

〈論 文〉

희박-과농 메탄 화염의 상호작용에 관한 수치 해석적 연구

이승동* · 정석호**

(1995년 8월 21일 접수)

A Numerical Study on the Lean-Rich Interaction of Methane/Air Flames

Sung-Dong Lee and Suk Ho Chung

Key Words : Flame Interaction(화염의 상호작용), Triple Flame(삼중 화염), Stretched Flame(스트레치 화염), Counterflow(대향류)

Abstract

Interaction of flames in a lean-rich concentration field is studied numerically adopting a counterflow as a model problem. Detailed kinetic mechanism is adopted in analyzing the structure of various type of flames which can be found in lean-rich interaction. Flow field is simplified to quasi one-dimensional by using boundary layer approximation and similarity formulation. Triple flames are identified and its structure shows that a diffusion flame is located in the middle of two premixed flames. Such a diffusion flame is formed by H₂ and CO generated from the rich premixed flame and O₂ leaked from the lean premixed flame. The flame position can be identified either from the hydrogen production rate or the heat release rate. Transition from single diffusion flame to triple flame is observed as degree of premixing is increased.

기 호 설 명

a : 스트레인율(Strain rate) 또는 속도 구배
 C_p : 혼합물의 평균 정압비열
 C_{pk} : 화학종 k 의 정압비열
 f : 유동함수
 h_k : 화학종 k 의 엔탈피
 K : 화학종의 개수
 p : 압력
 q_R : 복사 열전달률
 R : 일반 기체상수
 T : 온도
 u : 반경방향 속도
 v : 축방향 속도

\bar{W} : 평균 분자량
 W_k : 화학종 k 의 분자량
 x : 반경방향 좌표
 y : 축방향 좌표
 Y_k : 화학종 k 의 질량 분율
 L : 축방향 경계
 Q : 열발생률

그리스문자

α : 예혼합 정도
 ϕ : 당량비
 μ : 점성 계수
 λ : 열전도률
 ρ : 밀도
 V_{ky} : 화학종 k 의 y 방향 확산 속도
 ω_k : 화학종 k 의 생성률

*회원, 서울대학교 대학원

**회원, 서울대학교 기계공학과

1. 서 론

난류 연소를 이해하기 위한 모델로서 Williams⁽¹⁾와 Peters⁽²⁾ 등이 층류소화염 모델(laminar flamelet model)을 제창한 이후 화염의 상호 작용에 관한 연구가 활발하게 이루어져 왔다.⁽³⁻⁸⁾ 층류소화염 모델은 난류 유동의 에디의 특성 길이보다 화염면의 두께가 작은 경우에 국부적인 화염은 층류 화염의 특성을 가진다는 개념으로서, 국소 화염은 난류 소산과 관련된 전단 유동장내에 존재하므로, 층류 소화염의 특성은 단순한 형태의 전단 유동장을 가지는 대향류 화염에 대한 연구를 통해 파악될 수 있다. 난류 화염에서의 층류 소화염들은 스트레인과 화염 굴곡에 의해 화염 스트레치를 받으면서 유동장과 상호작용하며, 농도장이 불균일해지면 소화염들 간의 농도적 상호작용 및 화염 온도의 차이에 의한 열적 상호작용이 일어난다. 이러한 효과로 인해 전체적인 난류 화염은 연소율, 소염특성 또는 가연 한계에서 개별적 층류 화염과는 다른 특성을 가지며, 이로 인해 소화염간의 상호작용은 난류 화염의 특성을 결정하는 중요 인자로 파악되고 있다.

화염의 농도적 상호작용에는 회박-회박, 과농-과농 및 회박-과농 상호작용이 있다. 이 중에서 회박-과농 상호작용은 층상급기 방식의 내연기관, 부상 화염(lifted flame) 및 화염 스프레드(flame spread) 현상에서의 화염 선단, 또는 대향류 버너에서의 회박-과농 연소 등에서 나타날 수 있다. 이 중 대향류 버너는 각 화염의 농도와 온도, 화염 스트레치 등을 자유롭게 조절할 수 있고 유동의 형태가 단순하여 상호작용 연구의 주된 모델로 채택되어 왔다.

대향류 화염에서 회박-과농 상호작용이 일어날 때, Damköhler 수와, 연료와 산화제의 예혼합 정도에 따라 세 가지 형태의 화염이 존재할 수 있다.^(5,7) 양쪽의 예혼합기의 예혼합 정도가 낮아 화염의 전파속도가 유동속도에 비해 충분히 크지 못한 경우에는 확산 화염과 융합되어 한 개의 화염으로 나타나며, 그 중 하나의 예혼합 화염이 충분히 큰 전파속도를 갖게 되면 분리되어 두 개의 화염이 존재하게 되며, 두 혼합기 모두 충분히 예혼합된 경우에는 과농 예혼합 화염과 회박 예혼합 화염으로 분리

되고 중간에 확산 화염이 형성되어 모두 세 개의 화염이 형성된다.

회박-과농 상호작용은 활성화 에너지 접합 점근 전개 방법을 이용한 이론적 해석과 대향류 버너를 이용한 실험을 통해 Damköhler 수와 예혼합 정도가 화염의 형태에 미치는 영향이 연구되었으며,⁽⁵⁾ 회박-과농 상호 작용하의 화염의 천이에 대하여 실험적으로 연구되었다.⁽⁶⁾ 그러나, 이전의 연구들은 방법적 한계에 의해 화염의 상세한 구조를 분석하기에는 부족하였다. 이에 따라, 본 연구에서는 계산 능력의 발달에 따라 최근 연소 현상의 연구에 활발히 적용되고 있는 상세 화학반응 모델을 도입하여 삼중 화염의 화학적 구조를 분석하고, 회박-과농 상호작용이 일어날 때 예혼합 정도의 변화에 따른 화염 형태의 천이 특성을 규명한다.

2. 지배 방정식 및 경계 조건

대향류 유동장에 대한 상사 경계층 지배 방정식은 다음과 같다.⁽⁹⁻¹²⁾

연속 방정식 :

$$\frac{dV}{dy} + 2a\rho f' = 0 \quad (1)$$

운동량 방정식 :

$$\frac{d}{dy}(\mu \frac{df'}{dy}) - V \frac{df'}{dy} + a[\rho_\infty - \rho(f')^2] = 0 \quad (2)$$

화학종 방정식 :

$$\frac{d}{dy}(\rho Y_k V_{ky}) + V \frac{dY_k}{dy} - \omega_k W_k = 0, \quad k=1, 2, \dots, K \quad (3)$$

에너지 방정식 :

$$\frac{d}{dy}(\lambda \frac{dT}{dy}) - C_p V \frac{dT}{dy} - \sum_{k=1}^K \rho Y_k V_{ky} C_{pk} \frac{dT}{dy} - \sum_{k=1}^K \omega_k W_k h_k = 0 \quad (4)$$

상태 방정식 :

$$\rho = \frac{p\bar{W}}{RT} \quad (5)$$

여기서 $u = axf'$, $V = \rho v$ 이다.

이 방정식들에 대한 경계 조건들은 버너 노즐 출구에서는 축방향으로의 속도 성분만을 가지는 플러

산화제의 농도를 Fig. 4에 나타내었다. 이로부터 메탄의 3중 화염은 과농한 예혼합 화염에서 산소는 거의 완전 소모되고 유효 연료가 누출(Leak)되며, 희박한 예혼합 화염에서 유효 연료는 거의 완전 소모되고 산소는 누출되어 두 예혼합 화염 사이에 누출된 유효 연료와 산소가 반응하는 확산 화염이 형성된다. 이러한 확산 화염에서는 과농측의 메탄이 분해된 CO와 H₂가 연료로 작용한다.

일반적으로 화염은 급격한 발열 반응을 수반하며, 이를 근거로 화염의 위치와 강도 등은 열 발생률의 극대점으로부터 정의하기도 한다. 그러므로, 삼중 화염은 두 예혼합 화염에서의 열 발생률의 극점과 함께 확산 화염에서도 극점이 나타날 것으로 예상할 수 있다. Fig. 5에는 열 발생률의 분포를 표시하였는데, 양쪽의 예혼합 화염에서의 극대점과 함께 확산 화염에서의 극대점도 나타나고 있음을 알 수 있다. 그러나, 확산 화염에서의 열 발생 강

도의 최대치는 예혼합 화염의 약 1/150 정도밖에 되지 않으며, 화염이라고 정의할 수 있는 좁은 지역에서의 반응이라기보다는 두 예혼합 화염 사이에 넓게 분포된 지역에서의 반응임을 알 수 있다. 열 발생률에서 확산 화염이 뚜렷이 드러나지 않는 이유는 먼저 예혼합 화염의 발열 반응의 크기가 중앙의 확산 화염에 비해 너무 크고, 화염 후류에서의 라디칼 재결합 반응에 의한 발열과 수소의 산화반응에 의한 발열이 겹치기 때문이다. 그러므로, 확산 화염의 특성을 보기 위해서는 열 발생률보다는 Fig. 3의 수소의 소모율로 판정하는 것이 삼중 화염에서의 확산 화염 확인에는 더 적합하다.

3.2 회박-과농 상호작용하의 화염 천이

α 가 0에서 1까지 변화함에 따라, 확산 화염으로부터 부분 예혼합 확산 화염(partially premixed diffusion flame), 이중 화염, 삼중 화염을 거쳐 두 개의 대칭 화염으로 천이해 간다.

Fig. 6에는 예혼합 정도의 변화에 따른 온도 분포를 표시하였으며, Figs. 7~9에는 열 발생률과 H₂ 반응율의 변화를 보여주고 있다. 열 발생률은 온도 분포와 직접적인 관련이 있으며 일반적으로 화염의 위치를 규정하는 데에 적합하지만, 열발생이 여러 가지 기구에 의해 일어나 내부의 자세한 화학적 구조를 알기 어려우므로, H₂의 반응률도 함께 표시하였다. 예혼합 정도가 달라지면 화염의 위치가 변하므로 일관성 있게 비교하기 위하여 정체점이 원점이 되도록 좌표계를 조정하였다.

$\alpha=0$ 인 경우는 단일 확산 화염이다. 이 경우 화염은 산화제 쪽에 위치하게 되는데, 이는 산소와

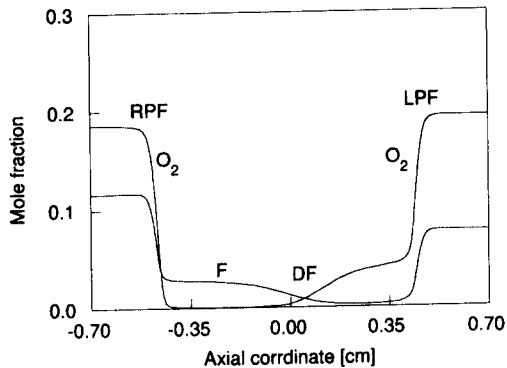


Fig. 4 Concentration distribution of effective fuel and oxygen ($\alpha=0.8$)

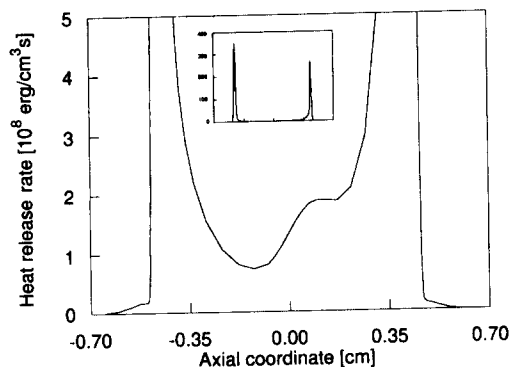


Fig. 5 Profile of heat release rate in triple flame

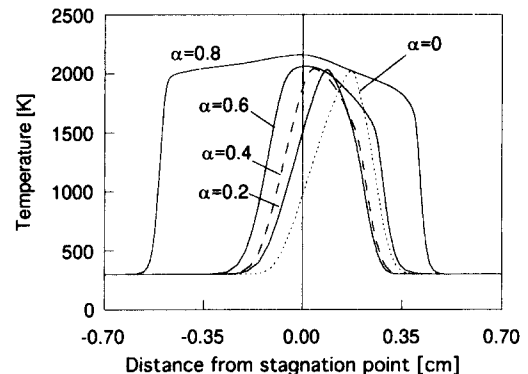


Fig. 6 Variation of temperature profile by variable degree of premixing

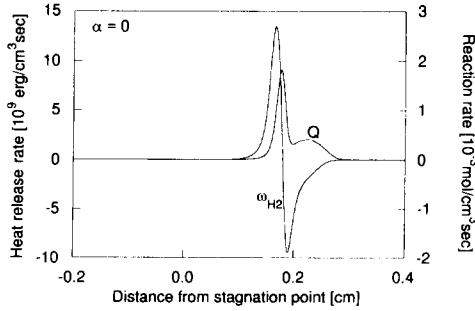


Fig. 7 Heat release rate and H_2 production rate for $\alpha = 0.0$

메탄의 반응 비율 및 질소에 의한 산소의 희석화가 그 원인이다. Fig. 7에 나타나 있는 열 발생률은 확산 화염임에도 불구하고 두 개의 극점을 가지고 있다. 이는 H_2 와 CO의 반응물로부터 알 수 있듯이 좌측은 CH_4 가 H_2 와 CO를 거쳐 산화하면서 열을 방출하는 지역이며, 우측은 주로 메탄의 분해에 생성되어 주위로 확산된 H_2 와 CO가 산화되는 지역이다.

$\alpha=0.2$ 가 되면 온도 분포는 단일 확산 화염에 비하여 정체면 쪽으로 더 이동하게 되는데, 이는 예혼합 화염이 아직 충분한 전과 특성을 가지지 못한 상태에서, 확산 화염일 때 순수 메탄만 공급되던 지역이 공기에 의해 희석된 효과가 나타나기 때문이다. Fig. 8에는 오른쪽의 열 발생률이 뚜렷이 높아져 있는 것으로 나타나 두 개의 화염이 존재하는 것과 같은 형태를 보이고 있으나, H_2 의 반응물로부터 판단하면 확산 화염과 유사한 형태를 띠고 있기 때문에 단일 융합 화염으로 분류하는 것이 적당하다. 희박한 예혼합 화염이 분리된 경우로 볼 수 있는 $\alpha=0.6$ 인 경우인 Fig. 9와 비교해 보면 그 차이가 명확히 나타난다. 즉, $\alpha=0.6$ 의 경우에는 희박 화염 지역에서도 수소의 발생이 일어난 후 소모되는 형태의 반응이 일어나고 있으나, $\alpha=0.2$ 의 경우에는 오른쪽 열 발생 지역에서 그러한 구조를 찾아볼 수 없다. 따라서, $\alpha=0.2$ 의 경우는 희박 예혼합 화염이 분리되지 않은 경우로 보는 것이 타당하다.

한편, $\alpha=0.4$ 인 경우는 희박 예혼합 화염이 점차 나타나고 있지만, 이 화염은 확산 화염에 의해 수동적으로 유지된다. 예혼합 화염의 경우 당량비가 0.5 이하이면 희박 가연 한계 영역에 속하므로 독립적인 전과 특성을 가질 수 없다. $\alpha=0.6$ 에 도달

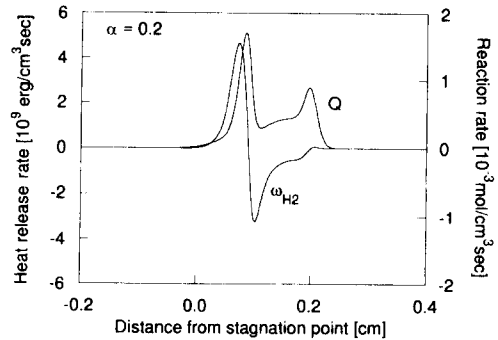


Fig. 8 Heat release rate and H_2 production rate for $\alpha = 0.2$

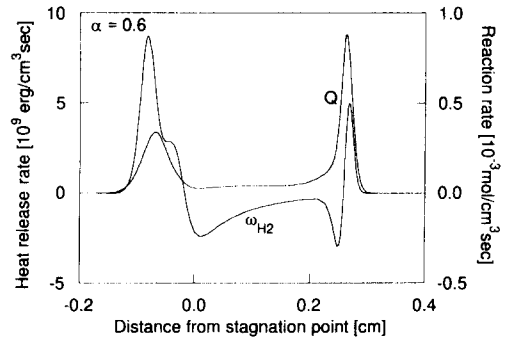


Fig. 9 Heat release rate and H_2 production rate for $\alpha = 0.6$

하면 확산 화염의 위치 변화에 따라 확산 화염에 의존하면서 정체면 쪽으로 함께 이동하던 희박 예혼합 화염이 정체면으로부터 멀어지며, 희박 예혼합 화염의 분리가 일어난다. 한편, 희박 예혼합 화염과는 달리 과농 화염은 아직 확산 화염과 분리가 일어나지 않은 상태이며 확산 화염과 함께 정체면 근처에 머물러 있다.

$\alpha=0.8$ 이 되면 두 예혼합 화염은 모두 확산 화염으로부터 분리되어 완전한 독립적 전과 특성을 가지게 된다. 한편, 확산 화염은 전술한 바와 같이 H_2 및 CO와 O_2 의 확산 화염 형태로 약한 강도를 가지면서 정체면 근처에서 형성된다.

이와 같이, 예혼합 정도의 변화에 따라 화염은 확산 화염에서 단일 융합 화염, 융합 화염과 예혼합 화염을 거쳐 삼중 화염으로 변한다. 더욱 예혼합 정도가 커져 $\alpha=1.0$ 이 되면, 화염은 대칭이 되며, 스트레치를 받는 단일 예혼합 화염으로 분류된다.

4. 결 론

메탄의 회박-과농 농도장에서 나타나는 삼중 화염의 구조와 화염의 천이 특성을 상세 화학 반응을 고려한 수치 해석을 통하여 연구하였다.

삼중 화염은 과농한 메탄 예혼합 화염과 회박한 메탄 예혼합 화염의 사이에 수소와 일산화탄소의 확산 화염이 존재하는 형태를 띠며, 확산 화염의 열 발생률의 최대치는 예혼합 화염에 비하여 매우 작은 값을 가진다.

메탄/공기 화염에서 예혼합 정도가 높아짐에 따라 확산 화염으로부터 회박한 예혼합 화염이 먼저 분리되며, $\alpha=0.8$ 이 되면 세 개의 화염으로 완전히 분리되는 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 1994년도 교육부 학술연구조성비(기계공학 ME94-F-03)의 지원을 받아 수행되었으며 이에 관계자에게 감사드린다.

참고문헌

- (1) Williams, F. A., 1975, "A review of Some Theoretical Consideration of Turbulent Flame Structure," *AGARD Conference Proceedings*, No. 164, AGARD, Paris, pp. II 1-1-25.
- (2) Peters, N., 1986, "Laminar Flamelet Concepts in Turbulent Combustion," *Twenty-first Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 1231~1250.
- (3) Sohrab, S. H., Ye, Z. Y. and Law, C. K., 1984, "An Experimental Investigation on Flame Interaction and the Existence of Negative Flame Speed," *Twentieth Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 1957~1965.
- (4) Chung, S. H., Kim, J. S. and Law, C. K., 1986, "Extinction of Interacting Premixed Flames : Theory and Experimental Comparison," *Twenty-first Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 1845~1851.
- (5) 이충훈, 정석호, 1987, "과농-회박 예혼합 화염의 상호 작용에 관한 연구," *대한기계학회논문집* 제11권 제6호, pp. 991~1000.
- (6) Law, C. K., Zhu, D. L., Li, T. X., Chung, S. H. and Kim, J. S., 1989, "On the Structure and Extinction Dynamics of Partially Premixed Flames : Theory and Experiment," *Combust. Sci. Tech.*, Vol. 64, pp. 199~232.
- (7) Chung, S. H., 1990, "Interaction of Flames," *Handbook of Heat and Mass Transfer*, N. P. Chermisinoff (Ed.), Gulf Publ. Co., Vol. 4, pp. 863~891.
- (8) Lee, S. D. and Chung, S. H., 1994, "On the Structure of Interacting Lean Methane/Air premixed Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 98, pp. 80~92.
- (9) Smooke, M. D., Crump, J., Seshadri, K. and Giovangigli, V., 1990, "Comparison between Experimental Measurements and Numerical Calculation of the Structure of Counterflow, Diluted, Methane-Air, Premixed Flames," *Twenty-Third Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 463~470.
- (10) Smooke, M. D., 1982, "Solution of Burner-Stabilized Premixed Laminar Flames by Boundary Value Methods," *Journal of Computational Physics*, Vol. 48, pp. 72~105.
- (11) Kee, R. J., Miller, J. A., Evans, G. H. and Dixon-Lewis, G., 1988, "A Computational Model of the Structure and Extinction of Strained, Opposed Flow, Premixed Methane-Air Flames," *Twenty-second Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 1479~1494.
- (12) Rogg, B., 1988, "Response and Flamelet Structure of Stretched Premixed Methane-Air Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 73, pp. 45~65.
- (13) Peters, N. and Rogg, B., 1993, *Reduced Kinetic Mechanisms for Applications in Combustion Systems*, Springer-Verlag.