

# 기연가스의 혼합이 상호작용을 하는 예혼합화염의 소화특성에 미치는 영향에 관한 연구

## Effect of Burnt Gas Mixing on the Extinction of Interacting Flames Premixed

임 홍 근\*    정 석 호\*\*  
H. G. Im,    S. H. Chung

### ABSTRACT

The effects of burnt gas mixing, which can be caused by turbulent eddy mixing, on the interaction and extinction characteristics of premixed flames are analyzed using large activation energy asymptotics adopting counterflow as a model problem. The results show that the burnt gas mixing, preferential diffusion and heat loss affect the fuel consumption rate, flame temperature and the oxidizer concentration at the flame which influence the flame behavior and the extinction characteristics.

### 기 호 설 명

- $A$  : 화염면에서의 연료소비율, 식(16) 참조
- $a$  : 상수
- $B$  : 충돌빈도인자(1/sec)
- $b$  : 상수
- $c$  : 기연가스 혼합률
- $c_p$  : 정압 비열
- $D$  : 물질 확산 계수
- $Da$  : Damkohler 수(=  $B\sigma/\kappa$ )
- $G$  : 식(7)에서 정의된 함수
- $k$  : 열전도율
- $Le$  : Lewis 수(=  $k/\rho c_p D$ )
- $m$  : 식(17) 참조
- $Q$  : 연료의 발열량(kJ/kg fuel)

- $r$  : 기연가스의 에너지 보존율(=  $(T_f - T_a)/cY_{F,u}$ )
- $T$  : 무차원 온도
- $T_a$  : 무차원 활성화 온도
- $T_{ad}$  : 단열화염 온도
- $Y$  : 화학종의 질량비  
[희랍문자]
- $\alpha$  : 상수
- $\beta$  : 섭동된 연료의 질량비
- $\epsilon$  : 작은 매개변수(=  $T_f^2/T_a$ )
- $\eta$  : 상사 변수
- $\theta$  : 섭동된 온도
- $\kappa$  : 화염 스트레치 인자
- $\lambda$  : 상수
- $\xi$  : 내부 확장 변수, 식(15)에서 정의됨.

\* 서울대학교 대학원

\*\* 정회원, 서울대학교 기계공학과

- $\rho$  : 밀도  
 $\sigma$  : 이론당량비(stoichiometric oxidizer to fuel mass ratio)  
 $\omega$  : 화학반응률  
 [하첨자]  
 E : 소화 상태  
 F : 연료  
 f : 화염  
 i : 화학종(i = O, F)  
 j : 화염 위치(j = 1, 2)  
 O : 산화제  
 u : 미연 상태( $c = 0$ )  
 in : 내부 반응 지역  
 out : 외부 비반응 지역  
 $\infty$  : 경계조건( $\eta \rightarrow +\infty$ )  
 $-\infty$  : 경계조건( $\eta \rightarrow -\infty$ )  
 I :  $-\infty < \eta < \eta_{f1}$  지역  
 II :  $\eta_{f1} < \eta < \eta_{f2}$  지역  
 III :  $\eta_{f2} < \eta < \infty$  지역  
 [상첨자]  
 o : 화염면극한해  
 + : 후류 기연가스 지역  
 - : 전류 미연가스 지역

## 1. 서 론

대부분의 연소 시스템에서는 난류상태로 연소가 진행되는데 이러한 난류 화염의 형태는 난류의 스케일(turbulent scale)에 따라 변화하게 된다. 이때 난류 스케일이 커서 최소 에디의 스케일(Kolmogorov scale)이 화염두께보다 큰 경우에는 유동장의 난류성분은 단지 화염을 굴곡시키는(flame wrinkling) 작용만을 하게 된다. 일반적인 난류 연소 상태는 이러한 특성을 갖는 것으로 알려져 있는데<sup>1)</sup>, 이 경우 예혼합화염은 매우 근접된 상태의 층류 소화염의 집합체(ensemble of laminar flamelets)로 예측되며 이에 따라 화염과 화염의 상호작용(flame-flame interaction)이 나타난다. 또한 난류 유동장에서의 에디 거동(eddy motion)은 비균일 유동장(nonuniform

flow field)을 형성시키며, 이에 따라 화염 스트레치(flame stretch)로서 특성지어지는<sup>2)</sup> 유동장과 화염의 상호작용(flow field-flame interaction)이 발생하게 된다.

난류 예혼합화염에서의 소화염은 전파되는 화염면의 곡률 또는 접선 유동장의 비균일성에 기인한 화염 스트레치가 증가하면 특성 유동시간이 짧아져서 이 시간동안 화학반응이 충분히 진행되지 못함에 따라 화염이 소화된다.<sup>2)</sup> 이 경우 누출된 미연가스는 난류 에디의 혼합(turbulent eddy mixing)에 의하여 주위의 기연가스와 혼합되는데, 이러한 혼합의 개념은 age theory<sup>3)</sup>, coalescence/dispersion model<sup>4)</sup> 그리고 내연기관에서의 배기가스 재순환(exhaust gas recirculation) 혹은 잔류가스(residual gas)와 신기의 혼합 등과 연관될 수 있다.

이와 같이 스트레치를 받는 상태에서 기연가스와 부분적으로 혼합되어 강도가 서로 달라진 두 혼합기가 소화염을 형성하는 경우, 이 화염들간의 상호작용에 의하여 단독화염과는 상이한 연소 특성이 나타나게 된다. 따라서 이러한 난류 예혼합화염의 모델링을 위해서는 스트레치를 받는 유동장내에서 반응물과 기연가스의 혼합을 고려한 화염 상호작용 특성이 규명되어야 한다.

화염의 상호작용에 관한 연구로는 미연 연료장에서 농도장이 층상화된 예혼합화염의 상호작용에 대한 연구가 수행되었으며<sup>5-8)</sup>, 반응물(reactant)과 생성물(product)간의 상호작용에 따른 화염의 특성에 관한 연구도 수행된 바 있다.<sup>9-11)</sup> 그러나 공급되는 초기 농도장이 균일한 경우라도 기연가스와 혼합 정도에 따라 강도가 다르게 형성된 난류 소화염들은 열적 상호작용을 하게 되어 상이한 연소특성을 나타낼 수 있다.

따라서 본 연구에서는 초기 균일 농도장에서 기연가스의 혼합에 의한 예혼합화염의 특성을 규명하기 위한 모델링으로, 대향류 유동장에서 상호 작용을 하는 두 예혼합 화염에 대한 기연가스의 혼합률, 확산선호도 및 열손

실의 영향을 파악하기 위하여 활성화 에너지가 큰 경우의 접합 접근 전개방법(matched asymptotic expansion technique)을 이용하여 해석하였다.

## 2. 해 석

### 2.1 지배방정식과 경계조건

초기 상태의 미연 농도 및 온도가 동일하던 두 공급기가 대향류 유동장을 형성하는 시스템에서(Fig. 1) 화학반응은 Arrhenius 형태이고 총체 1단계 반응이며, 물리적 성질이 일정하고 Prandtl수가 1이며, 유동장은 비압축성인 경우에 상사변수를 도입하면 지배방정식은<sup>12)</sup>

$$\frac{d^2 T}{d\eta^2} + \eta \frac{dT}{d\eta} = \omega$$

$$\frac{1}{Le_i} \frac{d^2 Y_i}{d\eta^2} + \eta \frac{dY_i}{d\eta} = -\omega, \quad i=O, F \quad (1)$$

$$\omega = -Da Y_O Y_F \exp(-T_a/T)$$

$$Da = B\sigma/\kappa \quad (2)$$

이다. 여기서 온도  $T$ 는 발열량  $Q$ 와 비열  $c_p$ 에 의해 정의된 특성온도  $Q/c_p$ 로써 무차원화 되었으며 활성화온도  $T_a = (E_a/R)/(Q/c_p)$ ,  $E_a$ 는 활성화에너지,  $R$ 은 일반기체상수이고,  $Y_F$ 는 연료의 질량비,  $Y_O$ 는 산화제의 질량비를 산화제와 연료의 이론당량비(stoichiometric ratio)  $\sigma$ 로써 나누어준 값이다.  $i$ -화학종의 Lewis 수  $Le_i = k/\rho c_p D_i$ 이며  $k$ 는 열전도율,  $\rho$

는 밀도,  $D_i$ 는  $i$ -화학종의 물질확산계수이고, Damkohler수  $Da = B\sigma/\kappa$ ,  $B$ 는 충돌빈도인자,  $\kappa$ 는 스트레치인자이다.

초기 미연상태의 온도 및 농도가 각각  $T_u, Y_{F,u}, Y_{O,u}$ 이고, 기연가스와 혼합된 비율, 즉 혼합률을 각각  $c_{-\infty}, c_{\infty}$ 라 정의하며 화염온도  $T_f$ 에 의한 현열(sensible enthalpy) 증가에 대한 화학적 에너지의 비, 즉 기연가스의 에너지 보존율을  $r \equiv (T_f - T_u)/c Y_{F,u}$ 이라 정의하고,  $Y_F$ 를 회박화학종으로 취급하면 경계조건은 다음과 같다.

$$T_{-\infty} = T_u + r c_{-\infty} Y_{F,u}$$

$$Y_{F,-\infty} = Y_{F,u} (1 - c_{-\infty})$$

$$Y_{O,-\infty} = Y_{O,u} - c_{-\infty} Y_{F,u}; \quad \eta \rightarrow -\infty \quad (3)$$

$$T_{\infty} = T_u + r c_{\infty} Y_{F,u}$$

$$Y_{F,\infty} = Y_{F,u} (1 - c_{\infty})$$

$$Y_{O,\infty} = Y_{O,u} - c_{\infty} Y_{F,u}; \quad \eta \rightarrow \infty$$

여기서  $c=0$ 이면 초기 미연상태를,  $c=1$ 이면 순수 기연가스를 의미하며, 또한  $r=1$ 이면 전체 시스템이 단열된 경우이고  $r < 1 (> 1)$ 이면 기연가스가 열손실(이득)을 받는 경우이다.

### 2.2 화염면극한의 해

활성화온도가 큰 경우 화학반응은 최대온도 부근에 국한되므로 먼저 화염면극한으로 무한반응률의 해를 구한 후 섭동시켜 유한반응률의 영향을 고려한다.

화염  $j$  ( $j=1, 2$ )의 위치  $\eta_{fj}$ 에서의 화염온도 및 산화제의 농도를 각각  $T_{fj}, Y_{O,fj}$ 라 하면 화염면극한의 해는

$$I \text{ 지역; } -\infty < \eta < \eta_{f1}$$

$$T_I^0 = T_{-\infty} + (T_{f1} - T_{-\infty}) G_I(\eta; 1)$$

$$Y_{F,I}^0 = Y_{F,-\infty} - Y_{F,-\infty} G_I(\eta; Le_F)$$

$$Y_{O,I}^0 = Y_{O,-\infty} + (Y_{O,f1} - Y_{O,-\infty}) G_I(\eta; Le_O) \quad (4)$$

$$II \text{ 지역; } \eta_{f1} < \eta < \eta_{f2}$$

$$T_{II}^0 = T_{f1} + (T_{f2} - T_{f1}) G_{II}(\eta; 1)$$

$$Y_{F,II}^0 = 0$$

$$Y_{O,II}^0 = Y_{O,f1} + (Y_{O,f2} - Y_{O,f1}) G_{II}(\eta; Le_O) \quad (5)$$

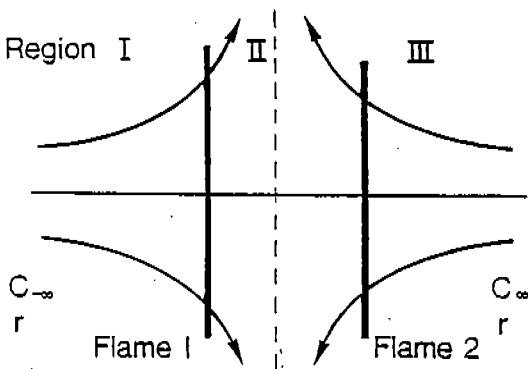


Fig. 1 Schematic of the system analyzed

$$\begin{aligned}
 & \text{III 지역 ; } \eta_{f2} < \eta < \infty \\
 & T_{\text{III}}^0 = T_{\infty} + (T_{f2} - T_{\infty}) G_{\text{III}}(\eta : 1) \\
 & Y_{F, \text{III}}^0 = Y_{F, \infty} - Y_{F, \infty} G_{\text{III}}(\eta : Le_F) \\
 & Y_{O, \text{III}}^0 = Y_{O, \infty} + (Y_{O, f2} - Y_{O, \infty}) G_{\text{III}}(\eta : Le_O)
 \end{aligned} \tag{6}$$

이 되며, 여기에서

$$\begin{aligned}
 G_I(\eta : Le_i) &= \int_{-\infty}^{\eta} e^{-Le_i s^{2/2}} ds / \int_{-\infty}^{\eta_{f1}} e^{-Le_i s^{2/2}} ds \\
 G_{II}(\eta : Le_i) &= \int_{\eta_{f1}}^{\eta} e^{-Le_i s^{2/2}} ds / \int_{\eta_{f1}}^{\eta_{f2}} e^{-Le_i s^{2/2}} ds \\
 G_{III}(\eta : Le_i) &= \int_{\infty}^{\eta} e^{-Le_i s^{2/2}} ds / \int_{\infty}^{\eta_{f2}} e^{-Le_i s^{2/2}} ds
 \end{aligned} \tag{7}$$

이다.

식(4)~(6)에 화염면에서의 점프조건(jump condition)<sup>13)</sup>을 적용하면

$$\begin{aligned}
 (T_{f1} - T_{\infty}) G'_I(\eta_{f1} : 1) - \frac{Y_{F, \infty}}{Le_F} G'_I(\eta_{f1} : Le_F) \\
 = (T_{f2} - T_{f1}) G'_{II}(\eta_{f1} : 1)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 (T_{f2} - T_{f1}) G'_{II}(\eta_{f2} : 1) = (T_{f2} - T_{\infty}) G'_{III}(\eta_{f2} : 1) \\
 - \frac{Y_{F, \infty}}{Le_F} G'_{III}(\eta_{f2} : Le_F)
 \end{aligned} \tag{8}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{Y_{F, \infty}}{Le_F} G'_I(\eta_{f1} : Le_F) + \frac{Y_{O, f1} - Y_{O, \infty}}{Le_O} G'_I(\eta_{f1} : Le_O) \\
 = \frac{Y_{O, f2} - Y_{O, f1}}{Le_O} G'_{II}(\eta_{f1} : Le_O) \\
 \frac{Y_{O, f2} - Y_{O, \infty}}{Le_O} G'_{III}(\eta_{f2} : Le_O) + \frac{Y_{F, \infty}}{Le_F} G'_{III}(\eta_{f2} : Le_F) \\
 = \frac{Y_{O, f2} - Y_{O, f1}}{Le_O} G'_{II}(\eta_{f2} : Le_O)
 \end{aligned} \tag{9}$$

이 되며 여기서 ' ≡ d/dη 이다.

식(8), (9)를 이용하면 주어진 η<sub>fj</sub>에 대한 T<sub>fj</sub>, Y<sub>O, fj</sub>를 구할 수 있는데, 이때 각 화염의 위치 η<sub>fj</sub>는 특성치(eigenvalue)로 존재하므로 이를 결정하기 위하여는 화염 구조의 해석이 필요하다.

### 2.3 화염 구조의 해석

유한반응률을 고려하면 화염은 면이 아닌

유한한 두께를 가지므로, 화염면극한의 해로부터 섭동을 주어 확산-대류가 지배하는 외부 비반응지역과 확산-반응이 지배하는 내부 반응지역에 대해 각각 전개하여 접합시킨다.

외부 비반응지역의 전개식은 화염 1에 대하여

$$\begin{aligned}
 T_{1, \text{out}}^- &= T_I^0 + \epsilon_1 a_1 G_I(\eta : 1) + o(\epsilon_1) \\
 T_{1, \text{out}}^+ &= T_{II}^0 + \epsilon_1 [a_1 + (a_2 \epsilon_2 / \epsilon_1 - a_1) \\
 & \quad \times G_{II}(\eta : 1)] + o(\epsilon_1) \\
 Y_{F1, \text{out}}^- &= Y_{F, I}^0 + \epsilon_1 b_1 G_I(\eta : Le_F) + o(\epsilon_1) \\
 Y_{F1, \text{out}}^+ &= \epsilon_1 [b_1 + (b_2 \epsilon_2 / \epsilon_1 - b_1) \\
 & \quad \times G_{II}(\eta : Le_F)] + o(\epsilon_1)
 \end{aligned} \tag{10}$$

이며, 화염 2에 대하여

$$\begin{aligned}
 T_{2, \text{out}}^- &= T_{III}^0 + \epsilon_2 a_2 G_{III}(\eta : 1) + o(\epsilon_2) \\
 T_{2, \text{out}}^+ &= T_{II}^0 + \epsilon_2 [a_1 \epsilon_1 / \epsilon_2 + (a_2 - a_1 \epsilon_1 / \epsilon_2) \\
 & \quad \times G_{II}(\eta : 1)] + o(\epsilon_2) \\
 Y_{F2, \text{out}}^- &= Y_{F, III}^0 + \epsilon_2 b_2 G_{III}(\eta : Le_F) + o(\epsilon_2) \\
 Y_{F2, \text{out}}^+ &= \epsilon_2 [b_1 \epsilon_1 / \epsilon_2 + (b_2 - b_1 \epsilon_1 / \epsilon_2) \\
 & \quad \times G_{II}(\eta : Le_F)] + o(\epsilon_2)
 \end{aligned} \tag{11}$$

이다. 여기서 상첨자 -와 +는 각각 화염의 전류(미연 지역)와 후류(기연 지역)를 나타내며, 작은 매개변수(small parameter) ε<sub>j</sub> = T<sub>fj</sub><sup>2</sup>/T<sub>a</sub> 이고, Clavin과 Joulin의 closure<sup>14)</sup>인 T<sub>j, out</sub><sup>-</sup>(η<sub>fj</sub>) = T<sub>j, out</sub><sup>+</sup>(η<sub>fj</sub>)을 이용하였다.

위의 1차 전개식에 대하여 점프조건을 적용하면

$$\begin{aligned}
 a_1 G'_I(\eta_{f1} : 1) + \frac{b_1}{Le_F} G'_I(\eta_{f1} : Le_F) \\
 + (a_1 - a_2 \epsilon_2 / \epsilon_1) G'_{II}(\eta_{f1} : 1) \\
 + (b_1 - b_2 \epsilon_2 / \epsilon_1) G'_{II}(\eta_{f1} : Le_F) / Le_F = 0
 \end{aligned} \tag{12}$$

$$\begin{aligned}
 a_2 G'_{III}(\eta_{f2} : 1) + \frac{b_2}{Le_F} G'_{III}(\eta_{f2} : Le_F) \\
 + (a_1 \epsilon_1 / \epsilon_2 - a_2) G'_{II}(\eta_{f2} : 1) \\
 + (b_1 \epsilon_1 / \epsilon_2 - b_2) G'_{II}(\eta_{f2} : Le_F) / Le_F = 0
 \end{aligned} \tag{13}$$

을 얻을 수 있다.

화염 j(j=1, 2)에서의 내부 반응지역의 전개식을

$$\begin{aligned} T_{j, in} &= T_{fj} - \epsilon_j \{ \theta_j(\xi_j) + m_j \xi_j + \alpha_j \} + o(\epsilon_j) \\ Y_{Fj, in} &= \epsilon_j \beta_j(\xi_j) + o(\epsilon_j) \\ Y_{Oj, in} &= Y_{O, fj} + O(\epsilon_j) \end{aligned} \quad (14)$$

으로 하고,  $\xi_j, A_j, m_j$  를 각각

$$\begin{aligned} \xi_1 &= A_1(\eta - \eta_{f1}) / \epsilon_1 + \lambda_1 \\ \xi_2 &= A_2(\eta_{f2} - \eta) / \epsilon_2 + \lambda_2 \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} A_1 &= (Y_{F, \infty} / Le_F) G_I(\eta_{f1} : Le_F) \\ A_2 &= -(Y_{F, \infty} / Le_F) G_{II}(\eta_{f2} : Le_F) \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} m_1 &= -(T_{f2} - T_{f1}) G_{II}(\eta_{f1} : 1) / A_1 \\ m_2 &= (T_{f2} - T_{f1}) G_{II}(\eta_{f2} : 1) / A_2 \end{aligned} \quad (17)$$

으로 정의하여, 식(14)를 식(1)에 대입하면  $\epsilon$ -차수에서의 내부 지배방정식과 국소 Shvab-Zeldovich 연계 함수는

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \theta_j}{d\xi_j^2} &= Da_j \left( \frac{\epsilon_j}{A_j} \right)^2 Y_{O, fj} \beta_j \exp(-T_a / T_{fj}) \\ &\times \exp(-\alpha_j) \exp[-(\theta_j + m_j \xi_j)] \end{aligned} \quad (18)$$

$$\frac{d^2}{d\xi_j^2} \left( \theta_j - \frac{\beta_j}{Le_F} \right) = 0 \quad (19)$$

이다. 따라서

$$\theta_j - \frac{\beta_j}{Le_F} = p_j \xi_j + q_j \quad (20)$$

이며, 상수  $p_j$  와  $q_j$  는 내부 전개식과 외부 전개식의 접합 조건으로부터 구할 수 있다.

외부 전개식을  $\eta = \eta_{fj}$  에 대해 전개하여 내부 확장변수  $\xi_j$  로 치환한 후  $\xi_j \rightarrow \pm\infty$  에 대해 내부 전개식과 접합하면

$$\theta_j \rightarrow \begin{cases} -\xi_j + (1 - m_j) \lambda_j - a_j - \alpha_j & ; \xi_j \rightarrow -\infty \\ -m_j \lambda_j - a_j - \alpha_j & ; \xi_j \rightarrow \infty \end{cases} \quad (21)$$

$$\beta_j \rightarrow \begin{cases} -Le_F(\xi_j - \lambda_j) + b_j & ; \xi_j \rightarrow -\infty \\ b_j & ; \xi_j \rightarrow \infty \end{cases} \quad (22)$$

이다. 이를 이용하여  $p_j$  와  $q_j$  를 결정함으로써 식(18)을  $\theta_j$  와  $\xi_j$  만으로 표현할 수 있다. 한편  $\alpha_j$  와  $\lambda_j$  는 임의로 취할 수 있는 상수이므로

$$\begin{aligned} Le_F Da_j \left( \frac{\epsilon_j}{A_j} \right)^2 Y_{O, fj} \exp(-T_a / T_{fj}) \\ \times \exp(-\alpha_j) = \frac{1}{2} \end{aligned} \quad (23)$$

$$m_j \lambda_j + a_j + \alpha_j + b_j / Le_F = 0 \quad (24)$$

으로 하면, 내부 지배방정식과 경계조건은 다음과 같다.

$$2 \frac{d^2 \theta_j}{d\xi_j^2} = \theta_j \exp[-(\theta_j + m_j \xi_j)] \quad (25)$$

$$\frac{d\theta_j}{d\xi_j} \rightarrow -1 ; \xi_j \rightarrow -\infty$$

$$\frac{d\theta_j}{d\xi_j} \rightarrow 0 ; \xi_j \rightarrow \infty \quad (26)$$

식(25), (26)에서 주어진  $m_j$  에 대하여 수치해를 구하면, 그 결과<sup>15)</sup>는

$$\theta_j(\infty) = \begin{cases} 0.000246 p^4 - 0.01001 p^3 + 0.1545 p^2 \\ -0.62026 p + 0.72168 ; 0.15 < m_j < 0.5 \\ 0 & ; m_j < 0.15 \end{cases} \quad (27)$$

$$p = 1 / (0.5 - m_j) \quad (28)$$

$$(\theta_j + \xi_j)(-\infty) = \begin{cases} 1.344 - 4 m_j(1 - m_j) / (1 - 2 m_j) \\ + 3 m_j^2 - \ln(1 - 4 m_j^2) / m_j \\ & ; 0.1 < m_j < 0.5 \\ -\ln(0.6307 m_j^2 - 1.344 m_j \\ + 1) / m_j & ; m_j < 0.1 \end{cases} \quad (29)$$

와 같다. 이로부터 식(21)에서  $\alpha_j, a_j$  는

$$\begin{aligned} \theta_j(\infty) &= -m_j \lambda_j - a_j - \alpha_j \\ (\theta_j + \xi_j)(-\infty) &= (1 - m_j) \lambda_j - a_j - \alpha_j \end{aligned} \quad (30)$$

와 같이 규정되며 따라서 화염의 위치가 결정된다. 이때 동일한 스트레치에서의 특성을 알기 위하여 주어진  $\eta_{f1}$  으로부터  $\eta_{f2}$  를 조절하여  $Da_1 = Da_2 = Da$  가 되게 하면 두 화염의 특성을 파악할 수 있다.

### 3. 결과 및 검토

발열량, 활성화에너지 및 비열 등은 탄소수가 적은 alkane 계의 탄화수소와 공기의 혼합기에서 일반적으로 채택하는 값인  $Q = 5.0 \times 10^4$  kJ/kg fuel,  $E_a = 46$  kcal/mole,  $c_p = 1.0$  kJ/kg·K를 사용하였고  $Y_{F, u} = 0.03, Y_{O, u} =$

0.05로서 초기당량비  $\phi = Y_{F,u}/Y_{O,u} = 0.6$ 인 회박 연료장에 대한 화염의 특성을 고찰하였다. 먼저  $r=1$ 로서 시스템 전체가 단열된 경우에 대한 전반적인 특성을 파악하였고, 이후 기연가스의 열손실이 소화특성에 미치는 영향을 살펴보았다.

3.1  $r=1$ (단열)인 경우

Damkohler수의 변화에 따른 화염 위치의 특성을 전형적인 몇 가지 경우에 대하여 도시하면 Fig.2와 같은데  $(c_{-\infty}, c_{\infty})$ 의 조합 및  $Le_F$ 에 따라 화염위치는 대칭 혹은 비대칭성을 보여준다.

이러한 화염의 소화 특성은 Damkohler 수가 감소, 즉 스트레치가 증가함에 따라 두 가지 상이한 특성을 보여주는데, 두 화염이 떨어진 상태로 소화되는 약한 상호작용기구의 S-곡선 소화와, 두 화염이 충돌(merge)하여 소화되는 강한 상호작용기구의 충돌 소화로 대별할 수 있다(각각 S와 M으로 표시).<sup>7)</sup> 이는 확산선호도에 의해 크게 영향을 받는데,  $Le_F \leq 1$ 인 경우는 대부분 충돌 소화를 나타내고  $Le_F > 1$ 일 때는 대부분 S-곡선 소화를 나타낸다. 이러한 결과는 단일 예혼합화염의 해

석<sup>16,17)</sup>을 통하여 예측된 바 있다. 이에 따라 소화 Damkohler수  $Da_E$ 는 Fig.2에 나타난 바와 같이 주어진  $(c_{-\infty}, c_{\infty})$  및  $Le_F$ 에 대하여 S-곡선 소화의 경우에는 전환점(turning point)에서, 충돌 소화인 경우는 두 화염의 위치가 동일한 점에서의  $Da$  값으로 정의할 수 있다.<sup>6,7)</sup>

화염의 소화에 미치는 기연가스 혼합물의 영향을 파악하기 위해  $c_{-\infty} = c_{\infty}$ 의 대칭혼합인 경우와  $c_{-\infty} = 0$ 의 비대칭혼합인 경우에 대하여  $c_{\infty}$ 의 변화에 따른  $Da_E$ 의 변화를 도시하여 보면 Fig.3과 같다. 이에 의하면 일반적으로  $c_{\infty}$ 의 증가에 따라  $Da_E$ 가 감소하며 따라서 기연가스와 혼합되는 경우 스트레치에 대한 화염의 내구성이 증가함을 알 수 있다. 특히  $Le_F$ 가 증가할 수록 혼합물에 따른 내구성이 더욱 강하게 나타난다. 반면  $Le_F$ 가 감소하여  $Le_F = 0.5$ 인 경우에는 상당량의 혼합물까지( $c_{\infty} \approx 0.7$ )는  $Da_E$ 의 변화가 미소함을 알 수 있다. 특히  $c_{-\infty} = 0$ 이고  $Le_F = 0.5$ 인 경우에는  $c_{\infty} > 0.7$ 에서 오히려  $Da_E$ 가 증가하여 순수 미연가스에 비해 스트레치에 대한 내구성이 감소한다.

혼합물에 대한 화염 소화의 이러한 특성으

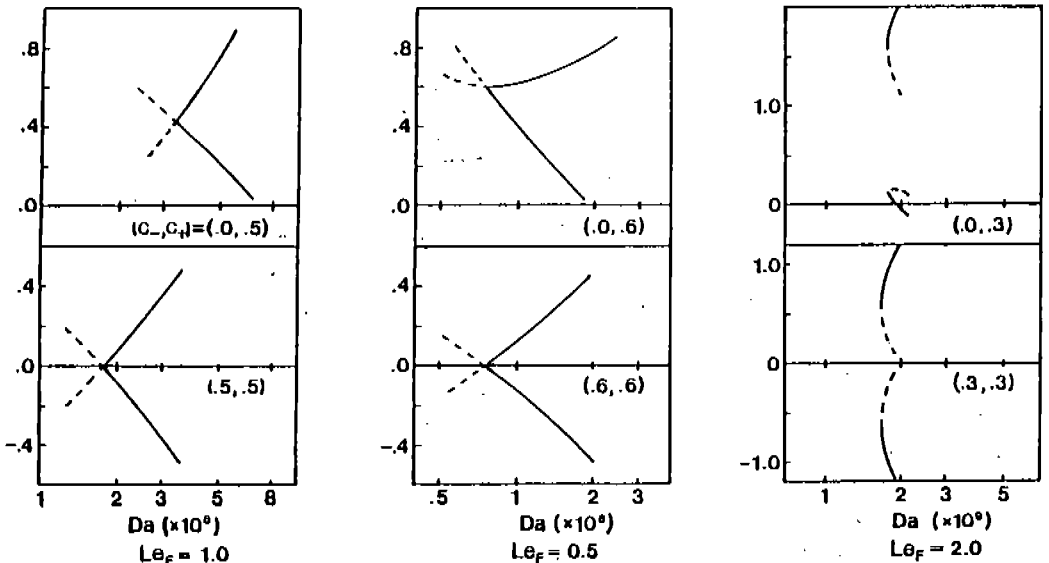


Fig.2 Variations of flame location with Damkohler number for  $Le_0 = 1.0$

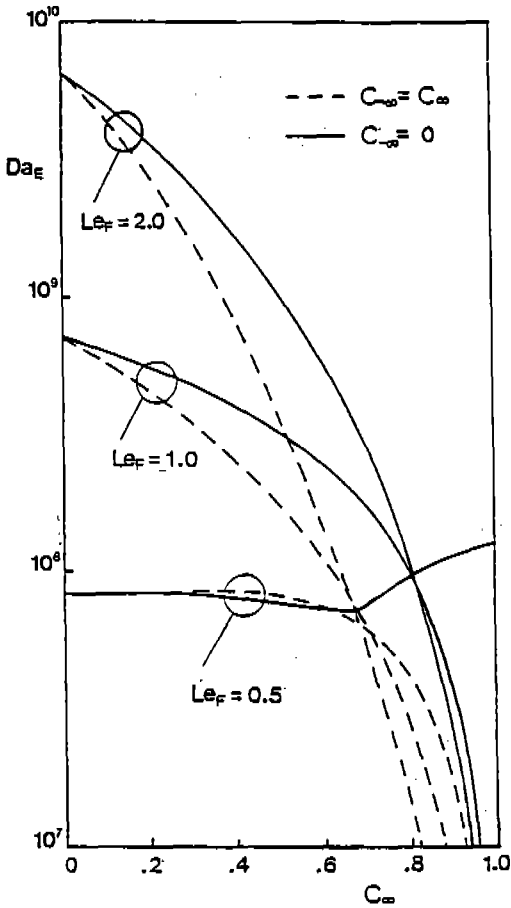


Fig. 3 Effect of mixing ratio on  $Da_E$  for  $Le_0 = 1.0$

로 미루어 난류 예혼합화염의 연소 특성이  $Le_F$ 에 따라 상당히 달라질 수 있음을 예측할 수 있다. 즉 난류 유동장에서 평균 스트레치가 일정한 경우에 있어서, 부분적인 강한 스트레치에 의해 누출된 미연가스는  $Le_F > 1$ 인 경우(예를 들어 일반적인 탄화수소 연료)에는 기연가스와 혼합에 의하여 지속적으로 연소될 수 있음에 비해  $Le_F \ll 1$ 인 경우(예를 들어 수소)에는 누출된 미연에디와 기연에디와의 직접적인 접촉에 의한 연소는 가능하지 않으며 기연가스와 충분한 혼합이 이루어져야 연소될 수 있음을 알 수 있다.

화염의 소화 특성에 미치는 주요 인자들의 특성을 파악하기 위해 식(23)에 나타난 변수들의 영향을 살펴보면, 화염 소화시의  $A_{j,E}$ ,

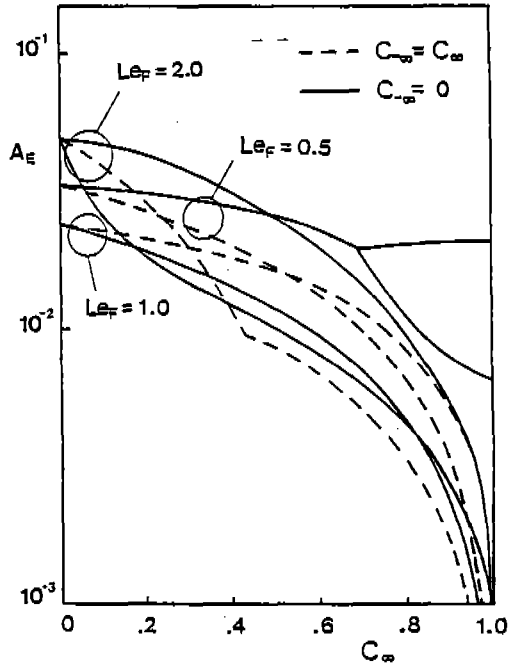


Fig. 4 Effect of mixing ratio on  $A_E$  for  $Le_0 = 1.0$

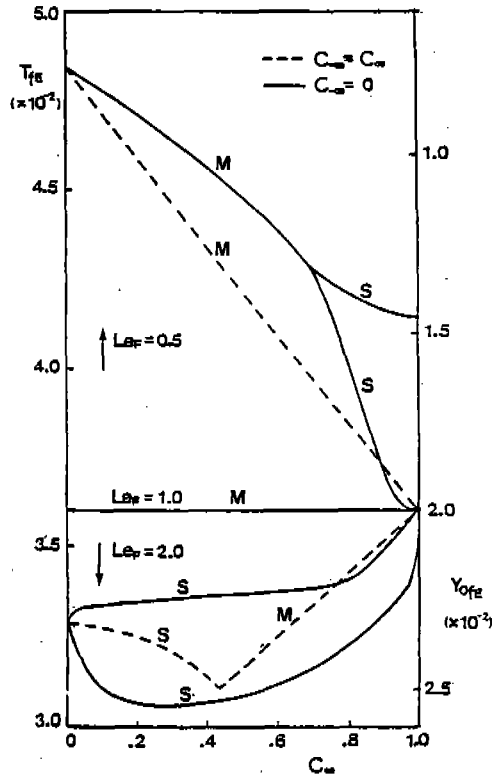


Fig. 5 Effect of mixing ratio on  $T_{f,E}$  and  $Y_{O_f,E}$  for  $Le_0 = 1.0$

$Y_{O_2,E}$ ,  $T_{fj,E}$ 의 특성이 소화에 큰 영향을 미치는데 이를 도시하면 Figs. 4, 5와 같다. 먼저  $Le_i=1$ 인 경우 초기의 전엔탈피(total enthalpy)가 일정하여 물질확산에 의한 열이득(heat gain)과 열확산에 의한 열손실(heat loss)의 효과가 상쇄되므로 화염온도는 스트레치에 무관하게 항상 단일화염온도  $T_{ad} = T_u + Y_{F,u}$ 를 유지한다. 따라서  $Da_E$ 의 변화에 영향을 미치는 주요 인자는 연료소비율  $A_{j,E}$  즉 화염에서의 연료농도구배(식(16) 참조)임을 알 수 있다.

이에 비하여  $Le_F \neq 1$ 인 경우에는 화염온도, 연료소비율, 화염에서의 산화제농도가 동시에 영향을 미친다. 특히  $Le_F=0.5$ 이고  $c_\infty=0$ 인 경우에는 연료소비율의 변화는 작으나  $c_\infty$ 의 증가에 따라 두 화염온도의 차이가 커지므로 강한 화염으로부터의 열손실에 의해 소화가 촉진된다.

이와 같은 방법으로 주어진  $Le_i$ 에서 혼합물의 조합에 따라  $Da_E$  값을 구할 수 있는데 이를  $(c_\infty, c_\infty)$  평면상에 등  $Da_E$ 선(iso- $Da_E$  line)으로 도시하면 Figs. 6, 7과 같다. 그림의 대각선, 즉  $c_\infty=c_\infty$ 선에 대하여 대칭적이므로 각 경우에 대하여 반평면만 도시하였다. 여기서  $Da_{E,u}$ 는 순수 미연가스의 소화  $Da$ -

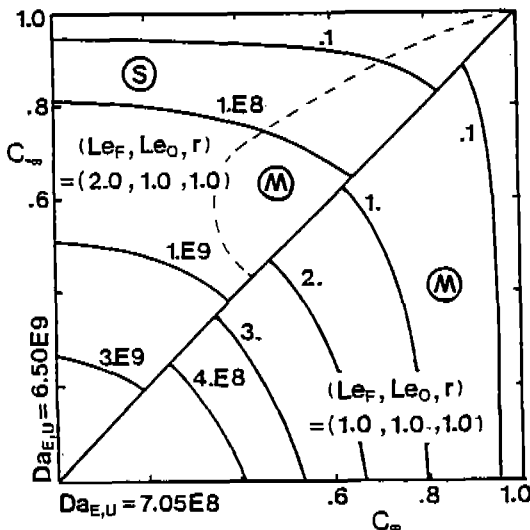


Fig. 6 Effect of  $Le_F$  on Extinction for  $Le_0 = 1.0$

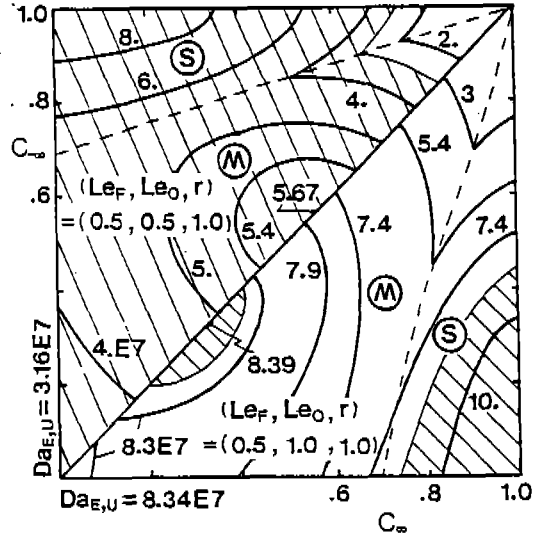


Fig. 7 Effect of  $Le_0$  on Extinction for  $Le_F = 0.5$

mkohler 수로서  $c_\infty=c_\infty=0$ 인 경우이다.

$Le_F=Le_0=1.0$ 인 경우(Fig. 6)는 혼합물에 관계없이  $T_f$ 와  $Y_{O_f}$ 가 일정하여 후류로의 열손실이 없으므로 전영역에 걸쳐 화염이 충돌 소화됨을 알 수 있으며, 일정한 스트레치를 받을 때 혼합물이 증가할 수록 경계온도( $T_\infty$ ,  $T_\infty$ )가 증가하여 전류의 밀도가 작아질 뿐만 아니라, 화염온도는 일정하여 화염의 반응성(reactivity)은 동일한데 반해 공급되는 연료량은 감소하므로 이를 보상하기 위하여 화염 전파속도가 증가하게 되는데, 이에 따라 혼합물이 큰 화염은 보다 큰 스트레치에서 소화된다. 따라서  $Da_E$ 는 점점 감소하여  $c=1$ 이 되면 스트레치를 증가하여도 화염이 소화되지 않는다( $Da_E=0$ )<sup>5)</sup>

한편 평균혼합물( $(c_\infty+c_\infty)/2$ )이 일정하더라도 혼합물이 비대칭일 경우 화염의 소화 특성은 강한 화염에 의해 지배되므로<sup>7)</sup> 대칭인 화염보다 큰 스트레치에서 소화된다. 예를 들어  $c_\infty=c_\infty=0.3$ 인 경우보다  $c_\infty=0$ ,  $c_\infty=0.6$ 인 경우가  $Da_E$  값이 작다. 그러나 이러한 특성은 확산선호도 등의 효과에 의해 두 화염의 온도가 서로 달라 화염 후류로의 열손실이 발생하면 달라질 수 있다.

$Le_F=2.0$ 이면(Fig. 6) 화염온도가 낮아져서



화염이 약화되므로 S-곡선 소화를 보이나 혼합물이 아주 큰 경우에는 확산선호도에 의한 화염 약화 효과가 작아지므로 충돌 소화를 나타내는 영역이 존재한다.

$Le_F=0.5$ 인 경우는(Fig.7) 혼합물이 크지 않은 범위에서 혼합물의 증가에 따라  $Da_E$ 가 증가하는 지역이 나타나는데 이는 충돌 소화 지역의 경우 혼합물이 증가할수록  $Le_F \neq 1$ 에 의한 화염온도 증가 효과가 감소하므로  $T_f$ 가 감소하기 때문이다(Fig.5 참조). 그러나 혼합물이 더욱 커짐에 따라 연료소비율  $A_f$ 의 효과가 지배적이 되어  $Da_E$ 는 극값(extremum)을 지나 0으로 수렴한다. 한편 혼합물의 비대칭성이 큰 지역에서는 두 화염의 온도차가 커져서 강한 화염이 후류로의 열손실을 받으므로 S-곡선 소화를 나타내며, 이러한 경향은 비대칭성이 심해질수록 증대되어  $Da_E$ 는 증가한다.

$Le_F=0.5$ 에서  $Le_0$ 의 영향을 살펴보면,  $Le_F=Le_0$ 이면 확산선호도의 영향이 연료와 산화제에 동일하게 작용하므로 화염에서의 과잉산화제농도  $Y_{O,f}$ 가 일정하게 유지되는데 반하여  $Le_F < Le_0$ 이면 연료의 유효농도가 상대적으로 증가하므로  $Y_{O,f}$ 가 감소하게 되어 화학반응률을 감소시키는 효과가 발생하는데, 기연가스가 혼합되면 이러한 효과가 줄어들기 때문에 혼합물이 증가할수록  $Y_{O,f}$ 가 증가하게 되며(Fig.5 참조), 이는  $Da_E$ 를 감소시키는 작용을 한다. 따라서  $Le_0=1.0$ 인 경우에 비하여  $Y_{O,f}$ 가 일정하게 유지되는  $Le_0=0.5$ 인 경우에 더 넓은 혼합물의 범위에서  $Da_E > Da_{E,u}$ 가 된다.

Fig.7에서 빗금친 영역은  $Da_E > Da_{E,u}$ 인 영역을 표시한다. 일반적으로 과농화화종의 확산선호도가 화염 특성에 미치는 영향은 매우 작는데<sup>7)</sup> 비하여 혼합과 연관된 소화 특성은 그 영향이 매우 큰 것을 알 수 있다. 이러한  $Da_E > Da_{E,u}$ 인 영역을  $(Le_F, Le_0)$ 의 조합에 따라  $c_{\infty}=c_{\infty}$ 인 경우와  $c_{\infty}=0$ 인 경우에 대해 도시하면 Figs.8.9와 같다. 예를 들어 Fig.8에서  $Le_F=0.5$ ,  $Le_0=1.0$ 이면 곡선의 내부 지역, 즉  $0.2 < c < 0.4$  범위에서  $Da_E$

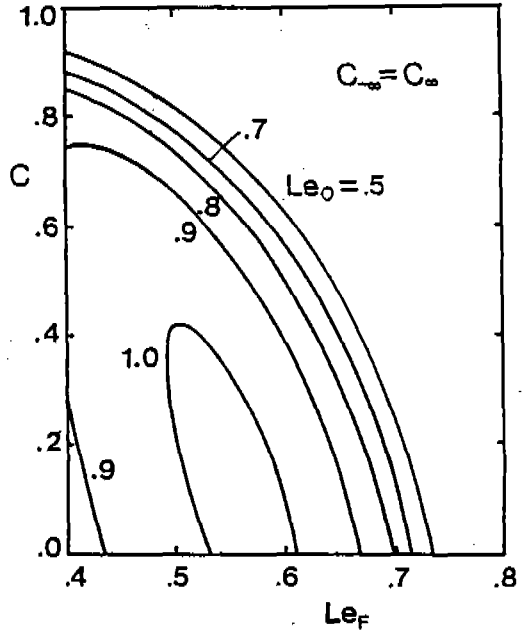


Fig.8 Boundaries of  $Da_E > Da_{E,u}$  for symmetric mixing

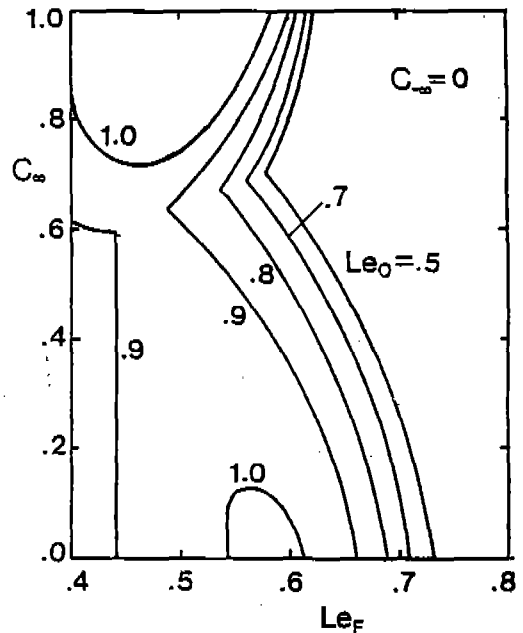


Fig.9 Boundaries of  $Da_E > Da_{E,u}$  for  $c_{\infty}=0$

$> Da_{E,u}$ 가 되어, 초기 미연 연료장에서 보다 작은 스트레치에서 화염이 소화된다. 마찬가지로 Fig.9의 경우  $Le_F=0.5$ ,  $Le_0=1.0$ 이면

$0.75 < c_{\infty} < 1$  지역에서 소화가 쉽게 발생한다.

3.2  $r \neq 1$  인 경우

기연가스가 복사 또는 대류에 의하여 열손실이나 열이득을 받으면 경계온도가 변화하여 화염 특성에 영향을 주게 된다. 기연가스의 에너지 보존율이 소화 스트레치에 미치는 영

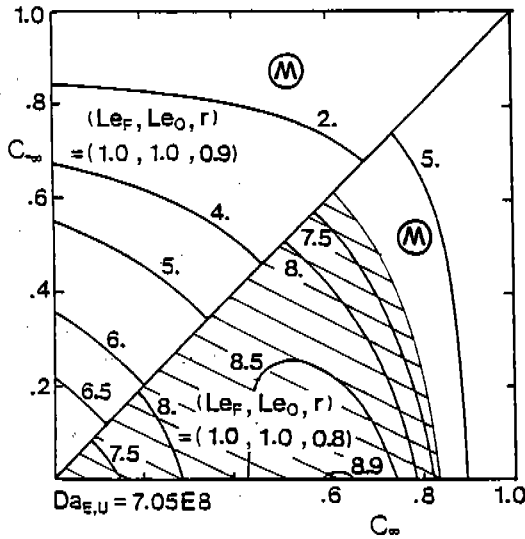


Fig.10 Effect of  $r$  on Extinction for  $Le_F = 1.0, Le_0 = 1.0$

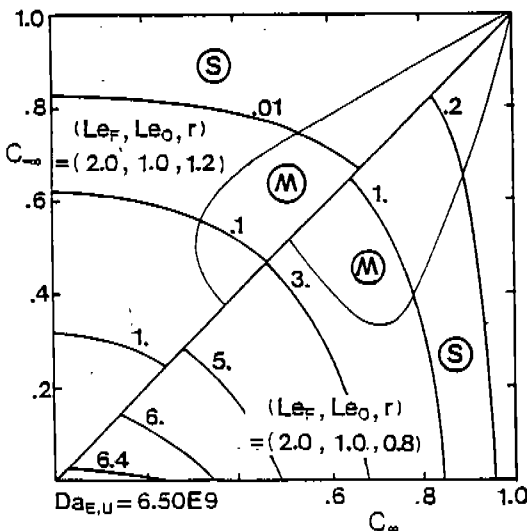


Fig.11 Effect of  $r$  on Extinction for  $Le_F = 2.0, Le_0 = 1.0$

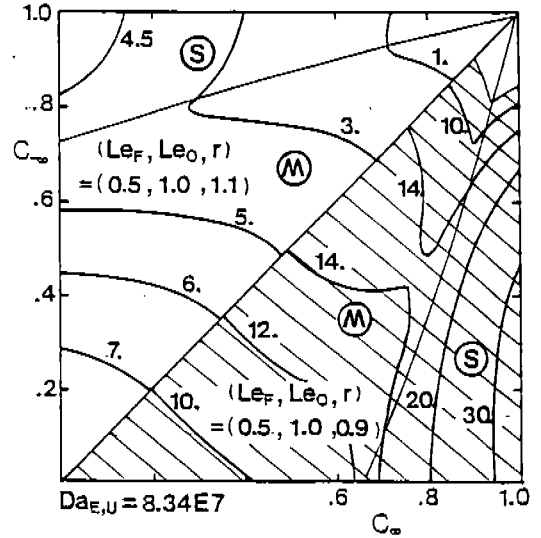


Fig.12 Effect of  $r$  on Extinction for  $Le_F = 0.5, Le_0 = 1.0$

향을 알아보기 위하여  $r = 0.8 \sim 1.2$  범위에서 확산선호도의 변화에 대하여 계산을 수행하였는데 그 결과는 Figs.10~12와 같다. 이에 따르면  $Le_F = 2.0$  인 경우(Fig.11)에 혼합물이 큰 영역에서 충돌 소화를 일으키는 특성이란든지,  $Le_F = 0.5$  인 경우(Fig.12)에 혼합물의 비대칭성이 커지면 S-곡선 소화를 나타내는 점등, 그림의 정성적인 형태는 단열( $r = 1$ )된 경우와 동일하다. 그리고 각 그림의  $r$  값에 따른 변화를 살펴보면 기연가스의 열이득은 일반적으로 화염의 소화를 지연시키고 열손실은 화염의 소화를 촉진시킴을 알 수 있다.

희박 화학종의 Lewis수의 영향은 앞에서 논의된 바와 같이  $Le_F < 1$  이면  $T_f > T_{ad}$  가 되므로 이때 기연가스 혼합이 화염의 내구성을 증가시키기 위해서는  $r > 1$  이어야 하며,  $Le_F > 1$  이면 기연가스가 약간의 열손실을 받더라도 화염의 소화를 억제할 수 있다.

이에 따라 주어진  $(Le_F, Le_0)$  의 조합에서 미량의 기연가스 혼합이 화염의 소화를 촉진시킬 것인가 혹은 억제할 것인가의 기준이 되는 임계 에너지 보존율  $r_c$  를 정의할 수 있는데,  $(Le_F, Le_0) = (1.0, 1.0)$  인 경우  $0.8 < r_c < 0.9$  (Fig.10),  $(0.5, 1.0)$  인 경우는  $0.9 < r_c < 1.0$  (Fig.7과 12),  $(2.0, 1.0)$  인 경우는  $r_c$

< 0.8 (Fig. 11) 임을 알 수 있다. 이러한  $r_c$  값은  $(c_{-\infty}, c_{\infty})$  평면에서  $\frac{dDa_E}{dc}|_{c=0} = 0$  인 조건으로써 수식적으로 계산할 수 있는데, 주어진 확산선도도의 조합에서  $Le_F \leq 1$  인 경우에

$$r_c = \frac{1}{\sqrt{Le_F}} - \frac{T_N^2 (2 - Y_{O,L} / Y_{O,N})}{Y_{F,u} (T_a + 4 T_N)} \quad (31)$$

이며, 여기에서

$$\begin{aligned} T_N &= T_u + Y_{F,u} / \sqrt{Le_F} \\ Y_{O,N} &= Y_{O,u} - Y_{F,u} \sqrt{Le_O / Le_F} \\ Y_{O,L} &= Y_{F,u} (1 - \sqrt{Le_O / Le_F}) \end{aligned} \quad (32)$$

이다. 이때  $r > r_c$  이면 소량의 기연가스의 혼합이 화염의 소화를 억제하는, 일반적인 경향을 나타내며,  $r < r_c$  이면 이와 반대의 결과를 나타낸다.

단,  $c_{-\infty} = c_{\infty} = 0$  에서 S-곡선 소화를 나타내는 경우에는  $\eta_{f,E} \neq 0$  이므로 위와 같은 수식적인 결과를 얻을 수 없으며, 따라서 식(31)은 충돌 소화를 나타내는 경우, 즉  $Le_F \leq 1$  인 경우에만 유효하다. 그러나  $Le_F > 1$  인 경우에는  $r_c$  값이 약 0.8 이하이므로 매우 큰 열손실이 있는 경우에만 이러한 예외적인 특성이 나타난다. 식(31)에 의하면  $Le_F$  값이 감소할수록  $r_c$  값이 증가하므로 기연가스의 열손실이 크지 않은 경우라도  $Da_E > Da_{E,u}$  인 영역이 나타나며, 따라서  $Le_F \ll 1$  인 화염의 경우에 보다 특이한 소화 특성을 가질 수 있다.

#### 4. 결 론

대항류 유동장에서 미연가스와 기연가스의 혼합이 상호작용을 하는 화염의 소화 특성에 미치는 영향을 해석적으로 고찰하였다. 이 결과에 따르면, 기연가스의 혼합에 의한 화염의 소화 특성은 희박 화학종(연료)의 확산선도에 따라 상이하게 나타나는데,  $Le_F > 1$  이면 기연가스가 혼합된 화염의 경우 미연가스만의 연소시에 비해 더 큰 스트레치에 견딜 수 있는데 반하여,  $Le_F < 1$  이면 소량의 기연가스의 혼합은 오히려 화염을 약화시켜 소화 스트레치를 감소시키며 충분한 양의 기연가스와 혼합되어야 화염이 강화됨을 보여주고 있다. 또

한  $Le_F < 1$  인 경우의 이러한 특성은 과농화확종(산화제)의 영향을 크게 받음을 알 수 있다.

이를 난류 예혼합화염의 이론적 모델인 wrinkled laminar flamelet model 과 연관지어 보면 탄소수가 큰 탄화수소 연료( $Le_F > 1$ )의 경우에는 난류 유동에 의해 발생한 국부적인 강한 스트레치에 의해 화염이 소화되어 누출된 미연가스가 기연가스와 혼합되면 즉시 재연소가 가능하나, 수소 연료( $Le_F \ll 1$ )의 경우에는 국부적으로 소화된 후 재연소되기 위해서는 충분히 기연가스와 혼합되기 위한 시간을 요하며, 따라서 Lewis 수에 따라 난류 예혼합화염의 화염 특성이 상당히 달라질 것임을 예측할 수 있다.

또한 연소 시스템과 외부와의 열전달에 의해 기연가스의 온도는 단열화염온도와 다른 값을 가질 수 있는데, 이러한 효과를 고려한 기연가스의 에너지 보존율  $r$  을 정의하고,  $Le_F \leq 1$  인 경우 소량의 기연가스 혼합이 미연가스를 재연소시킬 수 있는 최소한의 임계 에너지 보존율  $r_c$  값을 수식화 하였다.

#### 후 기

본 연구는 한국과학재단 목적 기초연구비의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. Williams, F.A., "A Review of Some Theoretical Considerations of Turbulent Flame Structure," *AGARD Conference Proceedings*, No.164, AGARD, Paris, II1-1 to 25, 1975.
2. Chung, S.H., "Phenomenological Derivation of the Effects of Flame Stretch and Preferential Diffusion on Premixed Flame," *Trans. K.S.M.E.*, Vol.9, No.2, pp.655-662, 1985.
3. Pratt, D.T., "Mixing and Chemical Reaction in Continuous Combustion," *Prog.*

- Energy Combust. Sci.*, Vol.1, pp.75-87, 1976.
4. Butler, G.W., Pratt, D.T. and Malte, P.C., "Coalescence/Dispersion Modeling of Turbulent Combustion in a Jet Stirred Reactor," *WSS/CI* 84-13, 1984.
  5. Sohrab, S.H., Ye, Z.Y. and Law, C.K., "An Experimental Investigation on Flame Interaction and the Existence of Negative Flame Speeds," *Twentieth Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, pp.1957-1965, 1984.
  6. Sohrab, S.H., Ye, Z.Y. and Law, C.K., "Theory of Interactive Combustion of Counterflow Premixed Flames," *Combust. Sci. Tech.*, Vol.45, p.27, 1985.
  7. Chung, S.H., Kim, J.S. and Law, C.K., "Extinction of Interacting Premixed Flames; Theory and Experimental Comparisons," *Twenty-first Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, pp.1845-1851, 1986.
  8. 이충훈, 정석호, "과농-희박 예혼합화염의 상호작용에 관한 연구", 대한기계학회 논문집, 제 11 권 제 6 호, pp. 991~1000. 1987.
  9. Libby, P.A. and Williams, F.A., "Structure of Laminar Flamelets in Premixed Turbulent Flames," *Combust. Flame*, Vol.44, pp.287-303, 1982.
  10. Libby, P.A. and Williams, F.A., "Strained Premixed Laminar Flames Under Non-adiabatic Conditions," *Combust. Sci. Tech.*, Vol.31, pp.1-42, 1983.
  11. Libby, P.A., Linan, A. and Williams, F.A., "Strained Premixed Laminar Flames with Nonunity Lewis Numbers," *Combust. Sci. Tech.*, Vol.34, pp.257-293, 1983.
  12. Jain, V.K. and Mukunda, H.S., "On the Ignition and Extinction Problems in Forced Convection Systems," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.11, pp.491-508, 1968.
  13. Chung, S.H. and Law, C.K., "Structure and Extinction of Convective Diffusion Flames with General Lewis Numbers," *Combust. Flame*, Vol.52, pp.59-79, 1983.
  14. Clavin, P. and Joulin, G., "Premixed Flames in Large Scale and High Intensity Turbulent Flow," *J. Physique-Lettres*, Vol.44, pp.L1-12, 1983.
  15. Linan, A., "The Asymptotic Structure of Counterflow Diffusion Flames for Large Activation Energies," *Acta Astronautica*, Vol.1, pp.1007-1039, 1974.
  16. Buckmaster, J.D. and Ludford, G.S.S., *Theory of Laminar Flames*, Cambridge University Press, 1982.
  17. Chung, S.H., "A Study of the Effect of Flame Stretch on Flame Speed," *Trans. K.S.M.E.*, Vol.9, No.2, pp.250-258, 1985.