

# 축방향 유속변동에 의한 관내 예혼합화염의 소화특성에 관한 이론적 연구

김남일\* · 신현동\*\* · 배충식\*\*\*

## A theoretical study on the extinction of the premixed flame in a tube caused by a longitudinal velocity variation

Nam Il Kim, Hyun Dong Shin, Choong Sik Bae

**Key Words:** Premixed Flame, Extinction, Flame Stretch, Unsteady Propagation

### Abstract

Many previous researches on the premixed flame in a tube have treated the unsteady flame behaviors but more detailed and fundamental research has been necessary. The study on the flame stabilization condition in a tube and the unsteady behaviors were carried out in recent years. In this paper, a mean velocity variation larger than the burning velocity was introduced to the stabilized flame for a period longer than the reaction time scale in order to examine the unsteady behavior of flame propagation. Through our previous work it was found that the effects of non-unity Lewis number on the flame extinction was negligible in the extinction by the boundary layer even though they were important in the extinction by the acoustic instability. In this paper we carried out an analytic approach to explain the previous experimental results. It showed that the heat loss, from a flame to the wall, is not a sufficient condition but a required one for the growth of the extinction boundary layer. In addition, the quenching and the flame stretch, under a strong unsteady flow field, are the main causes of the eventual extinction.

### 기호설명

- $\phi$  : 당량비
- $V_m$  : 관내 평균유속
- $\Delta V_m$  : 관내 평균유속의 변동량
- $\Delta L$  : 관 단면기준 스트로크
- $\Delta t$  : 유속변동의 지속시간
- $\tau_r$  : 대류시간스케일
- $\tau_r$  : 반응시간스케일
- $T_{ad}$  : 단열화염온도

### 1. 서론

관내 예혼합 화염의 연소특성에 관한 연구는 연소 장치의 안전 설계와 내부연소를 이용하는 다양한 시스템의 구동특성을 이해하는데 기초가 된다. 관련 연구로는 초기에는 소염직경(quenching diameter)과 화염전파를 이용한 연소속도 측정 등이 이루어 졌으며, 이후에 밀폐된 관내 화염전파에서 관찰되는 화염의 진동이나 다양한 화염의 모양들(tulip or cusp, finger or mushroom)에 관한 연구가 화염안정성 등의 관점에서 다루어졌다<sup>(1,2)</sup>. 근래에는 관내 정

---

\* 한국과학기술원  
 \*\* 한국과학기술원 기계과  
 \*\*\* 한국과학기술원 기계과

지화염에 대해 유속을 인위적, 독립적인 실험변수로 이용하는 실험들이 행해지고 있다. Searby<sup>(3)</sup>, Choi<sup>(4)</sup> 등은 스피커를 이용한 음파가진을 통해 화염의 응답특성을 연구하였다. 그러나 선행연구자들의 경우 실험의 초기조건이 되는 관내 정지화염의 특성에 관한 연구가 부족하였으며, 스피커가진의 경우 높은 주파수의 복잡한 유동장을 유도할 수 있는데 반해 큰 유속변동을 충분한 시간동안 가할 수 없어서 소화 등의 직접적인 화염강도의 변화를 관찰할 수 없었다.

이러한 이유로 본 연구자들은 이전의 연구에서 화염이 관내에 정지하는 조건에 대한 실험을 보다 엄밀히 행하였으며, 그러한 조건에서 직경과 행정거리가 큰 피스톤을 이용하여 연소속도보다 큰 유속변동을 화염의 반응시간스케일 보다 긴 시간동안 가하는 실험을 행하였다<sup>(5,6,7)</sup>. 그 결과 예혼합 화염이 관내에 평면화염과 유사한 특성을 가지며 존재하는 조건을 발견하였으며, 이러한 조건이 유속변화에 의한 화염의 거동특성을 연구하는 초기조건으로 적합함을 보였다. 그리고 유속변동에 의한 화염의 소화는 음향파에 의한 소화와 벽면 근처에서 생성된 소화영역의 성장에 의한 소화경계층(extinction boundary layer)에 의한 소화로 구분될 수 있음을 보였다. 특히 소화경계층에 의한 소화는  $Le$  수에 무관하게 동일한 특성을 가지므로 열-물질 확산과 무관하게 화염 스트레치에 의해 발생하는 현상을 보였다.

그러나 이러한 접근은 그 특성을 설명하는 것은 가능하지만 비정상 과정의 화염 소화를 이해하기에는 부족하여서 보다 이론적인 접근이 요구되었다. 이에 본 연구에서는 소화경계층에 의한 소화를 간단한 모델을 통해 보다 이론적으로 설명하고자 한다.

## 2. 관내화염 실험결과

### 2.1. 실험방법

실험에 사용된 관은 내경46mm, 외경50mm, 길이 120cm의 석영관이며, 관의 아래쪽에 유속변동을 가하기 위한 120mm 직경의 피스톤을 설치하였다. 피스톤은 행정거리와 속도를 조절할 수 있도록 제작되었다. 실험에 사용된 연료는 99% 이상의 순도를 가지는 프로판, 메탄과 공기의 혼합기이다.

실험의 초기조건은 프로판/공기의 경우 당량비( $\phi$ ) 0.54-0.60, 메탄/공기의 경우 당량비 0.59-0.63 영역에서 화염의 전파속도가 관내에 공급되는 예혼합기의 평균속도( $V_m$ )와 균형을 이루어 화염이 관내에 정지하는 조건이다. 이 때 화염의 온도를 0.25mm K-타입 열전대와 25.4  $\mu$ m R-타입 열전대를 이용하여 측정한 결과이다. 두 온도의 차이는 열전대에서 발생하는 복사로 인한 온도손실이 그 주된 원인이다. 벽면 근처에서의 온도 변화 영역은 K-타입 열전대의 결과로 알 수 있으며, 화염면의 실제 온도는 R-타입 열전대 결과로 보다 잘 예측할 수 있다.

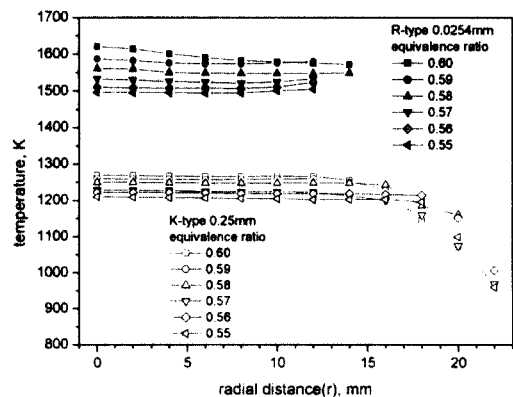


Fig. 1 화염정지조건에서 반경방향 화염 온도분포

당량비에 무관하게 벽면으로의 열손실이 발생하는 영역은 벽면 근처 6mm 정도임을 알 수 있다. 따라서 정지한 화염의 상당부분에서는 반경방향 열손실을 무시할 수 있는 조건이다.

이러한 초기조건에 유속변동을 가하고 화염의 비정상(unsteady) 전파특성을 관찰하였다. 실험변수는 Fig.2와 같이 정의되는데, 관 단면을 기준으로한 스트로크( $\Delta L$ )와 관내 평균유속의 변동량( $\Delta V_m$ )이며 유속변동의 지속시간( $\Delta t$ )은 두 변수의 비로 구할 수 있다. 초기의  $V_m$ 과 동일한 방향의 유속변동을 정방향 유속변동,  $\Delta V_m > 0$ , 그 반대를 역방향 유속변동,  $\Delta V_m < 0$ , 이라 정의 하였다.

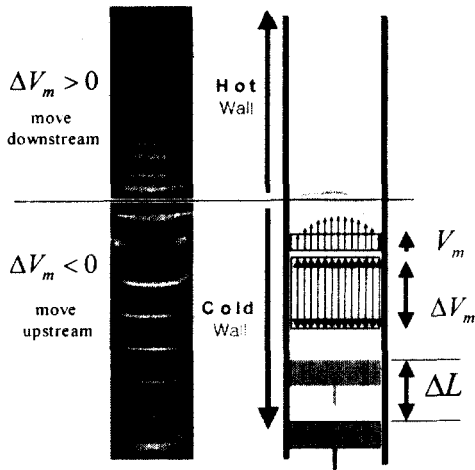


Fig. 2 비정상 실험 변수와 화염 거동

## 2.2. 실험결과

선행 연구를 통해 유속변동에 따른 화염의 소화특성을 실험적으로 구하였는데, 그 대표적인 결과가 Fig. 3와 같다. 각각의 당량비에 대한 선의 위쪽에서는 화염이 소화되며, 아래쪽에서는 화염이 소화되지 않는 조건을 의미한다.

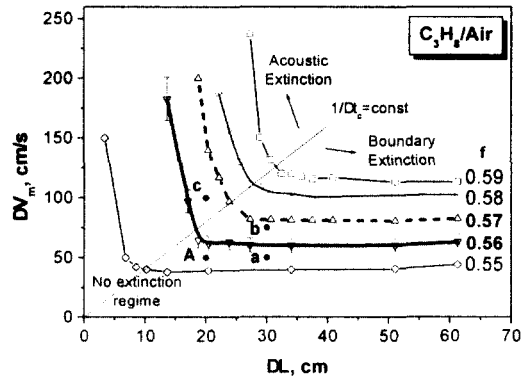


Fig. 3 프로판/공기 예혼합 화염의 소화특성<sup>(5)</sup>

$\Delta L$ ,  $\Delta V_m$ 의 변화에 따라 화염의 소화특성이 확연히 구분되는데, 특히  $\Delta t > 0.25$ 인 영역에서는 당량비별로  $\Delta V_m$ 이 특정값 이상일 때  $\Delta L$ 에 무관하게 화염이 소화되는 것을 알 수 있는데, 이 영역을 경계층 소화 영역으로 정의하였으며 실험조건, A, a, b, c에 해당하는 화염의 거동을 Fig.4에 나타내었다.

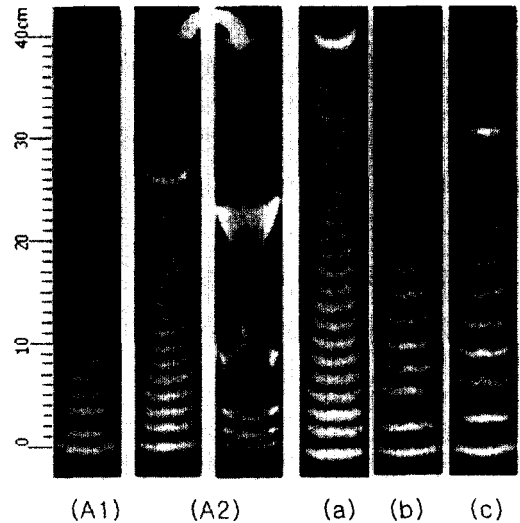


Fig. 4 화염전파 모양<sup>(5)</sup> (당량비, 스트로크, 유속변동) A1: 0.55, 20cm, 50cm/s, A2: 0.56, 20cm, 50cm/s, a: 0.56, 30cm, 50cm/s, b: 0.56, 30cm, 75cm/s, c: 0.56, 20cm, 100cm/s

화염이 경계층 소화조건에 있는 경우에는 화염 가장자리의 소화 영역이 관 중앙까지 성장하여 궁극적인 소화가 발생함을 알 수 있다. 이러한 특성을 가지는 경계층 소화조건에 대한 이론적인 접근이 본 연구의 주 목적이다.

이 때 벽면으로의 열손실이 화염소화의 충분조건이 되지 않는 것은 두 가지 결과로부터 알 수 있다. 1) 역방향 유속변동시 화염이 차가운 벽면의 내부로 이동하고 정방향 유속변동시 뜨거운 벽면 내부로 이동하지만 화염 소화는 오히려 정방향 유속변동에서 발생함. 2) 정지 화염에 대해 초기 온도를 반경방향으로 측정한 결과인 Fig.1에서 알 수 있듯이 벽면으로 온도구배가 발생하는 영역은 벽면에 가까운 부분에만 해당함.

### 3. 소화경계층 성장 이론

#### 3.1. 비반응 유동장

초기에 관내에 완전발달된 유동이 급격한 유속변동에 의해 새로운 완전발달 유동으로 발전하는 문제는 연속방정식(1)과 축방향 운동량 방정식(2)을 동시에 만족하도록 압력구배 항을 수정해가는 방법에 의해 이론해가 수치적으로 구해질 수 있다.

$$\int_0^R 2\pi r V(r, t) dr = \pi R^2 (V_m + \Delta V_m) \quad (1)$$

$$\frac{dV(r, t)}{dt} = \nu \left( \frac{d^2 V(r, t)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dV(r, t)}{dr} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{dP(t)}{dx} \quad (2)$$

그 결과를 Fig.5에 나타내었다. 유속변동이 가해진 직후에는 관 내부의 유동이 전체적으로 균일하게 증가하며 대략 5초 정도 지난 다음에 관내에 새로운 완전발달 유동이 형성됨을 알 수 있다.

Fig.6에서는 이러한 방법으로 예상되는 관 중앙에서의 유속변화를 LDV를 이용해 측정한 결과와 비교하였다. 그 결과 실험

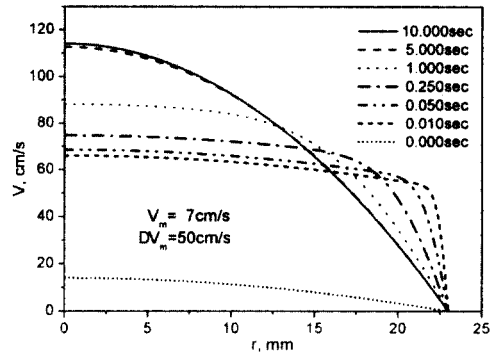


Fig. 5 급격한 유속변동에 의한 관내 유속의 변화

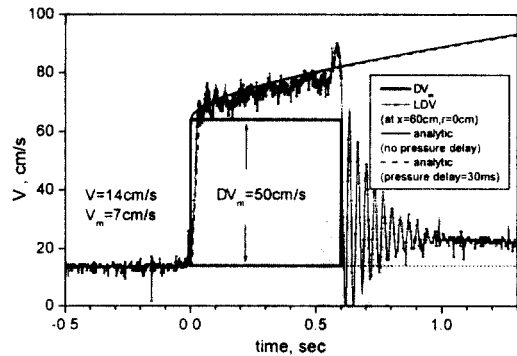


Fig. 6 급격한 유속변동이 있는 관내 비반응 유동장의 관 중심에서의 속도 변화와 이론해의 비교

과 이론해가 유사하며, 실제의 경우 발생하는 가속지연시간 30ms 정도를 고려하여 이론해를 구하면 더욱 일치함을 알 수 있다.

이처럼 관내 유동이 새로운 정상상태에 이르는데 요구되는 시간을 대류시간스케일 ( $\tau_v$ )로 정의하자. 식(2)에서 알 수 있듯이 이러한 대류시간스케일은 관내 평균 동점성계수에 비례하게 되는데, Table 1과 같이 관내 화염이 있는 경우의 대류시간스케일은 비반응 유동장에서의 대류시간스케일 ( $\tau_v^0$ )에 대해 대략 1/10 정도의 값을 가지게 되므로 0.5초 이내에 관내유동이 새로운 정상상태로 발달하게 될 것을 예상할 수 있다. 이러한 화염면 주변의 유동조건에서

화염면에 발생하는 스트레치를 살펴보기로 하자.

Table 1 관내 화염이 있는 경우 대류시간스케일의 비교

$\phi$	$T_{ad}$ , [K]	$\bar{\nu}$ , [cm <sup>2</sup> /s]	$\tau_v/\tau_v^0$
0	300	0.158	1
0.54	1587	1.342	0.118
0.56	1625	1.390	0.114
0.58	1663	1.438	0.110
0.60	1701	1.487	0.106

### 3.2. 화염면 스트레치

정방향 유속변동시에는 변면근처의 화염면이 양의 스트레치를 받게 되고 역방향 유속변동시에는 음의 스트레치를 받음을 선행연구에서 밝힌바 있다.<sup>(5)</sup> 이러한 결과로 Fig.2에 보듯이 정방향 유속변동시에는 가장자리 소화가 발생하지만 역방향 유속변동에서는 화염면 가장자리는 보다 안정적으로 존재하는 것을 설명할 수 있었다.

정방향 유속변동시에 변면근처의 화염면을 Fig.7에 간단히 표현하였다.

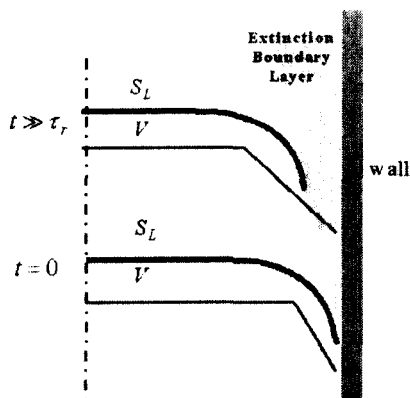


Fig. 7 소화경계층 근처에서 유속과 연소속도 변화

화염이 벽면 근처에 있거나 가장자리가 소화된 경우에 그 근처에서는 반경방향으로 열손실이 발생하므로 화염의 연소속도가 감소하게 되며 이러한 현상은 소염직경 (quenching diameter) 보다 작은 공간에 노출된 화염과 물리적으로 유사한 특성을 가질 것으로 생각할 수 있다. 이러한 가장자리 화염에 대해 Fig.8과 같이 화염면에 수직, 수평 단위벡터를  $n$ ,  $\perp$ 로 정의하고 화염면의 기울기를  $\theta$ 로 정의하자.

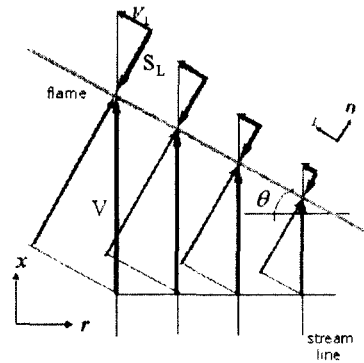


Fig. 8 벽면이나 소화영역 근처에서의 화염면에서의 유속과 연소속도

이 때 화염면에 발생하는 스트레치는 일반적으로 많이 쓰이는 다음의 식으로부터 유도할 수 있다.<sup>(8)</sup>

$$K \equiv \frac{1}{A_f} \frac{dA_f}{dt} = \nabla_{\perp} \cdot V_{\perp} + (V \cdot n)(\nabla_{\perp} \cdot n) \quad (3)$$

연소속도의 변화는 대략 화염대 두께와 비슷한 스케일에서 변화하는데 반해 화염면의 곡률 변화는 화염대 두께에 비해 큰 길이스케일에서 중요하므로 두 번째 항은 무시할 수 있다. 화염면의 접선방향 속도 성분은 원통좌표계에서 다음과 같이 성분분해할 수 있다.

$$\vec{V}_{\perp} = -V_{\perp} \cos \theta \hat{r} + V_{\perp} \sin \theta \hat{x} \quad (4)$$

$$V_{\perp} = S_L \tan \theta$$

스트레치 식의 첫 번째 항을 전개하면,

$$\begin{aligned}
\nabla_{\perp} \cdot V_{\perp} &= \nabla \cdot \vec{V}_{\perp} \\
&= -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r V_{\perp} \cos \theta) + \frac{\partial}{\partial x} (V_{\perp} \sin \theta) \\
&= -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r S_L \sin \theta) + \frac{\partial}{\partial x} (S_L \tan \theta \sin \theta) \\
&= \sin \theta \left( -\frac{S_L}{r} - \frac{\partial S_L}{\partial r} - \tan^2 \theta \frac{\partial S_L}{\partial r} \right) \\
&= -\sin \theta \frac{S_L}{r} - \sin \theta \sec^2 \theta \frac{\partial S_L}{\partial r} \\
&= -\sin \theta \frac{S_L}{r} + \tan \theta \frac{dS_L}{d\perp} \quad (5)
\end{aligned}$$

여기서  $\theta$ 는 다음의 식에서 수치적으로 explicit 하게 구할 수 있다.

$$\frac{d\theta}{dt} = -\frac{dV}{dr} \cos \theta - \frac{dS_L}{d\perp} \quad (6)$$

$$\theta_{t+\Delta t} = \theta_t - \left[ \frac{dV}{dr} \cos \theta_t + \frac{dS_L}{d\perp} \right] \Delta t \quad (7)$$

여기서 반경방향 속도구배( $dV/dr$ )는 앞서의 연속방정식과 운동량 방정식을 연립하여 구한 결과로부터 얻어지므로 화염면을 따른 연소속도의 변화( $dS_L/d\perp$ )를 알면 화염면에 작용하는 스트레치의 강도를 예측할 수 있다. 온도에 따른 연소속도는 다양한 형태로 표현되는데, 예를 들면 다음과 같은 식을 사용할 수 있다. <sup>(9)</sup>

$$S_L = \left[ -2\alpha(\nu+1) \frac{M_F \omega_F}{\rho_u} \right]^{1/2} \quad (8)$$

일반적으로 Arrhenius 타입의 반응을 고려하고 당량비가 결정되면 임의의 상수(A)와 지수항으로 표현된다.

$$S_L = A \exp\left(\frac{-T_a}{2T}\right) \quad (9)$$

여기서  $T_a$ 는 반응온도(activation temp., K)이며, 연료와 반응에 의해 결정되는데, 프로판/공기의 1단계 반응의 경우 15098K이다. 위 식을 온도에 대해 미분하면,

$$\begin{aligned}
\frac{dS_L}{dT} &= A \exp\left(\frac{-T_a}{2T}\right) \left(\frac{T_a}{2T^2}\right) \\
&= S_L \left(\frac{T_a}{2T^2}\right) \quad (10)
\end{aligned}$$

화염면을 따라 연소속도의 구배는 소화과정동안 다양하게 변화하겠지만 그 대략적인 크기를 아는 것이 화염 소화를 설명하는데 중요하므로 Fig.1의 온도측정 결과

로부터 다음과 같이 근사할 수 있다. 온도구배가 있는 영역은 6mm, 화염온도는 약 1600K, 벽면온도는 약 900K, 평균온도는 1250K를 사용하고 이때 연소속도는 당량비 0.56에서의 값 9.68cm/s를 사용하였다.

$$\begin{aligned}
\frac{dS_L}{d\perp} &= S_L \left(\frac{T_a}{2T^2}\right) \frac{dT}{d\perp} \\
&\sim S_L \left(\frac{T_a}{2T^2}\right) \frac{dT}{dr} \\
&\sim (9.68) \left(\frac{15098}{2(1600)^2}\right) \left(\frac{900-1600}{0.6}\right) \\
&\sim -33.3 \text{ [1/s]}
\end{aligned} \quad (11)$$

예를 들어 Fig.3의 당량비 0.56, "a" 조건에 대해 초기속도 9.68cm/s, 관내 평균온도 950K 유속변동크기 50cm/s 인 경우에 유속변동 초기 30ms 동안 가속기간을 두어서 실제 실험 결과와 유사한 조건을 가지도록 하고 수치적으로  $dV/dr$ 를 구하였다. 시간경과에 따른 반경방향 각 위치에서 Karlovitz수( $Ka$ )를 다음과 같이 구한다..

$$Ka = K\tau_r = K \frac{\delta_f}{S_L} \approx K \frac{\alpha(T_m)}{S_L^2} \quad (12)$$

여기서  $\delta_f$ 는 화염대 두께이며, 본 연구에서는 평균온도에서의 열확산계수를 연소속도로 나눈 값으로 정의하였다. 유속변동이 있을 때 화염의 위치에서 시간 경과에 따라 변화하는 Karlovitz 수의 반경방향 분포를 구한 결과가 Fig.9이다.

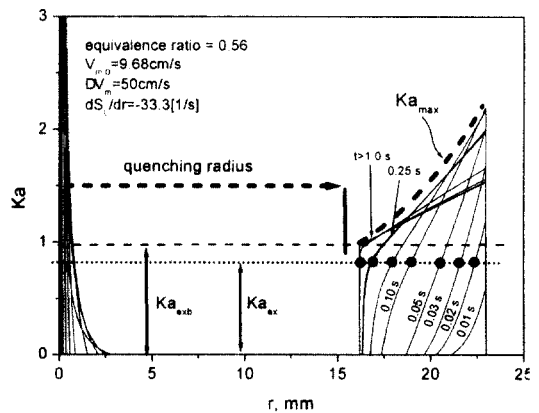


Fig. 9 유속변동시 화염대에서의 Karlovitz 수의 변화 (소화경계층 성장, 비소화 조건)

유속변동에 의해 유발되는  $Ka$ 의 최대값 ( $Ka_{max}$ )은 각 시간에 해당하는  $Ka$  값들의 외곽선들로 이루어진다. 연료와 당량비에 대해 소화가 발생하는  $Ka_{ex}$  값은 결정될 것이므로  $Ka > Ka_{ex}$  조건에서 소화가 발생할 것이다. 소화 경계층의 성장을 위해서는 실제로 소화가 발생하는  $Ka_{ex}$  가  $Ka_{max}$ 의 최소값보다 작아야 하는데, 이를 경계층소화 Karlovitz 수 ( $Ka_{exb}$ )라 하자.

시간이 경과함에 따라 소화가 발생하는 영역이 벽면에서 관 내부로 성장해 가며, 0.25초 이후에는 시간에 무관하게 소화영역의 성장이 더 이상 성장하지 않는 것을 보여준다. 이는 Fig.4(a)에 해당하는 조건이며, 이 때 관내 소염직경(or 반경)이 유지되고 있는 화염의 직경보다 작아야 할 것이다.

만일, 유속변동의 크기가 증가하면 Fig.10과 같이 소화경계층의 침투가 소염직경 내부에 이르게 되고 화염은 궁극적으로 완전히 소화하게 되는 것으로 설명된다.

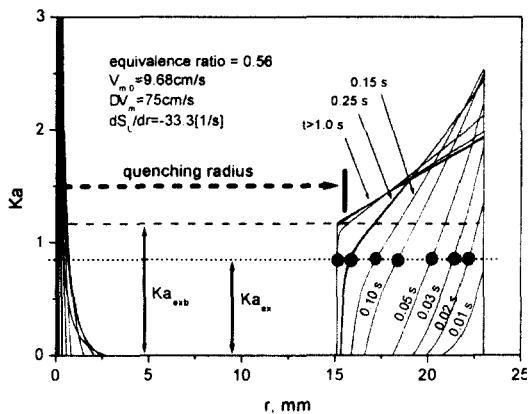


Fig. 10 유속변동시 화염대에서의 Karlovitz 수의 변화 (소화경계층 성장, 소화 조건)

만일, 초기에 벽면으로의 열손실이 작거나 반경방향 연소속도의 차이가 작은 경우에는 ( $dS_L/dr \rightarrow 0$ ) 소화경계층의 성장은 억제 될 것임을 다음의 당량비 0.57인 조건

에서  $dS_L/dr = -3.33$  으로 두고 계산한 Fig.11의 결과에서 알 수 있다. 이 때 당량비의 증가는 소염직경을 감소시키며,  $Ka_{ex}$ 를 증가시키게 된다.

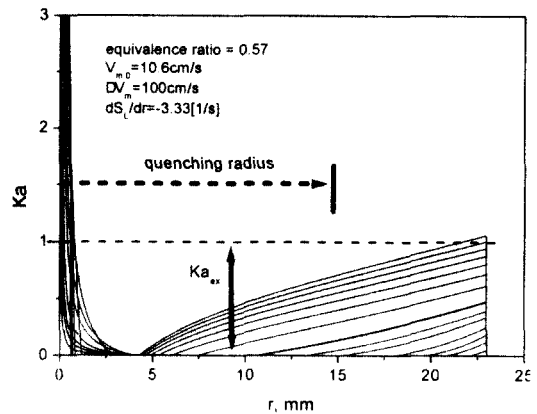


Fig. 11 유속변동시 화염대에서의 Karlovitz 수의 변화 (소화경계층 없음, 비소화 조건)

#### 4. 결론

1. 관내에 정지한 화염에 연소속도보다 크고 반응시간스케일 보다 오랫동안 속도변동이 가해지면 당량비에 따라 국부적 소화와 완전 소화가 발생하는 조건이 변화한다.

2. 초기 유속과 동일한 방향의 유속변동에 대해 벽면으로부터 소화영역의 성장을 관찰 할 수 있는데, 이러한 소화영역의 존재는 열손실 등에 의해 유발된 화염면에서의 연소속도의 불균일이 급격한 유속변동에 노출될 때 발생하는 비정상 스트레치에 의해 설명될 수 있다.

3. 화염면에 발생하는 비정상 스트레치의 크기는 연속방정식, 축방향 운동량 방정식을 연립해에서 구한 속도와 반경방향 화염의 온도분포에서의 유추된 연소속도의 구배를 이용하여 그 특성을 설명할 수 있다.

## 후기

본 연구에 지원해 주신 연소기술연구센터(CERC)와 국가지정연구실(직접분사식 엔진연소 최적화기술)에 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Salamandra, G. D., Formation of Detonation Wave During Combustion of Gas in Combustion Tube Proc. Combust. Inst. 7: 851-855 (1958)
- (2) Lewis, B., Elbe, G., Combustion, Flames and Explosions of Gases, ACADEMIC PRESS, INC.(1987)
- (3) Searby, G., Rochwerger, D., A Parametric Acoustic Instability in Premixed Flames, J.Fluid Mech. 231, 529-543 (1991)
- (4) Choi, B. I., Shin, H. D., "Flame/Flow Interaction in Oscillating Flow Field" Flow, Combustion Science and Technology, vol.159, pp. 87-107 (2001)
- (5) Kim, N. I., Lee, U. D., Shin, H. D., Laminar Premixed Flame Propagation Using Large Axial Velocity Variation, Proc. Combust. Inst. 28. pp.1867-1874 (2000)
- (6) 김남일, 이은도, 신현동, "급격한 유속변동에 의한 관내 Air/C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> 예혼합 화염의 소화 특성에 관한 실험적 연구", 대한기계학회 2001년도 논문집 B권 25권 4호, pp. 540-545
- (7) Kim, N. I. Lee, U. D., Shin, H. D., Lewis Number Effects on Premixed Flame in a Tube Using Large Axial Velocity Variation, 3rd Asia-Pacific Conference on Combustion. pp.429-432 (2001)
- (8) Chung, S. H., Law, C. K., Combust. Flame, 55, 123-125 (1984)
- (9) Turns, S. R., An Introduction to Combustion, McGraw-Hill, Inc. 1996