

희박연소에서 발생하는 메탄의 농도 상호작용과 삼중화염에 대한 연구

오 태 균^{*1)} · 정 석 호²⁾

동양공업전문대학 기계과¹⁾ · 서울대학교 기계항공공학부²⁾

Concentration Interaction of Premixed and Triple-layer Flames in Lean Burn with Methane Fuel

Tae Kyun Oh^{*1)} · Suk Ho Chung²⁾

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Dongyang Technical College, Seoul 152-714, Korea

²⁾School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, Seoul 151-744, Korea

(Received 21 April 2006 / Accepted 8 June 2006)

Abstract : The performance in the practical combustion system including reciprocating engines and gas turbine combustors is being much governed by turbulent reacting flow that is often analyzed by both a laminar flamelets concept and flame interaction. The characteristics of laminar flame interaction have been investigated numerically to provide basic understanding of wrinkled turbulent flames under concentration interaction resulting from inhomogeneity in fuel-air mixing, especially focused on the transition of flame characteristics such as diffusion flame, partially premixed diffusion flame, and triple-layer flame by the variation in the degree of premixedness. The extinction stretch rates to the premixedness have also been obtained in this paper. The boundary defining the regime of the existence of triple-layer flames as functions of both stretch rate and premixedness has been determined which agrees well with previously reported experiment measuring OH radical concentration peaks based on PLIF.

Key words : Triple-layer flame(삼중화염), Premixedness(예혼합도), Flame interaction(화염상호작용), Stretch(스트레치), PLIF(평면 레이저 유도 형광법)

Nomenclature

- f : stream function
- T : temperature[K]
- Y_i : mass fraction of i -species
- α : premixedness

1. 서론

화염은 유동 측면에서 층류 화염과 난류 화염으로 분류된다. 왕복형 내연기관이나 가스 터빈과 같

이 실제의 연소기기에서의 연소는 대부분 난류 연소로 진행된다. 난류 화염의 두께가 난류 유동에서의 최소 에디 특성길이인 Kolmogorov 스케일보다 적을 경우 난류 화염은 층류 소화염의 집합(ensemble of laminar flamelets)¹⁾으로 간주되며, 층류 화염을 분석할 때 사용되었던 이론해석이 그대로 적용된다.

두 개의 예혼합화염간의 온도 또는 농도가 불균일할 경우 발생하는 화염간에는 상호작용²⁾이 발생한다. 희박연소엔진이나 직접분사가솔린엔진과 같이 농도장의 층상화가 전체적으로 과농에서 희박까지 다양하게 존재하는 경우에는 농도적 상호작용이

*Corresponding author, E-mail: tko@dongyang.ac.kr

발생한다. 이 경우 적당한 스트레치의 영역에서는 화염을 통해 희박측에서는 산화제가 누출되고, 과농측에서는 연료가 누출되어 희박 예혼합화염과 과농 예혼합화염 사이에 확산화염이 존재하게 되어 전체적으로 삼중화염(triple-layer flame)이 형성될 수 있다. 한편 조건에 따라서는 예혼합화염과 확산화염의 특성을 동시에 갖는 혼성 화염(hybrid flame)의 형태가 존재하는 것으로도 알려져 있다.

연소기기에서는 농도의 층상화와 유동효과로 인하여 농도적 상호작용이 일반적으로 나타난다. 이러한 예로서 층상급기 방식의 희박연소 엔진, 부상 화염(lifted flame)³⁾, 고체연료 표면위의 화염 스프레드에서의 화염 선단⁴⁾ 등이 과농-희박 상호작용이 관찰되는 예로 거론될 수 있다. 상호작용이 발생하는 화염은 개별적인 화염과는 연소율, 소염특성 및 가연한계 등에 있어 상이한 거동을 보인다. 따라서 실제 연소지역에서는 확산화염 이외에 과농-희박 상호작용 현상이 관찰될 수 있으므로 난류연소를 올바르게 해석하기 위해서는 과농-희박 상호작용에 대한 이해가 요구된다.

과농-희박 상호작용에서 나타나는 삼중화염은 Phillips⁵⁾에 의해 처음 실험적으로 관찰된 후에, Linan 과 Crespo⁶⁾는 전파하는 삼중화염의 내부구조를 파악하기 위해 활성화 에너지 접합 접근 전개방법을 사용하였다. Dold⁷⁾는 혼합기의 농도 구배와 삼지화염의 전파 속도 사이의 관계식을 유도하였으며, Kioni^{8,9)}는 대향류 유동장에서 스트레인을 따른 삼중화염의 전파속도와 화염 구조의 변화 및 OH 라디칼의 분포를 수치해석 및 레이저를 이용한 실험을 통하여 규명하였다. 또한 Guo¹⁰⁾는 삼중화염의 존재가 NOx의 생성에 미치는 영향을 수치계산으로 분석하였다.

본 연구에서는 축대칭 대향류 유동장에서 메탄/공기 예혼합기의 과농-희박 예혼합도(premixedness)를 변화시킬 경우 발생하는 화염의 거동, 소염특성 및 상호작용을 고찰하였다. 또한 과농-희박 상호작용에서 나타나는 삼중화염을 OH 라디칼과 열발생률을 이용하여 확인하였으며, 수치계산을 통해 스트레치와 예혼합도에 따라 삼중화염이 존재하는 맵(map)을 작성하였고, 이를 평면 레이저 유도 형광법

(planar laser induced-fluorescence)에 의해 관측된 실험결과와 비교하여 일치함을 확인하였다.

2. 이론 및 계산방법

2.1 지배방정식 및 경계조건

축대칭 대향류 유동장에서 경계층 근사를 이용하여 유도한 연속 방정식, 운동량 방정식, 화학종 방정식, 에너지 방정식에 대한 지배방정식¹¹⁾에 대해 경계조건은 다음과 같이 설정되었다.

$$x = -\infty;$$

$$f' = \sqrt{\rho_{\infty}/\rho_{-\infty}}$$

$$Y_i = Y_{i-\infty}, \quad i = 1, 2, \dots, N$$

$$T = T_{-\infty}$$

$$x = \infty;$$

$$f' = 1$$

$$Y_i = Y_{i\infty}, \quad i = 1, 2, \dots, N$$

$$T = T_{\infty}$$

위식에서 x 는 축방향 좌표, ρ 는 밀도, f 는 스트림 함수(stream function)로 $f = u/u_{\infty}$ 로 정의된다. 또한 Y_i 는 i -화학종의 질량분율, T 는 온도, N 은 관계된 총 화학종수, u 는 축방향 속도, ∞ 는 자유 영역(free stream)의 경계조건을 각각 표시한다.

2.2 계산방법

본 연구에서 사용한 대향류 화염의 해석을 위해 사용된 코드는 Smooke에 의해 개발된 프로그램에 적절한 수정을 가하여 수렴성을 향상시킨 프로그램이다. 미분 방정식 형태인 지배방정식을 유한차분법으로 차분화하여 연립 대수방정식을 구한 후 시간적분과 Newton 반복계산(Newton iteration)을 통해 해를 구하였다.

화학반응, 열역학적 물성치 및 상태방정식의 계산에는 Sandia 국립연구소에서 개발한 Chemkin-II를 이용하였고, 전달 물성치의 계산에는 Transport package를 이용하였다. 화염을 해석하기 위해 사용하는 화학반응 메카니즘으로는 53개 화학종과 325

개의 화학반응 과정을 갖는 GRI-Mech 3.0을 이용하였다.

3. 결과 및 분석

압력 1atm, 온도 298.15K 의 메탄/공기 예혼합기에서 농도적 상호작용을 살펴보기 위하여 각각의 자유영역에서 공급되는 예혼합기의 당량비를 여러가지 경우로 변화시키면서 계산을 수행하였다.

3.1 화염 형상의 변화 및 소염

대향류 유동장의 각각에서 공급되는 메탄의 예혼합기의 당량비의 크기에 따라 다양한 형태의 화염이 관측된다. Fig. 1은 스트레치가 $\kappa = 300 \text{ s}^{-1}$ 인 메탄 예혼합화염에서 예혼합도(premixedness)에 따른 온도 분포를 도시한 그림이다. 여기서 예혼합도 α 는 변수로서, 대향류 유동장에 공급되는 각각의 예혼합기의 당량비가 $\phi_{-\infty} = 1/\alpha$ 과 $\phi_{\infty} = \alpha$ 로서 대칭성을 갖게 조절하였다. 예혼합도 $\alpha = 0$ 은 확산화염, $\alpha = 1$ 은 양쪽의 당량비가 1인 대칭 예혼합화염을 의미한다. 예혼합도가 0인 확산화염으로부터 그 값이 점차로 증가하여 양쪽 미연 예혼합기의 당량비가 1로 수렴할수록 화염 전파속도가 증가하며, 이에 따라 기연가스 지역이 넓게 분포하게 된다.

화염의 위치를 결정해 주는 척도로 OH 라디칼과

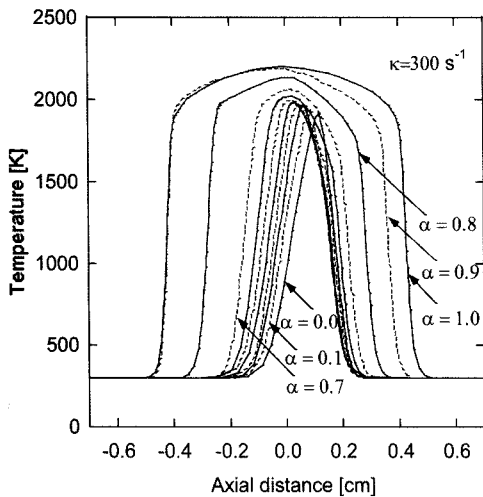


Fig. 1 Temperature profiles with premixedness at stretch $\kappa = 300 \text{ s}^{-1}$

CH 라디칼 몰분율의 극대값¹²⁾이 널리 사용된다. 이는 OH 라디칼과 CH 라디칼이 예혼합화염과 확산화염에서 연료의 분해과정과 산화과정에 관여하므로 화염의 위치를 결정하는 것으로 알려져 있기 때문이다. Fig. 2는 예혼합도 $\alpha = 0$ 인 확산화염에서의 OH와 CH 라디칼의 분포를 표시하고 있다.

OH와 CH 라디칼의 극대값으로서 위치가 표시되는 확산화염은 정체면에서 산화제 측으로 약간 이동하여 존재하는데, 이는 메탄과 산소의 당량비에 기인한다. 예혼합도 $\alpha = 0$ 인 확산화염에서 반응물과 생성물에 대한 주요 화학종의 분포를 Fig. 3에도 시하였다. 주요 생성물인 CO_2 와 H_2O 는 화염면에서 연료의 산화과정으로 발생하는데, OH나 CH 라디칼의 극대값의 위치와 마찬가지로 산화제측으로 약간

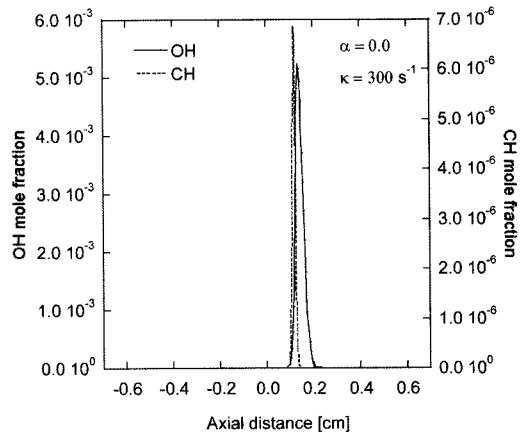


Fig. 2 Radical profiles of OH and CH for a diffusion flame

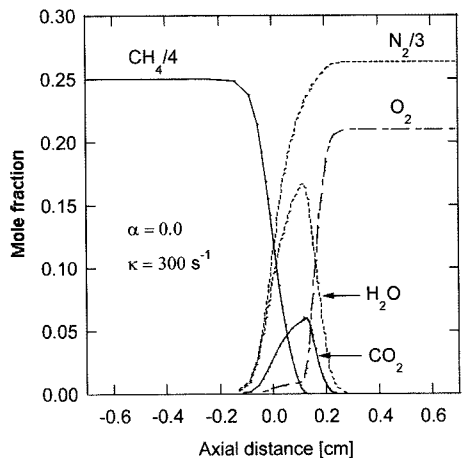


Fig. 3 Profiles showing major species for a diffusion flame

이동되어 있다. 주요 반응물과 생성물 관점에서 정확한 화염 위치의 예측은 어려우나 예혼합도 α 를 증가시키며 이론당량비 근처로 접근시키면, 주요 생성물인 CO_2 와 H_2O 는 대칭형상을 보이며 화염전파 속도가 증가하면서 분포지역이 Fig. 3보다 넓게 분포하게 된다.

예혼합도를 $\alpha = 0.5$ 까지 증가시키면 OH 라디칼은 점점 넓은 지역에 걸쳐 분포되면서 극대값은 한 위치로 국한된다. 그러나 CH 라디칼은 과농한 측에 큰 극대값과 더불어 희박한 측에 또 하나의 작은 극대값이 나타나는데, 이를 Fig. 4에 표시하였다. 확산 화염은 정체점 근처에서 형성되고, 희박한 예혼합 화염이 혼성화염인 부분 예혼합 확산화염((partially premixed diffusion flame, PPDF)에서 막 분리되어 산화제 측에 위치하는 것으로 분석된다. CH 라디칼은 메탄이 분해되면서 생성되므로 과농한 측에 큰 몰분율의 극대값이 나타나게 된다. OH 라디칼로 판단할 경우 $\alpha = 0.5$ 까지의 화염은 확산화염과 예혼합 화염이 혼성된 PPDF의 형태를 갖는 것으로 판단된다. 일반적으로 당량비가 0.5 이하일 경우 예혼합 화염은 희박 가연한계에 속하므로 독립적으로 전파하는 특성을 갖지 못한다.

예혼합도를 계속 증가시킬 경우 $\alpha = 0.8$ 에서는 Fig. 5처럼 OH 라디칼의 극대값 관점에서 명확한 삼중화염의 모습을 보여준다. 양쪽의 극대값은 예혼합 화염의 위치를 지시하며, 가운데의 극대값은 희박한 예혼합 화염과 과농한 예혼합 화염에서 각각 누출된 산화제와 연료에 의해 형성된 확산화염을 나

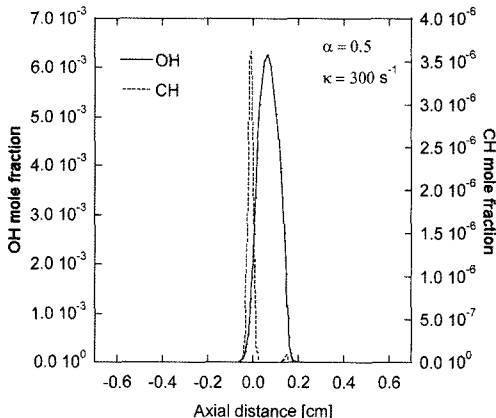


Fig. 4 Radical profiles of OH and CH for $\alpha = 0.5$

타낸다. 예혼합도가 $\alpha = 0.8$ 보다 크거나 작은 값을 갖게 되면 OH 라디칼은 2개의 극대값을 갖게 되는데, 이는 삼중화염의 구조가 과농-희박 예혼합도에 의해 큰 영향을 받는 것을 알 수 있다. 즉, OH 라디칼의 극대값으로 화염의 위치를 정의하는 경우, 스트레치가 일정할 때 어느 한정된 구간의 예혼합도에서만 삼중화염이 관찰될 수 있다. 한편 예혼합도 $\alpha = 0.8$ 의 경우 CH 라디칼은 가운데에 형성되는 확산화염의 위치까지 의미 있는 수준까지 확산되지 못하고, 이에 따라 2개의 극대값을 보이면서 중간의 확산화염의 위치를 표시하지 못한다.

예혼합도 α 가 1에 접근하는 경우 Fig. 6에서와 같이 OH와 CH 라디칼 관점 모두 2개의 대칭적인 예혼합 화염만 존재하게 되고 주요 생성물(CO_2 , H_2O)도 대칭적인 형상을 갖게 된다.

예혼합도 α 가 0인 확산화염에서 1인 대칭 예혼합

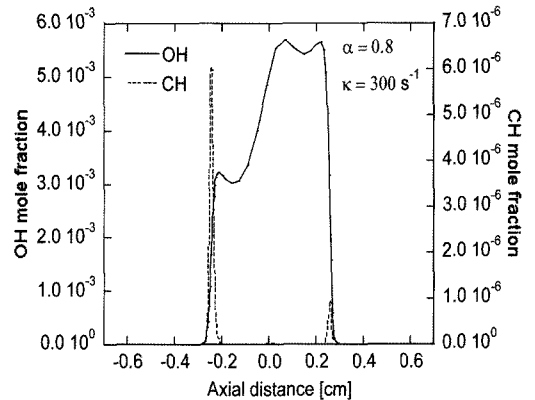


Fig. 5 Radical profiles of OH and CH for $\alpha = 0.8$

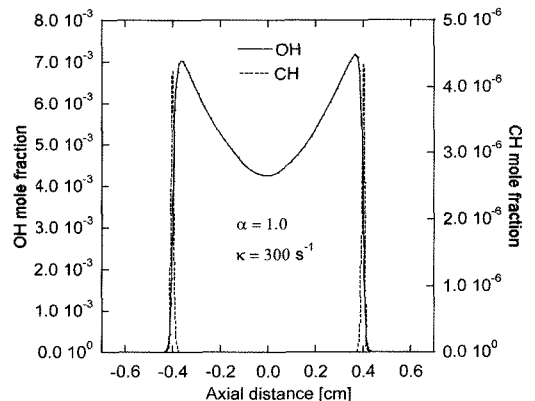


Fig. 6 Radical profiles of OH and CH for $\alpha = 1.0$

화염에 이르기까지 OH와 CH 라디칼, 열발생률에 의해 지시되는 화염의 위치와 화염의 형태가 변화하는 과정을 영역별로 도시한 것이 Fig. 7이다.

CH 라디칼과 열발생률의 극대점이 비교적 정확한 화염의 위치를 지시하지만, 삼중화염의 존재를 지시하지는 못한다. CH 라디칼의 물분율과 열발생률은 삼중 화염 가운데 확산화염의 위치에서 매우 낮은 값을 갖기 때문에 삼중화염의 존재여부는 OH 라디칼의 극대값으로 구분하는 것이 정확한 것으로 판단된다

Fig. 8은 스트레치 $\kappa = 100 \text{ s}^{-1}$, 예혼합도 $\alpha = 0.8$ 의 조건에서 화염에서 발생하는 열발생률을 표시한 그림이다. 가운데에 위치한 확산화염의 열발생률의 크기는 우측의 희박 예혼합화염보다 200배 이상 적은 값을 갖게 되며, 이에 따라 열발생률을 통해 확산화염의 존재를 판단하는 것은 OH 라디칼을 활용하는 것보다 정확도에서 떨어진다. 일반적으로 확산화염에서의 열발생률은 과농과 희박 예혼합화염에 비해 상당히 적은 값을 갖는다. 보통 화염에서의 열발생률은 화염을 특성 짓는 요인이기는 하나, 실험적으로 규명하기가 곤란하다는 점과 수렴된 계산결과를 이용하여 열발생률을 재계산하여야 하는 단점이 존재한다. 따라서 삼중화염의 안정 한계를 확인하기 위한 방안으로 열발생률에 의한 결과는 OH 라디칼에 의한 삼중화염의 안정 한계에 대한 보조자료로 사용하는 것이 적절하다.

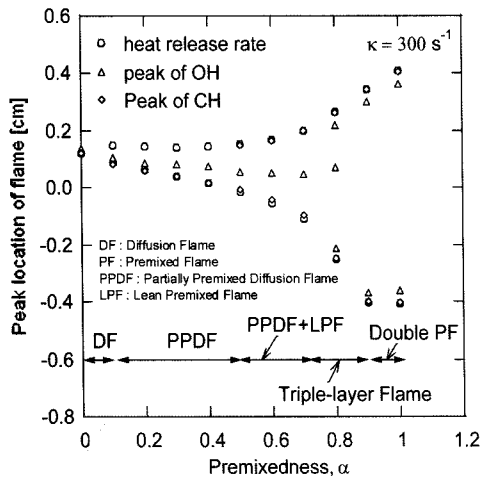


Fig. 7 Flame location with premixedness, α

Fig. 9는 예혼합도 α 를 0에서 1로 변화시켰을 때 소염이 발생하는 스트레치를 구한 그림이다. $\alpha = 0$ 인 확산화염의 소염은 $\kappa = 544 \text{ s}^{-1}$ 으로 상당히 낮은 값에서 발생한다. 확산화염은 화염전과속도가 존재하지 않으므로 예혼합화염처럼 스트레치의 변화에 따라 스스로 위치를 조절할 능력이 없으며, 스트레치의 증가에 따라 반응시간 부족으로 인하여 반응물이 누설되고 화염의 두께가 감소하면서 소염이 발생하는 것으로 분석된다. 예혼합도 α 가 증가하면 소염이 발생하는 스트레치도 증가한다. 이것은 예혼합도가 이론당량비에 접근하면서 완전히 독립적인 전과특성을 갖는 예혼합화염의 성질을 갖게 되

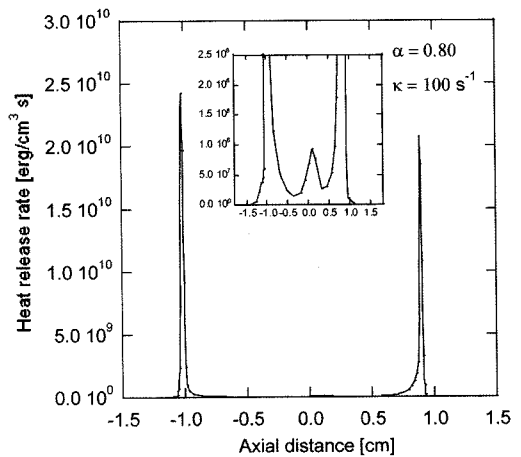


Fig. 8 Profiles showing heat release rates for a triple flame, $\alpha = 0.8$

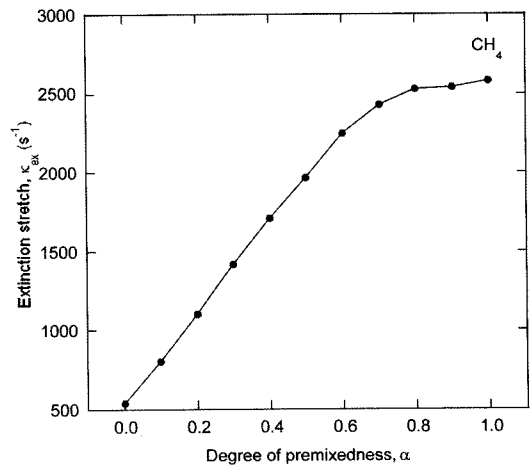


Fig. 9 Extinction stretch to premixedness, α

며, 이에 따라 스트레치에 대한 위치조절 능력을 갖게 되면서 소염에 대한 저항력이 커지게 되기 때문이다.

3.2 삼중화염의 경계 및 존재영역

회박연소 엔진이나 가스터빈, 최근의 직접분사 가솔린엔진¹³⁾에서 혼합기는 성층화된 유동장(stratified field)의 형태로 공급된다. 전술한 바와 같이 연소실 내에서 연료가 과농한 혼합기와 희박한 혼합기로 성층화되어 있을 경우 이 유동장을 전파하는 화염은 회박 예혼합화염, 과농한 예혼합화염, 가운데에 위치한 확산화염의 형상을 갖게 된다. 전절에서 삼중화염의 존재는 OH 라디칼의 극대값으로 판단하는 것이 적절하다고 기술하였다. 일반적으로 OH 라디칼은 예혼합화염과 확산화염의 연료를 산화시키는데 중요한 역할을 한다. 평면 레이저 유도 형광법(planar laser induced fluorescence)에 의한 측정⁹⁾에 따르면 OH 라디칼의 극대값은 화염의 반응지역을 올바르게 지시하므로, OH 라디칼의 극대값의 위치는 화염의 존재와 위치를 표시하는 것으로 해석될 수 있다. 본 연구에서는 이와 같이 OH 라디칼의 극대값을 이용하여 삼중화염의 존재를 판단하는 근거로 활용하였다.

삼중화염의 존재는 대항류 유동장의 각각에서 공급되는 예혼합도 뿐만 아니라 스트레치의 영향도 크게 받는다. 삼중화염이 존재하는 스트레치영역에서 더욱 강한 스트레치가 작용할 경우, 어느 한 예혼합화염은 정체면으로 이동하여 결국 확산화염과 합쳐지면서 혼성화염(PPDF)과 또 다른 예혼합화염을 형성하게 되어 삼중화염 구조는 사라지게 된다. Fig. 11은 예혼합도와 스트레치를 변화시킬 경우 대칭형 예혼합도($\phi_{\infty} = 1/\alpha$, $\phi_{\infty} = \alpha$)를 갖는 과농-희박 예혼합기에서 삼중화염이 존재할 수 있는 안정한 계를 OH 라디칼의 분포를 이용하여 수치해석적으로 구하였으며, 계산결과를 대항류 버너에서 평면 레이저 유도 형광법(planar laser-induced fluorescence)을 통해 구한 실험결과¹⁴⁾와 비교하였다. 실험 결과는 삼중화염이 존재할 수 있는 각각의 희박한계와 과농한계만을 도시하였다. 실험에서의 희박한계는 과농 예혼합기의 당량비 $\phi = 1.20$ 인 경우에 대

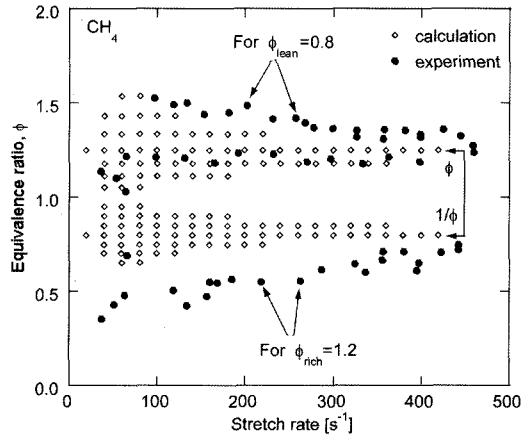


Fig. 10 Comparison of calculated and experimental stability map of a triple flame with stretch and premixedness based on OH

해 각 스트레치에서 삼중화염이 존재할 수 있는 영역이다. 마찬가지로 실험에서 삼중화염이 안정적으로 존재할 수 있는 과농한계는 회박 예혼합기의 당량비 $\phi = 0.8$ 로 고정하고 각각의 스트레치에서 한계영역을 구한 것이다. 따라서 실험결과와 본 연구의 수치계산에서 이용한 대칭적으로 예혼합기를 모델링한 것과는 차이가 존재한다. Fig. 10은 과농-희박 예혼합기의 농도차가 크지 않고 이론당량비 근처의 값을 가지면 삼중화염이 존재하는 스트레치영역이 줄어든다는 것을 보여준다. 이는 삼중화염을 구성하기 위해서는 과농 예혼합화염과 희박 예혼합화염 각각에서 연료와 산화제의 누출이 있어야 하나, 이론당량비 근처의 과농-희박 예혼합기에서는 잉여 화학종의 누출이 확산화염을 형성할 정도의 양이 되지 않기 때문이다. 또한 과농과 희박 예혼합기의 농도차가 일정 한도 이상으로 형성되어 극단적으로 과농하거나 희박하게 되면, 화염 전파 속도가 적으므로 정체면 근처로 화염이 접근하게 되며, 이에 따라 확산화염이 예혼합화염과 융합되어 삼중화염이 존재할 수 없다.

수치계산 결과에 의하면 가장 스트레치가 큰 영역까지 삼중화염이 존재하는 예혼합도는 $\alpha = 0.8$ 로 계산되었다. 즉, $\alpha = 0.8$ 은 확산화염과 예혼합화염의 융합을 초래하지 않을 정도로 희박 예혼합화염과 과농 예혼합화염의 전파 속도가 적절하며, 또한 각각의 잉여 화학종이 확산화염을 형성하기에 적절

한 정도로 누출이 일어나는 예혼합도라고 할 수 있다.

4. 결론

대향류 유동장에서 메탄/공기 예혼합화염에 대한 과농-회박 농도적 상호작용과 삼중화염의 거동을 수치적으로 연구하였다. 예혼합도 α 가 0에서 1로 변화함에 따라 확산화염, 확산화염과 회박 예혼합화염, 삼중화염 및 대칭 예혼합화염으로 변화되는 것을 CH와 OH 라디칼의 몰분율, 열발생률에 의해 분석하였다. 예혼합도 α 가 작으면 OH 라디칼은 1개의 극대값을 갖는 단일 화염 형상을 보여주나, CH 라디칼의 경우에는 $\alpha = 0.5$ 부터 두개의 극대점을 보여주면서 두개 화염의 존재를 표시한다. 예혼합도에 따라 확산화염에서 먼저 회박 예혼합화염의 분리가 이루어지며, $\alpha = 0.7$ 이 되면 완전히 독립적인 전파특성을 갖는 두개의 예혼합화염의 성격을 갖게 된다.

예혼합화염은 스트레치에 따라 화염 위치를 스스로 조절함으로써 확산화염보다 훨씬 높은 소염 스트레치값을 갖는다. 한편 회박과 과농 예혼합기가 이론당량비에서 벗어난 정도가 적을수록 소염 스트레치는 높은 값에서 형성된다.

OH 라디칼의 분포를 통해 삼중화염이 존재하는 영역을 분석한 결과, 낮은 스트레치 영역이면서 연료와 산소의 잉여 화학종이 확산화염을 형성하기에 적절한 정도의 누출이 일어나는 조건에서만 삼중화염이 형성되는 것을 확인하였다. 한편 확산화염 지역에서의 열발생률은 예혼합화염에 비해 상당히 적으므로 열발생률로서 삼중화염의 유무를 판별하기에는 다소 어려움이 존재한다. 따라서 삼중화염의 안정 한계는 OH 라디칼의 극대값에 의해 판별하는 것이 적절하며, 이는 평면 레이저 유도 형광법에 의한 실험결과와도 비교적 잘 일치한다.

References

- 1) N. Peters, "Laminar Flamelet Concepts in Turbulent Combustion," 21st Symposium on Combustion, The Combustion Institute, pp.1241-1250, 1986.
- 2) S. H. Sohrab, Z. Y. Ye and C. K. Law, "An Experimental Investigation on Flame Interaction and the Existence of Negative Flame Speeds," 20th Symposium on Combustion, The Combustion Institute, pp.1957-1965, 1984.
- 3) B. J. Lee and S. H. Chung, "Stabilization of Lifted Tribachial Flames in a Laminar Nonpremixed Jet," Combustion and Flame, Vol.109, pp.163-172, 1997.
- 4) I. S. Wichman, "Theory of Opposed-Flow Flame Spread," Prog. Energy Combust. Sci., Vol.18, pp.553-593, 1992.
- 5) H. Phillips, "Flame in a Buoyant Methane Layer," 10th Symposium on Combustion, The Combustion Institute, pp.1277-1283, 1965.
- 6) A. Liñán and A. Crespo, "Asymptotic Analysis of Unsteady Diffusion Flames for Large Activation Energies," Combustion Sci. Tech., Vol.14, pp.95-117, 1976.
- 7) J. W. Dold, "Flame Propagation in a Nonuniform Mixture: Analysis of a Slowly Varying Triple Flame," Combustion and Flame, Vol.76, pp.71-88, 1989.
- 8) P. N. Kĩoni, B. Rogg, K. N. C. Bray and A. Liñán, "Flame Spread in Laminar Mixing Layers : The Triple Flame," Combustion and Flame, Vol.95, pp.276-290, 1993.
- 9) P. N. Kĩoni, K. N. C. Bray, D. A. Greenhalgh and B. Rogg, "Experimental and Numerical Studies of a Triple Flame," Combustion and Flame, Vol.116, pp.192-206, 1999.
- 10) H. Guo, F. Liu and G. J. Smallwood, "A Numerical Study on NOx Formation in Laminar Counterflow CH₄/air Triple Flames," Combustion and Flame, Vol.143, pp.282-298, 2005.
- 11) S. D. Lee and S. H. Chung, "Local Equilibrium Temperature as a Measure of Stretch and Preferential Diffusion Effects in Counterflow H₂/Air Premixed," 27th Symposium on Combustion, The Combustion Institute, pp.579-585, 1998.
- 12) M. A. Tanoff and M. D. Smooke, "The Sensitive Structure of Partially Premixed Methane-Air vs. Air Counterflow Flames," 26th Symposium on Combustion, The Combustion

Institute, pp.1121-1128, 1996.

- 13) C. Lee, K. Lee and C. Lee, "An Experimental Study on the Flow Characteristics and the Stratified Effects in Visualization Engine Using DPIV and the Entropy Analysis," Transactions of KSAE, Vol.13, No.1, pp.9-18, 2005.
- 14) R. D. Lockett, B. Boulanger, S. C. Harding and D. A. Greenhalgh, "The Structure and Stability of the Laminar Counter-flow Partially Premixed Methane/Air Triple Flame," Combustion and Flame, Vol.119, pp.109-120, 1999.