‘T_CO₂’와 실제 CO₂와의 차이는 화학적효과를 의미한다.

3. 결과 및 검토

3.1 소화농도의 비교를 통한 수치해의 검증

소염점에서 CO₂ 소화약제의 소화효과에 대한 정량적 분석 이전에 적용된 복사모델(OTM)을 통한 CO₂ 소화약제의 소화농도 예측에 대한 타당성을 검증을 위하여, Figure 3은 a_g의 변화에 따른 연료 및 공기류에 첨가된 CO₂의 소화농도를 비교·도시한 것이다. 첨가된 CO₂ 자체의 복사 효과의 영향을 간접적으로 판단하기 위하여 복사효과가 무시될 수 있는 N₂의 소화농도가 추가되었다. 우선 Figure 3(a)의 연료류에 첨가된 N₂의 소화농도에 대한 실험결과를 살펴보면, 중력장에서 얻어진 실험결과⁽⁴⁾의 소화농도는 a_g가 감소함에 따라 증가하다가 a_g≈35 s⁻¹에서 전환점(즉, 최대 소화농도)이 발생하는 전형적인 C-curve 형상을 보여 준다. 또한 미소 중력장에서의 실험결과⁽¹⁶⁾는 a_g≈20 s⁻¹에서 전환점이 발생됨을 볼 수 있다. 반면에 부력향이 고려되지 않은 본 연구의 계산 결과들은 a_g가 10 s⁻¹까지 감소될 때까지 전환점이 발생되지 않고 지속적으로 증가되는 결과를 보여준다. 위의 원인들은 최근 수행된 2차원 직접수치모

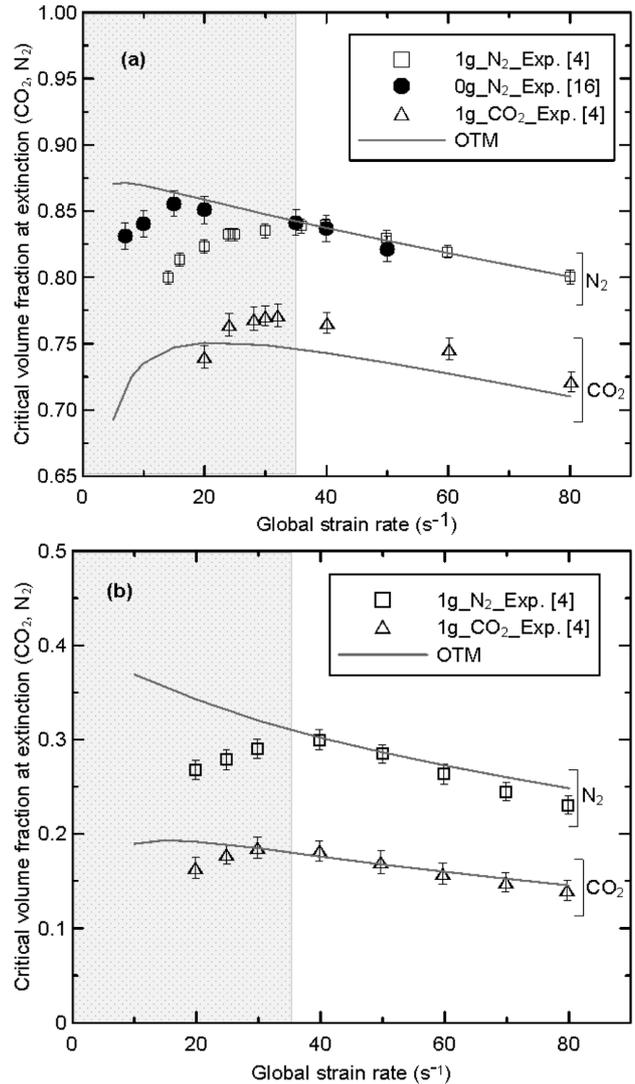


Figure 3. Critical Volume fractions at extinction of CO₂ and N₂; (a) fuel dilution and (b) air dilution.

사(DNS) 연구결과를 통해 명확히 이해 될 수 있다^(17,18). 즉 미소중력장에서 유한 직경의 버너를 통해 생성된 화염은 측면(반경)으로의 전도 열손실에 의해 화염강도가 감소되어 1차원 계산결과보다 낮은 소화농도에서 소염이 발생된다. 또한 중력장에서의 결과는 측면으로의 열손실과 더불어 부력에 의한 곡률효과로 인하여 화염두께, 화염위치 및 국부 신장율이 변화되며, 결국 화염면의 최대 열발생량이 감소되어 1차원 계산 결과와 더욱 큰 차이가 발생하게 된다. 또한 이들 다차원효과가 무시될 수 있는 충분한 직경(d=50 mm)을 갖는 버너가 적용되었을 때, 순수 복사 열손실에 의한 전환점의 발생은 a_g<10 s⁻¹의 조건에서 발생된다⁽¹⁸⁾. 그 결과 a_g>10 s⁻¹의 조건이 고려된 본 계산에서는 a_g가 감소함에 따라 소화농도는 점차적으로 증가됨을 알 수 있다. 이들 결과를 고려할 때 본 연구의 1차원 계산 결과는 a_g<35 s⁻¹ 조건에서 작은 또는 유한직경의 버너가 적

용된 실험결과와 직접적으로 비교하는 것은 한계가 있다.

연료류에 첨가된 N₂ 소화농도를 살펴보면(Figure 3(a)), OTM의 결과는 실험결과와 비교 했을 때 낮은 신장율에서 미세한 차이를 제외하고 동일한 결과를 보여주고 있다. 복사효과를 동반하는 CO₂의 소화농도를 살펴보면, OTM은 실험결과에 비해 과소 예측하는 결과를 볼 수 있다. 그러나 공기류에 첨가된 CO₂의 소화농도를 살펴보면(Figure 3(b)), OTM은 실험측정의 불확실도 범위 내에서 거의 유사한 결과를 보여주고 있다. 대부분의 화재에서 소화약제의 공급은 공기류 측에서 이루어짐을 고려할 때, 비교적 간단한 복사모델인 OTM의 적용은 매우 효율적임을 확인하였다.

3.2 N₂ 소화약제를 이용한 순수 희석효과 및 열적효과와 분리

일반적으로 소화약제의 첨가에 의한 희석효과는 열적효과를 포함하여 적용되기 때문에, CO₂ 소화효과의 정량적인 분석 이전에 희석효과에 대한 명확한 정의 및 이해가 선행되어야 한다. Figure 4는 a_g=20 s⁻¹에서 (a) 순수 CH₄/air, (b) 공기류에 첨가된 N₂에 의한 소화조건, (c) N₂와 동일한 몰분율의 D_N₂(비열이 0으로 처리된 가상의 소화약제

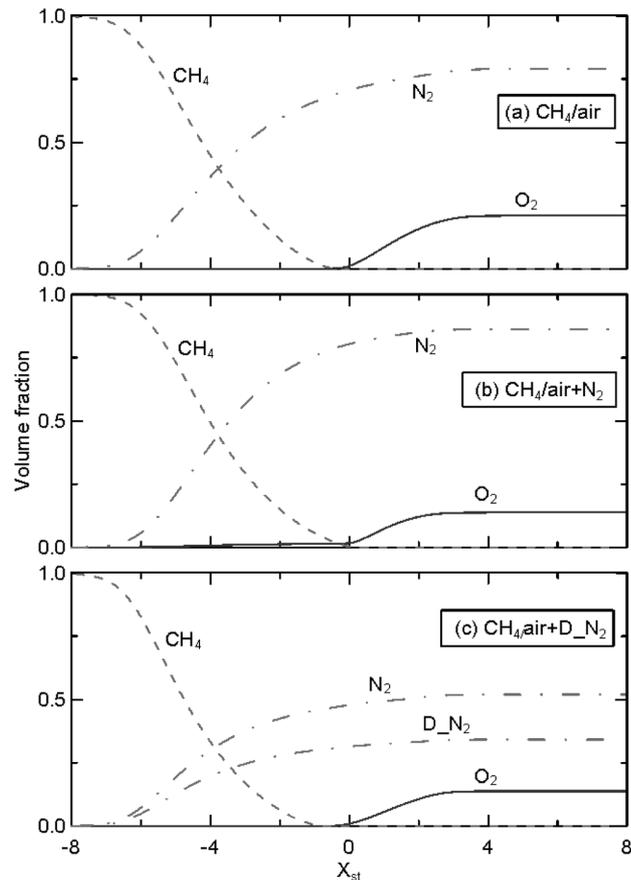


Figure 4. Volume fractions of CH₄, O₂ and N₂ (or D_N₂) with N₂ (or D_N₂) added in the air stream.

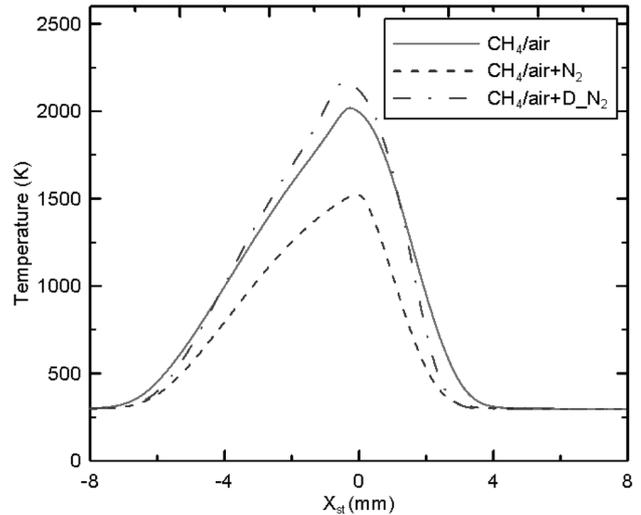


Figure 5. Comparison of temperature distributions with N₂ (or D_N₂) added in the air stream.

제)가 첨가된 조건에서 연료, 공기 및 질소(D_N₂ 포함)의 체적분율을 도시한 것이다. 모든 결과는 이론 혼합분율값을 갖는 화염면의 위치(x_{st})를 상대적인 기준점(0)으로 표기하였다. 공기류에 N₂ 및 D_N₂의 첨가는 정체면 또는 화염면의 위치를 변화시키기 때문에 이론 혼합분율값을 갖는 화염면 CH₄/air의 농도분포와 비교할 때, N₂가 첨가된 경우 한정된 반응속도로 인하여 많은 양의 O₂ 침투(leakage) 현상이 확인된다. 그러나 냉각 효과가 고려되지 않은 D_N₂의 동일한 양이 첨가되었을 때는 O₂의 침투현상이 확인되지 않는다.

Figure 5는 Figure 4와 동일한 조건에서 온도분포를 도시한 것이다. 비열이 고려되지 않은 D_N₂ 첨가 시 순수 CH₄/air 조건과 비교할 때, 속도장, 산화제류의 농도구배 그리고 평균 열역학 및 전달물성치 값들의 변화로 인해 각 조건의 최대온도의 차이가 발생된다. D_N₂는 열용량이 고려되지 않더라도 CH₄/air 조건에 비해 다른 이론 혼합분율(z_{st})을 갖으며, 정체면을 기준으로 상대적인 화염면의 위치는 변화된다. 즉, D_N₂로 인해 화염면은 정체면에 더욱 근접하고 이로 인해 화염면은 상이한 국부신장율을 갖게 된다. D_N₂의 경우에(화염면 기준으로 공기측의 속도 구배를 통해 예측된) 국부신장율이 매우 낮으며, 그 결과 최대온도는 CH₄/air에 비해 증가하게 된다. 위 결과로부터 일반적으로 알려진 반응물의 농도감소로 인한 O₂ 침투현상은 엄밀하게 열적효과에 의한 반응속도의 감소에 의해 발생하는 것으로서, 본 연구에서 고려된 D_N₂는 반응물의 농도를 감소시켜 충돌 횟수를 저감시키는 순수한 희석효과를 갖게 된다. 본 논문에는 도시하지 않았지만 연료류에 첨가한 N₂와 D_N₂에 의한 결과 역시 이와 유사한 경향을 보인다.

Figure 6은 N₂ 소화약제의 소화효과에 대한 정량적 분석을 위해 a_g에 따른 N₂와 D_N₂의 소화농도를 도시한 결과

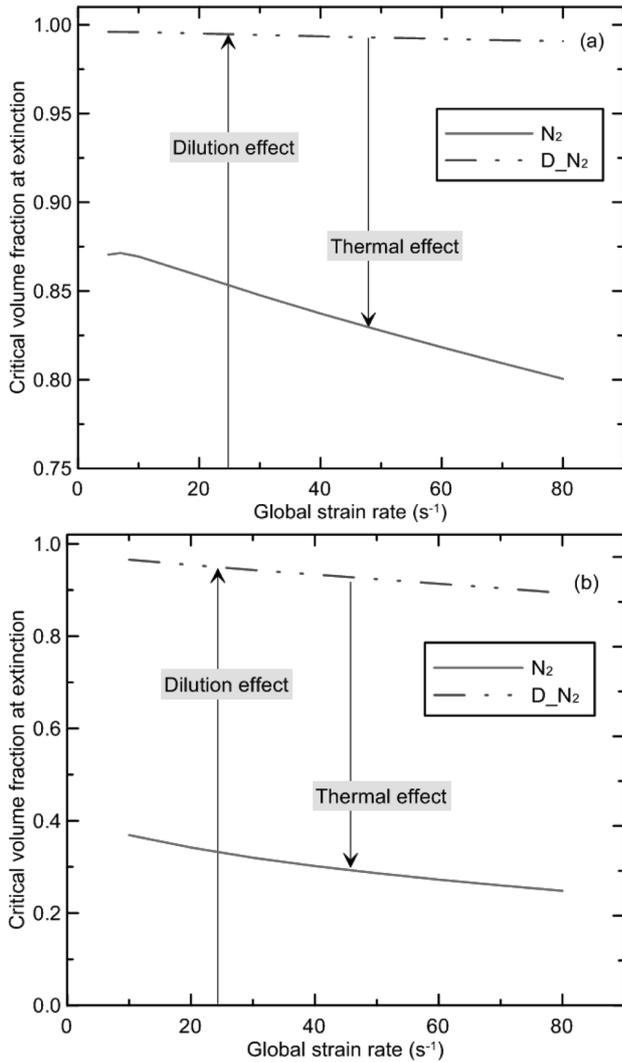


Figure 6. Critical volume fractions at extinction of N₂; (a) fuel dilution and (b) air dilution.

이다. N₂의 소화효과는 CO₂와는 달리 본질적으로 질식효과와 열적 냉각효과만을 갖게 된다. Figure 6(a)의 연료류에 첨가된 N₂ 소화농도를 살펴보면, 순수한 희석효과(D_N₂)는 약 99% 이상의 높은 소화농도를 요구하며, 열적 효과에 의해 a_g 변화에 따라 13~20%의 소화농도의 감소를 발생시킨다. 공기류에 첨가된 N₂의 소화농도를 살펴보면(Figure 6(b)), 희석효과에 의해 약 90% 이상의 소화농도가 요구되며, 열적효과에 의해 약 60%의 소화농도 감소가 발생됨을 알 수 있다. 즉, 연료 및 공기류에 첨가된 N₂의 소화효과는 유사한 경향을 보이지만, 정량적 측면에서 공기류에 첨가된 N₂의 희석 및 열적 소화효과가 매우 높음을 알 수 있다. 이들의 차이는 연료 또는 공기류의 N₂ (또는 D_N₂) 첨가에 따른 N₂(또는 D_N₂)의 소화농도, 화염면의 위치, 국부 화염신장을 및 발생열량 등의 변화에 의해 발생하는 것으로 예측되며, 이에 대한 상세한 해석은 향후 진행될 예정이다.

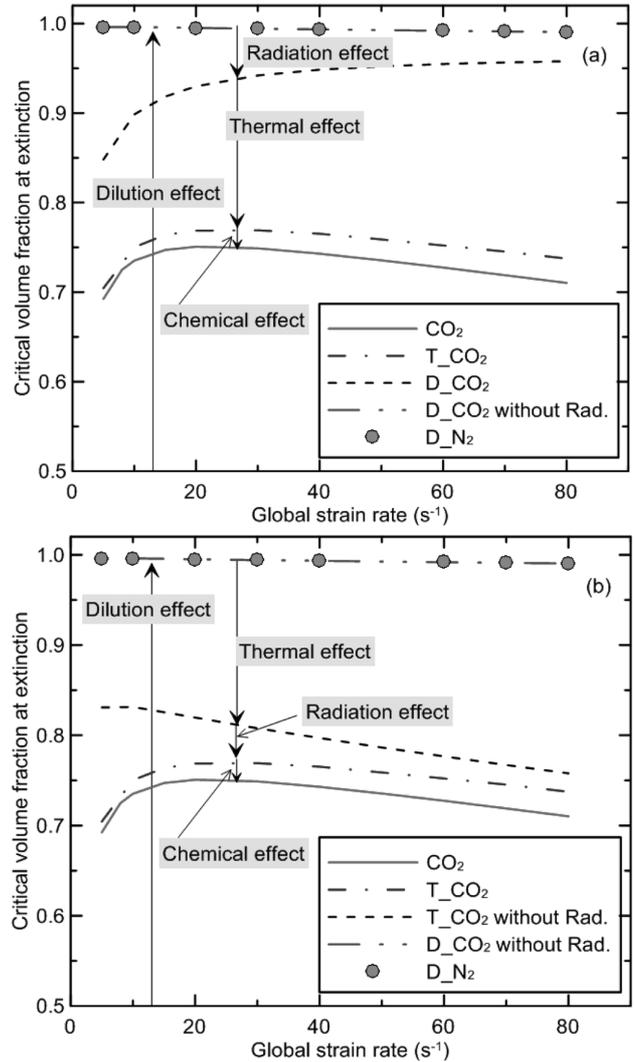


Figure 7. Critical volume fractions at extinction with the fuel dilution (a) radiation effect without heat capacity (b) radiation effect with heat capacity.

3.3 CO₂ 소화약제의 소화효과에 대한 정량적 분석

Figure 7은 연료류에 첨가한 CO₂의 소화효과에 관한 순수 희석, 복사열손실, 열 및 화학적 효과를 정량적으로 분석하기 위하여, 가상의 소화약제들을 고려한 결과를 도출한 것이다. Figure 7에서 추가된 D_N₂는 복사효과가 고려되지 않은 'D_CO₂ without Rad.'의 소화농도와 동일한 값을 보이며, 반응물의 감소(즉, 충돌 횟수의 감소)에 의한 순수한 희석효과는 N₂와 CO₂가 동일함을 볼 수 있다. 추가로 이는 두 소화약제의 전달 물성치의 차이가 소화효과에 미치는 영향은 매우 작음을 의미한다. CO₂ 소화약제의 소화효과는 복사효과 처리 방법에 따라 두 가지의 소화효과로 분류될 수 있다. Figure 7(a)는 첨가된 CO₂의 열용량을 고려하지 않은 상태에서 복사효과를 고려한 결과이다. 즉, 순수한 희석효과에 의한 소화농도에서 비열이 고려되지 않은 D_CO₂ 소화농도의 차이는 결과적으로 열용

량이 배제된 복사 참여 화학종에 의한 복사효과를 의미한다. D_{CO_2} 와 T_{CO_2} 의 소화농도 차이는 열용량에 의한 순수한 열적효과를 나타내며, T_{CO_2} 와 실제 CO_2 의 소화농도 차이는 화학적효과로 표현될 수 있다. 반면 Figure 7(b)는 첨가된 CO_2 의 비열이 고려된 조건에서 복사효과를 예측한 결과이다. 순수한 희석효과에 의한 높은 소화농도는 열, 복사 그리고 화학적 효과에 의해 점차적으로 감소되며, 최종 실제 CO_2 의 소화농도를 나타내게 된다. Figures 7(a)와 (b)를 비교해보면, 가상의 소화약제의 적용 방식에 따라(즉, 복사효과 예측 시 열용량의 고려 유무에 따라) 소화농도에 미치는 복사효과와 열적효과가 정량적으로 큰 차이가 없음을 확인할 수 있다.

Figure 7에서의 결과와는 다르게, CO_2 가 공기류에 첨가된 조건에서 비열의 고려 유무에 따른 복사효과에 대하여 도시한 Figure 8을 살펴보면, 복사효과 처리 방법에 따

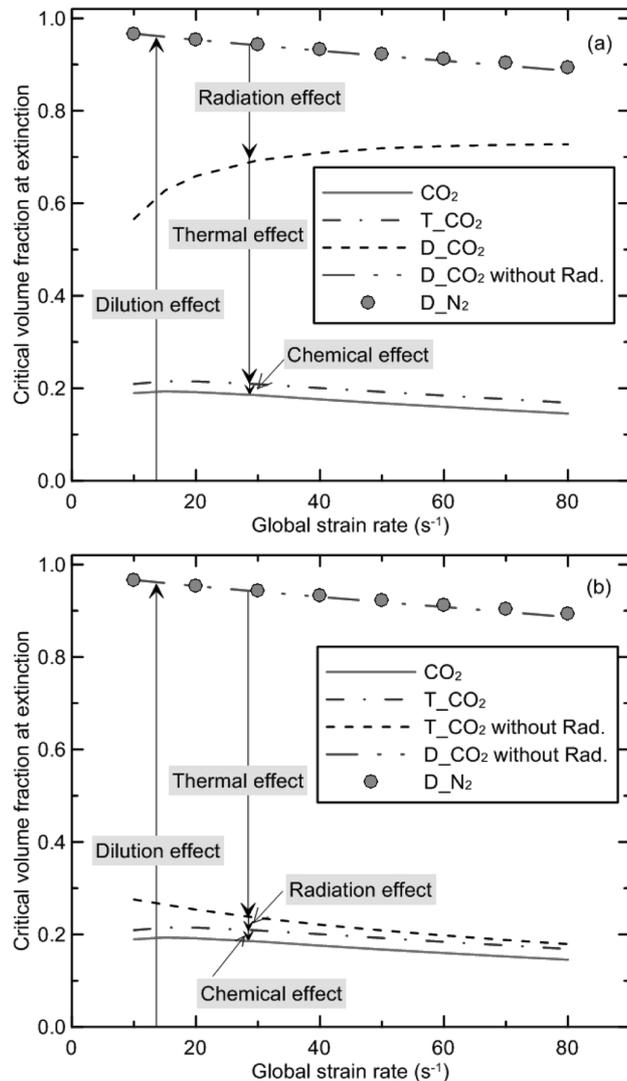


Figure 8. Critical volume fractions at extinction with the air dilution (a) radiation effect without heat capacity (b) radiation effect with heat capacity.

라 복사 및 열적효과가 소화농도에 미치는 기여도가 크게 변화됨을 볼 수 있다. 즉, 첨가된 CO_2 의 열용량을 고려하지 않은 조건에서 복사효과(Figure 8(a))는 열용량이 고려된 조건(Figure 8(b)),에 비해 매우 큰 소화농도 감소에 대한 기여도를 갖게 된다. 동시에 열적효과 역시 위의 두 가지 방법에 따라 매우 상이한 정량적 기여도를 보여주고 있다. 이는 복사효과 예측 단계에서 열용량의 고려 유무는 화염온도의 큰 차이를 발생시키며, 소화농도에 대한 복사효과 정량적 기여도를 크게 변화시키게 된다. 위 결과로부터 열적효과와 복사효과는 화염온도와 직접적으로 관련되어지며, 이 두 가지의 소화효과의 개별적 평가는 많은 어려움이 존재한다. 따라서 CO_2 의 소화효과는 순수 희석효과, 복사효과를 포함한 열적효과 그리고 화학적효과로 분리되는 것이 보다 타당할 것으로 판단된다.

Figure 9는 CO_2 소화효과의 정량적 기여도를 확인하기

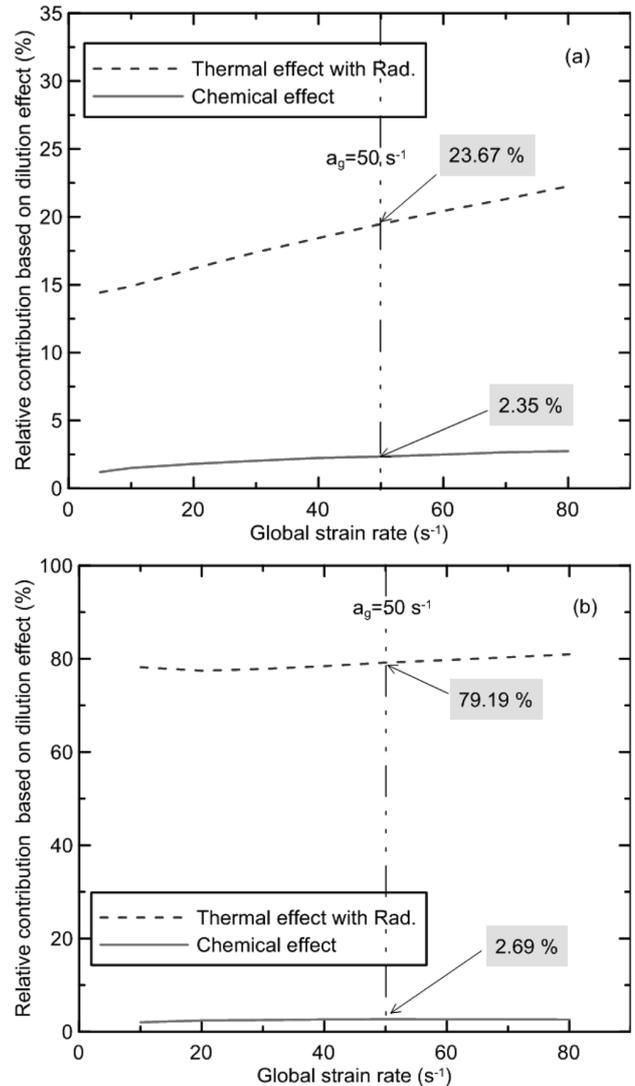


Figure 9. Relative extinguishing contribution based on dilution effects with (a) fuel dilution and (b) air dilution.

위하여, 순수 희석효과를 기준으로 복사효과를 포함한 열적효과와 화학적 효과의 상대적인 소화농도 감소에 대한 기여도를 나타낸 것이다. Cup 버너에서의 소화농도와 유사한 값을 보여주는 $a_g=50 \text{ s}^{-1(19)}$ 에서의 결과를 살펴보면, 연료류에 첨가된 CO₂(Figure 9(a))는 순수 희석효과를 기준으로 복사효과를 포함한 열적효과를 통해 약 23.67 %의 소화농도 감소를 발생시키며, 화학적 효과를 통해 2.35 %의 소화농도 감소효과를 발생시킨다. 반면에 공기류에 첨가된 CO₂(Figure 9(b))는 복사효과를 포함한 열적효과는 79.19 %의 소화농도 감소를 발생시키며, 화학적 효과를 통해 2.69 %의 소화농도 감소효과를 발생시킴을 확인할 수 있다.

소화약제의 국소방출방식의 개념이 적용 가능한 대향류 확산화염에서 CO₂ 소화약제의 정량적 소화기구에 관한 본 연구의 접근방법은 향후 다양한 소화약제들의 개별 소화성능에 대한 보다 정확한 평가에 활용될 수 있으며, 연료, 연소방식 및 조건 등에 보다 효율적인 혼합 청정소화약제의 구성 성분 도출에 궁극적으로 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결 론

소화약제의 국소방출방식의 개념이 적용 가능한 CH₄/air 대향류 확산화염에서 CO₂ 소화농도 예측에 대하여 검증을 하고, 소화효과의 정량적 분석을 시도하였다. 주요 결과는 다음과 같다.

연료류에 첨가된 CO₂ 소화농도의 예측에 있어서, OTM은 실험결과에 비해 과소 예측하는 결과를 볼 수 있지만 공기류에 첨가된 CO₂의 소화농도 예측은 실험측정의 불확실도 범위 내에서 거의 유사한 결과를 보여준다. 또한 대부분의 화재에서 소화약제의 공급은 공기류 측에서 이루어짐을 고려할 때, 비교적 간단한 복사모델인 OTM의 적용은 매우 효율적임을 확인하였다.

가상의 소화약제의 개념을 이용한 CO₂ 소화농도 분석을 통해 총괄신장율에 따른 순수 희석효과, 복사효과를 포함한 열적효과 그리고 CO₂의 연쇄반응 억제를 통한 화학적 효과의 정량적 기여도를 구체적으로 확인할 수 있었다. Cup 버너에서의 소화농도와 유사한 값을 보여주는 $a_g=50 \text{ s}^{-1}$ 에서 공기류에 첨가된 CO₂는 순수 희석효과를 기준으로 복사효과를 포함한 열적효과를 통해 79.19 %의 소화농도 감소를 발생시키며, 화학적 효과를 통해 2.69 %의 소화농도 감소효과를 발생시킴을 확인할 수 있었다.

후 기

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2012R1A1A1009708).

참고문헌

1. C. H. Hwang, C. E. Lee and J. H. Kim, "Flame Blow-out Limits of Landfill Gas Mixed Fuels in a Swirling Nonpremixed Combustor", *Energy and Fuels*, Vol. 22, No. 5, pp. 2933-2940 (2008).
2. H. Liu, H. Guo, G. J. Smallwood and O. L. Gulder, "The Chemical Effects of Carbon Dioxide as an Additive in an Ethylene Diffusion Flame: Implications for Soot and NOx Formation", *Combustion and Flame*, Vol. 125, No. 1-2, pp. 778-787 (2001).
3. C. H. Hwang, C. B. Oh and C. E. Lee, "Effects of CO₂ Dilution on the Interactions of a CH₄-air Nonpremixed Jet Flame with a Single Vortex", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 48, No. 7, pp. 1423-1431 (2009).
4. 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).
5. 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).
6. 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).
7. D. J. Hwang, J. Park, C. B. Oh, K. H. Lee and S. I. Keel, "Numerical Study on NO Formation in CH₄-O₂-N₂ Diffusion Flame Diluted with CO₂", *International Journal of Energy Research*, Vol. 29, No. 2, pp. 107-120 (2005).
8. C. E. Lee, S. R. Lee, J. W. Han and J. Park, "Numerical Study on Effect of CO₂ Addition in Flame Structure and NOx Formation of CH₄-air Counterflow Diffusion Flame", *International Journal of Energy Research*, Vol. 25, No. 4, pp. 343-354 (2001).
9. J. Park, J. S. Kim, J. O. Chung, J. H. Yun and S. I. Keel, "Chemical Effects of Added CO₂ on the Extinction Characteristics of H₂/CO/CO₂ Syngas Diffusion Flames", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 34, No. 20, pp. 8756- 8762 (2009).
10. D. X. Du, R. J. Axelbaum and C. K. Law, "The Influence of Carbon Dioxide and Oxygen as Additives on Soot Formation in Diffusion Flames", *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 23, No. 1, pp. 1501-1507 (1991).
11. 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).
12. 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).

13. 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).
14. 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).
15. 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).
16. A. Hamins, M. Bundy, C. B. Oh and S. C. Kim, "Effect of Buoyancy on the Radiative Extinction Limit of Low-Strain Rate Nonpremixed Methane-air Flames", *Combustion and Flame*, Vol. 151, No. 1-2, pp. 225-234 (2007).
17. 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).
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).
19. A. Hamins, D. Trees, K. Seshadri and H. K. Chelliah, "Extinction of Nonpremixed Flames with Halogenated Fire Suppressants", *Combustion and Flame*, Vol. 99, No. 2, pp. 221-230 (1994).