

<論 文>

과농-희박 예혼합화염의 상호작용에 관한 연구

이 충 훈* · 정 석 호**

(1987년 8월 14일 접수)

On the Interaction of Rich-Lean Premixed Flames

C.H. Lee and S.H. Chung

Key Words: Flame Interaction(화염 상호작용), Flame Stretch(화염 스트레치), Premixed Flame(예혼합 화염), Diffusion Flame(확산화염)

Abstract

Existence of triplet flames in a lean-rich concentration field is studied both experimentally and theoretically using large activation energy asymptotic technique adopting counterflow system as a model problem.

Experiment shows that in triplet system of a lean and a rich premixed flame separated by a diffusion flame, either lean or rich premixed flame merges with diffusion flame as stretch is increased, such that transition boundary between 3-flame and 2-flame exists. The region in which 3-flame can exist forms an island within rich-lean concentration fields for large stretch, where as it extends to the line of $(Q_o/Q_r)_r=0$ or $(Q_r/Q_o)_l=0$ for small stretch. Theoretical results show the qualitative agreement with experiment and the existence of limiting stretch over which 3-flame can not exist.

기 호 설 명

A : 식 (20)에 정의됨

a : 상수

B : 충돌빈도인자

b : Y/ϵ

C.F. : Cellular flame

C_p : 정압비열

D : 물질확산계수

Da : Damköhler 수 ($=B\sigma/\kappa$)

D.F. : 확산화염(diffusion flame)

Ea : 활성화 에너지(activation energy)

k : 열전도도

Le : Lewis 수 ($=k/\rho C_p D$)

L.P.F. : 희박예혼합화염(lean premixed flame)

m : 식 (21)에 정의됨

p : 상수

Q : 발열량

R.P.F. : 과농예혼합화염(rich premixed flame)

T : 온도

T_a : 활성화 온도

Y : 질량비

회 략 문 자

α : $T_{\infty} - T_{\infty}$

β : $Y_{o,\infty} - Y_{o,\infty}$, 섭동온도

* 서울대학교 대학원[원 대우중공업(주)]

** 정희원, 서울대학교 공과대학 기계공학과

- γ : $Y_{F-\infty} - Y_{F_0}$
- γ_s : 상수
- δ_0 : 식 (42)에 정의됨
- ε : 작은 매개변수
- η : 상사변수
- θ : 섭동온도
- κ : 화염스트레치 인자
- λ : 식 (24)에 정의됨
- ξ : 식 (17)에 정의됨
- ρ : 밀도
- σ : 당량비에서의 산화제와 연료의 질량비
- ϕ : 경계에서의 Y_F/Y_0
- Ω : 체적비
- ω : 화학반응율

하 첨 자

- E : 천이
- F : 연료
- f : 화염
- i : i 화합종 ($i=O, F$)
- L : 회박(lean)
- O : 산화제
- R : 과농(rich)
- 1 : 회박에 혼합화염
- 2 : 과농에 혼합화염
- 3 : 확산화염
- $\pm\infty$: 경계조건
- +
-

상 첨 자

- in : 내부반응지역
- out : 외부반응지역

1. 서 론

예혼합화염의 상호작용 기구는 전류(upstream) 및 후류상호작용(downstream interaction)으로 나눌 수 있다⁽¹⁾. 전류 상호작용은 두 화염이 서로 접근하는 경우 미연가스지역의 온도 및 농도구배에 의해 상호작용을 일으킨다.

이에 비해 후류상호작용은 기연가스에 의한 상호작용을 의미하는데 미연가스의 농도가 균일한 경우에는 상호작용이 나타나지 않으나 농도장이 층상화(stratification)

된 경우에는 다양한 상호작용이 발생한다. 즉, 농도장의 층상화가 전체적으로 회박하거나, 과농한 경우에는 두화염이 열적상호작용(thermal interaction)을 일으키며, 이 경우 한쪽 화염은 초단열(superadiabatic) 상태에서 상대화염으로부터 열을 공급받고, 다른 화염은 저단열(subadiabatic)상태로 상대화염으로 열손실을 일으킨다.

한편 농도장의 층상화가 과농에서 회박까지 다양하게 존재하는 경우에는 농도적상호작용(concentration interaction)을 일으키며, 이 경우 화염을 통해 회박연료 측에서는 산소가 누출(leakage)되고, 과농연료 측에서는 연료가 누출되어 이 두 예혼합화염 사이에 확산화염이 존재할 수 있고, 경우에 따라 예혼합화염과 확산화염의 특성을 동시에 갖는 hybrid 화염이 존재할 수 있다.

일반적인 연소시스템에서는 대부분 난류상태로 연소가 진행되는데 이때 난류의 소화염(flamelet)들은 유동장이 불균일하여 화염스트레치를 받게 된다. 화염에 미치는 유동장의 영향은 화염스트레치(flame stretch)로 표시되는데⁽²⁻⁴⁾, 이 인자가 예혼합화염에 미치는 영향은 단독화염에 대하여 집합점근전개 방법을 이용하여 널리 연구되어 왔으며⁽⁵⁻⁸⁾, 또한 현상적으로 고찰되었다^(9,10).

화염의 상호작용에 관한 실험적 연구로서 Sohrab등⁽¹¹⁾은 대량류 유동장에서 회박(과농)-회박(과농)의 비균일 농도장을 형성하여, 예혼합화염의 가연한계를 측정하였는데, 이 결과는 예혼합화염이 열적상호작용을 받을 때 단독화염의 가연한계보다 훨씬 넓은 범위에서 연소가 가능함을 보여주었다.

이에 대한 해석적 연구는 집합점근전개방법(matched asymptotic technique)으로 수행되었는데^(11,12) 이 결과는 실험결과와 잘 일치하고 있다. 또한 최근에 부분적 예혼합 확산화염계(partially premixed diffusion system)에 대한 연구도 수행되었다⁽¹³⁻¹⁶⁾.

일반적인 연소시스템의 경우 연료와 산화제는 대부분 당량비 1로 공급되는데 이 때 농도장이 층상화 된 경우에는 과농-회박 연료장이 형성될 수 있으며, 따라서 화염의 농도적 상호작용에 관한 이해가 필요하나 이에 관한 연구는 아직 없는 실정이다. 이에 따라 본 연구에서는 과농-회박 연료장에서 화염들의 상호작용에 관하여 이론적 해석 및 실험적 검증을 통해 연구하였고, 이 중 특히 두 개의 예혼합화염 사이에 확산화염이 형성되어 세 개의 화염이 존재하는 영역을 고찰하였다.

2. 이론적 해석

2.1 지배방정식과 경계조건

대향류 유동장에서 (Fig. 1) 화학반응은 Arrhenius 형태이고, 연료와 산화제에 대하여 각각 1차 반응이며 물리적 성질이 일정하고, 비압축성이고, Lewis 수 $Le=1$ 인 경우 상사해를 가정하면 그 지배 방정식은 다음과 같다. ⁽¹²⁾

$$\frac{d^2 T}{d\eta^2} + \eta \frac{dT}{d\eta} = \omega \quad (1)$$

$$\frac{d^2 Y_i}{d\eta^2} + \eta \frac{dY_i}{d\eta} = -\omega \quad i=O, F \quad (2)$$

$$\omega = -DaY_O Y_F \exp(-Ta/T)$$

여기에서 T 와 Ta 는 발열량 Q 와 비열 C_p 에 의해 정의된 특성온도 Q/C_p 에 의해 무차원화된 온도와 활성화 온도이며, Y_F 는 연료질량비, Y_O 는 산화제의 질량비를 당량비 σ 로 나누어준 값이다. 또 Damköhler 수 Da 는 $B\sigma/\kappa$ 로, B 는 충돌빈도인자 (frequency factor), κ 는 화염스트레치 인자이다.

이 때 경계조건은

$$T = T_\infty, Y_F = Y_{F_\infty}, Y_O = Y_{O_\infty} : \eta \rightarrow \infty \quad (3)$$

$$T = T_{-\infty}, Y_F = Y_{F_{-\infty}}, Y_O = Y_{O_{-\infty}} : \eta \rightarrow -\infty \quad (4)$$

로 표시된다.

경계에서의 화학종농도의 조합에 따라 두 가지의 화염구조가 존재한다. 첫째는 양쪽경계에서 희박연료장 또는 과농연료장을 형성하는 경우 즉, $(Y_{F_\infty}/Y_{O_\infty}-1)$ $(Y_{F_{-\infty}}/Y_{O_{-\infty}}-1) > 0$ 일 때에는 두 개의 예혼합화염이 존재하고, 그사이에 풍부한 화학종만이 존재하는 경우이며, 둘째는 양쪽 경계에서 각각 희박연료장과 과농연료장을 형성하는 경우에 즉, $(Y_{F_\infty}/Y_{O_\infty}-1)(Y_{F_{-\infty}}/Y_{O_{-\infty}}-1) < 0$ 일 때에는 두 개의 예혼합화염과 그 가운데에 확산화염이 형성될 수 있다. 본 해석에서는 후자의 경우로 양 경계에서 각각 과농, 희박 연료장을 형성하는 경우를 해석하였다.

2.2 화염 해석

과농-희박 연료장에서 형성된 확산화염 (Fig. 1)은 $Le=1$ 인 경우 Shvab-Zeldovich 연계함수에 의해 온도와 위치는 $Y_F = Y_O = 0$ 에서 결정되므로, 주어진 경계 조건에서 스트레치의 영향을 받지 않는다. 따라서 양쪽의 예혼합화염은 상대 예혼합화염으로부터 영향을 받지 않고 독립적으로 해석할 수 있다. 즉, 각각의 예혼합화염은 노출출구의 조건 및 확산화염의 조건을 경

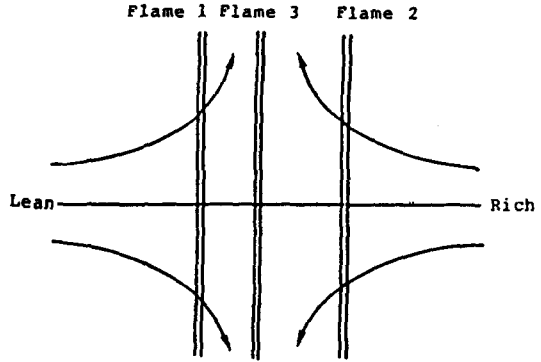


Fig. 1 Schematic of the system analyzed

계조건으로 하여 독립적으로 해석할 수 있다.

(1) 화염면 극한의 해석

희박예혼합 화염의 위치를 η_{f1} , 과농예혼합 화염의 위치를 η_{f2} , 확산화염의 위치를 η_{f3} 라고 하면, 화염면 극한에서 η_{f1} 에서는 연료가 완전히 소모되고, η_{f2} 에서는 산화제가 완전히 소모되고, η_{f3} 에서는 희박예혼합 화염과 과농예혼합화염에서 각각 누출된 산소와 연료가 완전히 소모된다.

이 때

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

$$\beta = Y_{O_{-\infty}} - Y_{O_\infty}$$

$$\gamma = Y_{F_{-\infty}} - Y_{F_\infty}$$

$$x = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\eta/\sqrt{2})$$

로 정의하면 식 (1)과 (2)의 연계함수로부터

$$T + Y_O = T_\infty + Y_{O_\infty} + (\alpha + \beta)x \quad (5)$$

$$T + Y_F = T_\infty + Y_{F_\infty} + (\alpha + \gamma)x \quad (6)$$

을 얻을 수 있는데 이에 따라 온도장과 농도장은 분리되어 식 (5), (6)으로 시스템이 규정된다. 또 반응물의 완전소모 (complete consumption)를 가정하면, 확산화염에서 $Y_F = Y_O = 0$ 이므로

$$x_{f3} = \frac{Y_{F_\infty} - Y_{O_\infty}}{\beta - \gamma} \quad (7)$$

$$T_{f3} = T_\infty + Y_{O_\infty} + (\alpha + \beta)x_{f3} \quad (8)$$

$$= T_\infty + Y_{F_\infty} + (\alpha + \gamma)x_{f3} \quad (9)$$

이다.

희박예혼합화염에서 연료가 완전히 소모 ($Y_{Ff1}=0$)되므로,

$$T_{f1} = T_\infty + Y_{F_\infty} + (\alpha + \gamma)x_{f1} \quad (10)$$

$$Y_{Of1} = Y_{O_\infty} - Y_{F_\infty} + (\beta - \gamma)x_{f1} \quad (11)$$

로 표시되며 과농예혼합화염에서는 산소가 완전히 소모 ($Y_{Of2}=0$)되므로,

$$T_{f2} = T_{\infty} + Y_{O_{\infty}} + (\alpha + \beta)x_{f2} \quad (12)$$

$$Y_{Ff2} = Y_{F_{\infty}} - Y_{O_{\infty}} + (\gamma - \beta)x_{f2} \quad (13)$$

이다.

(2) 예혼합화염의 구조해석

실계의 화학반응은 유한하므로 화염은 면이 아닌 일정한 두께를 갖는다. 이를 고려하여 화염면 극한의 해로부터 섭동을 주어, 확산-대류의 외부 비반응지역과 확산-화학반응의 내부 반응지역을 해석하여 결합시킨다.

외부 비반응지역은 화염면극한의 해로부터 유한반응을 고려하여 경계조건을 만족하도록 섭동시켜

$$T_{1,-}^{out} = T_{\infty} + (T_{f1} - T_{\infty}) \frac{x}{x_{f1}} + \varepsilon_1 a^{-1} \frac{x}{x_{f1}} + O(\varepsilon) \quad (14)$$

$$T_{1,+}^{out} = T_{f3} + (T_{f1} - T_{f3}) \frac{x - x_{f3}}{x_{f1} - x_{f3}} + \varepsilon_1 \left\{ b_1 + (a_1^+ - b_1) \frac{x - x_{f3}}{x_{f1} - x_{f3}} \right\} + O(\varepsilon) \quad (15)$$

으로 하고, 내부반응지역은 화염온도 T_{f1} 을 섭동시켜

$$T_1^{in} = T_{f1} - \varepsilon_1 (\theta_1 + m_1 \xi_1 + p_1) \quad (16)$$

으로 전개하였다.

여기서 $\varepsilon_1 = T_{f1}^2 / T_{\infty}$ 로 정의되고, 하첨자 +, -는 각각 기연 및 미연가스 지역을 의미하며, 내부확장변수 (inner stretched coordinate) ξ_1 는

$$\xi_1 = \frac{A_1}{\varepsilon_1} (x - x_{f1}) + \lambda_1 \quad (17)$$

이다. 이 때 식 (16)을 식 (5)와 (6)에 대입하면

$$Y_{O_1}^{in} = Y_{O_{f1}} + \varepsilon_1 \left\{ \theta_1 + \left(m_1 + \frac{\alpha + \beta}{A_1} \right) \xi_1 + p_1 - \frac{\alpha + \beta}{A_1} \lambda_1 \right\} + O(\varepsilon) \quad (18)$$

$$Y_{F_1}^{in} = \varepsilon_1 \left\{ \theta_1 + \left(m_1 + \frac{\alpha + \gamma}{A_1} \right) \xi_1 + p_1 - \frac{\alpha + \gamma}{A_1} \lambda_1 \right\} + O(\varepsilon) \quad (19)$$

를 얻게 된다.

m_1 과 A_1 은 임의로 조절할 수 있는 변수이므로

$$A_1 = Y_{F_{\infty}} / x_{f1} \quad (20)$$

$$m_1 = - \frac{(\alpha + \gamma)}{A_1} \quad (21)$$

로 정의하면, 결합조건은

$$\theta_1 \rightarrow -m_1 \lambda_1 - p_1 - a_1^+; \xi_1 \rightarrow \infty \quad (22)$$

$$\theta_1 + \xi_1 \rightarrow (1 - m_1) \lambda_1 - p_1 - a_1^-; \xi_1 \rightarrow -\infty \quad (23)$$

의 관계식을 얻을 수 있다.

이 때 Clavin과 Joulin의 closure⁽⁶⁾를 가정하면

$$\lambda_1 = (\theta_1 + \xi_1)(-\infty) - \theta_1(\infty)$$

이다. λ_1 은 임의로 조절할 수 있으므로

$$m_1 \lambda_1 + p_1 = 0 \quad (24)$$

로 놓으면, 식 (18)과 (19)는

$$\frac{Y_{O_1}^{in}}{\varepsilon_1} = \frac{Y_{O_{f1}}}{\varepsilon_1} + \theta_1 + \frac{(\beta - \gamma)}{A_1} (\xi_1 - \lambda_1) \quad (25)$$

$$\frac{Y_{F_1}^{in}}{\varepsilon_1} = \theta_1 \quad (26)$$

이 된다. 이 때 $Y_{O_{f1}}$ 과 $(\beta - \gamma)$ 를 동일한 차수로 가정하고, p_1 은 임의로 조절할 수 있으므로,

$$\frac{2\pi D a_1 \varepsilon_1^2 \exp(\eta_{f1}^2 - p_1 - T_{\infty} / T_{f1})}{A_1^2} = \frac{1}{2} \quad (27)$$

로 놓을 수 있다.

식 (16)과 (25)~(27)을 식 (1)에 대입하면 지배방정식과 경계조건은

$$2 \frac{d^2 \theta_1}{d\xi_1^2} = (\theta_1 + b_1) \theta_1 e^{-(\theta_1 + m_1 \xi_1)} \quad (28)$$

$$\frac{d\theta_1}{d\xi_1} = 0 : \xi_1 \rightarrow \infty \quad (29)$$

$$\frac{d\theta_1}{d\xi_1} = -1 : \xi_1 \rightarrow -\infty \quad (30)$$

이 되며, $b_1 = Y_{O_{f1}} / \varepsilon_1$ 이다.

이 때 식 (28)~(30)을 풀면 주어진 m_1 값에 대한 λ_1 값을 구할 수 있다. λ_1 과 m_1 의 관계는 수치해석결과⁽¹⁷⁾로부터

$$\exp(-m_1 \lambda_1) = \frac{f_1(m_1) f_2(m_1)}{b_1 f_2(m_1) + 2f_1(m_1)} \quad (31)$$

이며, 여기서

$$f_1(m_1) = 0.6307m_1^2 - 1.344m_1 + 1$$

$$f_2(m_1) = -0.56m_1^3 + 2.36m_1^2 - 2.1274m_1 + 1$$

이다.

그러므로 위의 해석을 이용하여 화염 1의 위치를 규정하면 이에 따른 Da_1 을 계산할 수 있다.

화염 2에 대해서도 화염 1의 해석방법을 똑같이 적용할 수 있으며 이에 따라 Da_2 를 계산할 수 있다.

따라서 주어진 경계조건에서 확산화염의 위치가 결정되며 예혼합화염 1의 위치를 규정하고 예혼합화염의 위치 2를 변화시켜 $Da_1 = Da_2$ 가 되도록 조절하여 η_{f2} 를 결정하면 주어진 Da 에서 3화염의 위치를 결정할 수 있다. 그러나 확산화염의 경우 화염면 극한에서 항상 해가 존재하므로 구조해석을 통해 소화조건을 검토하여야 한다.

(3) 확산화염의 구조해석

비반응지역을 전개하여

$$T_{3,-}^{out} = T_{\infty} + Y_{F_{\infty}} + (\alpha + \gamma)x - \varepsilon_3 A_3 (x - x_{f1}) \quad (32)$$

$$T_{3,+}^{out} = T_{\infty} + Y_{O_{\infty}} + (\alpha + \beta)x - \varepsilon_3 B_3 (x - x_{f2}) \quad (33)$$

$$\varepsilon_3 = T_{f2}^2 / T_{\infty}$$

로 하고, 내부전개식을

$$T_3^{i'n} = T_{f3} - \delta_0^{-1/3} (\epsilon_3 \beta_3 + \epsilon_3 \gamma_3 \xi_3 + \dots) \quad (34)$$

$$Y_{f3}^{i'n} = T_\infty + Y_{f\infty} + (\alpha + \gamma)x - T_3^{i'n} \\ = \delta_0^{-1/3} \epsilon_3 (\beta_3 + \xi_3) \quad (35)$$

$$Y_{o3}^{i'n} = T_\infty + Y_{o\infty} + (\alpha + \beta)x - T_3^{i'n} \\ = \delta_0^{-1/3} \epsilon_3 (\beta_3 - \xi_3) \quad (36)$$

로 전개하여, 여기서

$$\xi_3 = \delta_0^{-1/3} (\gamma - \beta) (x - x_{f3}) / 2\epsilon_3 \quad (37)$$

$$1 - \gamma_3 = 2 \frac{\alpha + \gamma}{\gamma - \beta} \quad (38)$$

로 정의한 후, 식 (34)~(38)을 식 (1)에 대입하고, 외부 비반응지역과 내부 반응지역을 접합하면 $\xi_3 \rightarrow \pm\infty$ 에서의 경계조건과 지배방정식은

$$\frac{d^2 \beta_3}{d\xi_3^2} = 8\pi \epsilon_3^3 Da_3 (\gamma - \beta)^{-2} \exp(\eta_{f3}^2 - T_a / T_{f3}) \\ \times \delta_0^{-1} (\beta_3^2 - \xi_3^2) \exp\{-\delta_0^{-1/3} (\beta_3 + \gamma_3 \xi_3)\} \quad (39)$$

$$\beta_3 + \xi_3 = \delta_0^{-1/3} A_3 (x_{f3} - x_{r1}), \quad \xi_3 \rightarrow -\infty \quad (40)$$

$$\beta_3 - \xi_3 = \delta_0^{-1/3} B_3 (x_{f3} - x_{r2}), \quad \xi_3 \rightarrow \infty \quad (41)$$

이다.

이 때

$$\delta_0 = 8\pi \epsilon_3^3 Da_3 (\gamma - \beta)^{-2} \exp(\eta_{f3}^2 - T_a / T_{f3}) \quad (42)$$

로 정의하면

$$\frac{d^2 \beta_3}{d\xi_3^2} = (\beta_3 - \xi_3) (\beta_3 + \xi_3) \exp\{-\delta_0^{-1/3} (\beta_3 + \gamma_3 \xi_3)\} \quad (43)$$

$$\frac{d\beta_3}{d\xi_3} = -1 \quad \xi_3 \rightarrow -\infty \quad (44)$$

$$\frac{d\beta_3}{d\xi_3} = 1 \quad \xi_3 \rightarrow \infty \quad (45)$$

이 되며 이 때 식 (43)~(45)의 해로부터 주어진 γ_3 에 대한 소화 Damköhler 수 δ_{0E} 의 관계식은 다음과 같다.⁽¹⁸⁾

$$\delta_{0E} = e\{(1 - \gamma_3) - (1 - \gamma_3)^2 + 0.26(1 - \gamma_3)^3 \\ + 0.055(1 - \gamma_3)^4\}$$

$$Da_E = \frac{\exp(-\eta_{f3}^2)}{8\pi \epsilon_3^3} (\gamma - \beta)^2 \exp\left(\frac{T_a}{T_{f3}}\right) \delta_{0E}$$

2.3 결과 및 검토

과농-희박 연료장에서 형성된 2개의 예혼합화염과 확산화염의 거동을 탄소수가 적은 alkane 계의 탄화수소와 공기의 혼합기에서 일반적으로 채택되고 있는

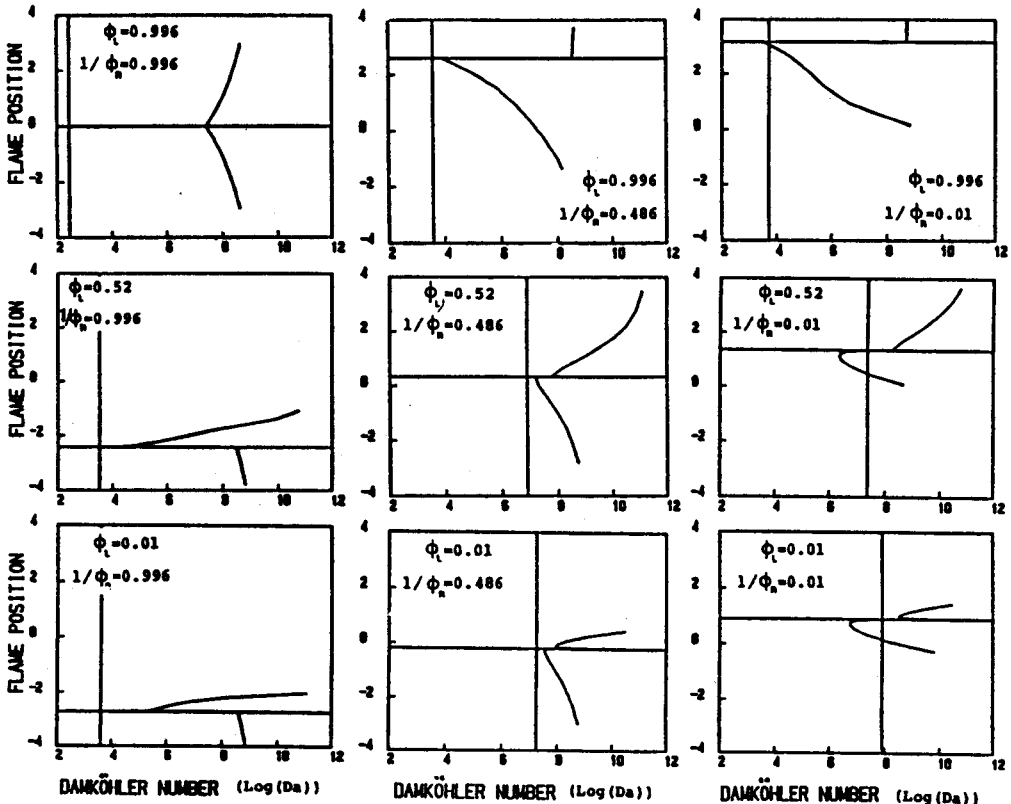


Fig. 2 Damköhler number versus flame position for various concentration fields

$Q=5 \times 10^4 \text{KJ/kg}$, $Ea=46 \text{Kcal/mole}$, $C_p=1.0 \text{KJ/kg} \cdot \text{K}$ 을 이용하여 살펴보았다.

이 3개의 화염의 특성을 파악하기 위해 경계에서의 연료와 산소의 질량비 $\phi=(Y_F/Y_O)$ 를 변화시킬 때 화염위치가 Fig. 2에 표시되어 있다. 여기서 ϕ_L 은 회박 축을, ϕ_R 은 과농축의 질량비이며 각각의 그림에서 가로선은 확산화염의 위치를, 세로선은 확산화염의 소화 Damköhler 수를 표시하며 확산화염의 위쪽의 곡선은 회박에혼합화염, 아래쪽의 곡선은 과농에혼합화염의 위치를 나타낸다.

Damköhler 수가 큰 경우 즉 노즐출구의 유속이 작은 경우 3개의 화염이 존재하며 화염스트레치가 증가하여 Da 가 감소하면 3개의 화염은 서로 근접하게 된다. 이 때 Da 가 더욱 감소하여 임계 Damköhler 수 Da_c 에 도달하면 하나의 예혼합화염이 확산화염과 충돌(merge)하거나, 확산화염과 매우 근접된 상태에서 S-선도의 소화점인 turning point를 갖게 된다. 이 때 $Da < Da_c$ 가 되면 3개의 화염이 천이하여 확산화염과 예혼합화염의 특성이 복합적으로 나타나는 hybrid 화염과 나머지 하나의 예혼합화염을 갖는 두 화염이 형성될 것으로 예측된다. 이러한 경우에는 2개의 화염이 존재하는 새로운 모델이 채택되어야 한다.

전 범위의 (ϕ_L, ϕ_R) 에서 예혼합화염이 소화되어 두 화염으로 천이하는 지역은 $\phi_L \ll 1$, $1/\phi_R \ll 1$ 인 지역에서 나타나는데 이 때 예혼합화염의 위치가 확산화염과 매우 근접해 있다. 실제 3점의 실험결과를 보면 항상

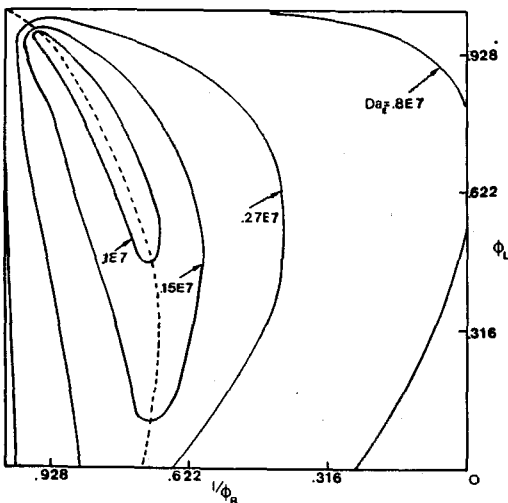


Fig. 3 Effect of flame stretch on the boundary between 3-flame and 2-flame from analysis ($\sigma=3.6$, $Y_{N_2}=75\%$)

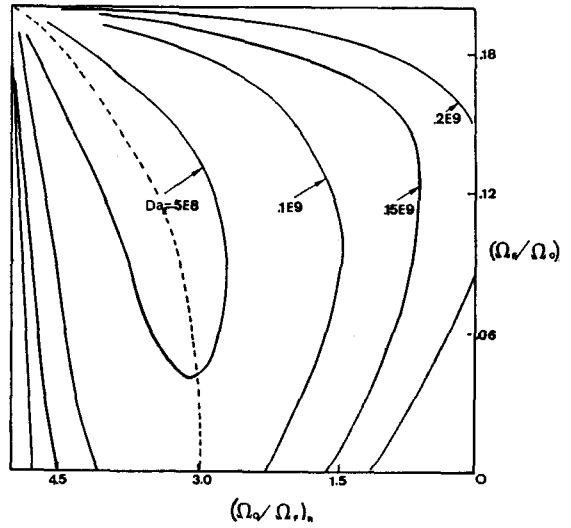


Fig. 4 Effect of flame stretch on the boundary between 3-flame and 2-flame from analysis ($\sigma=3.6$, $\Omega_{N_2}=83\%$)

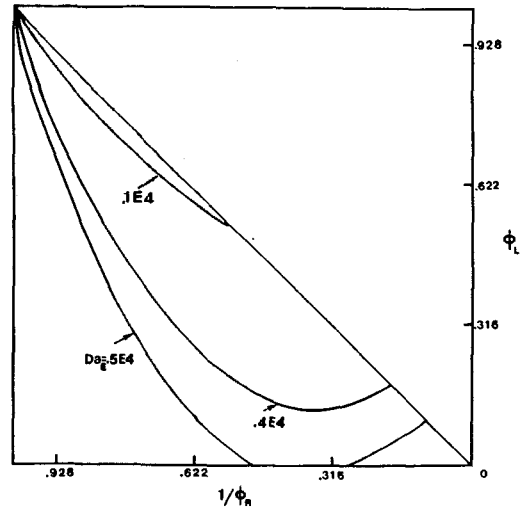


Fig. 5 Effect of flame stretch on the boundary between 3-flame and 2-flame from analysis ($\sigma=1.0$, $Y_{N_2}=75\%$)

충돌(merge)하여 천이함을 보이고 있는데, 이는 두 화염이 매우 근접하여 화염의 특성이 변화하기 때문인 것으로 추측된다.

해석의 결과 S-선도의 전환점(turning point)에서 두 화염이 이미 충분히 근접해 있으므로 화염 특성변화에 따른 새로운 모델을 설정하여 해석하더라도 전환점에 해당하는 Da 로부터 $O(\epsilon)$ 의 오차가 예측되므로 전환점의 Da 를 Da_c 로 취급하였으며 충돌하는 경우에는

충돌시의 Da 를 Da_E 로 설정하였다.

각각의 (ϕ_L, ϕ_R) 에서 Da_E 를 구하여 $\sigma=3.6$ 과 $Y_{N_2}=0.75$ 에 대한 등- Da_E (iso-extinction Damköhler number) 선도가 Fig. 3에 표시되어 있다. 이 때 3개의 화염이 존재하는 영역은 Da 가 작은 경우에는 (ϕ_L, ϕ_R) 상에서 섬 (island) 모양이 되며 Da 가 큰 경우에는 각각 $1/\phi_R=0$ 과 $\phi_L=0$ 까지 확장된다. 실제 $\phi_L=0$ 또는 $1/\phi_R=0$ 이면 두 개의 화염만이 존재할 수 있으나 상기의 그림은 미량의 연료 혹은 산화제가 존재하더라도 3개의 화염이 존재함을 의미하고 있다.

또한 Da_E 의 최소값이 존재하여 이 이상의 스트레치에서는 3개의 화염이 존재할 수 없음을 알 수 있으며 최소값이 $\phi_L \approx 1/\phi_R \approx 1$ 부근에서 나타나는데 이는 주어진 질소의 질량비에서 연료와 산화제가 각각의 노즐출구에서 당량비에 가깝게 공급되어 화염의 강도가 최대가 되기 때문인 것으로 판단된다.

이 그림에서 점선은 두 예혼합화염이 동시에 확산화염에 충돌하는 경우이며 점선의 좌측(우측)에서는 과농(희박) 예혼합화염과 합쳐지는데 따라서 점선부근에서는 3개의 화염에서 직접 1개의 화염으로 천이할 수 있다. 이상의 전연료장에 대한 계산에서 확산화염이 먼저 소화되는 경우는 없었다.

Fig. 4에서는 $\sigma=3.6$, $Q_{N_2}=0.83$ 인 경우에 해석한 결과를 그린 것으로 Fig. 3과 비슷한 경향을 나타내고 있다.

질소의 질량비 $Y_{N_2}=0.75$ 로 고정시키고 $\sigma=1$ 로 계산하였을 때 3화염이 존재하는 영역을 Fig. 5에 나타내었다. 이 경우에는 $\phi_L=1/\phi_R$ 을 중심으로 하여 대칭적으로 나타나고, 이 축에서는 두 개의 화염이 동시에 확산화염에 충돌하였으며 따라서 1개의 화염으로 천이할 수 있다. 특히 $\phi_L=1/\phi_R=0$ 에서는 1개의 확산화염만이 존재하므로 이 부근에는 1개의 화염만이 존재할 수 있는 영역이 가능할 것으로 예측된다.

3. 실험

3.1 실험장치

과농-희박 연료장을 형성하는 대항류 유동장의 실험장치 개략도는 Fig. 6에 나타내었다.

버너는 황동봉을 사용하여 가공하였고, 노즐직경은 38mm이며 노즐 주위에 워터자켓 (water-jacket)을 설치하여 과열을 방지하였으며 워터자켓 바깥에는 내경 97mm, 두께 2mm의 황동판을 접합시켜 그 공간에 비이드 (bead)를 채워 공기중의 산화제의 영향을 제거시

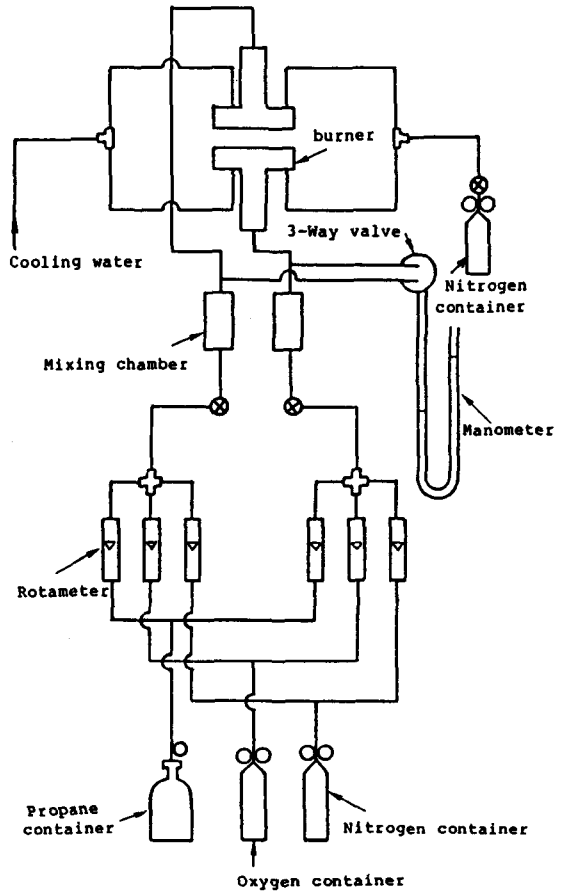


Fig. 6 Schematic diagram of experimental apparatus

켰다. 버너출구에는 두께 3.2mm, 포어사이즈 (pore size) $10\mu\text{m}$ 의 스테인리스강 다공질판을 설치하여 유동을 균일하게 하였는데 버너 출구 유속이 20cm/sec 정도의 범위에서 약 20cmAq의 압력강하가 발생하고 있다. 화염스트레치의 조절을 위해 출구 속도를 6~16 cm/sec 범위에서 변화시켰고, 두 버너간의 거리는 15 mm로 고정했다.

질소, 산소, 연료의 유량측정은 각각 로타미터를 사용하였는데 로타미터의 검증에는 습테스트 가스미터 (wet test gas meter)를 사용하였다. 각각의 기체는 로타미터를 통과한 후, 공급기체의 혼합을 원활하게 하기 위해 혼합실을 거쳐 버너로 유입되었다.

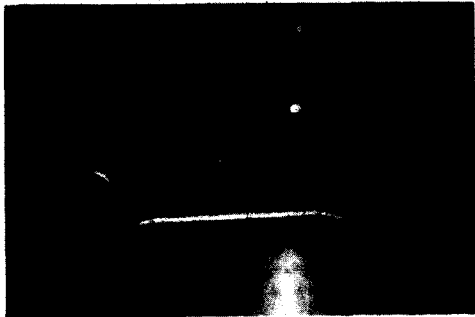
3.2 실험방법

양쪽 버너에 공급되는 질소의 체적비를 83%로 일정하게 유지하고 연료와 산소의 질량비를 변화시키며 일

정한 Damköhler 수에서, 즉, 혼합기의 일정한 출구속도에서 두화염의 경계를 관찰하였다. 이 때 혼합기의 노즐 출구속도가 16.3cm/sec와 6.6cm/sec에 대하여 실험을 수행하였다. 주로 직접 육안관찰을 하였으며 필요한 경우 카세트 미터와 카메라를 이용하였다.

3.3 결과 및 검토

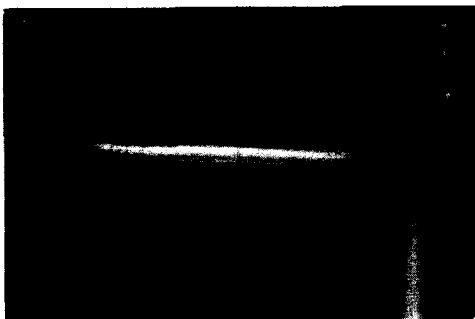
대항류 유동장에서의 화염형태가 Fig. 7에 나타나 있는데 (a)는 회박-회박, (b)와 (c)는 파농-회박 농도



(a) Symmetric double-flames $(Q_r)_v = (Q_r)_L = 2.3\%$



(b) Triple flames $(Q_r)_v = 5.1\%$ $(Q_r)_L = 2.3\%$



(c) The same concentration as case (b) with larger stretch

Fig. 7 Direct photographs of flames

장의 경우이며 (b)는 두 예혼합화염 사이에 확산화염이 존재함을 보이고 있으며, (c)는 스트레치를 증가시켰을 때 확산화염과 하나의 예혼합화염이 충돌하는 것을 보이고 있다.

상부 버너에는 과농혼합기를 공급하고 하부버너에는 희박혼합기를 공급하여 3개의 화염을 만든 다음, 양쪽 노즐출구에서의 농도를 일정하게 유지하면서, 질소량을 증가시켜서 스트레치를 크게 하면 양쪽의 예혼합화염이 가운데 확산화염으로 이동해 가는 것을 알 수 있다. 이 때 확산화염의 위치는 거의 변화하지 않았고 양쪽의 예혼합화염은 확산화염으로부터 열을 받아서 소파되지 않고 가운데 확산화염에 충돌하는 것을 관찰할 수 있었다.

Figs. 8과 9는 $Q_N = 0.83$ 으로 고정하고 연료와 산화제의 체적비를 변화시킬 때 노즐출구속도가 각각 6.6 cm/sec, 16.3cm/sec인 경우의 실험결과로서 화염의 위치를 도식적으로 표시하였다. 각각의 그림에서 R.P.F.는 파농예혼합화염을, L.P.F.는 희박예혼합화염을, D.F.는 확산화염, C.F.는 cellular flame을 나타내며 ||는 burner attached된 화염을 의미한다.

먼저 Fig. 8을 고찰하면, 우측하단에서 화염이 2개의 화염으로 되는 경계는 희박예혼합화염이 확산화염과 충돌함을 알 수 있다. 이 때, 이 지역에서의 경계선을 살펴보면 $(Q_o/Q_r)_R$ 이 감소하면, $(Q_r/Q_o)_L$ 이 증가하고 있다. 이는 동일한 스트레치에서 $(Q_r/Q_o)_L$ 을 고정시키면 희박예혼합화염의 위치는 고정되고, $(Q_o/Q_r)_R$

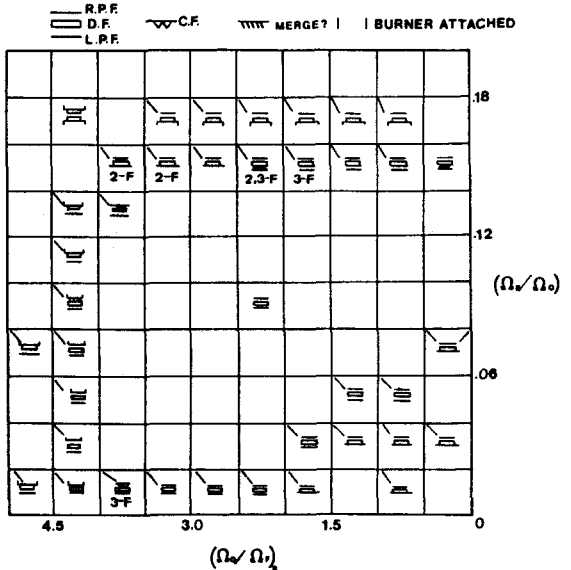


Fig. 8 Flame configurations for propane and oxygen mixtures ($v = 6.6\text{ cm/s}$, $Q_N = 83\%$)

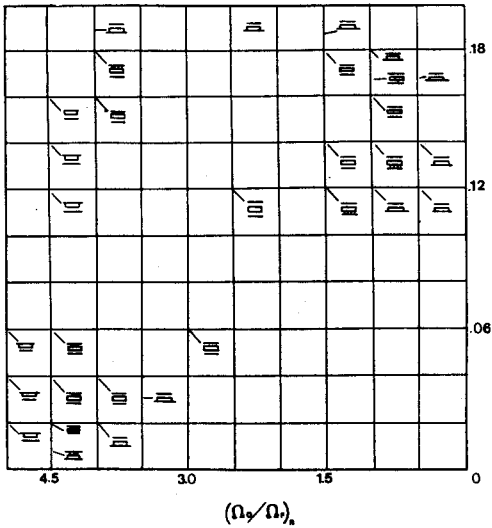


Fig. 9 Flame configurations for propane and oxygen mixtures ($v=16.3\text{cm/s}$, $\Omega_{H_2}=83\%$)

이 커질수록 과농예혼합화염에서 누출되는 연료의 양이 줄어들기 때문이다. 이 그림에서 상부의 3-화염과 2-화염의 경계는 확산화염이 희박예혼합화염에 충돌하여 발생하며 이 경계선은 $(\Omega_o/\Omega_f)_R$ 에 거의 무관하게 $(\Omega_f/\Omega_o)_L$ 이 거의 일정할 때 나타났다. 일정 스트레치에서 확산화염이 희박예혼합화염으로 이동한 이유는 희박 연료장의 농도가 당량비에 접근하면 희박예혼합화염에서 누출되는 산소의 양이 줄어들기 때문이다. 이 지역에서의 경계는 실제로는 $(\Omega_f/\Omega_o)_L$ 이 실험결과보다 더 클 것으로 예측되는데 이는 버너 출구의 유속이 작아 희박예혼합이 버너에 부착되어 열손실이 발생하며 희박예혼합화염이 더 이상 이동하지 않기 때문이다.

그림의 좌측에서의 경계는 확산화염이 과농예혼합화염에 충돌하여 3-화염이 2-화염이 되었으며 이 경계선은 $(\Omega_f/\Omega_o)_L$ 값에 거의 무관하게 $(\Omega_o/\Omega_f)_R$ 값이 거의 일정할 때 나타났다. 이 경우도 상단의 경계와 마찬가지로 $(\Omega_o/\Omega_f)_R$ 의 실험치에 비해 더 증가할 것으로 예측된다. 좌측상단에서는 좌측의 화염특성과 상단의 화염특성이 모두 나타났으며 화염의 거동을 관찰한 결과 양쪽 노즐에서 확산화염과 예혼합화염이 충돌한 형태를 보이고 있다.

Fig. 9는 예혼합화염이 버너출구에 부착하는 것을 방지하고 화염스트레치의 영향을 살펴보기 위해 노즐출구 속도를 16.3cm/sec로 하여 실험한 결과를 나타

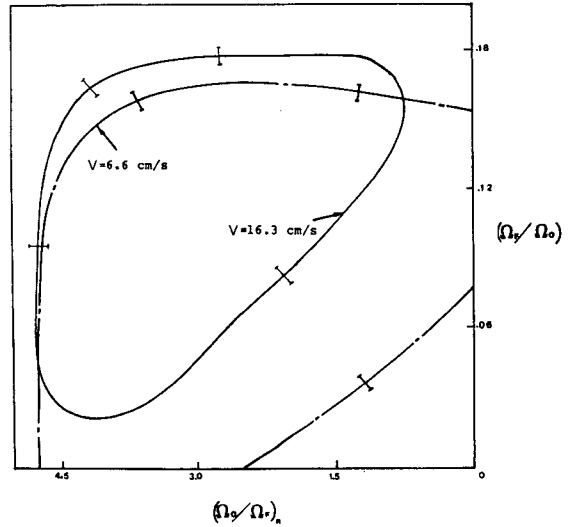


Fig. 10 Boundary between 3-flame and 2-flame from experiment ($v=6.6, 16.3\text{cm/s}$)

내고 있다.

이 결과는 3-화염이 존재하는 영역이 섬모양으로 나타나며 모든 실험조건에서 화염이 버너출구에 부착하지 않았다.

Fig. 8과 9에서 3-화염과 2-화염이 나타난 점들 사이를 미세 조절하여 구한 경계가 Fig. 10에 표시되어 있는데 이 결과는 스트레치를 증가시킬 때 3-화염이 존재하는 영역이 줄어드는 것을 알 수 있으며 스트레치에 따라 섬모양 혹은 $(\Omega_f/\Omega_o)_L=0$ 와 $(\Omega_o/\Omega_f)_R=0$ 까지 영역이 확장됨을 알 수 있다. 좌편과 상단의 작은 스트레치에서의 영역감소는 앞서 말한바와 같이 예혼합화염이 버너출구에 위치해서 더 이상 이동하지 못하여 버너출구의 porous plate로의 열손실에 기인하는 것으로 판단된다.

4. 결 론

과농-희박 농도장에서 화염의 농도적 상호작용기구를, 대항류 유동장을 모델로 하여 접합점근전개방법을 이용한 이론해석과 실험을 통해 연구하였다.

두 예혼합화염과 확산화염은 주어진 농도장에서 스트레치를 증가시키면 하나의 예혼합화염이 확산화염으로 이동하며, 충돌하여 2-화염으로 천이하며 과농-희박 농도장에서 3-화염이 존재하는 영역은 스트레치가 큰 경우에는 섬(island) 모양으로, 작은 경우에는 희박화학종의 농도가 0이 되는 범위까지 확장되며 전체

적으로 더 넓은 범위에서 3-화염이 존재하는데 이는 실험과 이론이 정성적으로 부합됨을 보이고 있다. 또한 이론해석의 결과는 충분히 큰 스트레치에서는 3-화염이 존재할 수 없음을 보이고 있다.

끝으로 과농-희박 예혼합계의 소화는 예혼합화염-부분예혼합 확산화염의 모델을 해석하여야 그 특성을 규명할 수 있을 것으로 예측된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 1986년도 일반연구비의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 표한다.

참 고 문 헌

- (1) S.H. Sohrab, Z.Y. Ye, C.K. Law, 1984, "An Experimental Investigation on Flame Interaction and the Existence of Negative Flame Speeds", 20th Symposium (Int'l) on Combustion, p.1957, Combustion Institute.
- (2) Karlovitz, B., Denniston, D.W., Knapschaefer, D.H., and Wells, F.H., 1953, "Studies on Turbulent Flames", Fourth Symposium (Int'l) on Combustion, pp.613~620, Williams and Wilkins.
- (3) Williams, F.A., 1975, "Analytical and Numerical Methods for Investigation of Flow Fields with Chemical Reactions, Especially Related to Combustion", AGARD Conference Proceedings, No. 164.
- (4) S.H. Chung and C.K. Law, 1984, "An Invariant Derivation of Flame Stretch", Combustion and Flame, Vol. 55, pp.123~125.
- (5) J. Buckmaster, 1978, "The Quenching of a Deflagration Wave held in Front of a Bluff Body", 17th Symposium (Int'l) on Combustion, pp.141~161, Combustion Institute.
- (6) P. Clavin, G. Joulin, 1983, "Premixed Flames in Large Scale and High Intensity Turbulent Flow", J. Physique-Lettres, Vol. 44, pp.1~12.
- (7) P.A. Durbin, 1982, "The Premixed Flame in Uniform Straining Flow", J.F.M., Vol. 121, pp.141~161.
- (8) S.H. Chung, 1985, "A Study of the Effect of Flame Stretch on Flame Speed", Trans. KSME, Vol. 19, No. 2, pp.250~258.
- (9) S.H. Chung, 1985, "Phenomenological Derivation of the Effects of Flame Stretch and Preferential Diffusion on Premixed Flame", Trans. KSME, Vol. 9, No. 5, pp.655~662.
- (10) S.H. Chung, C.K. Law, 1987, "An Integral Analysis of the Structure and Propagation of Stretched Premixed Flames", to Appear in Combust. Flame.
- (11) S.H. Sohrab, Z.Y. Ye, C.K. Law, 1986, "Theory of Interactive Combustion of Counterflow Premixed Flames", Combust. Sci. Tech., Vol. 45, p. 27.
- (12) 정석호, 김종수, 1986, "상호작용을 하는 희박-희박 예혼합화염의 소화특성에 관한 연구", 대한기계학회논문집, 제10권, 제 2 호, pp.232~240.
- (13) A. Hamins, H. Thridandam, K. Seshadri, 1985, "Structure and Extinction of a Counterflow Partially Premixed, Diffusion Flame", Chemical Engineering Science, Vol. 40, No. 11, pp.2027~2038.
- (14) T.X. Li, D.L. Zhu, C.K. Law, 1987, "On the Structure and Extinction of Partially-Premixed Flames", Spring Technical Meeting, WSS/CI, Provo, Utah, April 6~7.
- (15) T.H. Lin, S.H. Sohrab, 1987, "On the Transition of Diffusion to Premixed Flames in Conserved Systems", Combustion and Flame, Vol. 68, No. 1, pp.73~79.
- (16) 김종수, 정석호, 1987, "부분 예혼합-확산계의 소화특성 및 예혼합화염의 Near-stoichiometry 구조에 관한 연구", 대한기계학회논문집 게재예정.
- (17) N. Peters, 1979, "Premixed Burning in Diffusion Flames—The Flame Zone Model of Libby and Economos", Int. J. Heat. Mass. Transfer, Vol. 22, pp.691~703.
- (18) A. Linan, 1974, "The Asymptotic Structure of Counterflow Diffusion Flames for Large Activation Energies", Acta Astronautica, Vol. 1, pp.1007~1039.