

## 메탄올 액적 화염의 음향파 가진에 의한 재점화

김 홍 집\* · 손 채 훈\*\* · 정 석 호\*\*\*  
(1998년 8월 5일 접수)

### Reignition of Methanol Droplet Flames Under Acoustic Pressure Oscillation

Hong Jip Kim, Chae Hoon Sohn and Suk Ho Chung

**Key Words:** Methanol Droplet Flame (메탄올 액적 화염), Reignition (재점화), Extinction (소멸)  
Pressure Oscillation(압력 가진)

#### Abstract

Reignition as special cases of acoustic pressure responses of flame are numerically studied by employing methanol droplet flame as a laminar flamelet. Quasi-steady flame responses occur in the range of small amplitude, low frequency oscillation. Reignition phenomena can occur when, by increasing the frequency of large amplitude acoustic pressure, the magnitude of characteristic acoustic time is the same order of that of characteristic reaction time of flames. And more increasing of amplitude of acoustic pressure induces the direct extinction of flame. Flame can sustain its own intensity even under the steady extinction temperature in case of high frequency acoustic oscillation, and this tendency is remarkable with increasing frequency. Reignition regime with respect to amplitude and frequency of acoustic pressure doesn't exist in low frequency(10<sup>2</sup> Hz, in this study), but broadens with frequency of acoustic pressure.

#### 기호설명

$A_i$	: $i$ -반응 단계의 pre-exponential factor	$M_j$	: $j$ -화학종의 분자량
$b_i$	: $i$ -반응 단계의 온도 지수	$m$	: 반경 방향의 질량 유량 ( $=\rho ur^2$ )
$D_j$	: $j$ -화학종의 확산 계수	$n_s$	: 화학종의 개수
$E_i$	: $i$ -반응 단계의 활성화 에너지	$p$	: 압력
$h$	: 혼합물의 비엔탈피	$Q$	: 식 (15)에 정의된 전열방출률
$h_j$	: $j$ -화학종의 비엔탈피	$Q'$	: 단위 길이당 열방출률
$K$	: 증발률 상수	$Q''$	: 단위 체적당 열방출률
$k_i$	: $i$ -반응 단계의 반응률 상수	$R$	: 기체 상수
$L$	: 액체 메탄올의 잠열	$\bar{R}$	: 일반 기체 상수
$\bar{M}$	: 혼합물의 평균 분자량	$r$	: 반경 방향 좌표
		$r_{ext}$	: 소멸시 메탄올 액적의 반경
		$\tilde{r}_j$	: 화염대거리 ( $=r_f/r_s$ )
		$r_s$	: 메탄올 액적의 반경
		$T$	: 온도 또는 가진 음향파의 주기

\* 서울대 대학원, 기계공학과

\*\* 회원, 서울대 대학원, 기계공학과

\*\*\* 회원, 서울대학교 기계공학과

- $T_{min}$  : 한 주기간 응답에서의 최소온도
- $T_{ext}$  : 정상상태의 소염온도
- $t$  : 시간
- $t_{life}$  : 액적의 수명시간
- $u$  : 반경 방향 속도
- $V_c$  : 확산 속도 보정항
- $V_j$  :  $j$ -화학종의 확산 속도
- $\dot{\omega}_j$  :  $j$ -화학종의 순생성률
- $X$  : 물질유
- $Y$  : 질량 비율
- $\Theta_j$  :  $j$ -화학종의 열확산비
- $\lambda$  : 혼합물의 열전도도
- $\rho$  : 밀도
- $\omega$  : 음향파의 주파수

**상첨자**

- (') : 단위 반경 길이당의 값
- ('') : 단위 체적당의 값

**하첨자**

- $a$  : 가진하는 음향파의 진폭
- $B$  : 액체상에서의 포화 상태
- $f$  : 화염에서의 상태
- $g$  : 기체상
- $i$  :  $i$ -반응 단계
- $j$  :  $j$ -화학종
- $l$  : 액체상
- $m$  : 평균값
- $ext$  : 소염
- $max$  : 최대값
- $min$  : 최소값
- $s$  : 액적 표면에서의 상태
- $\infty$  : 외기 조건

**1. 서 론**

연소시 화염은 외부로부터 교란을 받아 음향 불안정성(acoustic instability), 수력학적 불안정

성(hydrodynamic instability), 확산-열 불안정성(diffusive-thermal instability)등과 같은 연소 불안정을 야기하며<sup>(1)</sup> 이에 대한 연구가 활발히 이루어져 왔다. 연소 불안정은 화염이 외부 교란에 대하여 나타내는 응답을 살펴봄으로써 파악할 수 있다. 화염 응답에 대한 연구 중 난류 연소 상황에서 음향파 불안정성을 파악하기 위해 연소실 내의 난류 화염을 총류 소화염의 집합체로 간주하여 소화염들의 음향파 가진에 대한 응답특성이 연구되어 왔다.<sup>(2-4)</sup> 선형 안정성 해석을 통한 연구들은<sup>(2,3)</sup> 작은 진폭의 음향파 가진에 대한 응답만을 고려하므로 소염영역에서 두드러지는 비선형 응답특성을 파악하지 못하였고, 또 일단계 화학반응 모델을 채택함으로써 실제 화염에서 존재하는 넓은 재결합 반응 지역을 고려하지 못하였다. Kim등<sup>(4)</sup>은 이를 보완하기 위하여 상세 화학반응을 고려하여 단일 액적 화염을 소화염 모델로, 소염영역 근처에서 뚜렷해지는 비선형 음향파 응답특성을 연구하였다.

소염 근처 화염의 특이한 비선형 응답으로는 재점화 현상을 들 수 있는데, 이에 대하여 Mauss등<sup>(5)</sup>은 확률론적 모사의 일환으로 소염영역 근처의 소화염에서 스트레인을의 순간적 변화량과 그 지속시간 등을 인자로 하여, 이에 의해 발생하는 소염 및 재점화 현상을 연구하였다. 또 Ezekoye 등<sup>(6)</sup>은 복사열전달을 고려하여 연료 공급의 유량 교란을 통하여 발생하는 응답 중의 하나로 재점화 현상을 연구하였다. 그러나 이들은 순간적인 유동 교란에 의한 해석으로, 실제 상황에서 존재할 수 있는 지속적인 외부 교란을 고려하지 못하였거나, 재점화 현상에 영향을 주는 인자에 대한 정량적인 고찰이 부족하다. 본 연구에서는 이러한 지속적인 외부 교란에 대한 모델링으로서 주기적 압력변화를 고려하였고, 메탄을 액적화염을 채택하여 액체 연료를 사용하는 연소기에서의 재점화 현상을 수치적으로 모사하였다. 메탄을의 화학반응 기구는 비교적 상세히 알려져 있어, 상세 화학반응이나 축소 반응 기구를 이용하여 화염의 구조, 소염 등에 관한 해석이 이루어져 왔다.<sup>(7,8)</sup> 메탄을은 액체연료 중 가장 간단한 연료의 하나이므로, 여타 액체연료의 연소특성을 이해하는데 기초자료를 제공해 줄 수 있다.

## 2. 지배방정식 및 수치해법

반응 유동장에서 해석의 단순화를 위하여 다음과 같은 가정을 도입하였다. 액적의 반경 변화와 관련된 특성시간은 특성 확산시간보다 액체와 기체의 밀도비인  $(\rho_l/\rho_g)$ 만큼 크므로 반경의 변화율을 무시하고 준정상상태로 기체상을 해석할 수 있다.<sup>(9)</sup> 이러한 가정 하에서 본 연구에서 취급하는 비정상성은 압력의 요동에 기인한 것으로 가정하였다. 이에 대한 타당성 검증은 결과 부분에서 자세히 논의하였다. 또한 고려하는 시스템을 아입제 영역에 국한시키고 기체상은 이상 기체로, 액체상은 평형 포화상태로 가정하였다. 또한, 대류 현상을 무시함으로써 구형 대칭인 1-차원 화염을 취급하였다. 시스템내의 유동 속도는 음속에 비해 매우 작으므로 점성 소산 효과는 무시하였다. 이에 따른 지배방정식은 다음과 같다.<sup>(4)</sup>

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial m}{\partial r} = 0 \quad (1)$$

$$p = p(t) = p_m + p_a \sin(2\pi\omega t) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial(mh)}{\partial r} \\ & - \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) \\ & + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \rho \sum_{j=1}^n h_j Y_j V_j \right) \\ & - \frac{\partial p}{\partial t} = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho Y_j)}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial(m Y_j)}{\partial r} \\ & + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \rho Y_j V_j) = w_j M_j \end{aligned} \quad (4)$$

$$p = \frac{\rho \bar{R} T}{M} \quad (5)$$

여기서  $m$ 은  $\rho u r^2$ 으로 정의되는 질량유속이며,  $p_m$ 과  $p_a$  그리고  $\omega$ 는 각각 평균 압력, 가진 압력의 진폭 및 주파수이고, 엔탈피  $h$ 와 평균 혼합 분자량  $\bar{M}$  그리고 확산 속도  $V_j$ 는 다음과 같다.

$$h = \sum_{j=1}^n h_j Y_j \quad (6)$$

$$\begin{aligned} V_j = & - \frac{D_j}{X_j} \frac{\partial X_j}{\partial r} \\ & + \frac{D_j \Theta_j}{X_j} \frac{\partial (\ln T)}{\partial r} \\ & + V_c \end{aligned} \quad (7)$$

$$\bar{M} = \left( \sum_{j=1}^n Y_j / M_j \right)^{-1} \quad (8)$$

여기서 Soret 효과를 고려하여 확산 속도를 평가하였으며,  $\sum_{j=1}^n Y_j V_j = 0$ 를 만족시키기 위하여 속도 보정항  $V_c$ 을 도입하였다.<sup>(10)</sup>

지배방정식에 포함된 열역학적 물성치와 전달 물성치는 CHEMKIN-II<sup>(11)</sup>과 TRANSPORT PAC-KAGE<sup>(10)</sup>를 사용하였다. 92-단계의 기본 반응을 포함하는 상세 반응기구<sup>(12)</sup>를 사용하였는데, 이 메커니즘은 GRI-기구<sup>(13)</sup>에서 H 라디칼에 의한 메탄올의 분해 반응의 반응물이 수정된 것이다. 여기서  $i$ -반응 단계에서의 반응물 상수  $k_i$ 는 다음과 같은 Arrhenius 형태의 식으로 표시된다.

$$k_i = A_i T^{b_i} \exp(-E_i/RT) \quad (9)$$

식 (1)~(5)에 대한 경계 조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} r = r_i: & \lambda r^2 \frac{\partial T}{\partial r} = mL \\ & T = T_{B, CH_3OH} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} m Y_j + \rho r^2 Y_j V_j \\ = m \delta(j - CH_3OH) \end{aligned}$$

$$r \rightarrow \infty: T \rightarrow T_\infty: \text{steady}$$

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} = \frac{\partial p}{\partial t}: \text{oscillation} \quad (11)$$

$$Y_j \rightarrow Y_{j,\infty} = \delta(j - \text{Air})$$

여기서  $\delta$ 함수는  $\delta(j-j) = 1 (=0)$  if  $j=J (j \neq J)$

으로 정의된다.

메탄올의 포화온도  $T_B$ 는 Hass와 Newton이 제안한 다음의 근사식을 사용하였다.<sup>(14)</sup>

$$T_B [K] = \frac{376.554 + 263.445 \log(p [\text{atm}])}{5.82 - 1.15 \log(p [\text{atm}])}$$

$$+ 273.15 \quad (12)$$

증발 잠열  $L$  은 포화시의 온도에 따라 변하며,<sup>(15)</sup> 본 연구의 계산 조건인 1 기압 근처에서 다음과 같은 곡선 맞춤형 식을 사용하였다.

$$L[\text{kJ/kg}] = 1100 - 2.2636\Delta T - 2.8306 \times 10^{-2}(\Delta T)^2 + 1.8257 \times 10^{-4}(\Delta T)^3 + 1.1042 \times 10^{-5}(\Delta T)^4 - 5.1627 \times 10^{-9}(\Delta T)^5 \quad (13)$$

여기서  $\Delta T = T_B - 337.85$ 이다.

수치해석에는 Smooke<sup>(16)</sup>가 개발한 알고리즘을 이용하였다. 각 노드에서의 독립변수들의 보존성을 만족시키기 위하여 유한체적법을 사용하였으며, 시간적분을 위하여는 암시법과 Crank-Nicolson법을 선택적으로 사용할 수 있게 하였다. 행렬의 풀이 방법으로는 Jacobi 행렬을 주기적으로 구하여 계산하는 변형된 Newton-iteration 방법을 사용하였다.

기존의 수치해석 코드 및 수치해법으로는 소염점 근처에서 수렴된 해를 얻기 어려우므로 이에 대한 보완 및 수정이 필요하다. 본 연구에서는 소염점 근처에서 최대온도를 인자로 하여 액적의 반경과 화염의 구조를 계산하는 역 수치해법(inverse numerical method)을 사용하였다.<sup>(4)</sup> 이 기법을 사용하면 소염점을 보다 정확하게 예측할 수 있을 뿐만 아니라 소염점을 지난 중간가지(middle branch)의 해도 안정적으로 구할 수 있다. 이를 이용하여 용향파 가진에 의한 화염의 기본적인 응답을 검토하고 압력 요동에 따른 재점화 현상을 해석하였다.

### 3. 결 과

액적화염은 소염을 일으키는 액적 반경보다 훨씬 큰 평형 근처의 화염과 소염 액적 반경과 비슷한 크기를 가지는 소염영역 근처의 화염으로 대별할 수 있다.

Figure 1에  $r_s = 70\mu\text{m}$  인 메탄을 액적화염에서 압력 변화에 따른 최대온도의 거동을 보여주는 전형적인 정상상태의 특성 S-곡선을 도시하였다.

소염 근처의 화염( $p_m = 1 \text{ atm}$ )에 용향파가 가진되어 압력이 10% 변동된다고 가정하면, 압력이 증가하여 화염이 평형상태로 옮겨가는 경우에는 화염의 응답변동의 크기가 작으나 압력이 감소하여 화염이 소염 근처의 영역으로 이동하는 경우, 그 응답변동의 크기는 평형상태 근처로 이동하는 경우에 비해 매우 커진다. 이로부터 용향파 응답특성이 소염 근처의 화염에서 매우 두드러질 것으로 예상할 수 있다. 즉 가진되는 용향파의 진폭이 증가하여 압력의 최소값이 정상상태에서 소염을 야기시키는 임계 압력값보다 더 낮아지면, 직접적인 소염이나 재점화 현상과 같은 특이한 응답특성을 보일 수 있음을 암시한다.

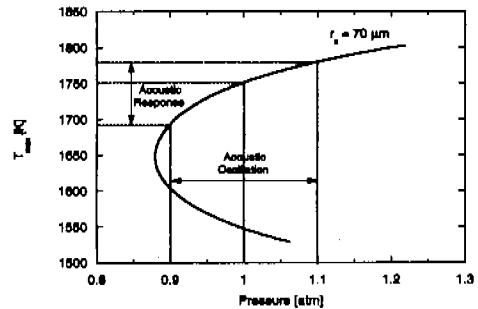


Fig. 1 Characteristic S-curve showing  $T_{\max}$  variation with respect to pressure.

1기압에서  $r_s = 70\mu\text{m}$  인 메탄을 액적화염의 경우, 기체상의 비정상성이 우세해지는 영역은 이른 해석에 의하면<sup>(9)</sup>  $r/r_s \geq (\rho_s/\rho_g) \approx 26.6$  인데, 본 해석의 결과에 따르면 화염대거리  $\tilde{r}_f \approx r_f/r_s \approx 6$  이다. 이로부터 정상상태 가정의 타당성을 검증할 수 있다. 또 Spalding의  $d^2$ -law에 의하면  $r_s = 70\mu\text{m}$  인 메탄을 액적의 수명시간(droplet lifetime)은 다음과 같다.<sup>(1)</sup>

$$t_{k/a} = \frac{4(r_s^2 - r_{ext}^2)}{K} = \frac{2\pi\rho_l r_s(r_s^2 - r_{ext}^2)}{m} \approx 10^{-1} \text{ s} \quad (14)$$

따라서  $10^2 \text{ Hz}$  이상의 높은 주파수 범위에서 용향파 가진이 있는 경우, 용향파 특성시간이 액적의 수명시간에 비해 매우 짧기 때문에 액적 반경의 변화율은 몇 주기동안 무시할 수 있으므로 액

적의 반경이 일정하다는 가정은 유효하다.

유향파 가진에 의한 액적화염의 응답특성을 이해하기 위해서는 세 가지의 특성 시간을 비교해야 한다. 이에 는 가진하는 유향파 주파수의 역수로 표시되는 특성 유향파시간,  $r_s^2/D$  로 정의되는 액적화염의 특성 확산시간, 그리고 특성 화학반응 시간이 포함된다. 화염의 특성 확산시간이 유향파의 특성시간과 비슷한 크기를 가지거나 더 크다면 유동장에서의 응답 지연으로 인하여 위상차가 생기게 된다. 이러한 현상은 액적의 크기가 커서 특성 확산시간이 긴 평형상태 근처의 화염의 경우에 발생한다. 반면에 화염의 특성 확산시간이 유향파의 특성 시간보다 매우 짧으면, 화염은 가진에 대하여 큰 위상차 없이 주어진 압력에서 정상상태에 근접하는 준정상(quasi-steady) 상태의 응답을 보이게 된다. 소염 상태 근처의 화염은 액적의 반경이 작기 때문에 특성 확산시간이 작아 이 경우에 해당한다. 이렇듯 두 특성 시간의 차이에 의하여 화염으로부터의 열방출이 유향파와 동상을 유지하면 유향파가 증폭되거나, 유동장에서의 응답지연으로 인한 위상차로 그 위상차가 90°를 넘어서게 되면 감소되는 응답을 보이게 된다.<sup>(4)</sup> 특성 화학반응 시간은 화염의 강도를 유지시키는 기본 반응들의 반응상수의 역수에 비례한다.

$$Q \equiv \int_{r_s}^{\infty} \dot{Q}''' 4\pi r^2 dr \quad (15)$$

$$= \int_{r_s}^{\infty} \dot{Q}''' dr$$

여기서  $\dot{Q}'''$  와  $\dot{Q}$  는 각각 단위 체적당, 단위 길이당의 열방출률이며, Fig. 2에서 사용된 하첨자  $m$ 은 정상상태에서의 열방출률, 하첨자  $a$ 는 유향파 가진에 의한 열방출률의 변화량, 즉 파도상태와 정상상태에서의 열방출률의 차이를 나타낸다. 소염 근처의 화염은 앞에서 설명한 바와 같이 짧은 특성 확산시간을 가지므로 유향파의 가진에 대하여 위상차가 없는, 준정상상태의 응답을 보인다. 가진하는 유향파의 진폭이 커짐에 따라 응답의 비선형성이 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 Fig. 1에서 알 수 있듯이 압력이 평균 압력보다 낮은 경우, 화염은 소염영역으로 접근하게 되고 이에 따라 응답이 더 커지는 것에 기인한다. 이렇듯 소염 근처의 화염은 큰 진폭을 가지는 유향파 가진이 있는 경우, 응답의 비선형성이 증가할 뿐만 아니라 진폭의 임계값을 초과할 경우 재점화 현상이나 직접적인 소염과 같은 특이한 응답들을 보이게 된다. 특히 이러한 응답들은 소염 근처의 화염이 특성 화학반응 시간과 비슷한 크기의 유향파 특성 시간을 가지는 가진이 주어지는 경우에 일어날 가능성이 크다.

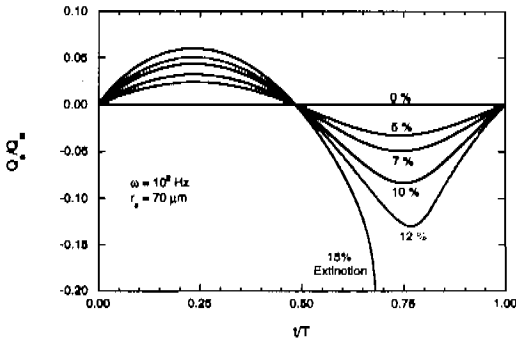


Fig. 2 Variations of the normalized heat-release responses for various amplitudes of the pressure fluctuations.

소염 근처인 화염의 유향파 응답특성을 Fig. 2에 도시하였다. 여기서 전열방출률(total heat-release rate)  $\dot{Q}$ 는 다음과 같이 정의된다.

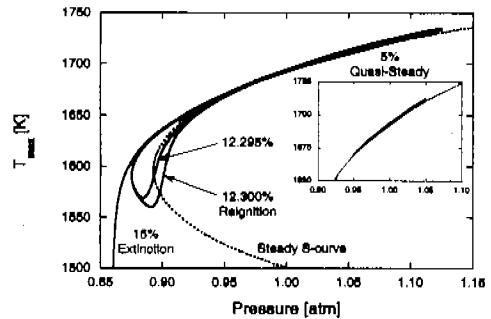


Fig. 3 Typical flame responses with pressure oscillation of  $\omega=10^2$  Hz for  $r_s=70 \mu\text{m}$ ; Quasi-steady, reignition, extinction.

Figure 3에 정상상태의 화염 특성을 나타내는 S-곡선을 압력변화에 따른 최대온도로 표시하였으며,  $\omega=10^2$  Hz의 유향파 가진이 주어지는 경우 여러 가지 진폭에 대한 화염의 최대 온도인

$T_{max}$ 의 응답을 도시하였다. 앞에서 언급한 바와 같이 5%의 작은 진폭의 음향파 가진에 대한 화염의 응답은 S-곡선 주위를 정상상태의 화염에서 많이 벗어나지 않은 상태, 즉 준정상상태의 응답을 보이는 것을 알 수 있다. 하지만 가진 음향파의 진폭이 커지면 정상상태의 화염특성으로부터 많이 벗어나게 되고 어떤 특정한 진폭에서는 정상상태의 소멸점을 지나는 응답을 보이게 된다. 이 진폭보다 더 큰 진폭의 가진이 주어지면 응답은 S-곡선의 중간가지를 지나게 된다. 정상상태의 화염에서 불안정한 영역인 중간가져서는 조건에 따라서 화염이 소멸되어 아래가지(lower branch)로 전이되거나, 다시 점화가 일어나 윗가지(upper branch)로 전이하는 두가지 양상(bimodal shape)을 보인다. 이보다 진폭이 더 커지면 화염이 낮은 압력에 의한 화학 반응물의 감소로 더 이상 견디지 못하고 직접적인 화염의 소멸이 발생한다. 정상 상태의 소멸점을 지나는 응답으로부터 소멸이 일어나는 응답까지의 영역을 재점화 영역(reignition regime)이라고 정의하였으며, 일반적으로 이 영역은 가진하는 음향파의 주파수와 진폭에 따라 변화한다.

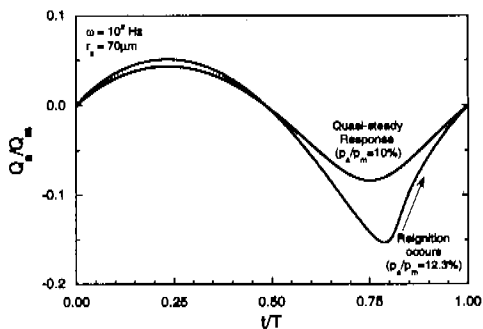


Fig. 4 Typical flame response and reignition response with pressure oscillation for  $r_s = 70 \mu\text{m}$  and  $\omega = 10^2 \text{ Hz}$ .

Figure 4에  $\omega = 10^2 \text{ Hz}$ 의 음향파가 가진될 때, 10% 가진에 의한 준정상상태의 화염 응답과 12.3% 가진에 의해 재점화 현상이 발생할 때의 화염응답을 시간의 함수로 비교하였다. 화염의 준정상 응답과는 달리 재점화 현상이 발생할 경우, 열방출률의 변화량은 압력이 최소점을 지나 다시 증가하는  $t/T = 0.75$  이후의 영역에서 특정한

지연 시간동안에도 계속 감소한다. 그러나, 비교적 높은 주파수로 인하여 소멸영역에 머무르는 시간이 상대적으로 짧기 때문에 압력 상승에 의한 화학 반응물의 증가와, 이 지연시간을 지난 뒤에 화염지역에서 아직 quenching되지 않은 잔류 라디칼들이 화학반응에 참여함으로 인해 화염 강도를 회복하는 재점화 현상이 발생한다.

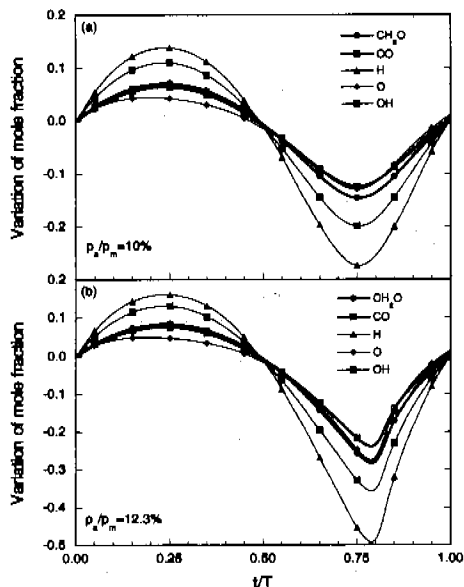


Fig. 5 Variations of maximum mole fraction of major radicals for (a) 10.0 % and (b) 12.3 % amplitude of the pressure oscillation in case of  $\omega = 10^2 \text{ Hz}$ .

이 때의 주요 라디칼들인  $\text{CH}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}$ ,  $\text{O}$ ,  $\text{OH}$ 의 정상 상태에서의 값에 대한 변화율을 Fig. 5에 나타내었다. 일반적으로 메탄올 화염에서는 메탄올이  $\text{H}$ 와  $\text{OH}$ 와 반응하여 이성질체인  $\text{CH}_3\text{O}$ 와  $\text{CH}_2\text{OH}$ 를 형성하고, 이 화학종들은 다시  $\text{CH}_2\text{O} \rightarrow \text{CHO} \rightarrow \text{CO}$ 의 경로를 통하여 주생성물인  $\text{CO}_2$ 를 형성한다. 메탄올 화염에서 화학반응을 시작시키는 가장 중요한 라디칼들은  $\text{H}$ 와  $\text{OH}$ 로 알려져 있으며, 메탄올이  $\text{CH}_3\text{O}$ 와  $\text{CH}_2\text{OH}$ 를 형성하는 기본반응의 반응률 평가에 있어서  $\text{OH}$  라디칼에 비해  $\text{H}$  라디칼에 대한 정량적인 정보가 부족한 실정이지만 그 중요성은 공통적으로 인식되고 있다.<sup>(12)</sup> 그림으로부터  $\text{H}$ 와  $\text{OH}$ 의 변화율이 준정

상상태의 응답에서 각각 30%와 20%에 이르며, 재점화가 일어난 경우에는 50%와 35%에 달해 매우 민감한 것을 알 수 있다. 따라서 이와 같은 응답특성 해석으로부터 메탄을 화염의 소멸 및 재점화 현상에 가장 많은 영향을 주는 것은 H 라디칼이라는 것을 확인할 수 있으며, 따라서 메탄을 연료쪽에서의 화학반응을 대표하는 것은  $CH_3OH + H \rightarrow CH_3O + H_2$  와  $CH_3OH + H \rightarrow CH_2OH + H_2$ 임을 알 수 있다.

또, 재점화가 발생할 때에는 순간적인 화학 반응의 증가로 인하여 열방출률과 온도, 그리고 주요 라디칼들이 급격히 증가하는 것을 Fig. 4와 5로부터 알 수 있다. 이는 Mauss 등<sup>(5)</sup>의 결과와 정성적으로 일치한다.

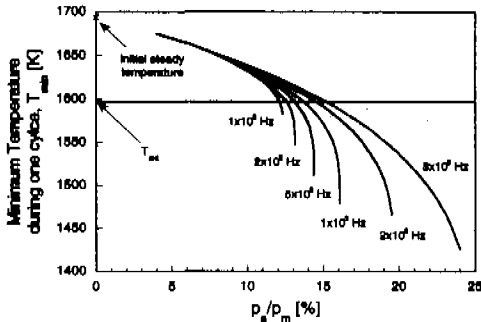


Fig. 6 Variations of minimum temperature during one cycle for various acoustic frequencies.

Figure 6에 다양한 가진 주파수에 대하여, 한 주기간의 응답 중에 가장 낮은 온도인  $T_{min}$ 과 가진한 음향파의 진폭과의 관계를 도시하였다. 작은 진폭에서는 화염이 정상상태의 온도에서 많이 벗어나지 않지만, 진폭이 증가하면 소멸영역에 근접하기 때문에 온도가 급격히 감소하는 것을 알 수 있다. 특히  $T_{min}$ 의 값이 정상상태의 소멸온도인  $T_{ext}$ 보다 매우 낮아졌음에도 불구하고 높은 주파수 ( $10^2 \sim 10^3$  Hz)로 인하여 화염이 중간가지에 머무르는 시간이 상대적으로 짧아지기 때문에 그 상태를 극복하고 화염이 유지되는 영역이 존재하는 것을 알 수 있다. 여기서 재점화 영역이  $T_{ext}$ 보다 낮은 부분에서 존재하는 사실은 주목할 만하다. 소멸점과 이 재점화 영역의 시작점의 차이는 가진 음향파의 진폭과 주파수에

따라 달라진다. 즉 화염의 음향파 가진에 의한 재점화 현상을 지배하는 인자로는 가진 음향파의 진폭과 주파수라고 할 수 있으며 이에 따라 이 인자들의 변화에 따른 재점화 영역의 외존성을 살펴보았다.

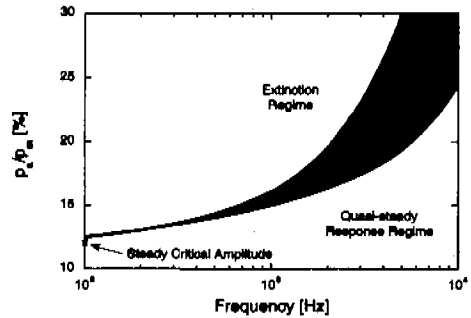


Fig. 7 Quasi-steady response, reignition and extinction regime with respect to acoustic amplitude and frequency.

가진하는 음향파의 진폭과 주파수에 따른 재점화 영역(reignition regime)과 직접적인 소멸이 일어나는 영역(extinction regime), 그리고 S-곡선의 윗가지(upper branch)에서만 응답을 보이는 준정상상태 영역(quasi-steady response regime)을 Fig. 7에 각각 도시하였다. 가진 주파수가 약  $10^2$  Hz 이하인 경우에는 재점화 현상이 발견되지 않았으며, 주파수가 증가할수록 재점화 영역이 넓어지는 것을 그림으로부터 알 수 있다. 이는 주파수의 증가에 따라 소멸영역에 머무르는 시간이 감소하는 것에 기인하며, 이 시간의 감소가 음향파 가진에 대한 화염의 강도를 유지시켜 화염이 정상상태의 소멸영역 근처에 이르지 못하게 한다. 따라서 주어진 진폭에 대하여 가진 음향파의 주파수가 증가할수록 직접적인 소멸이나 재점화 현상이 발생하지 않는다. 이러한 경향은 Ezekoye 등<sup>(6)</sup>의 결과와 정성적으로 일치한다. 또, 가진 주파수가 증가할수록 재점화 현상이나 직접적인 소멸을 야기시키는 진폭의 크기가 비선형적으로 증가하며, 이러한 양상은 직접적인 소멸을 일으키는 진폭의 경우에 더 뚜렷한 것을 Fig. 7로부터 알 수 있다. 만약 가진하는 주파수가 매우 커진다면 음향파 가진에 의한 화염의 직접적인 소멸은 관찰되기 힘들 것으로 예상된다.

## 4. 결 론

## 후 기

소염 근처의 정상 상태 메탄올 액적화염에 유향파 가진을 하였을 때, 특이한 화염의 응답으로서 화염의 재점화(reignition) 현상을 관찰하였다. 재점화 현상의 양상을 주파수와 진폭을 인자로 하여 화염의 응답을 얻음으로써 해석하였다.

메탄올 화염의 경우, 화학반응을 기작시키는 가장 중요한 라디칼이 H 라디칼임을 확인하였고, 이에 따라 연료쪽에서의 화학반응을 대표하는 것은  $\text{CH}_3\text{OH} + \text{H} \rightarrow \text{CH}_3\text{O} + \text{H}_2$  와  $\text{CH}_3\text{OH} + \text{H} \rightarrow \text{CH}_2\text{OH} + \text{H}_2$ 임을 알 수 있었다.

정상 상태 화염의 특성 S-곡선으로부터, 유향파 가진이 있을 경우 화염이 소염영역으로 접근할수록 화염의 응답이 커지며 어느 특정한 유향파 가진 조건에서 재점화 현상이나 직접적인 소염과 같은 비선형적인 응답이 발생할 수 있음을 예상할 수 있었다.

전체적인 특성으로서 가진하는 유향파의 주파수와 진폭에 따라 재점화 현상이 일어나는 영역을 얻었다. 이 때, 화염의 재점화 현상은 화염의 특성 화학반응 시간과 가진하는 유향파의 특성 시간이 서로 비슷한 크기를 가질 때 일어날 수 있었다. 즉, 작은 주파수의 유향파 가진에서는 이러한 재점화 현상이 일어나지 않으며 주파수의 크기가 커짐에 따라 재점화 현상이 일어나는 영역이 증가하는 경향을 보이는 것을 알았다. 본 연구에서 재점화 현상이 일어날 수 있는 주파수의 임계값은 약  $10^2$  Hz 정도였다.

실제적인 난류 유동장의 소화염들에서는 유향파에 따른 압력 변화에 의한 재점화 현상과 더불어, 주위에 존재하는 소화염으로부터의 전도 열 전달에 의한 재점화 현상도 일어날 가능성이 높은 것으로 예상된다. 이러한 유향파 가진에 의한 재점화 현상이 고려될 수 있는 소화염으로는 단일 액적화염과 함께 스트레인을 받는 대향류 소화염이 있으며, 난류 유동장에서 압력 교란 외에 유동 교란도 존재하므로 향후에는 본 연구에서 얻은 정보를 기반으로 스트레인을 받는 소화염의 유동 교란에 의한 재점화 특성을 연구하고자 한다.

본 연구는 서울대학교 터보·동력기계연구센터의 지원으로 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Williams, F. A., 1985, *Combustion Theory*, Addison-Wesley, 2nd Ed.
- (2) Kim, J. S. and Williams, F. A., 1994, "Contribution of Strained Diffusion Flames to Acoustic Pressure Response," *Combustion and Flame*, Vol. 98, No. 3, pp. 279~299.
- (3) Sohn, C. H., Chung, S. H., Kim, J. S., and Williams, F. A., 1996, "Acoustic Response of Droplet Flames to Pressure Oscillations," *AIAA Journal*, Vol. 34, pp. 1847~1854.
- (4) Kim, H. J., Sohn, C. H., Chung, S. H., and Kim, J. S., "Nonlinear Acoustic-Pressure Response of Oxygen Droplet Flames Burning in Gaseous Hydrogen," submitted to *Combustion Science and Technology*.
- (5) Mauss, F., Keller, D., and Peters, N., 1990, "A Lagrangian Simulation of Flamelet Extinction and Re-ignition in Turbulent Jet Diffusion Flames," *Twenty-third Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, Pittsburgh, pp. 693~698.
- (6) Ezekoye, O. A. and Zhang, Z., 1995, "Modeling of a Lagrangian Flamelet with Radiation Interaction," *Combustion Science and Technology*, Vol. 106, pp. 363~382.
- (7) Zhang, B. L., Card, J. M., and Williams, F. W., 1996, "Application of Rate-Ratio Asymptotics to the Prediction of Extinction for Methanol Droplet Combustion," *Combustion and Flame*, Vol. 105, No. 3, pp. 267~290.
- (8) Müller, C. M., Seshadri, K., and Chen, J. Y., 1993, "Reduced Kinetic Mechanisms for Counter-flow Methanol Diffusion Flames," *Reduced Kinetic Mechanisms for Applications in Combustion Systems*, Edited by Peters, N.



- and Rogg, B., pp. 284~307.
- (9) Crespo, A. and Liñán, A., 1975, "Unsteady Effects in Droplet Evaporation and Combustion," *Combustion Science and Technology*, Vol. 11, pp. 9~18.
- (10) Kee, R. J., Warnatz, J., and Miller, J. A., 1983, "A Fortran Computer Code Package for the Evaluation of Gas-Phase Viscosities, Conductivities, and Diffusion Coefficients," Sandia National Laboratories Report, SAND 83-8209.
- (11) Kee, R. J., Rupley, F. M., and Miller, J. A., 1989, "CHEMKIN-II : A Fortran Chemical Kinetics Package for the Analysis of Gas-Phase Chemical Kinetics," Sandia National Laboratories Report, SAND89-8009.
- (12) Li, S. C. and Williams, F. A., 1996, "Experimental and Numerical Studies of Two-Stage Methanol Flames," *Twenty-sixth Symposium(International) on Combustion*, The Combustion Institute, Pittsburgh, pp. 1017~1024.
- (13) GRI-mechanism Version 2.1, released 9/6/1995, CHEMKIN-II format (<http://www.gri.org>).
- (14) Hass, H. B. and Newton, R. F., 1994, "Correction of Boiling Points to Standard Pressure," *CRC Handbook of Chemistry and Physics(75th Edition)*, edited by Lide, D. R., CRC Press.
- (15) West, C. J., 1933, *International Critical Tables of Numerical Data, Physics, Chemistry and Technology*, National Research of Council, McGraw-Hill.
- (16) Smooke, M. D., 1982, "Solution of Burner Stabilized Premixed Laminar Flames by Boundary Value Methods," *Journal of Computational Physics*, Vol. 48, pp. 72~105.