

# 등방성 난류 유동장내 예혼합 화염의 자유 전파속도에 관한 실험적 연구

이상준\* · 노동순†

## Propagation Characteristics of Turbulent Premixed Flames in Nearly Isotropic Turbulent Flows

S. J. Lee and D. S. Noh

### ABSTRACT

Propagation speeds of turbulent premixed flames have been measured in a pulsed-flame flow reactor which generates flames propagating in nearly isotropic turbulent flow field with  $u'/S_L$  ranging from 1.2 to 5.3. The measurement involved a high-speed digital imaging at 1000 frames/second to capture the flame propagation motion. In addition to the flame speed measurements, flame perimeter ratio was measured for comparison. The observed flame propagation speed is high ranging from 5 to 20 times the laminar flame speed for the range of  $u'/S_L$ . The flames observed at extreme equivalence ratios exhibit intermittent propagation in that only a small fraction of ignited flame kernel resulted in full propagation of the flame. Also, at low equivalence ratios the flame speed decreased substantially even at high turbulence intensities.

**Key Words** : Turbulent, Premixed Flame, Flame Speed

### 기 호 설 명

$u'$ Turbulent intensity (same direction of mean flow)	$S_L$ Laminar flame speed
$v'$ Turbulent intensity (tangential direction of mean flow)	$S_T$ Turbulent flame speed
$\phi$ Equivalence ratio	$P_L$ Laminar flame perimeter
	$P_T$ Turbulent flame perimeter

### 1. 서 론

난류 예혼합 연소는 난류와 연소화학 간의 복잡한 상호작용이 포함된 하나의 동적 진행과정이다. 난류에서의 예혼합 화염의 구조는 실질적인 연소장치의 효율성과 밀접한 관계를 가지고 있는

연소 유동역학에 있어서 하나의 중요한 문제로 대두되고 있다. 특히 추진기관과 에너지 변환시스템에 대한 적용 때문에 이 분야에 대한 많은 연구들이 집중되어 왔으며, 이런 연구 목적중의 하나는 난류 예혼합 화염 전파속도에 대한 예측 능력을 갖는 것이었다.

난류가 예혼합 화염의 질량 연소율(mass burning rate)을 향상시킨다는 것은 쉽게 알 수 있지만, 그 양을 정확히 예측한다는 것은 쉽지 않은 문제이다. 난류의 매개변수의 함수로 화염 속도에 대한 실험적이고 이론적인 모델들에 대한

\* KIER, 한국에너지기술연구소

† 연락저자, dsnoh@kier.re.kr

시도들은 그 동안 일관성이 없는 결과를 보여주었다. 이러한 현상은 난류 연소율의 정확한 예측은 난류의 유동과 화염간의 상호작용에 의존된다는 사실을 보여준다. 이러한 작용은 난류의 유동장이 화염 내에서의 구조와 transport 비율에, 또한 동시에 화염구조와 발열비등은 난류 유동장에 영향을 준다고 할 수 있겠다. 그러므로 난류 화염 전파속도의 예측 향상에 대한 이러한 과정들에 대한 많은 실험적 연구들이 이루어져야 한다.

Abdel-Gayed 등[1]에 의해 난류화염 전파속도에 관한 심도 깊은 많은 연구와 데이터들이 축적되었다. 최근 이러한 분야에 대한 연구는 난류 예혼합 화염면(flame surface)의 특성에 초점이 맞추어지고 있으며, 주어진 버너 형태에서의 화염면의 특성과 전파속도간의 연관성 그리고 직접적인 비교로 모아진다.

화염면에 대한 영역, 굴곡(curvature), 그리고 orientation statistics 등은 화염면에 대한 기하학적인 설명이 제공되어진다.[2] Lee 등[3,4,5]은 이런 화염특성에 대한 실험을 여러 Lewis number에 대하여 자유롭게 진행되는 화염에서, 또한 제트 화염 버너 상에서 측정하였으며, 이러한 결과들은 난류상의 주름현상(wrinkle)이 미연혼합기 쪽으로 향하는 둥근형태의 굴곡을 생성시키는 국부연소속도에 전반적으로 영향을 준다는 사실을 보여주었다.

화염면에 대한 fractal analyses는 화염 전방부를 전 영역에 걸친 난류조건들에 대하여 fractal 하였고, fractal 차원 그리고 outer cutoff scale에 대한 측정이 여러 가지 화염형태에서 이루어지었다[6,7]. 공간 해상도 문제로 인하여, 지난 몇 년 사이, inner cutoff에 관한 측정만이 보고 되었는데 그중 North 등[8] 과 Gulder 그리고 Smallwood[9]에 의해 측정된 inner cutoff는 난류강도에 대하여 매우 작은 변화를 가지고 있었다. 그러므로 만약 fractal 방정식,  $(A_T/A_L) = (\epsilon_o/\epsilon_i)^{D_f-2}$ 에서, outer cutoff( $\epsilon_o$ ), inner cutoff( $\epsilon_i$ ), 그리고 fractal dimension( $D_f$ )을 이용하여 화염면의 변화를 계산한다면,  $u'/S_L$ 이 factor 10으로 증가 할 때, 화염면은 약 factor 3으로 증가하는 결과를 가져온다. 그러나 이것은 같은  $u'/S_L$  범위 안에서 Abdel-Gayed[1]등에 의해 관측된 값의 factor 보다 훨씬 낮은 것이다.

이러한 결과로 볼 때, 난류 예혼합 화염의 전파속도와 화염면에 대한 직접적인 측정과 관측이 요구된다. 본 연구에서는 pulsed flame flow reactor로써의 기능을 가지는 버너구조를 사용하여 강한 난류강도에서 자유롭게 아래로 진행되는 난류 예혼합 화염에 대하여 가시화 방법에 의한 전파 특성을 알아보고자 한다.

## 2 실험장치 및 방법

Fig. 1은 pulsed flame flow reactor를 나타낸다. 이 버너에서는 거의 일차원적으로, 자유롭게 진행되는 난류화염을 생성할 수 있다. 아랫방향으로 진행되는 화염은 전파속도와 면접부의 특성에 대한 평균 측정값을 얻기 위해서 계속해서 반복적으로 생성될 수 있다. 또한 강한 난류 강도( $u'/S_L$  값 6.0까지)를 만들어 낼 수 있는데, 이것

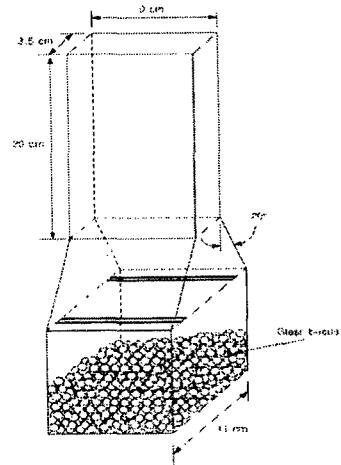


Fig. 1 Schematic drawing of the burner system

은 Fig. 1에서 나타났듯이 두 개의 슬롯(slot)을 통해서 나오는 유동에 의해 생성되어지는 서로 각 각 다른 방향으로 회전하는 한 쌍의 vortex로 인한 것이다. 유동의 바로 아래쪽에 있는 contraction영역은 이러한 vortex를 break-up를 시켜서 테스트 영역에서 강한 난류를 생성시킬 수 있다. 그러나 난류의 소멸현상(turbulence decay)에 의하여, 난류 강도는 버너의 길이에 따라 변하게 되며, 버너 본체 밑 부분에 직경 약 2-3 mm의 glass beads를 사용하여 연료와 공기의 혼합기가 균일하게 분산될 수 있도록 하였다.

이 실험장치는 연료와 공기의 예혼합기가 버너 밑 부분의 슬러그(slug)를 통해서 테스트 영역으로 흐르게 되며, 연료는 solenoid 밸브를 통하여 통제되어진다. 한편 혼합기의 점화를 위해서 electrode를 이용하였으며, 모든 제어장치들은 컴퓨터를 이용한 데이터 습득/제어 보드를 사용하였으며, 매 4초 간격으로 반복 실험이 가능하다.

화염 속도에 대한 특성을 위해서 LDV로 유동속도의 평균값과 난류강도를 측정하였다. 이 LDV는 100mW의 He-Ne 레이저를 사용하였으며, 이 레이저 probe의 직경과 길이는 각각 50

과  $500\mu\text{m}$ 이다. 측정되는 유동속도의 노이즈 제거와 data rate를 높이기 위하여 40Mhz의 frequency shift를 사용하였다. 또한 버너에서의 유동 속도측정을 위해서는 각 위치에서 약 1000개 정도의 샘플을 측정하였으며, LDV seeding particle로는 약  $1\mu\text{m}$ 의 입자크기의 실리콘 오일을 사용하였다.

화염 전파속도는 pulsed flame flow reactor에서 고속 디지털 카메라를 이용하여 직접적으로 측정하였다. Redlake사의 이 디지털 카메라는 초당 1000장을 촬영할 수 있으며 화소 밀집(pixel density)는  $320 \times 156$  그리고 field of view는  $120\text{mm} \times 50\text{mm}$ 이다. 화염 전방부에 대한 이미지를 직접적으로 관측하기 위해서 공간 해상도를 충분히 고려하였으며, Fig. 2에서 개략도를 나타내었다. 화염면에 대한 관측을 위해서는 single shot 디지털 카메라가 공간해상도  $50\mu\text{m}$  그리고 Nd:YAG 레이저와 동조되어 사용되었다. 유동에 실리콘 오일 입자를 같이 공급하므로써 화염에 의해 산화되면서 화염 전방부를 이미지화 하여서 관측을 하였다. 레이저 sheet는 약  $300\mu\text{m}$ 의 두께를 가지고 테스트 영역으로 보내지며 pulse 간격은 약  $10\text{ns}$ 이다. 테스트 영역 안으로 들어오는 화염을 촬영하기 위한 타이밍은 electrode의 발화 시간과 레이저 동조시간을 예측하여 사용되었는데, 화염의 이미지화를 하기에는 만족할 만한 예측을 가지고 있었다.

전파화염에 대한 이미지 분석을 위해서는 각 테스트마다 20 내지 30장의 순차적인 이미지를 얻었다. 이원화(binaziation) 작업을 통하여 화염 경계부의 위치를 알아내어 화염의 수직 방향으로의 평균위치를 계산해 낸 다음, 시간간격으로 나누어 화염의 전파속도를 계산하였다. 화염 경계부의 총길이는 이미지 이원화 작업을 통해서 화염의 경계부를 추적(trace)하여 이루어졌다. 화염 경계부에 대한 위치 좌표로부터, 화염 경계부의 총길이(perimeter), 굴곡(curvature) 그리고 orientation을 결정할 수 있다.

본 연구에서는 Propane-air 혼합기를 사용하여

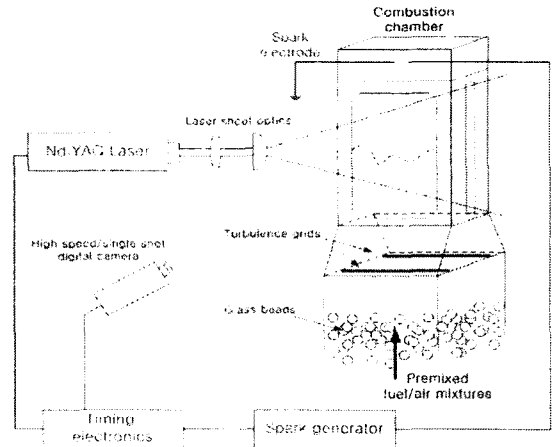


Fig. 2 Schematic of the flame speed and surface analysis

당량비 = 0.75 ~ 1.25, 평균 유동속도는  $1.6\text{m/s} \sim 4.9\text{m/s}$ , 난류 강도는  $0.5\text{m/s} \sim 1.45\text{m/s}$ , 그리고  $u'/S_L = 1.1 \sim 5.3$  범위에 대하여 실험하였다.

### 3 결과 및 고찰

Fig. 3에서는 화염전파 이미지의 일부분을 보여준다. 어떠한 외부적 발광효과 없이 화염 자체에서 발생하는 발광만으로 관측된 이미지이기 때문에, 이것은 화염의 volume 집약적인 이미지를 나타내며, 이러한 화염은 브러시(brush) 형태로 나타난다. 특히 높은 난류강도에서 이런 현상은 두드러진다. 테스트 영역에서 화염이 전파되면서 생성될 수 있는 압력이나 전파속도를 방해하는 요소를 검사했으며, Fig. 4는 화염 앞에서의 LDV 추적(trace) 데이터를 보여준다. 여기서 알 수 있듯이 순간적인 유동에 의한 화염에 대한 어떠한 영향도 없음을 보여준다. Fig. 5에서는 측정된 난류강도를 나타내며,  $u'$ 와  $\bar{u}$ 이 거의 같은 값을 가지고 있음을 나타낸다. 그 값은 평균유속의 약 30%에 해당된다. 여기서 난류의 length scale

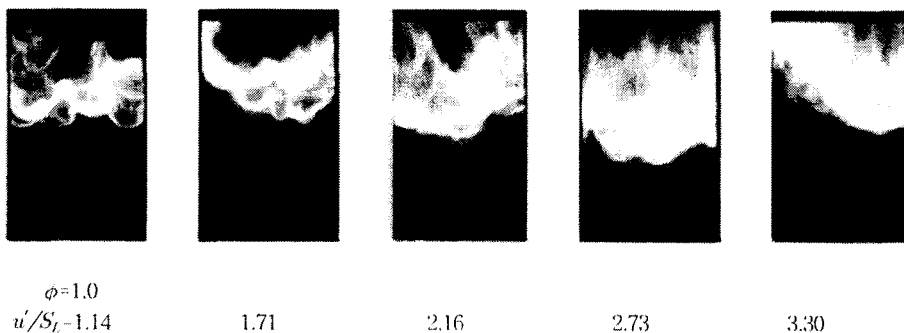


Fig. 3 Images of propagating turbulent premixed flames

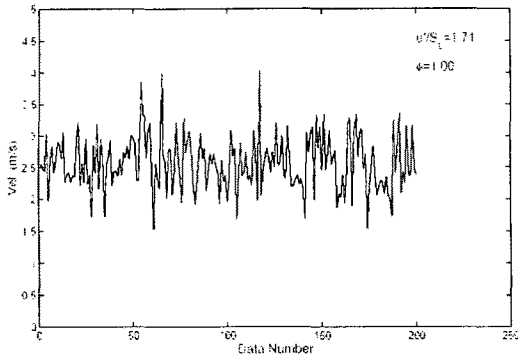


Fig. 4 Velocity trace during flame experiments (no apparent effect of the flame on the upstream turbulence is observed)

을 직접 측정하지 않았으나, Videto등[10]이 사용한 버너와 거의 일치되는 것으로 약 5mm의 integral length scale을 가지며 이 실험에 미치는 영향은 작은 것으로 보여 진다.

Fig. 6은  $u'/S_L$ 에 따른 난류 화염 속도를 보여 준다. 화염 속도는  $u'/S_L = 5$ 에서 층류 화염 속도에 비해 5에서 20배정도로 증가됨을 볼 수 있다. 이는 전파되는 화염을 고속 디지털 카메라를 이용하여 순차적으로 직접적으로 촬영하여 측정 한 것이다. 시간에 따른 화염 위치의 변화로부터 도출된 속도에 대해 유입되는 혼합기의 속도를 더하여 줌으로써 실질적인 화염속도를 얻을 수

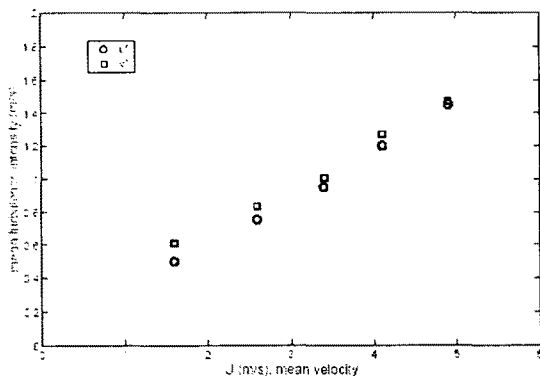


Fig. 5 Turbulence intensity and mean velocity flames

있다. Abdel-Gayed등[1]이 얻어낸 난류 화염속도에 대한 데이터를 분석한 Bray[11]의 결과를 비교해 볼 때, 본 실험에서 관측된 화염 속도의 결과와 크게 다르지 않았다. 낮은 Karlovitz 값인 0.01 ( $u'/S_L = 1.1$ )에서 Bray의 correlation은  $S_T/S_L$ 에서 약 4.5이었고, 이것은 Fig. 6에서 보여

준 층류 화염속도의 약 5배되는 난류 화염속도와 큰 차이가 없다. 높은 Karlovitz 값인 0.18 ( $u'/S_L = 5.3$ )에서는  $S_T/S_L$ 이 약 9이며, 이것은 Fig. 6에서 보여준 본 데이터 값에 약 두 배로써 차를 나타내었다.

Fig. 7에서는 이차원적 화염면의 특성을 얻기 위한 이원화된 화염 형태의 이미지이다. 이것은 앞에서 언급한 바와 같이 레이저 sheet와 실리콘 오일을 이용하여 얻은 이미지이며, 화염 경계부에 대한 좌표를 얻어 낼 수 있었으며, field of view는 32mm X 23mm 이다. 화염 경계 비율(perimeter ratio), 관측된 화염 경계부 총 길이에 대한 층류 화염 경계부의 길이 비율을 Fig. 8에 나타내었으며, 그 범위는 1.5에서 3까지이다. 이 데이터는 역시 Lee[4]등의 연구결과에 비해 약 25내지 33%의 작은 값을 가지나, 화염 경계부 비율에서 점진적으로 증가되는 현상은 동일하다.

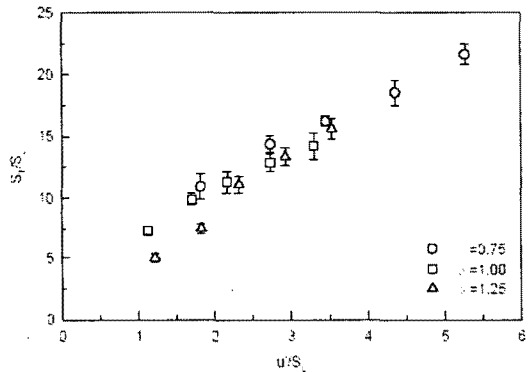


Fig. 6 Propagation speeds of turbulent premixed flames

Fig. 9에서는 화염 topology에 대한 일반적인 형태를 나타내었다. 이미지 분석에서 얻어낸 화염 브러쉬(brush)의 두께와 각 방향에 따른 버너비를 기초로 타원형태의 아크(arc)로 나타 낼 수 있다. 보정 효과,  $f_1$  그리고  $f_2$ ,는 평면부에 대한 타원체 면적에 대한 비율이고 그것은 총체적 화염 굴곡에 의한 화염면에 대한 증가로 표현된다. 화염 전파속도 측정 때와 마찬가지로 이 측정을 위해서 각각의 난류조건에서 20 내지 30회 가량의 순차적인 화염 이미지를 사용하였으며, 시간에 대한 평균값을 얻어내었다. 이러한 평균 보정효과는 Table 1에 나타내었다. 이 Table 1에서 측면부 굴곡( $f_1$ )은 비교적 1.12보다 작은 값을 나타낸다. 반면에 수직적인 굴곡은 Table 1에서의 보정 효과,  $f_2$ 에서 나타나듯이 비교적 큰 값을 가짐을 보여준다. 이러한 사실은 유동이 수직면 쪽으로 더욱 속박됨을 보여준다. 보정 효과( $f_2$ )는

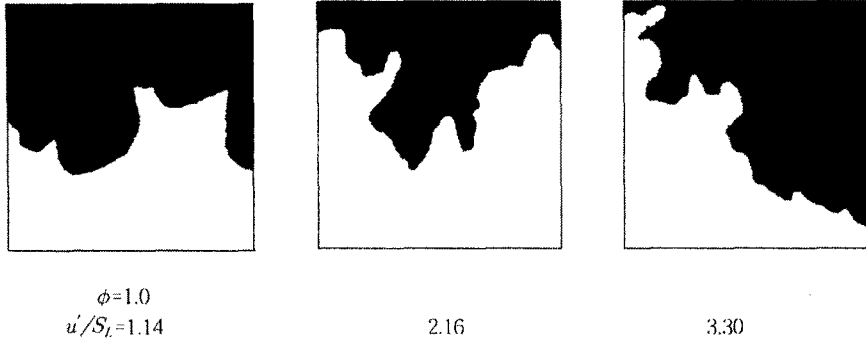


Fig. 7 Binarized images showing the flame contour obtained from laser sheet imaging

수직면 쪽에서의 화염 굴곡이 난류강도가 증가함에 따라 1.7에서 3.4로 증가됨을 보여주었다. 이러한 화염 브러쉬(brush)를 기초로 한 보정효과는 당량비 0.75에서 다소 낮은 경향이 있는데, 이것은 화염 발광이 상대적으로 다소 낮고, 이것은 총체적인 화염 굴곡(global flame curvature)의 과소평가로 나타나게 되어 결국 난류 화염진과속도의 과대평가로 이어진다.

현 난류화염 속도 테이터와 Abdel-Gayed등[1]의 데이터를 Bray[11]에 의해 분석된 결과물을 비교해 보면, 이 연구에서 얻어진 화염속도

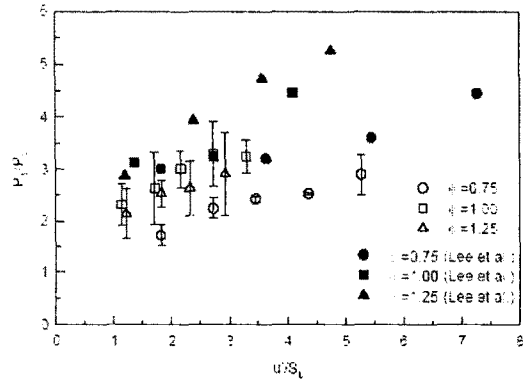


Fig. 8 Flame perimeter ratio as a function of  $u'/S_L$

Table 1 Summary of correction factors for the global flame curvature

$\phi$	$u'/S_L(m/s)$	$f_1$	$f_2$	$f_1 * f_2$
0.75	1.82	1.0520	1.8943	1.9928
	2.73	1.1177	2.0028	2.2385
	3.45	1.1116	2.1130	2.3487
	4.36	1.1478	2.3376	2.6830
	5.27	1.1256	2.5666	2.8889
1.00	1.14	1.0735	1.7878	1.9192
	1.71	1.0735	2.2246	2.3882
	2.16	1.1116	2.6824	2.9817
	2.73	1.0623	3.2119	3.4121
	3.30	1.0735	3.3906	3.6399
1.25	1.22	1.0520	1.6838	1.7713
	1.83	1.0735	1.8408	1.9761
	2.32	1.0735	2.4516	2.6318
	2.93	1.1116	2.7990	3.1113
	3.54	1.0982	3.0932	3.3971

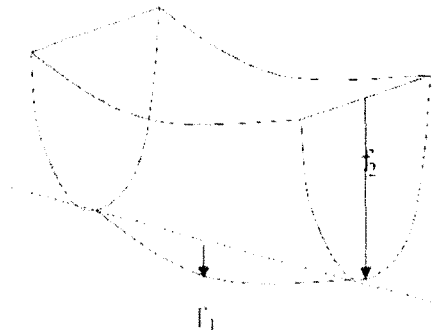


Fig. 9 Global flame topology in the current burner configuration

의 범위가 상당부분 일치하고 있음을 볼 수 있다. 낮은 0.01의 Karlovitz number( $u'/S_L = 1.1$ )에서 Bray의 correlation은  $S_T/S_L$ 에서 약 4.5인 반면에 층류 화염속도의 3에서 4배 정도로 관측

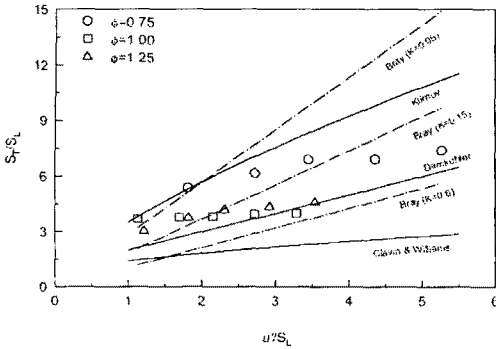


Fig. 10 Comparison of the turbulent burning velocity data with various models (the parameter  $K$  in Bray's model prescribes a representative flame stretch)

된 것과 크게 다르지 않았다. 높은 Karlovitz number  $0.18(u'/S_L = 5.3)$ 에서는  $S_T/S_L$ 이 약 9인 반면에 본 연구에서는 약 28%의 차이를 타내는 가장 높은 값인 7을 보여주었다. 이 실험에서 측정된 난류 화염전파 속도에 대한 데이터를 현존하고 있는 몇 개의 모델들과 비교하여 Fig. 10에 나타내었다. 보편적인 접근방식으로는 먼저  $S_T$ 에 대한 근사 값은 유동의 단면적( $A_L$ )에 대한 난류 화염면( $A_T$ )의 비율을 층류 화염전파 속도를 곱함으로써 예측하는 것이다. 즉,

$$S_T = f(K) * (A_T/A_L) S_L \tag{1}$$

화염 stretch 그리고 변형(modification)요소,  $f(K)$ ,를 통한 버너 외형에 따른 효과 같은 이차적인 효과를 고려되어야 된다. 여기서  $K$ 는 평균 화염의 팽창을 의미하며, Abdel-gayed등[1]과 Bray[11]는  $K$ 값을 다음과 같이 표현하였다.

$$K = 0.157 (u'/S_L)^2 Re_L^{-0.5} \tag{2}$$

난류 화염속도는 난류의 주름(wrinkle)에 의한 화염면의 증가로 향상되어진다. 화염 stretch 역시 유동의 strain과 화염의 굴곡(curvature)효과를 통해서 국소적 화염 속도에 영향을 줄 수 있다. 그러므로 Fig. 10에서 보여준 모델들은 먼저 난류강도, 층류 화염속도, 그리고 length scale에 의한 화염면의 증가를 예측 하였다. 본 실험 데이터는 높은  $K$  값(0.6)의 Bray 모델과 Damköhler의 모델[12]에 거의 개략적으로 일관성을 보이고 있으며, 당량비 0.75에서는 다소 높은 값을 나타내고 있으나, 이 역시 Bray의 모델 영역 안에 존재하고 있다. Damköhler와 Bray의

모델들은 다음과 같다.

$$S_T/S_L = 1 + u'/S_L, \tag{3}$$

$$S_T/S_L = 0.875 K^{-0.392} (u'/S_L); \tag{4}$$

한편, Kilmov[13]의 모델과 Clavin과 Williams[14]의 모델은 각각 다음과 같다.

$$S_T/S_L = 3.5 (u'/S_L)^{0.7}, \tag{5}$$

$$S_T/S_L = \{0.5 [1 + (1 + 8 \frac{u'^2}{S_L^2})^{1/2}]\}^{1/2}. \tag{6}$$

여기서 기본적인 사실은 난류 화염전파 속도가 화염면의 증가에 따라 상승된다는 것은 기본적으로 맞으며, 난류 화염전파속도를 예측하기 위해서는 총체적 화염 형태와 국소적 화염의 주름(wrinkle)과 같은 3차원적 구조를 고려해야 한다는 것이다. 또한 미세한 와류에 의한 질량 및 열 전달의 변형은 국소 층류 화염전파속도를 포함하는 국소화염 특성을 변형시키는데 있어서 부차적 역할을 한다는 것이다. 특히 Table 1에서 보였듯이 기하학적인 영향은 상당히 중요하다. 이 실험에서 쓰여진 버너 구조에서 기하학적인 영향(geometrical effect)은 비교적 직접적인 방법으로 예측가능하다. 왜냐하면 평면적 단면적을 가지고 화염전파가 자유롭게 하강하는 구조를 가지고 있기 때문이다. Fig. 6에서 보여주듯이 보정을 하지 않은 화염 전파속도는 총체적 굴곡효과로 인해서 매우 높은 값을 가지고 있다. 체트화염이나 다른 화염 구조에 대해서는 기하학적인 효과가 직접적이지 못하고, 특히 총체적 화염구조에 있어서 유동분산이나 일정치 않은 다른 유동형태를 갖고 있기 때문이다.

### 4. 결론

- 1) 자유 전파되는 propane/air 예혼합 화염에 대하여 당량비 0.75 ~ 1.25,  $u'/S_L = 1.4 \sim 5.3$  조건에서 화염 전파속도를 가시화 방법에 의하여 측정, 비교하였다. 난류 화염 전파속도의 범위는 층류 화염속도에 비해 2.6배 그리고 높은 난류강도에서는 7배까지 올라갔다. 반면 화염 주변부의 비율은 1.4에서 3.3이었다.
- 2) 본 실험에서 측정된 난류 화염전파 속도는 난류와 열화학적 특성에 의해 증가되는 화염면에 대해 모델화한 Bray와 Damköhler의 결과를 따르고 있다.
- 3) 자유전파 난류 예혼합 화염에 있어서, 총체적

화염 굴곡은 약 3.5 비율로써 화염 속도를 증가시킬 수 있었다. 이러한 굴곡현상이 있는 화염들은 기하학적 보정과 화염의 topology 그리고 유동특성 등 난류 예혼합 화염에 있어서, 3차원적인 효과들이 난류 화염속도에 큰 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

### 참고문헌

- [1] R. G. Abdel-Gayed, D. Bradley, M. Lawes, "Turbulent Burning Velocities: a General Correlation in Terms of Straining Rates", *Proc. Royal Society of London A*, Vol. 414, 1987, pp. 389-413.
- [2] S. B. Pope, "The Evolution of Surfaces in Turbulence", *International Journal of Engineering Science*, Vol. 26, 1988, pp. 445-469.
- [3] T-W. Lee, G. L. North, D. A. Santavicca, "Curvature and Orientation Statistics of Turbulent Premixed Flame Fronts", *Combustion Sci. and Tech.* Vol. 84, 1992, pp. 121-132.
- [4] T-W. Lee, G. L. North, D. A. Santavicca, "Surface Properties of Turbulent Premixed Propane/Air Flames at Various Lewis Numbers", *Combustion and Flame* Vol. 93, 1993, pp. 445-456.
- [5] T-W. Lee, G. L. North, D. A. Santavicca, "Flame Curvature Statistics in Axisymmetric Turbulent Jet Flames", *Combustion Sci. and Tech.* Vol. 108, 1995, pp. 31-46.
- [6] G. L. North, D. A. Santavicca, *Combustion Sci. and Tech.* Vol. 72, 1990, pp. 215.
- [7] F. C. Gouldin, S. M. Hilton, T. Lamb, "Experimental Evolution of the Fractal Geometry of Flamelets.", *22nd Symposium (International) on Combustion*, 1988, pp. 541-550.
- [8] G. L. North, T.-W. Lee, D. A. Santavicca, unpublished work, 1996.
- [9] O. L. Gulder, G. J. Smallwood, "Inner Cutoff Scale of Flame Surface Wrinkling in Turbulent Premixed Flames", *Combustion and Flame*, Vol. 103, 1995, pp. 107-114.
- [10] B. D. Videto, D. A. Santavicca, *Combustion Sci. and Tech.* Vol. 76, 1991, pp. 159-164.
- [11] K. N. C. Bray, "Studies of the turbulent burning velocity", *Proc. Royal Society of London A*, Vol. 431, 1990, pp. 315-325.
- [12] G. Damköhler, "The effect of turbulence on the flame velocity in gas mixtures", *Zeitschrift Electrochem*, Vol. 46, 1940, pp. 601-626. (English translation, NACA TM 1112, 1947).
- [13] A. M. Klimov, "Premixed Turbulent Flames-Interplay of Hydrodynamic and Chemical Phenomena", *Progress in Astronautics and Aeronautics*, Vol. 88, 1983, pp. 133-146.
- [14] P. Clavin, F. A. Williams, "Effects of Molecular Diffusion and of Thermal Expansion on the Structure and Dynamics of Premixed Flames in Turbulent Flows of Large Scale and Low Intensity", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 116, 1982, pp. 251-282.