

〈 논문 〉

정상 중력장에서 낮은 스트레인율을 갖는 대향류 비예혼합화염의 소화한계

오창보* · 박 정† · 최병일* · 김정수** · Anthony Hamins***
(2005년 1월 31일 접수, 2005년 8월 17일 심사완료)

Extinction Limits of Low Strain Rate Counterflow Nonpremixed Flames in Normal Gravity

Chang Bo Oh, Jeong Park, Byungil Choi, Jeong Soo Kim and Anthony Hamins

Key Words : Extinction Limits(소화한계), Counterflow Flame(대향류화염), Multi-dimensional Effects (다차원효과), Nonpremixed Flame(비예혼합화염), Normal Gravity(정상 중력장)

Abstract

The extinction characteristics of low strain rate normal gravity (1-g) nonpremixed methane-air flames were studied numerically and experimentally. A time-dependent axisymmetric two-dimensional (2D) model considering buoyancy effects and radiative heat transfer was developed to capture the structure and extinction limits of 1-g flames. One-dimensional (1D) computations were also conducted to provide information on 0-g flames. A 3-step global reaction mechanism was used in both the 1D and 2D computations to predict the measured extinction limit and flame temperature. A specific maximum heat release rate was introduced to quantify the local flame strength and to elucidate the extinction mechanism. Overall fractional contribution by each term in the energy equation to the heat release was evaluated to investigate the multi-dimensional structure and radiative extinction of 1-g flames. Images of flames were taken for comparison with the model calculation undergoing extinction. The two-dimensional numerical model was validated by comparing flame temperature profiles and extinction limits with experiments and 1D computation results. The 2D computations yielded insight into the extinction mode and flame structure of 1-g flames. Two combustion regimes depending on the extinction mode were identified. Lateral heat loss effects and multi-dimensional flame structure were also found. At low strain rates of 1-g flame ("Regime A"), the flame is extinguished from the weak outer flame edge, which is attributed to multi-dimensional flame structure and flow field. At high strain rates, ("Regime B"), the flame extinction initiates near the flame centerline due to an increased diluent concentration in reaction zone, which is the same as the extinction mode of 1D flame. These two extinction modes could be clearly explained with the specific maximum heat release rate.

기호설명

u : 혼합기 유속
 g : 중력가속도

I : 단위 텐서(unit tensor)
 a_g : 총괄 스트레인율(Global strain rate)
 T : 온도
 Y_i : 화학종 i 의 질량분율
 Ca : 연료류에 포함된 N_2 의 물분율
 c_p : 혼합기의 정압비열
 c_{pi} : 화학종 i 의 정압비열
 W_i : 화학종 i 의 분자량
 p_0 : 열역학적 압력(thermodynamic pressure)

† 책임저자, 회원, 국립순천대학교 기계자동차공학부
E-mail : jeongpark@sunchon.ac.kr

TEL : (061)750-3533 FAX : (061)750-3530

* 회원, 한국기계연구원 에너지기계연구센터

** 회원, 국립순천대학교 기계자동차공학부

*** NIST, Building and Fire Research Laboratory

- p_1 : 수력학적 압력(hydrodynamic pressure)
 D_{im} : 혼합기 평균확산계수(mixture-averaged diffusion coefficient)
 R_0 : 일반기체상수(universal gas constant)
 h_i^0 : 화학종 i 의 생성열(heat of formation)
 t : 시간
 L : 연료와 공기노즐사이의 간격
 D : 연료 및 공기노즐 내경
 x : 축방향 거리
 r : 반경방향 거리
 Vr : 속도비

그리스 문자

- ρ : 혼합기의 밀도
 ρ_0 : 주위 공기의 밀도 (reference density)
 $\dot{\omega}_i$: 화학종 i 의 단위체적 당 몰생성률
 μ : 혼합기의 점성계수

1. 서 론

대향류화염은 스트레인을(strain rate)을 직접 조절하기 용이하고 화염위치를 조절하기 편리한 기하학적 형상을 가지고 있다.⁽¹⁾ 또한, 이 화염은 유사(similarity)를 이용하여 1차원 화염으로 간단히 모델링할 수 있어 화염구조와 소화거동에 대해 잘 정의된 데이터를 얻을 수 있으며, 난류화염의 국소 구조인 화염편(flamelet)에 대한 유용한 정보를 제공해 준다.⁽¹⁻⁴⁾ 이미 부력효과가 없는 무중력(0-g) 하에서 수행된 실험⁽⁵⁾은 대향류화염이 거의 평평한 1차원적인 구조를 갖는다는 것을 잘 보여준 바 있다. 이렇게 평평한 1차원적인 대향류화염에 대한 수치계산은 다차원 수치계산 접근법에 비해 계산시간이 과도하지 않기 때문에 상세화학반응을 고려할 수 있는 장점이 있다.

한편, 중력조건(1-g)에서도 스트레인이 높아지면 중심축 근처의 대향류화염은 부력보다 대류에 영향을 많이 받기 때문에 거의 평평한 구조를 보인다. 그러나 스트레인이 낮아지게 되면 부력효과가 지배적이 되어 화염은 중력방향으로 불룩하게 곡률을 형성하게 된다. 따라서 부력효과를 무시한, 상사해에 근거한 1차원 수치계산⁽⁶⁾은 낮은 스트레인을 갖는 중력장의 다차원 대향류화염 구조를 적절히 예측하지 못하는 어려움이 있다. 결국 수치해석 측면에서 볼 때, 1-g 조건의 낮은 스트레인을 갖는 대향류화염에 대한 물리적인

정보를 얻기 위해서는 부력효과를 고려할 수 있는 다차원 수치계산이 필요하다.

지금까지 대향류화염에 대한 연구는 상당수 진행되어 왔는데, 이 연구들은 대부분 높은 스트레인을 갖는 대향류화염에 한정되어 있다.^(1-4,7) 낮은 스트레인을 갖는 대향류화염에 대한 연구는 매우 적는데, Maruta⁽⁵⁾ 등이 10초 동안 무중력을 얻을 수 있는 실험장치(JAMIC)에서 매우 낮은 스트레인을 갖는 대향류화염 소화한계를 측정된 실험이 대표적이다. 이 연구에서는 0-g 조건 하에서 연료류에 N_2 를 첨가한 CH_4 -공기 비예혼합화염의 소화한계(extinction limits)가 측정되었다. 여기서, 소화한계란 각 스트레인을 조건에 대해서 화염을 소화시키는 데 필요한 최소한의 연료류 속의 N_2 물분율을 의미하는데, 이 연구에서 소화한계는 스트레인이 감소되면 점차 증가하다가 스트레인이 훨씬 더 낮아지게 되면 “전환점(turning point)”을 기준으로 다시 감소되는 것으로 나타났다. 이러한 전환점은 화염이 받는 스트레인이 감소하게 되면 화염두께가 두꺼워지고 화염온도도 높아져서 복사에 의한 열손실이 증가되기 때문으로 알려져 있다. 화재안전의 관점에서 본다면, 이 전환점에서의 비활성 기체 N_2 의 농도는 모든 유동조건의 비예혼합화염을 소화시킬 수 있는 한계농도에 해당되므로, N_2 를 화재진압 소화제로 이용할 경우 소화제의 농도를 결정하는 기초 자료로 이용될 수 있다.

한편, 1-g 조건에 대한 연구에서도 Bundy 등⁽⁷⁾은 낮은 스트레인을 받는 대향류 비예혼합화염에 대한 실험을 통하여 Maruta 등의 결과⁽⁵⁾와 유사한 소화한계의 거동을 확인하였다. 그러나 이 연구에서는 1-g 대향류 비예혼합화염이 0-g 화염처럼 전환점을 보이는 이유에 대해서는 밝히지 못하였다. 실제 지구상에서 발생하는 화재 또한 부력이 지배적인 낮은 스트레인의 화염으로 간주할 수 있기 때문에 1-g 조건에서의 대향류 비예혼합화염의 소화특성은 화재의 소화특성을 이해하는데 유용하게 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

따라서, 본 연구에서는 Bundy 등이 수행한 실험 연구⁽⁷⁾를 수치계산으로 재현하여 기존에 밝히지 못했던 1-g 조건에서 대향류 비예혼합화염의 소화한계 곡선이 전환점을 갖는 이유에 대해서 검토하고, 0-g 조건의 소화한계 특성과의 차이점을 검토하고자 한다. 이를 위해 부력, 복사 열전달 및 유한 화학반응(finite chemistry)을 고려할 수 있는 2차원 수치계산 코드를 개발하였다. 또한, 소화한계 실험을 수치계산으로 재현하기에 앞서 1-g의 대향류화염에 대해 온도측정 및 소화과정에 대한 가시

화 실험, 그리고 잘 알려진 OPPDIF를 이용한 1차원 대항류화염 결과와 비교하여 2차원 수치계산 성능을 검증하였다.

2. 실험방법

본 연구에서는 중력장에 있는 대항류 비에혼합화염의 소화과정을 가시화하기 위한 실험을 수행하였다. 이 가시화 실험은 수치계산 코드의 검증 및 소화한계 특성을 규명하는데 중요하게 이용되었다.

실험에 이용된 대항류화염 버너 및 실험방법은 기존 연구⁽⁷⁾와 동일하다. 이용된 버너의 내경(D)과 노즐사이의 간격(L)은 각각 23.4mm와 15mm이다. 버너 출구에는 Top-hat 형태의 유속분포를 갖도록 하기 위해서 스테인 레스 스틸로 만든 메쉬(200/in)를 설치 하였다. 버너 상부에는 유입되는 유체가 화염에 의해서 가열되는 것을 방지하기 위해 물 재킷(water-cooled jacket)을 설치하였다. 또한, 하부 주위류 노즐에서는 연료가 주위 공기와 2차 연소되는 것을 예방하기 위해서 N₂를 0.03m/s로 분출시켰다.

화염온도는 Thin filament pyrometry를 이용하여 측정하였다.^(7,8) 대항류화염의 소화과정 차이를 검토하기 위해서 연료류에 첨가된 N₂의 몰분율(Ca)이 0.79인 정상 상태의 화염에서 N₂ 농도를 소화한계까지 갑자기 증가시켜 소화되어 가는 과정을 디지털 비디오 카메라를 이용하여 촬영하였다.

참고로, 소화한계에 대한 실험 데이터는 정상 중력장에서의 CH₄-공기 대항류화염에 대한 "총괄 스트레인을(global strain rate)"에 대한 함수로 정의하였다.⁽⁷⁾ 여기서 총괄 스트레인은 아래의 식 (1)과 같이 정의되며,⁽⁹⁾ 이하에서는 간단히 스트레인을이라 칭한다.

$$a_g = \frac{2V_O}{L} \left(1 + \frac{V_F \sqrt{\rho_F}}{V_O \sqrt{\rho_O}} \right) = \frac{2V_r V_F}{L} \left(1 + \frac{\sqrt{\rho_F}}{V_r \sqrt{\rho_O}} \right) \quad (1)$$

여기서, V와 ρ는 각각 유입유체의 속도와 밀도, L은 노즐사이의 거리를 나타낸다. 하첨자 O와 F는 각각 공기류와 연료류를 의미하며, 속도비 V_r는 V_O/V_F를 의미한다.

일반적으로 스트레인의 개념은 대항류화염의 특성 유동시간(characteristic flow time)을 정량화 시켜 얻기 위해 사용된다. 본 연구에서도 이러한

관점에서 스트레인을 변화시키면서 0-g 및 1-g 화염의 각 스트레인을 조건에서의 소화한계 및 특성을 고찰하였다.

3. 수치계산방법

3.1 2차원 수치계산방법

본 연구에서는 두개의 원형 노즐 사이에 형성되는 1-g 대항류화염 모사에 적합한 비정상, 축대칭 2차원 수치계산 코드를 개발하였다. 지배방정식은 낮은 마하수 근사법⁽¹⁰⁾을 적용하여 아래의 식 (2)~(6)와 같이 연속, 운동량, 화학종, 에너지 및 상태방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p_1 + (\rho - \rho_0) \mathbf{g} + \nabla \cdot \mu \left[(\nabla \mathbf{u}) + (\nabla \mathbf{u})^T - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I} \right] \quad (3)$$

$$\frac{\partial (\rho Y_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} Y_i) = \nabla \cdot (\rho D_{im} \nabla Y_i) + W_i \dot{\omega}_i, \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (4)$$

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) - \sum_{i=1}^N W_i h_i^0 \dot{\omega}_i + \rho \sum_{i=1}^N (c_{pi} D_{im} \nabla Y_i \cdot \nabla T) + \dot{q}_r \quad (5)$$

$$p_0 = \rho R_0 T \sum_{i=1}^N \left(\frac{Y_i}{W_i} \right) \quad (6)$$

본 계산에서는 Soret과 Dufour 효과는 무시하였으며, 열역학적 물성치와 전달 물성치는 각각 CHEMKIN-II⁽¹¹⁾ 및 TRANFIT Package⁽¹²⁾를 이용하여 계산하였다.

본 연구의 수치해석 기법은 직접수치모사법을 바탕으로 하고 있으며, 주어진 지배방정식을 추가적인 모델 없이 직접 풀게 된다. 계산에 이용된 차분법과 구체적인 수치 알고리즘에 대해서는 참고문헌 (13)과 (14)에 자세히 기술되어 있으므로 여기서는 생략한다.

계산에 이용된 노즐치수 및 계산영역은 Fig. 1에서 보는 바와 같다. 연료류와 공기류는 각각 하부와 상부노즐에서 분출된다. 실험을 재현하기 위해서 노즐치수는 실험에 이용된 버너의 치수와 동일하게 하였다. 기존의 실험연구⁽⁷⁾에서 1-g의 낮은 스트레인을 조건에서는 화염온도가 상부

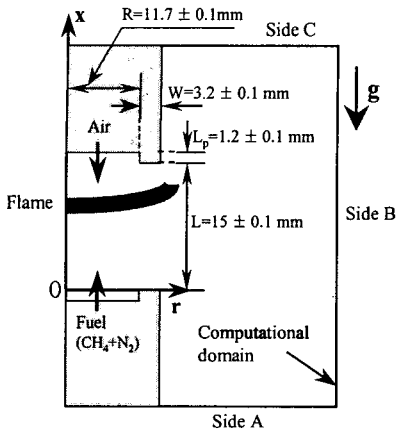


Fig. 1 Schematic drawing of the burner geometry and computational domain

노즐출구의 경계온도에 영향을 미치게 되며, 이러한 효과가 화염의 위치에도 영향을 주는 것을 확인한 바 있다. 본 계산에서는 1-g 화염의 위치를 잘 예측하기 위하여 실험과 유사한 효과를 갖도록 노즐 팁을 노즐출구보다 더 돌출되도록 설정하였다. 이 노즐 팁 돌출길이 (L_p)는 선형계산을 통해 1.2mm가 가장 적합하다는 것을 확인하였으며, 모든 스트레인을 조건에 대해서 L_p 는 1.2mm로 일정하게 하였다.

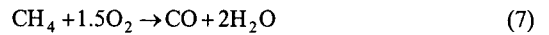
계산영역은 축방향으로 40.2mm, 반경방향으로 50mm로 각각 하였다. 이 영역에 대해 격자는 268×90 의 비균일 격자계를 이용하였으며, 축방향으로는 격자크기가 0.15mm로 균일하고 반경방향으로는 노즐반경(R)까지는 0.3mm로 일정하고 그 이후 점차 크기가 증가되도록 하였다. 축방향 최소격자 크기 0.15mm는 최소 길이 스케일인 열발생율의 폭을 합리적으로 예측하고 소화한계를 잘 예측하여 계산에 적합한 격자 크기임을 확인하였다.

경계조건으로서 노즐출구에서의 분출속도는 반경방향 속도성분이 없이 균일하게 처리하였다. 주위류와 연료의 2차 연소가 일어나지 않도록 하부 주위류 노즐(Fig. 1의 Side A)에는 실험⁽⁷⁾과 같이 N_2 를 0.03m/s로 균일하게 분출되도록 하였다. 중심축에서는 모든 물리량에 대해서 대칭조건을 갖도록 하였으며, Fig. 1의 Side B 및 Side C는 각각 Slip 조건과 출구경계로 처리하였다. 노즐벽면에서는 속도에 대해서는 No-slip 조건을, 스칼라 변수에 대해서는 Neumann 조건을 부여하였다. 노즐에서 분출되는 연료와 공기의 온도는 298K으로 하였으며, 공기류는 통상의 공기조성을

갖도록 하였다. 연료류는 N_2 로 CH_4 를 희석시킨 상태로 분출되며, $CH_4 : N_2 = 0.21 : 0.79$ (체적비) 조성으로 정상상태의 화염을 얻은 후 연료류 중의 N_2 농도를 점차 증가시키면서 소화한계를 얻었다.

3.2 화학반응 및 복사모델

본 연구에서는 CH_4 의 연소반응을 고려하기 위하여 3단계 총괄반응기구⁽¹⁵⁾를 이용하였다. 소화한계 계산을 위해서 반응식의 상수들은 복사 열손실의 영향이 비교적 적은 $a_g=40 s^{-1}$ 인 화염에 대해 소화한계 및 화염온도를 합리적으로 예측하도록 미소하게 수정하였으며, 수정된 반응기구로 전 스트레인을 영역의 화염에 대한 소화한계 계산을 수행하였다. 본 계산에 이용된 반응기구는 식 (7)~(12)과 같으며, 식 (10)~(12)에서 각 화학종의 반응율은 $kmol \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}$ 의 단위를 갖는다.



$$-d[CH_4]/dt = 10^{11.68} \exp(-23,500/T) [CH_4]^{0.7} [O_2]^{0.8} \quad (10)$$

$$-d[CO]/dt = 10^{12.35} \exp(-19,200/T) [CO]^{1.0} [H_2O]^{0.5} [O_2]^{0.25} \quad (11)$$

$$-d[CO_2]/dt = 10^{12.50} \exp(-20,500/T) [CO]^{1.0} [H_2O]^{0.5} [O_2]^{0.25} \quad (12)$$

복사를 고려하기 위해서는 광학적으로 얇은 복사모델⁽¹⁶⁾을 이용하였다. 이 모델은 CH_4 , CO_2 , H_2O 및 CO 가스로부터의 복사 열손실을 계산하며, 에너지방정식에 포함된 체적당 복사 열손실율은 다음 식으로 표현된다.

$$\dot{q}_r = -4\sigma K_p (T^4 - T_\infty^4) \quad (13)$$

여기서 σ 는 Stefan-Boltzmann 상수, T 와 T_∞ 은 각각 국소 화염온도 및 주위의 온도이다. 또한, K_p 는 혼합기의 Plank 평균 흡수계수로서 다음식에 의해서 구해진다.

$$K_p = P_{CH_4} K_{CH_4} + P_{CO_2} K_{CO_2} + P_{H_2O} K_{H_2O} + P_{CO} K_{CO} \quad (14)$$

여기서 P_i 와 K_i 는 분압(partial pressure)과 각 화학종에 대한 Plank 평균 흡수계수를 의미한다. K_i 에 대한 구체적인 값은 참고문헌 (16)에 나와 있다.

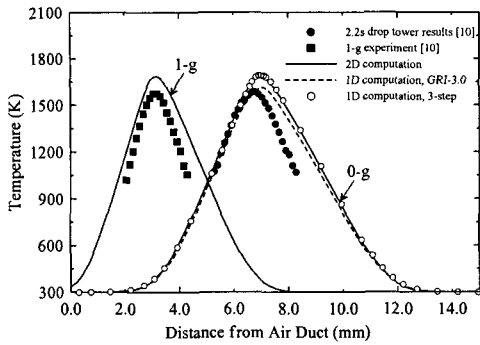


Fig. 2 Measured and computed temperature profiles for $a_g=20 \text{ s}^{-1}$ with $Ca=0.81$ and $Vr=1$

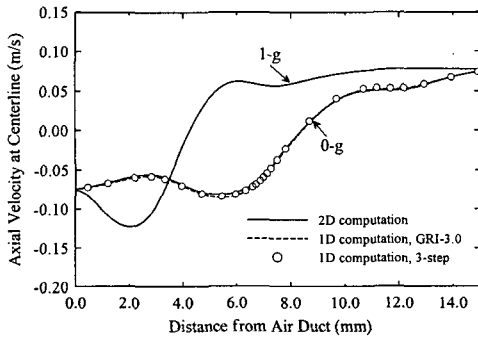


Fig. 3 Computed axial velocity profiles at centerline for $a_g=20 \text{ s}^{-1}$ with $Ca=0.81$ and $Vr=1$

3.3 1차원 수치계산방법

본 연구에서는 2차원 수치계산과 비교할 목적으로 기존에 대향류화염 구조를 검토하는데 많이 이용되고 있는 1차원 코드인 OPPDIF⁽⁶⁾을 이용한 수치계산도 병행하였다. OPPDIF를 이용한 계산에서도 2D 계산과 똑 같은 복사모델을 적용하였으며, 노즐간격, 연료류 및 공기류의 경계조건도 2D 계산과 동일하게 하였다. 반응기구는 2D 계산에 이용된 3단계 총괄반응기구⁽¹⁵⁾와 상세반응기구인 GRI-3.0⁽¹⁷⁾을 이용하였다. OPPDIF의 지배방정식에는 부력항이 없기 때문에 이 코드를 이용한 1차원 계산은 0-g 화염에 대한 계산으로 볼 수 있다.

4. 결과 및 검토

4.1 수치계산 결과의 검증

Fig. 2는 0-g 및 1-g CH_4 -공기 대향류화염에 대해 1D 코드(OPPDIF)와 2D 코드로 계산한 화염온도를 보여주고 있다. 2D 코드로 0-g 화염을 계산할 때는 중력가속도를 0으로 하여 계산을 수행하였다. 그림에서 기호는 실험에서 얻어진 온도분포⁽⁸⁾를

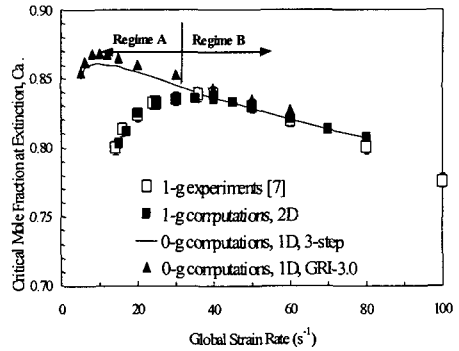


Fig. 4 Measured and computed extinction limits and combustion regimes of 1-g and 0-g countercurrent nonpremixed flames

나타낸다. Fig. 2는 $a_g=20 \text{ s}^{-1}$ 이고 $Ca=0.81$ 인 조건에 대한 결과로서, 소화한계에 근접한 화염의 온도분포를 보여주고 있다. 0-g 및 1-g 두 조건의 화염에 대해 2D 수치계산은 실험에서 얻어진 화염온도 분포와 화염대 위치를 적절하게 예측하고 있다. 이에 반해 1D 수치계산은 0-g 화염온도 분포와 화염대 위치는 잘 예측하지만 부력을 고려하지 못하므로 1-g 화염의 위치는 적절히 예측하지 못하고 있다. 참고로 0-g 화염에 대해 3단계 총괄반응기구를 사용한 1D 및 2D 계산결과는 거의 일치하는 것으로 보아 2D 수치계산 결과를 신뢰할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 1D 코드로 상세반응기구인 GRI-3.0과 3단계 총괄반응기구로 계산한 결과는 최고 화염온도를 제외하면 거의 유사함을 알 수 있어 화염구조 예측에 반응기구의 영향이 크지 않음을 확인할 수 있다.

Fig. 3은 Fig. 2와 동일한 화염에 대해 1D 및 2D 코드로 계산한 속도분포를 도시한 것이다. 1-g 화염은 부력으로 인해 상부 노즐(공기류 노즐)로 이동하기 때문에 Fig. 2의 온도분포와 마찬가지로 1D 계산은 1-g 화염의 속도를 제대로 예측할 수 없음을 알 수 있다. 반면 0-g 화염의 속도분포는 1D나 2D 계산결과가 유사하며, 1D 계산만 볼 때 반응기구에 거의 무관함을 알 수 있다. Fig. 2와 3의 결과를 통해 OPPDIF를 이용한 1D 계산은 부력을 고려하지 못하므로 1-g 화염을 적절히 모사할 수 없으며 1-g 화염의 특성을 검토하기 위해서는 2D 계산이 필수적임을 알 수 있다. 또한, 정확성과 계산시간을 고려할 때 3단계 반응기구를 2D 계산에 사용하는 것은 적합한 선택이라는 것을 확인할 수 있다. 이러한 2D 계산에서 3단계 반응기구의 유용성은 뒤에서 설명할 소화한계 실험결과와의 비교(Fig. 4)에서도 잘 확인할 수 있다.

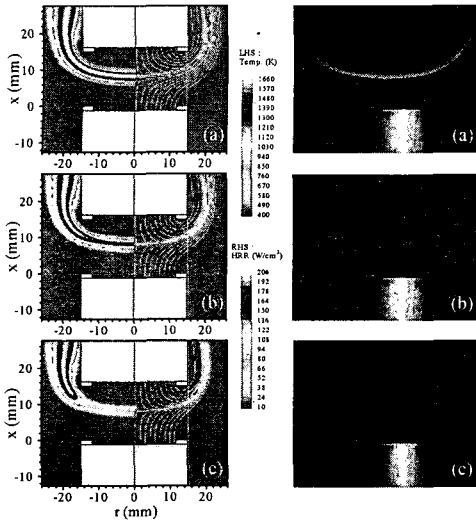


Fig. 5 Computed and measured extinction process of 1-g counterflow nonpremixed flame for $a_g=60s^{-1}$ and $Vr=1$ while Ca increases from $Ca=0.79$ to 0.825 at time equal to 0 s. Left three figures and right three figures are obtained by calculation and experiment, respectively. LHS and RHS in the computed result represent the flame temperature and heat release rate, respectively

4.2 소화한계 및 특성

Fig. 4에는 CH_4 -공기 대향류화염에 대해 실험, 1D 및 2D 수치계산으로 얻어진 소화한계를 비교 도시하였다. 결과에서 1D 계산은 부력항이 고려되지 못하므로 부력효과가 지배적인 낮은 스트레인을 조건의 1-g 화염 소화한계를 적절히 예측하지 못하는 것을 알 수 있다. 이 1D 계산은 소화한계 예측에 있어 반응기구에 거의 무관한 것을 알 수 있으며, 상세반응기구(GRI-3.0)를 이용하더라도 1-g 화염의 소화한계는 적절히 예측할 수 없음을 보여주고 있다. 반면에 1-g 화염에 대한 2D 계산은 모든 스트레인을 조건에 대해서 실험치를 매우 잘 예측하는 것을 알 수 있다. 또한, $a_g < 35 s^{-1}$ 의 낮은 스트레인을 조건에서는 부력효과가 고려되지 않은 0-g 화염(1D 계산)의 소화한계가 1-g 화염의 소화한계보다 높은 것을 알 수 있다.

다음으로 소화한계 곡선의 전환점 위치를 살펴 보면, 1-g 화염의 전환점이 0-g 화염보다 높은 스트레인을 영역에 위치하는 것을 알 수 있다. 무중력 화염의 소화한계에서의 전환점은 잘 알려진 현상으로서, 기존 연구에 의하면 복사 열손실이 전환점이 생기게 하는 주요한 원인으로 알려져 있다.^(5,18) 그러나, 1-g 화염의 전환점은 0-g 화염과는 달리 복사 열손실 뿐만 아니라 화염이 다차원 구

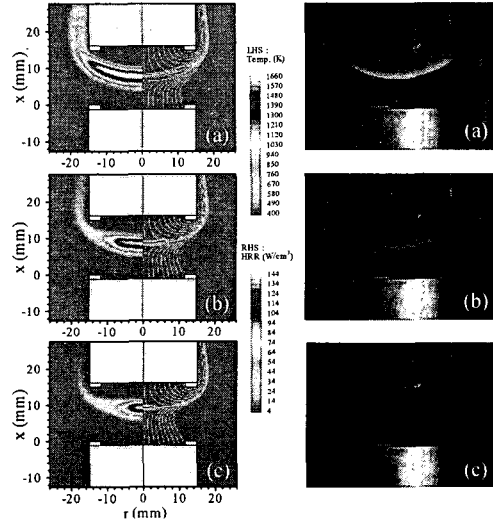


Fig. 6 Computed and measured extinction process of 1-g counterflow nonpremixed flame for $a_g=20s^{-1}$ and $Vr=1$ while Ca increases from $Ca=0.79$ to 0.825 at time equal to 0 s. Left three figures and right three figures are obtained by calculation and experiment, respectively. LHS and RHS in the computed result represent the flame temperature and heat release rate, respectively

조를 갖는 점과도 관련이 있다. 1-g 화염의 연소영역(combustion regime)은 소화모드에 따라 두 가지 영역, Regime A와 B로 나누어 진다. 이 두개의 영역은 전환점($a_g \approx 35 s^{-1}$)을 경계로 나누어 지며, 각 영역별 연소특성은 뒤에서 자세히 기술하기로 하겠다.

Fig. 5는 $a_g=60 s^{-1}$ 인 1-g 화염의 소화과정을 각각 계산과 비디오로 촬영하여 가시화한 결과이다(Regime B). 초기 정상상태 화염을 소화시키기 위해서 Ca 값은 0.79에서 0.825 (소화한계)까지 한번에 증가시켰다. 연료류에서 농도가 증가된 N_2 가 화염면에 도달하게 되면 1-g 화염은 중심축 근처에서부터 소화되기 시작한다. 이때 중심축 근처의 열발생율(heat release rate : HRR)은 급격히 감소되며 잠시 후 전체적으로 완전히 소화된다. 이러한 소화경향은 Fig. 5의 소화과정 실험 사진에서도 확인할 수 있다. 1-g 화염 중심축 근처에서의 소화기구는 1D 화염 소화기구와 기본적으로 동일하다. 반응대에서 증가된 희석제(N_2) 농도에 의해 화염이 소화되는 것이 “Regime B”의 중요한 특징이다.

Fig. 6은 $a_g=20 s^{-1}$ 인 낮은 스트레인을 갖는 1-g 화염의 소화과정을 보여주고 있다(Regime A). 소화과정 관찰을 위해서 앞(Fig. 5)에서와 마찬가지로

Table 1 Computed (2D) specific maximum heat release rate as a function of radial location in 1-g flames

Location	Maximum HRR (J/cm ³ s)	Local strain rate (s ⁻¹)	SMHRR (J/cm ³)
$a_g=20\text{ s}^{-1}, Vr=3, Ca=0.79$			
r/R=0*	155.5	60.3	2.6
r/R=0.5	150.4	60.9	2.5
r/R=1.1**	73.0	94.8	0.8
$a_g=60\text{ s}^{-1}, Vr=1, Ca=0.79$			
r/R=0*	229.2	104.6	2.2
r/R=0.8	228.3	107.3	2.1
r/R=1.6**	115.8	39.9	2.72

* Where R is the burner inner radius and r/R=0 is at the center of the flow field
 ** The outer flame edge region that has half value of the centerline heat release rate

초기 정상상태 화염(Ca=0.79)에서 소화한계까지 N₂의 농도를 한번엔 증가시켰다. 먼저, 계산결과를 보면 낮은 스트레인을 갖는 1-g 화염은 외부의 에지(edge)로부터 소화가 시작되어 중심축으로 화염이 수축되면서 전체적으로 소화되는 것을 알 수 있다. 즉, 중심축 근처의 화염에서는 충분히 연소할 수 있는 조건이지만 외부 에지에서 소화가 시작되어 중심축 근처의 화염까지 전부 소화시키는 경향을 확인할 수 있다. 이러한 소화특성에 의해서 1-g 화염은 낮은 스트레인율 조건에서 소화한계가 0-g 화염보다 훨씬 낮아지게 된다. 이 소화특성은 화염 가시화 실험결과에서도 명확하게 관찰할 수 있다. 이러한 독특한 소화특성은 앞에서 관찰한 높은 스트레인율 화염의 소화특성(Regime B)과는 다른 것을 알 수 있다. 이 결과는 낮은 스트레인을 갖는 1-g 화염은 다차원적인 화염구조 및 소화특성을 가짐을 보여주는 것으로서, 상사해에 근거한 1D 계산은 1-g 화염의 소화특성을 적절히 예측할 수 없음을 보여주고 있다. 이렇게 다차원적인 화염소화의 특징을 갖는 연소 영역은 "Regime A"로 분류된다.

본 연구에서는 대향류화염의 국소 소화특성을 좀 더 구체적으로 고찰하기 위하여 비 최대 열발생율(specific maximum heat release rate : SMHRR)을 도입하였다. 여기서 SMHRR은 화염면의 최대 열발생율을 국소 스트레인율로 나눈값을 의미한다.⁽¹⁹⁾ 이 매개변수는 화염의 강도를 나타내는 지표로 사용될 수 있으며, 화염면을 따라 국소 화염 강도를 비교하는데 이용될 수 있다. 참고로, SMHRR 값이 작을수록 화염 강도가 약해서 소화되기 쉽다는 것을 암시한다. 본 연구에서 SMHRR

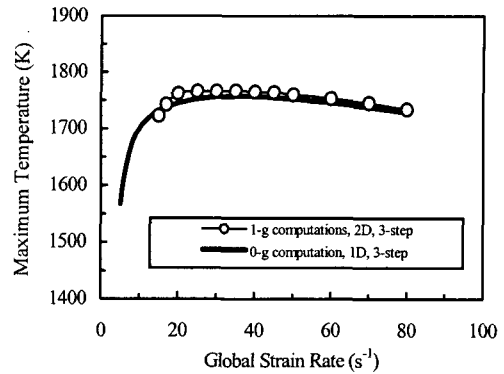


Fig. 7 Computed maximum temperature of 0-g and 1-g flames with Ca=0.79 as a function of the global strain rate at the centerline

을 구할 때에 국소 스트레인율 값을 화염면(최대 열발생 위치)에 수직인 속도성분의 구배⁽²⁰⁾로 정의하였다. Table 1은 $a_g=20$ 과 60 s^{-1} 인 화염의 특정 위치에서 구한 SMHRR 값을 보여주고 있다. $a_g=60\text{ s}^{-1}$ 인 경우에는 외부 에지의 화염강도가 중심축 화염의 강도보다 낮지 않지만, $a_g=20\text{ s}^{-1}$ 인 화염은 외부 에지가 중심축보다 훨씬 화염강도가 훨씬 낮음을 알 수 있다. $a_g=60\text{ s}^{-1}$ 인 화염은 외부 에지에서 열발생율과 스트레인율은 중심축보다 같이 낮지만, $a_g=20\text{ s}^{-1}$ 인 화염은 외부 에지에서 중심축보다 열발생율은 낮지만 스트레인율은 더 높은 것을 관찰할 수 있다. $a_g=20\text{ s}^{-1}$ 인 화염의 외부에서 스트레인율이 높게 나타나는 것은 부력에 의한 유속증가에 기인하는 것으로서, 부력효과는 결국 외부 에지의 화염강도를 약화시키고 이 곳에서부터 소화가 시작되는 것을 알 수 있다.

4.3 다차원 화염구조

Fig. 7에는 1D 코드로 계산한 0-g 화염의 최고온도 및 2D 코드로 계산한 1-g 화염의 중심축 상 최고온도를 총괄 스트레인율을 함수로 하여 도시하였다. 높은 스트레인율 조건(Regime B)에서는 1-g 화염의 중심축 최대온도가 0-g 화염과 대략 비슷한 것을 알 수 있다. 그러나 낮은 스트레인율 조건(Regime A)에서는 1-g 화염의 온도가 0-g 화염보다 약간 높다가 스트레인율이 더 낮아지면 0-g 화염온도보다 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 이 결과도 낮은 스트레인율 조건에서는 1-g 화염 중심축의 화염구조가 0-g 화염구조와는 다르다는 것을 간접적으로 보여주고 있다.

Fig. 8에는 0-g 화염과 1-g 화염에서 열의 유입

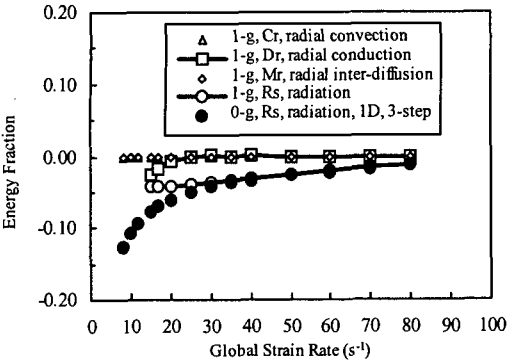


Fig. 8 Computed fractional contribution by each term in the energy equation (Eq. 16) to the heat release of 0-g and 1-g flames with $Ca=0.79$ as a function of the global strain rate along the flow field centerline

및 손실에 미치는 에너지방정식 내에서의 각항의 기여도를 도시하였다. 그림의 결과는 각 스트레인의 화염에 대해서 식 (15)에 보이는 에너지방정식 각항의 기여도를 독립적으로 계산한 것이다. 참고로 1D 계산에는 반경방향 열의 유출입은 고려되지 않는다. 또한 2D 계산의 경우에는 각 항의 값을 중심축 상에서 연료류 노즐 출구부터 공기류 노즐 출구까지 적분하여 계산하였으며, 이 값들은 중심축 화염에서 반경방향으로 열이 유출입되는 양을 나타낸다.

식 (15)에서, C_x 와 C_r 는 축방향 및 반경방향 대류항, D_x 와 D_r 는 축방향 및 반경방향 전도항, M_x 와 M_r 는 축방향 및 반경방향 확산에 의한 에너지 전달항, R_s 는 복사 열손실항 그리고 C_s 는 화학반응에 의한 열발생항을 의미한다. 이들 에너지방정식의 각 항들은 J/m^3s 의 단위를 갖는다. 1-g 화염의 중심축 근처에서는 C_r 및 M_r 의 기여도는 거의 없는 것으로 확인 되었다. 또한 0-g 및 1-g 화염의 중심축 반응대에서는 축방향 전도 열손실은 열발생량에서 복사 및 반경방향 열손실을 제외한 양과 대략 균형을 이루게 된다. 결과를 보면, 0-g 화염에서는 복사항이 열손실에 가장 크게 기여하게 되

며 스트레인을 줄이 감소할수록 복사 열손실은 지속적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 1-g 화염에서는 스트레인을 줄이 감소하게 되면 복사 열손실은 선형적으로 증가하지만, 반경방향 전도 열손실(측면 열손실)은 지속적으로 급격히 증가하여 점차 복사 열손실 양과 유사한 정도에 이르는 것을 알 수 있다. 즉, 1-g 화염의 낮은 스트레인을 조건에서는 복사뿐만 아니라 반경방향 전도 열손실이 화염에서의 열손실에 중요하게 기여하고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 낮은 스트레인을 조건에서는 1-g 화염이 다차원 화염구조의 영향을 크게 받는 것을 단적으로 보여주고 있다.

5. 결론

본 연구에서는 정상 중력장에 있는 CH_4 -공기 대향류 비예혼합화염의 소화특성 및 화염구조에 대해서 수치계산과 실험을 통해 검토하였다.

3단계 총괄 반응기구를 적용한 축대칭 2D 수치계산은 중력장 하에서 실험⁽⁷⁾에서 관측된 대향류화염의 온도분포 및 화염대 위치를 잘 예측하는 것을 확인하였다. 또한, 기존에 대향류화염의 계산에 많이 이용되고 있는 1D 수치계산은 낮은 스트레인을 갖는 1-g 화염구조를 적절히 예측할 수 없는데 반해서, 2D 수치계산은 모든 스트레인을 조건의 1-g 대향류화염 구조 및 소화한계를 잘 예측할 수 있었다.

본 연구에서 다루었던 1-g 화염의 연소영역은 크게 두 가지(Regime A와 B)로 나누어진다. Regime B에 있는 화염은 중심축 근처의 반응대에서 희석제(N_2) 농도가 증가되어 소화되는 특징을 가지고 있으며, 이 영역에서 얻어지는 소화한계는 1D 계산으로도 합리적으로 예측할 수 있었다. 반면에 Regime A에서는 소화특성이 부류에 기인한 다차원 화염구조와 관련되어 있으며, 1D 계산으로는 소화한계를 정확하게 예측할 수 없음을 알 수 있었다.

본 연구에서는 국소 화염의 강도를 정확히 예측하기 위하여 비 최대 열발생율(SMHRR)을 도입하였다. 이 매개변수는 1-g 화염의 중심축과 외부

$$\underbrace{\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)}_0 = \underbrace{-\rho c_p u \frac{\partial T}{\partial x}}_{C_x} - \underbrace{\rho c_p v \frac{\partial T}{\partial r}}_{C_r} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right)}_{D_x} + \underbrace{\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right)}_{D_r} + \underbrace{\sum_{i=1}^N \rho c_{pi} D_{im} \frac{\partial Y_i}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x}}_{M_x} + \underbrace{\sum_{i=1}^N \rho c_{pi} D_{im} \frac{\partial Y_i}{\partial r} \frac{\partial T}{\partial r}}_{M_r}$$

$$+ \underbrace{\dot{q}_r}_{R_s} - \underbrace{\sum_{i=1}^N W_i h_i^0 \dot{\omega}_i}_{C_s} \tag{15}$$

화염에지의 강도를 비교하는데 유용하였으며, 화염소화의 개시점을 알려주는 중요한 변수로 이용될 수 있었다.

또한, 에너지방정식의 각 항의 기여도를 평가하여 화염 중심축에서 유입, 손실되는 열에너지의 Budget을 검토하였다. 0-g 화염은 낮은 스트레인을 조건에서 복사 열손실에 의해서 소화한계가 낮아지는 것을 다시 한번 확인할 수 있었다. 그러나 1-g 화염은 낮은 스트레인을 조건에서 복사 열손실뿐만 아니라 반경방향으로의 전도 열손실에 의해서도 화염강도가 약해지게 된다. 또한, 1-g 화염은 낮은 스트레인을 조건에서는 중심축 근처의 화염은 충분히 연소될 수 있는 조건에 있지만 부력에 의한 영향으로 화염강도가 낮은 외부 에지부터 소화가 시작되어 전체 화염이 소화되는 특징을 갖는다. 낮은 스트레인을 조건에서는 1-g 화염은 0-g 화염과는 다른 열손실 기구 및 부력에 의한 다차원 화염구조로 인해 소화한계가 0-g 화염에 비해 매우 낮은 값을 갖게 된다.

후 기

본 연구는 NASA Microgravity Research Division의 연구비 지원(Contract No. NNC04CB07C)과 국립순천대학교 공과대학 학술재단의 교수해외과건연구 지원사업의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Tsuji, H., 1984, "Counterflow Diffusion Flames," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 8, pp. 93~119.
- (2) Puri, I. K. and Seshadri, K., 1986, "Extinction of Diffusion Flames Burning Diluted Methane and Diluted Propane in Diluted Air," *Combustion and Flame*, Vol. 65, pp. 137~150.
- (3) Peters, N. and Kee, R. J., 1987, "The Computation of Stretched Laminar Methane-Air Diffusion Flames Using a Reduced-Four Step Mechanism," *Combustion and Flame*, Vol. 68, pp. 17~29.
- (4) Seshadri, K. and Kee, R. J., 1988, "Asymptotic Structure and Extinction of Methane-Air Diffusion Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 73, pp. 23~44.
- (5) Maruta, K., Yoshida, M., Guo, H., Ju, Y. and Niioka, T., 1998, "Extinction of Low-Stretched Diffusion Flame in Microgravity," *Combustion and Flame*, Vol. 112, pp. 181~187.
- (6) Lutz, A. E., Kee, R. J., Grcar, J. F. and Rupley, F. M., 1997, "OPPDIF : A Fortran Program for Computing Opposed-Flow Diffusion Flames," *Sandia Report SAND96-8243*.
- (7) Bundy, M., Hamins, A. and Lee, K. Y., 2003, "Suppression Limits of Low Strain Rate Non-Premixed Methane Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 133, pp. 299~310.
- (8) Oh, C. B., Park, J., Kim, J. S. and Hamins, A., 2005, "Multi-Dimensional Effects in Low Strain Rate Flame Extinction Under Microgravity Environment," *Transactions of KSME B*, Vol. 29, No. 9, pp. 988~996.
- (9) Seshadri, K. and Williams, F. A., 1978, "Laminar Flow Between Parallel Plates with Injection of a Reactant at High Reynolds Number," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 21, pp. 251~253.
- (10) McMurtry, P. A., Jou, W. H., Riley, J. J. and Metcalfe, R. W., 1986, "Direct Numerical Simulations of a Reacting Mixing Layer with Chemical Heat Release," *AAIA Journal*, Vol. 28, pp. 962~970.
- (11) Kee, R. J., Rupley, F. M. and Miller, J. A., 1989, "A Fortran Chemical Kinetic Package for the Analysis of Gas Phase Chemical Kinetics," *SAND89-8009B*.
- (12) Kee, R. J., Dixon-Lewis, G., Warnatz, J., Coltrin, M. E. and Miller, J. A., 1986, "A Fortran Computer Code Package for the Evaluation of Gas-Phase Multicomponent Transport Properties," *SAND86-8246*.
- (13) Oh, C. B., Park, J. and Lee, C. E., 2004, "Numerical Investigation of Extinction in a Counterflow Nonpremixed Flame Perturbed by a Vortex," *Combustion and Flame*, Vol. 65, pp. 137~150.
- (14) Oh, C. B., 2003, "Direct Numerical Simulation on the Interaction of Counterflow Nonpremixed Flame and a Single Vortex," *Ph.D. Dissertation*, Inha University.
- (15) Dryer, F. L. and Glassman, I., 1972, "High Temperature Oxidation of CO and CH₄," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 14, pp. 987~1003.
- (16) Ju, Y., Guo, H., Maruta, K. and Liu, F., 1997, "On the Extinction Limit and Flammability Limit of Non-adiabatic Stretched Methane-Air Premixed Flames," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 342, pp. 315~334.
- (17) Bowman, C. T., Hanson, R. K., Davidson, D. F., Gardiner, W. C., Lissianski, V., Smith, G. P., Golden, D. M., Frenklach, M. and Goldenburg, M., 1999, http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/.
- (18) T'ien, J. S., 1986, "Diffusion Flame Extinction at Small Stretch Rates: The Mechanism of Radiative Loss," *Combustion and Flame*, Vol. 65, pp. 31~34.
- (19) Sung, C. J., Liu, J. B. and Law, C. K., 1995, "Structural Response of Counterflow Diffusion Flames to Strain Rate Variations," *Combustion and Flame*, Vol. 102, pp. 481~492.
- (20) Poinso, T. and Veynante, D., 2001, "Theoretical and Numerical Combustion," (Edwards), p. 59.