

질소로 희석된 대향류 메탄 비예혼합화염에서 CO₂에 의한 소화특성

이호현 · 오창보* · 황철홍*

부경대학교 안전공학과 · *대전대학교 소방방재학과
(2013. 1. 21. 접수 / 2013. 4. 19. 채택)

CO₂ Suppression Characteristics of the Nitrogen-diluted Methane Counterflow Non-premixed Flame

Ho-Hyun Lee · Chang Bo Oh[†] · Cheol Hong Hwang^{*}

Department of Safety Engineering, Pukyong National University

^{*}Department of Fire and Disaster Prevention, Daejeon University

(Received January 21, 2013 / Accepted April 19, 2013)

Abstract : The CO₂ suppression characteristics and flame structure of nitrogen-diluted methane counterflow non-premixed flame were studied experimentally and numerically. To mimic a situation where combustion product gases are entrained into a compartment fire, fuel stream was diluted with N₂. A gas-phase suppression agent, CO₂, was diluted in the air-stream to investigate the suppression characteristics by the agent. For numerical simulation, an one-dimensional OPPDIF code was used for comparison with experimental results. An optically-thin radiation model(OTM) was adopted to consider radiation effects on the suppression characteristics. It was confirmed experimentally and numerically that suppression limit decreased with increasing nitrogen mole fraction in the fuel stream. A turning point was found only when a radiation heat loss was considered and the extinguishing concentration for turning point was differently predicted compared to the experiment result. Critical extinguishing concentration when neglecting radiation heat loss was also differently predicted compared with the experimental result.

Key Words : suppression limit, nonpremixed counterflow flame, CO₂ suppression agent, flame, global strain rate

1. 서론

소화설비는 화재초기에 신속하게 화염을 소화함으로써 화재로 인한 인적, 물적 피해를 최소화하는데 필수적인 설비이다. 효과적인 화재진압을 위한 소화설비를 개발하기 위해서는 다양한 조건의 화재를 충분히 소화시킬 수 있도록 소화약제에 의한 화염의 소화한계와 특성에 관한 충분한 연구가 이루어져야 한다.

화재는 가연성 기체연료와 공기가 확산과정을 통해 만난 후 점화원을 통해 화염으로 진행되는 제어되지 않는 연소의 한가지 형태이다. 이 화재는 대부분 비예혼합화염의 특징을 갖고 있지만, 화재 초기단계에서 연료가 점화원과 바로 접촉하지 않는다면 가연성 연료성분이 주위 공기와 일부 혼합된 상태로 존재할 가능성이 높다. 이럴 경우에 초기의 화염형태는 비예혼합화염이 아닌 연료성분이 과농한 부분에 혼합화염 형태를 보일 수 있다¹⁾. 만약 화재가 구획실과 같은 밀폐된 공간에서 발생한다면, 화재는 고온 분위기의 영향과 화재에서 발생하는 연소 생성물들의 혼합 등으로 인하여 복잡한 특성을 가질 수 있다²⁾. 기존의 연구들은 이러한 복잡한 화재의 특성까지 충분히 고려하지 못한 경우가 많기 때문에 화재를 효과적으로 제어하기 위해서 향후의 연구들에서는 밀폐공간 내부에서의 복잡한 화재성상들을 충

분히 검토할 수 있는 연구가 필요한 실정이다.

화재에 관한 연구들은 실제와 유사한 형태의 화재를 형성시킨 후 화재나 연기의 전파, 소화약제의 성능평가와 관련한 연구들이 많다³⁾. 또한, 좀 더 기본적인 연구에서는 단순한 화염을 이용하여 여기서 얻어낸 잘 정의된 화염구조와 소화특성을 이용하여 거시적인 화재를 이해하고, 소화설비의 설계에 필요한 정보를 얻는 경우가 많이 있다^{4,5)}. 기존 연구들 중에서는 단순한 형태의 화염을 이용하여 소화한계를 검토한 연구들이 많이 있는데, 이들 연구에서는 주로 컵버너(Cup burner), Santoro 버너 그리고 대향류 버너가 많이 이용되고 있다. 컵버너는 주로 액체연료를 이용한 화염의 소화특성을 검토하는데 가장 많이 사용되고 있다⁶⁾. Santoro 버너는 동축류 제트 버너의 한 종류로서 기체연료를 대상으로 부력이 지배적인 화염의 소화특성을 연구하는데 많이 이용되고 있다⁷⁾. 그리고, 대향류 버너는 유속과 관련된 화염의 신장률(Strain rate)을 직접 조절하기 용이하고, 화염위치를 조절하기 편리한 특성을 가지고 있기 때문에 화염 신장률에 따른 소화특성을 검토하는데 많이 이용되어 왔다. 실제 난류화염의 국소 소화현상은 물리적으로는 난류 유동장의 속도구배 중에서 화염 접선방향의 성분인 화염 신장률이 그 화염의 특성에 직접영향을 주는 인자가 되기 때문에 대향류 버너를 이용하면 난류화염의 국

[†]Corresponding Author: Chang Bo Oh, Tel : +82-51-629-6472, E-mail : cboh@pknu.ac.kr
Department of Safety Engineering, Pukyong National University, 365, Sinseon-ro, Nam-Gu, Busan 608-739, Korea

소 소화특성을 고찰할 수 있는 장점이 있다⁸⁾.

대항류 화염을 이용하여 소화특성을 검토한 연구로는 Bundy 등이 메탄 비예혼합화염을 대상으로 상온에서 연료측과 산화제측에서 다양한 기체 소화약제의 소화한계를 측정한 연구⁹⁾가 있으며, Oh 등은 중력과 미소 중력장에서 실험과 수치해석을 통해 대항류 비예혼합화염의 소화과정¹⁰⁾과 버너직경에 따른 소화특성¹¹⁾을 연구한 바 있으며, 최근까지도 유사한 연구들이 많이 진행되고 있다¹²⁻¹³⁾. 하지만, 구획실과 같이 밀폐공간 내부의 화재특성을 잘 모사할 수 있는 조건, 즉 고온의 연소 생성물이 포함된 연료의 소화특성에 관한 연구는 최근에 들어서야 일부 진행되고 있다. Aggarwal 등은 Santoro 버너와 유사한 제트 버너에서 부분예혼합화염의 소화특성을 검토한 바 있다^{1,13)}. 그러나, 저자가 아는 바에 따르면 아직까지 대항류 버너를 이용하여 부분예혼합화염의 소화특성을 검토한 연구는 거의 없으며, 구획실 내부 상황과 유사한 연소 생성물에 포함된 연료의 소화특성에 관한 연구도 없는 것으로 확인되고 있다. 난류화염의 국소 소화특성을 이해하는데 중요한 대항류 연소장에서 부분예혼합화염이나 연소 생성물이 첨가된 연료의 소화특성과 화염 구조를 검토하는 것은 밀폐 공간내부의 실제 화재성상을 이해하는데 매우 중요하다고 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 대항류 버너를 이용하여 연소 생성물 중에 가장 많은 양을 차지하는 N₂를 포함한 연료가 연소될 경우의 화염구조를 화염 신장률을 변수로 하여 고찰하였다. 또한, 현재도 많이 사용되고 있는 대표적인 소화약제인 CO₂를 공기류에 첨가하여 N₂가 희석된 메탄 연료의 소화특성을 실험과 수치해석적으로 검토하였다.

2. 실험방법

본 연구는 연소 생성물이 혼합된 화염의 소화특성을 검토하기 위하여 연소 생성물 중 많은 양을 차지하는 N₂를 연료측에 혼합한 대항류 비예혼합화염을 대상으로 하였다.

Fig. 1은 본 연구에 이용한 대항류 버너와 유속 장치들의 개략도이다. 실험에 사용된 대항류 버너는 노즐내경이 34 mm이고 외경이 40 mm이며, 노즐간의 간격은 15 mm로 고정되었다. 노즐출구에는 유동이 Top-hat 형태의 유속분포를 갖도록 하기 위해서 스테인레스 스틸로 만들어진 메쉬(60~150 mesh)와 직경 3 mm에서 6.35 mm 사이의 스테인레스 구슬(Stainless steel bead)을 혼합하여 위치시켰다. 버너 상부에는 연소가스를 밖으로 배출하는 배기구와 유입되는 기체가 부력에 의해 올라온 화염에 의해서 가열되는 것을 방지하기 위한 수냉장치를 설치하였다.

하부 노즐측에는 연료류가 질량유량계를 통해 제어된 후 공급되며 상부 노즐에서는 공기류가 질량유량계를 통해 공급된다. 연료류에는 CH₄과 N₂를 기체의 혼합기로 구성되며, CH₄에 첨가된 N₂의 몰분율(X_{N_2})은 0.0, 0.3, 0.7이 되도록 하였다. 공기류에는 통상의 공기에 화염을 소화시키기 위하여 대표적인 기체상 소화약제인 CO₂를 첨가하였으며, 순수 공기 조건에서부터 CO₂의 희석률을 점차 증가시키면서 화염이 소화되는 농도(소화한계)까지 화염형상을 관찰하였다.

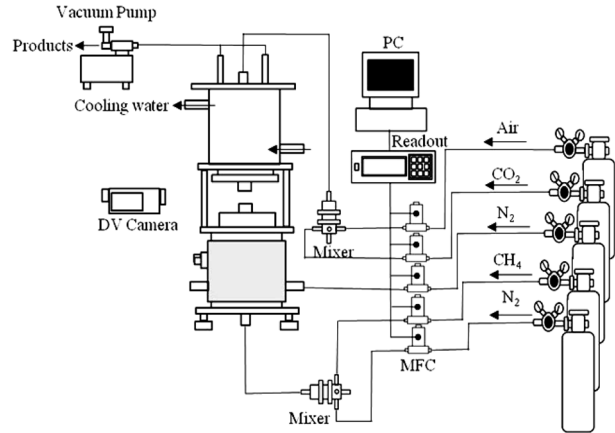


Fig. 1. Schematic diagrams of counterflow burner and flow system.

또한, 하부측 연료노즐 주위에 N₂를 추가적으로 공급하여 공급된 연료가 상부 노즐에서 공급된 공기가 아닌 주위 공기와 반응하여 부차적인 화염이 형성되지 않도록 하였다.

본 연구에서 대항류 화염의 신장률은 아래 식 (1)과 같이 정의된 총괄 신장률(Global strain rate, a_g)¹⁴⁾을 이용하였다.

$$a_g = \frac{2V_r V_f}{L} \left(1 + \frac{\sqrt{\rho_f}}{V_r \sqrt{\rho_a}} \right) \quad (1)$$

여기서, V 와 ρ 는 반응물의 속도와 밀도, L 은 노즐사이의 간격을 나타낸다. 하첨자 a 와 f 는 각각 공기류와 연료류를 의미하며, 속도비 V_r 은 V_a/V_f 를 의미한다. 본 연구에서는 a_g 의 범위는 20 s⁻¹~90 s⁻¹사이가 되도록 유동조건을 설정하였다.

연료로는 99.95%의 고순도 CH₄를 사용하였으며, 연료측 희석 및 하부 노즐 외측의 주위류는 순도 99.99%의 N₂를 사용하였다. 공기류는 일반 순도 99.95%인 공기와 순도 99.99%인 기체 CO₂를 혼합하여 사용하였다. 화염의 형상과 소화되는 과정을 가시화하기 위해 디지털 비디오 카메라 (Sony HDR-CX250)를 이용하여 60 fps(flame per second)의 속도로 촬영하여 분석하였다.

3. 수치계산 방법

본 연구에서는 실험결과와 타당성 확보와 실험에서 관찰하지 못한 화염구조의 고찰을 위하여 수치계산을 병행하였다. 고찰 대상인 대항류 화염은 1차원적으로 근사가 가능하기 때문에 수치계산 측면에서 매우 유리하다. 1차원 대항류 화염의 수치계산에는 기존에 많이 사용되어 온 OPPDIF code¹⁵⁾를 이용하였다. 수치계산시 필요한 열역학적 물성치와 전달 물성치는 CHEMKIN-II¹⁶⁾와 TRANFIT Package¹⁷⁾를 이용하였으며, 연소반응을 고려하기 위해서는 53개의 화학종과 325개의 소반응으로 구성된 GRI-v3.0¹⁸⁾을 사용하였다.

본 연구에서 다루게 된 화염 신장률은 높지 않기 때문에 화염대에서의 복사 열손실이 중요해지게 된다. 낮은 신장률 화염의 복사 열손실 영향을 고찰하기 위하여 복사

열손실이 없는 단열(Adiabatic) 계산과 복사열의 재흡수는 고려하지 않고 화염으로부터의 복사 열손실만을 고려할 수 있는 Optically Thin Model(OTM)¹⁹⁾을 적용한 수치계산을 수행하였다.

실험과 수치계산에서 연료류 및 공기류는 1 atm과 300 K 조건으로 공급되도록 하였다. 수치계산에서는 식 (1)로 정의된 총괄 신장률이 실험보다 조금 넓은 $10 \text{ s}^{-1} \sim 100 \text{ s}^{-1}$ 의 범위가 되도록 유량을 조절하였다. 노즐간격은 실험과 마찬가지로 15 mm로 고정하였으며, 연료류와 공기류의 조성비도 실험조건과 동일하도록 하였다. 수치계산에서는 모든 신장률 조건에 대해 노즐간격 15 mm의 1차원 신장에 격자점이 500개가 균일하게 배열되도록 하였다. OPPDIF code는 정상상태의 해를 얻을 수 있기 때문에 정확한 소화한계(소화농도)값을 얻기 위하여 소화한계 근처에서는 공기류에 포함된 CO_2 물분율을 0.001간격으로 증가시키면서 소화여부를 고찰하였다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 2는 실험과 수치계산을 통해서 얻어진 N_2 로 희석된 대향류 메탄 비예혼합화염의 총괄 신장률 변화에 따른 CO_2 소화한계를 보여주고 있다. 심볼 들은 실험에서 얻은 CO_2 소화한계이며, 실선은 단열조건으로 수치계산한 결과, 점선은 OTM을 적용한 수치계산 결과이다. 먼저 연료측에는 N_2 를 혼합시키지 않은 조건인 $X_{\text{N}_2} = 0.0$ 에 대한 CO_2 소화한계 실험값을 고찰해보면, 신장률이 점차 낮아질수록 소화한계는 증가하다가 $a_g = 30 \text{ s}^{-1}$ 부근에서 최고점을 가진 후 신장률이 더 낮아지게 되면 소화한계도 다시 낮아지는 것을 알 수 있다. 통상적으로 $a_g = 30 \text{ s}^{-1}$ 부근의 최고점을 전환점(Turning point)이라고 하며 Fig. 2를 왼쪽으로 회전시키면 소화 한계 곡선은 ‘C-곡선’ 형태의 특징을 가짐을 알 수 있다. 그림에서 화염 신장률이 감소함에 따라 전환점 기준으로 소화농도가 증가하다가 감소하는 C-곡선 형상으로 소화가 되는 것을 볼 수 있었다.

이러한 실험결과는 복사모델 OTM을 적용한 수치계산에

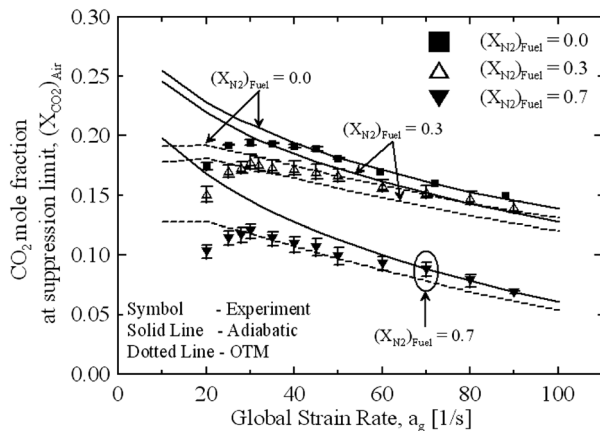


Fig. 2. Measured and computed CO_2 volume fraction in air stream near the suppression limit of nonpremixed flames with fuel stream of N_2 dilution ($X_{\text{N}_2} = 0.0, 0.3, 0.7$).

서도 확인될 수 있다. 그러나, 복사를 고려하지 않은 단열 조건 계산에서는 화염 신장률이 감소할수록 소화한계는 단순히 증가하는 경향을 보여 실험에서 얻은 C-곡선의 경향을 전혀 예측하지 못하고 있음을 알 수 있다. 무중력 조건에서 대향류화염의 C-곡선은 낮은 신장률 조건에서의 화염복사효과에 기인함이 이미 밝혀져 있다²⁰⁾. 또한, Oh^등¹⁰⁾은 중력조건에서도 대향류화염의 소화한계는 C-곡선 형태의 경향을 보인다고 보고한 바 있다. 이 연구에서는 중력조건에서 전환점보다 낮은 신장률 조건에서 소화한계가 다시 낮아지는 것은 복사 열손실뿐만 아니라 부력이 화염 외부선단(Outer edge)의 강도에 영향을 주고, 다차원적인 열손실에 기인한다고 밝힌 바 있다. 본 연구에서도 대향류 순수 메탄 비예혼합화염의 신장률 변화에 따른 거시적 소화특성은 기존 연구와 동일하게 나타남을 확인하였다.

연료측에 N_2 를 물분율로 0.3, 0.7 정도 혼합시킨 경우에도 CO_2 소화한계 곡선을 보면 N_2 가 포함되지 않은 소화한계 곡선과 유사하게 $a_g = 30 \text{ s}^{-1}$ 부근에서 전환점을 가지며 C-곡선 형상의 소화한계를 확인할 수 있었다. 또한, 대향류 화염의 소화한계는 연료류에 첨가된 N_2 물분율이 증가할수록 낮게 나타나고 있는데, 이는 불활성 가스인 N_2 가 CH_4 와 혼합됨에 따라 가연성 기체의 양이 줄어들고 전체적인 발열량이 줄어들게 되어 화염온도가 낮아지고 결국 소화한계도 낮아지는 것으로 판단된다. 이에 대해서는 Fig. 5에서 자세히 설명하도록 하겠다.

다음으로 수치계산 결과를 보면, N_2 희석률이 증가함에 따라 실험결과와 같은 순으로 소화한계가 낮아지는 것을 알 수 있다. 그리고, 단열조건의 계산결과는 OTM 계산결과보다는 소화한계를 높게 예측하지만 높은 신장률 조건에서는 실험과 수치계산 그리고 복사모델별 소화한계 예측성능의 차이는 크지 않다. 그러나, 낮은 신장률 조건에서는 수치계산에서 얻은 소화한계는 실험결과보다 높게 예측되는 것을 알 수 있다. 앞에서 설명한 바와 같이 복사를 고려하지 않은 단열조건의 계산에서는 전환점을 예측하지 못하고 있음을 알 수 있다. OTM을 적용하여 복사효과를 고려한 계산은 소화한계의 전환점을 예측하기는 하지만 실험결과보다 더 낮은 신장률 조건에 전환점이 위치하는 것을 알 수 있다. 이것은 본 연구에서 사용된 OPPDIF code는 부력효과를 고려하지 못하기 때문에 중력조건에서의 부력효과가 소화한계에 미치는 영향을 예측하지 못하는 것으로 판단된다. 따라서 향후 연구에서는 복사, 부력효과 및 다차원 열손실을 고려할 수 있는 수치계산을 수행하여 낮은 신장률에서 수치계산과 실험결과가 차이를 보이는 이유와 그 조건들에 대한 소화현상에 대한 구체적인 이유를 고찰해볼 필요가 있다고 생각한다.

Fig. 3 (a)-(c)는 대향류 화염의 소화특성을 고찰하기 위하여 신장률이 20 s^{-1} , 30 s^{-1} , 및 80 s^{-1} 에서 초기에 안정하게 화염이 유지되는 조건과 CO_2 를 소화한계의 90%까지 공기류에 첨가했을 경우의 화염형상을 보여주고 있다. 또한, 각 신장률 조건에서 그림의 우측열(Column)들의 그림들은 연료류에 N_2 희석률을 증가시킬 경우의 화염형상 사진을 보여주고 있다. 초기의 안정된 화염은 공기류에 CO_2 가 물

분율로 0.05가 포함된 상태이다. 초기 안정된 화염상태에서 CO₂ 물분율을 소화한계 직전까지 증가시키면 화염의 휘도(Luminosity)가 낮아지면서 화염크기도 줄어드는 것을 관찰할 수 있다. 이것은 화염온도 감소에 따른 반응강도의 약화와 soot 발생이 억제되는 것에 기인하는 것으로 보인다. 초기 안정된 화염에서 연료측에 N₂ 희석률이 큰 조건일수록 화염 휘도는 크게 낮아지는 것을 알 수 있다. Fig. 3 (a)의 낮은 신장률 20 s⁻¹인 조건에서는 공기류에 CO₂의 양을 증가시키면 화염은 외부선단에서부터 소화가 시작되어 중심축으로 수축되면서 소화가 되는 것을 확인할 수 있다. 이러한 낮은 신장률에서의 소화특성은 기존

연구의 결과¹⁰⁾와도 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 3 (c)의 높은 신장률 조건에서는 각 N₂ 희석률 조건에 대해 공기류의 CO₂ 농도가 증가하게 되면 화염의 휘도는 낮아지지만 그 크기는 그다지 줄어들지 않음을 알 수 있다. 또한 Fig. 3 (b)의 전환점 근처의 신장률 조건에서는 CO₂ 농도가 증가하게 되면 화염 휘도도 낮아지면서 외부선단이 중심축으로 줄어들면서 소화되게 된다. 이러한 연료류에 N₂ 첨가에 상관없이 각 신장률별 CO₂의 소화과정은 유사한 것을 알 수 있으며, 기존의 연구결과와도 잘 일치하는 것을 확인하였다.

Fig. 4 (a)-(c)는 공기류에 CO₂가 첨가될 경우, 단열조건

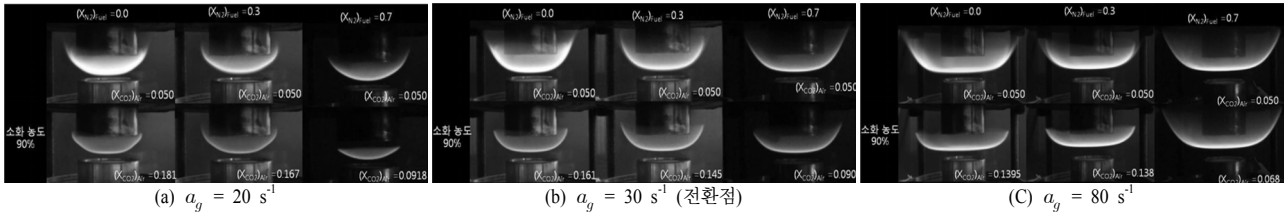


Fig. 3. Measured of counterflow nonpremixed flame for (a) a_g=20 s⁻¹, (b) a_g=30 s⁻¹, (C) a_g=80 s⁻¹ while CO₂ increases from X_{CO₂}=0,05 to 90% at suppression limit with Fuel stream of N₂ dilution(X_{N₂}=0,0, 0,3, 0,7).

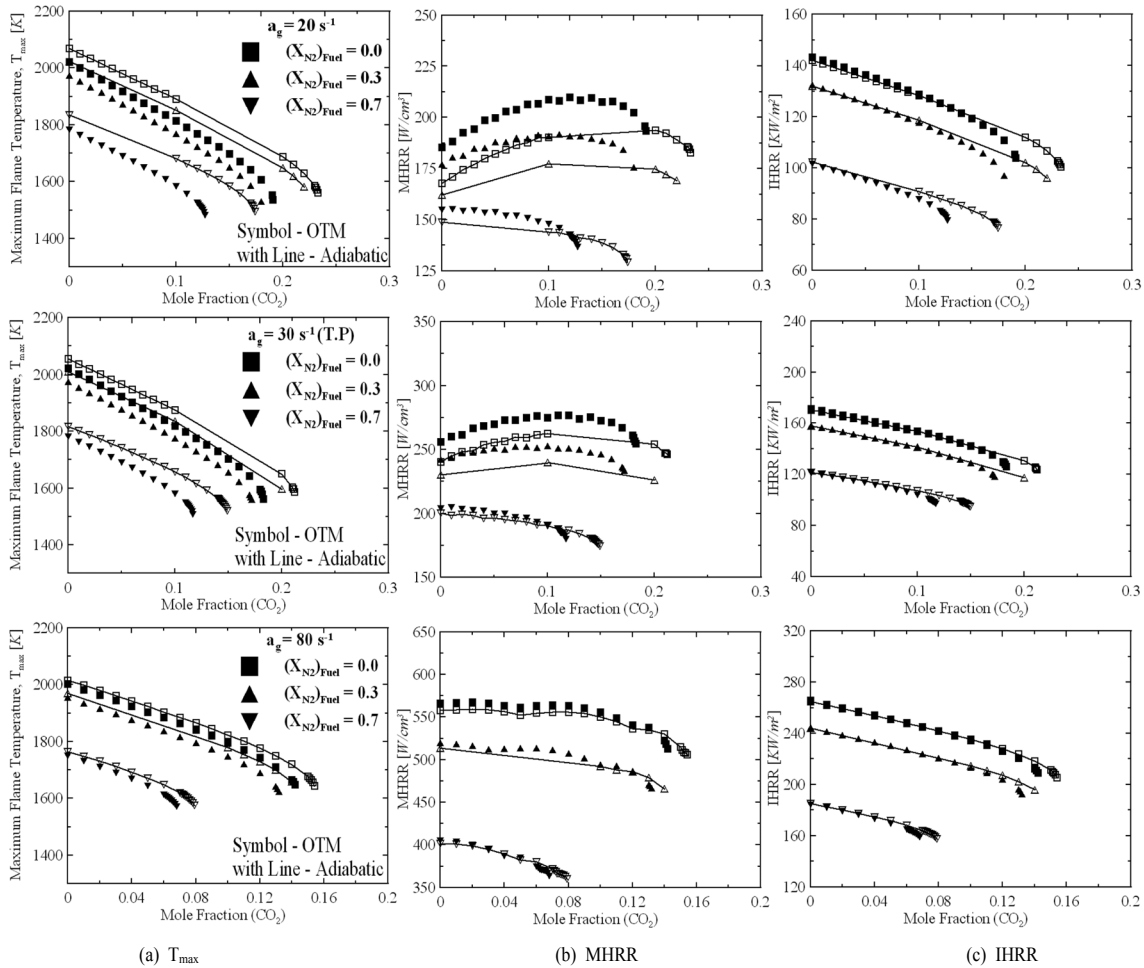


Fig. 4. 1D computed(Adiabatic, OTM) (a) T_{max} (b) MHRR, (c) IHRR at air stream CO₂ suppression limit of nonpremixed flames with fuel stream of N₂ dilution(X_{N₂}=0,0, 0,3, 0,7).

(Adiabatic)과 OTM을 이용하여 수치계산한 최고 화염 온도(T_{max}), 최고 열 발생률(Maximum Heat Release Rate; MHRR) 및 축 방향으로 공간 적분된 열 발생률(Spatially Integrated Heat Release Rate; IHRR)의 변화경향을 보여주고 있다. 모든 화염 신장률 조건에 대해 CO_2 첨가량이 증가하게 되면 T_{max} 와 IHRR은 점차 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 또한 동일한 CO_2 첨가량 조건에서 연료류에 N_2 가 많이 첨가될수록 T_{max} 와 IHRR값은 낮게 나타나고 있다. 그러나 MHRR의 경우에는 신장률이 80 s^{-1} 인 조건에서는 T_{max} 와 IHRR과 같이 CO_2 첨가량 증가에 따라 감소하지만, 이보다 더 낮은 신장률 조건에서는 연료류에 N_2 가 체적비로 70%첨가된 조건($X_{N_2}=0.7$)을 제외하면 CO_2 첨가량 증가에 따라 MHRR은 점차 증가하다가 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 IHRR에 대해서는 전체적으로 소화한계 근처를 제외하면 단일조건 계산과 OTM으로 계산한 결과 사이에 차이가 크지 않다. 그러나 T_{max} 와 MHRR의 경우에는 높은 신장률 조건(80 s^{-1})이나 연료류에 N_2 가 많이 포함될수록 복사의 영향은 작게 나타나고 있다. 높은 신장률 조건에서나 연료류에 N_2 첨가량이 커질수록 복사영향이 작아지는 이유는 높은 신

장률과 반응에 거의 참여하지 않는 희석제의 첨가가 화염 온도를 낮추기 때문이다. CO_2 와 N_2 의 첨가량이 동일한 조건에서는 화염 신장률이 증가할수록 MHRR, IHRR은 증가하지만 T_{max} 값은 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 신장률이 증가하게 되면 연료-공기 혼합층의 농도구배가 증가하게 되어 화염면으로의 연료와 공기의 공급량이 증가하게 되고 열발생률이 증가하기 때문이다. 화염온도의 경우에는 신장률이 증가하면서 열발생률이 커졌지만 혼합층구배가 커지기 때문에 전도에 의한 외부 열손실이 더 증가하게 되어 최고 화염온도는 낮아지게 된다. 이처럼 N_2 로 희석된 연료에서 기인한 비예혼합화염의 경우에도 T_{max} , MHRR 및 IHRR의 경향은 일반적인 대항류 비예혼합화염의 거동과 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

Fig. 5에는 신장률 20 s^{-1} 과 80 s^{-1} 인 조건에 대해 공기류에 첨가된 CO_2 가 달라진 조건에서의 화염온도와 열발생률 분포를 도시하였다. 우선, 신장률이 20 s^{-1} 인 조건에서는 복사 열손실을 고려한 OTM 조건이 복사 열손실을 고려하지 않은 Adiabatic 조건보다 화염 두께는 얇게, 최고 화염온도는 낮게 예측하고 있다. 그러나 열발생률 분포는 OTM과

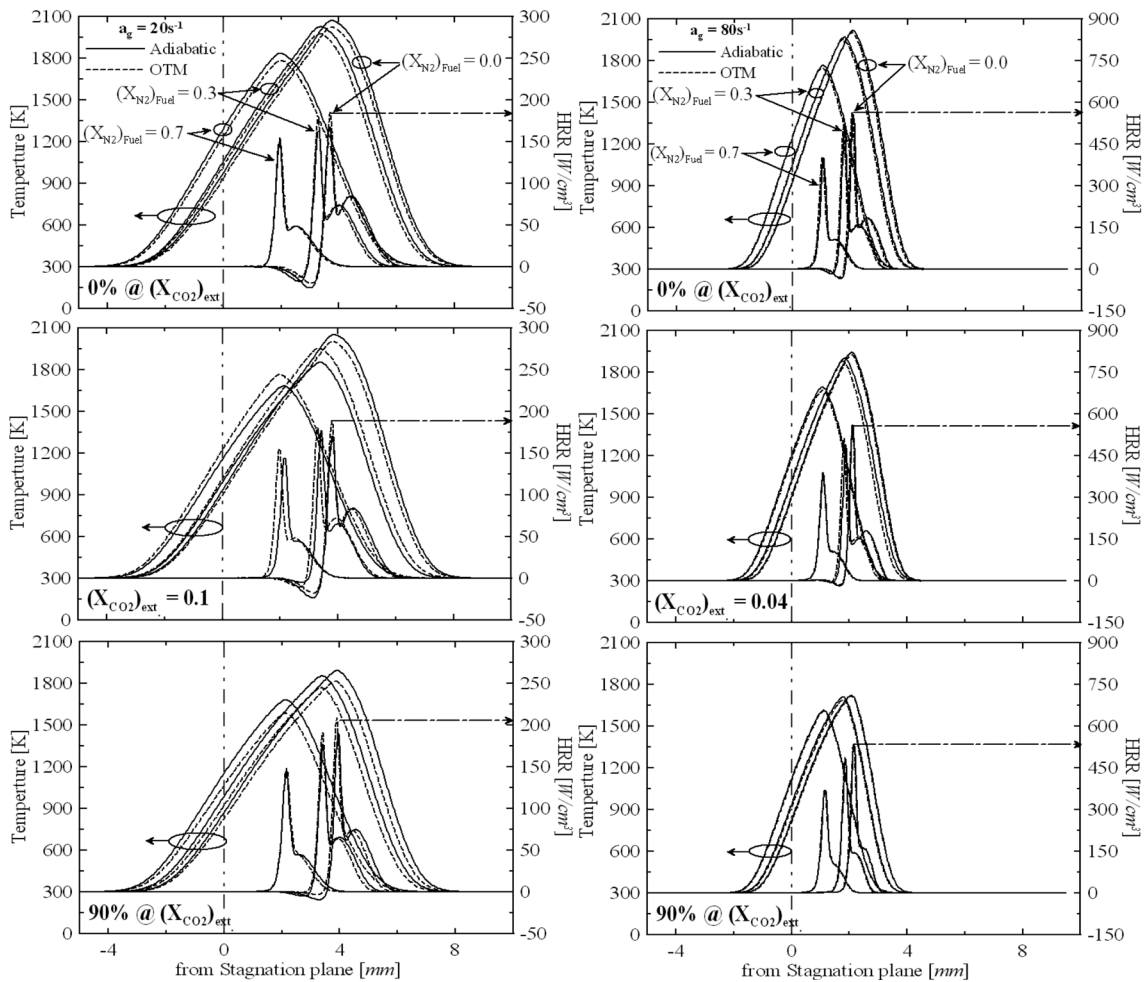


Fig. 5. 1D computed(Adiabatic, OTM) temperature and HRR for (up) $a_y = 20\text{ s}^{-1}$ (down) $a_y = 80\text{ s}^{-1}$ while CO_2 increases from $X_{CO_2}=0.0$ to 90% at suppression limit with fuel stream of N_2 dilution($X_{N_2}=0.0, 0.3, 0.7$).

Adiabatic 모두 비슷하게 예측하고 있지만 최고 열발생률 값은 복사 열손실을 고려한 OTM 조건이 Adiabatic 조건보다 오히려 미소하게 높게 나타나고 있다. 높은 신장률 조건(80 s⁻¹)에서는 화염두께, 최고 화염온도 및 열발생률 분포에 대한 Adiabatic과 OTM의 예측성능 차이는 거의 나타나지 않고 있음을 알 수 있다. 이것은 Fig. 4에서도 언급한 바와 같이 대항류 비예혼합화염의 경우, 높은 신장률에서는 복사 열손실의 영향을 크게 받지 않는다는 것을 보여주는 결과이다. 공기류에 첨가된 CO₂의 몰분율을 0.1(at 20 s⁻¹)과 0.04(at 80 s⁻¹)로 증가시켰을 경우, 신장률이 20 s⁻¹인 조건에서는 X_{N2} = 0.7인 조건을 제외하면 MHRR이 증가하였지만 신장률이 80 s⁻¹인 조건에서는 단순히 감소한 것을 볼 수 있다. 통상적인 비예혼합화염의 경우에는 신장률이 증가하게 되면 최고 열발생률이 증가하게 되다가 소화점 근처에서 급격히 감소하게 된다고 알려져 있다²¹⁾. Fig. 5의 결과는 비예혼합화염의 구조 중 특히, 열발생률 분포가 CO₂, N₂와 같은 불활성기체가 첨가가 고온 화염대에서의 화학반응에 영향을 주는 것을 나타내는 것으로서 향후 여기에 관해서는 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 N₂가 희석된 CH₄ 연료류와 CO₂가 첨가된 공기류에 의해 형성되는 대항류 비예혼합화염을 대상으로 소화 실험과 상세반응기구를 적용한 1D 수치계산을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

CO₂의 소화농도 실험에서는 순수 CH₄ 연료와 CH₄에 N₂를 희석시킨 연료조건 모두 신장률 변화에 대해 얻어진 소화농도는 전환점이 생기는 것을 확인하였다. 즉, 신장률이 감소함에 따라서 CO₂ 소화농도는 증가하다가 전환점을 기준으로 다시 감소하는 C-곡선 형상의 소화농도 특성을 보였다. 연료측에 N₂를 많이 희석시킬수록 화염은 적염에서 청염으로 변화되었으며, 휘도가 낮아지는 것으로 보아 화염의 강도도 낮아지는 것을 알 수 있었다.

수치계산으로 얻어진 결과에서는 공기류의 조건이 동일할 경우, 연료류측에 N₂ 희석을 증가시킬수록 화염두께는 얇아지고, MHRR과 IHRR값은 낮아지게 된다. 또한 연료류의 조건이 동일할 경우, 공기류측에 CO₂를 첨가할수록 최고 화염온도와 IHRR은 낮아지는 것을 확인하였다. 그러나 연료류에 N₂가 많이 첨가된 조건(X_{N2} = 0.7)이나 높은 신장률 조건을 제외하면 CO₂ 첨가량이 증가할수록 MHRR을 증가하다가 다시 감소하는 특성을 보였다.

높은 신장률 조건에서는 복사 열손실의 영향이 거의 없었으며, 낮은 신장률 조건에서는 OTM으로 계산한 결과가 Adiabatic으로 계산한 결과보다 화염두께, 최고 화염온도는 낮게 예측하였지만 최고 열발생률은 미소하게 높게 예측되는 것을 확인할 수 있었다.

감사의 글 : 이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업지원금을 받아 수

행된 것임. (과제번호 : 20100012480).

References

- 1) S. K. Aggarwal, "Extinction of Laminar Partially Premixed Flames," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 35, pp. 528-570, 2009.
- 2) D. T. Gottuk, M. J. Peatross, J. P. Farley and F. W. Williams, "The Development and Mitigation of Backdraft : A Real-Scale Shipboard Study," *Fire Safety Journal*, Vol. 33, pp. 261-282, 1999.
- 3) H. Y. Wang, "Numerical and Theoretical Evaluations of The Propagation of Smoke and in a Full-Scale Tunnel," *Fire Safety Journal*, Vol. 49, pp. 10-21, 2012.
- 4) M. Babb, S. R. Gollahalli and C. M. Sliepcevich, "Extinguishment of Liquid Heptane and Gaseous Propane Diffusion Flame," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 15, pp. 260-265, 1999.
- 5) Y. Saso, N. Saito, C. Liao and Y. Ogawa, "Extinction of Counterflow Diffusion Flames with Halon Replacements," *Fire Safety Journal*, Vol. 26, pp. 303-326, 1996.
- 6) G. T. Linteris, V. R. Katta and F. Takahashi, "Experimental and Numerical Evaluation of Metallic Compounds for Suppressing Cup-Burner flames," *Combustion and Flame*, Vol. 138, Issues 1-2, pp. 78-96, 2004.
- 7) W. M. Pitts, J. C. Yang, R. A. Bryant, L. G. Blevins and M. L. Huber, "Characteristics and Identification of Super-effective Thermal Fire-Extinguishing Agents : Final Report," NIST Technical Note 1440, pp. 44-56, 2006.
- 8) H. K. Chelliah, C. K. Law and T. Ueda, "An Experimental and Theoretical Investigation of The Dilution, Pressure and Flow-Field Effects on the Extinction Condition of Methane-Air-Nitrogen Diffusion Flames," *Twenty-Third Symposium (International) on Combustion*, pp. 503-511, 1990.
- 9) M. Bundy, A. Hamins and K.Y. Lee, "Suppression Limits of Low Strain Rate Non-Premixed Methane Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 133, pp. 299-310, 2003.
- 10) 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.
- 11) C. B. Oh, E. J. Lee and J. Park, "Effects of The Burner Diameter on the Flame Structure and Extinction Limit of Counterflow Non-premixed Flames," *International Journal of Spray and Combustion Dynamics*, Vol. 2, pp. 199-218, 2010.
- 12) E. J. P. Zegers, B. A. Williams, E. M. Fisher, J. W. Fleming and R. S. Sheinson, "Suppression of Nonpremixed Flames by Fluorinated Ethanes and Propanes," *Combustion and Flame*, Vol. 121, pp. 471-487, 2000.
- 13) A. Lock, S. K. Aggarwal, I. K. Puri, and U. Hegde, "Suppression of Fuel and Air Stream Diluted Methane-Air Partially

- Premixed Flames in Normal and Microgravity,” *Fire Safety Journal*, Vol. 43, pp. 24-35, 2008.
- 14) K. Sheshadri and F. A. Williams, “Laminar Flow between Parallel Plates with Injection of a Reactant at High Reynolds Number,” *International Journal of Heat Mass Transfer*, Vol. 21, pp. 251-253, 1978.
 - 15) A. E. Lutz, R. J. Kee, J. F. Grcar and F. M. Rupley, “OPPDIF : A Fortran Program for Computing Opposed-Flow Diffusion Flames,” Sandia Report, SAND 96-8243, 1997.
 - 16) R. J. Kee, F. M. Rupley and J. A. Miller, “Chemkin-II : A Fortran Chemical Kinetic Package for the Analysis of Gas Phase Chemical Kinetics,” Sandia Report, SAND 89-8009B, 1989.
 - 17) 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,” Sandia Report, SAND 86-8246, 1986.
 - 18) C. T. Bowman, R. K. Hanson, D. F. Davidson, W. C. Gardiner, V. Lissianski, G. P. Smith, D. M. Golden, M. Frenklach, M. Goldenburg, http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/, 1999.
 - 19) 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 Mech*, Vol. 342, pp. 315-334, 1997
 - 20) K. Maruta, M. Yoshida, H. Guo, Y. Ju and T. niioaka, “Extinction of Low-Stretched Diffusion Flame in Microgravity,” *Combustion and Flame*, Vol. 112, pp. 181-187, 1998
 - 21) C. J. Sung, B. Liu and C. K. Law, “Structural Response of Counterflow Diffusion Flames to Strain Rate Variations,” *Combustion and Flame*, Vol. 102, pp. 481-492, 1995.