

PIV/OH PLIF 동시측정을 이용한 난류 대향 분출 예혼합화염 구조 연구

조용진* · 김지호* · 조태영* · 윤영빈**†

Structure of Turbulent Premixed Opposed Impinging Jet Flame with Simultaneous PIV/OH PLIF Measurements

Yongjin Cho, Jiho Kim, Taeyoung Cho and Youngbin Yoon

ABSTRACT

The subject of turbulent premixed flames has been focused by many researchers for a number of decades. Especially, Borghi suggested a magnificent diagram classifying turbulent combustion areas and Lipatnikov and Chomiak modified this diagram. Recently, experimental techniques have been developed so that we can use PIV for measuring 2D velocity field and apply OH PLIF techniques for obtaining flame locations. In present study, a new diagram is proposed using strain rates and OH signal intensity. Thus, simultaneous PIV and OH PLIF measurements are used for shear strain rates and flame locations, respectively. It is believed that the shear strain rates represent flow characteristics such as turbulence intensity and the OH intensity indicates the flame characteristics such as burning velocities.

Key Words : Flame structure, Simultaneous measurements, Borghi diagram

기 호 설 명

u'	난류강도	S_L	층류화염 속도
L	적분길이스케일	ϵ	전단 변형률
δ_L	층류화염 두께	σ	OH 신호 강도

1. 서 론

현재까지 난류화염 구조에 대한 많은 연구가 있어 왔다. 하지만, 그 구조를 정확히 밝혀내지 못하고 있다. 이에 Borghi가 난류화염의 영역을 구분하는 Borghi 선도[1]를 제시하였으며, 최근에는 Lipatnikov 등[2]이 현재까지의 난류화염 구조에 대한 연구결과를 토대로 수정된 Borghi 선도를 제시하였다. 이호근[3]은 대향분출 화염에서의 화염 영역을 Borghi선도 상에서 구분하였다. 하지만, 실제로 실험적으로 난류화염 영역을 구분

하기 위해서는 이호근의 경우[3]처럼 적분길이 스케일(integral length scale; L)을 점 측정방식인 LDV등으로 구해야하며, 측정과정에서 Taylor 가정 등을 도입해야 한다.

또한, 층류 화염두께 (δ_L)나 층류 화염 속도 (S_L)등을 이론치로 가정하거나 다른 방법을 이용하는데, 이러한 값들을 정의하는데 있어 많은 논란이 있어왔다. 더구나 최근에는 점 측정 방식인 LDV 보다는 2차원 속도장을 측정할 수 있는 PIV의 사용이 증가하고 있고, 화학 반응 영역을 잘 표시해주는 LIF 기법 등이 발달하여, 이러한 기법들을 사용하는 추세이다. 따라서, 본 연구에서는 새로운 측정방식에 맞는 선도를 제시하고, 기존의 Borghi 선도를 대체할 수 있는지를 검토하고자 한다.

* 서울대학교 기계항공공학부 대학원

† ybyoon@snu.ac.kr

** 서울대학교 기계항공공학부

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험 장치 및 조건

2.1.1 연소기

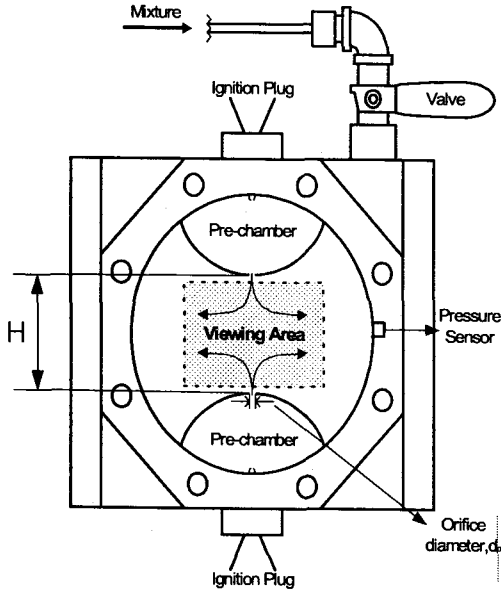


Fig. 1 Opposed impinging jet combustor

지금까지 예혼합 난류화염에 대한 연구 시 대향 분출 화염이 많이 사용되어 왔다[4]. 본 연구에서도 Fig.1과 같이 대향 분출염을 사용하였다. 이 연소기의 특징은 먼저 연소실에 예혼합 가스를 채운 후 아래위의 부 연소실(pre-chamber)에서 동시에 점화를 시키면 강한 유동장이 형성되면서 주 연소실내로 분출된다. 분출되는 과정에서 수 십 ms 동안 점화 지연이 발생하며, 점화 지연이 발생하는 동안 주 연소실내에서 기연가스와 미연 가스의 혼합이 이루어지고, 재 점화 시에 난류연소가 발생하게 된다.

2.1.2 실험조건

실험 시 유동 특성을 조절하기 위해 오리피스 직경(orifice diameter), d_o 를 변화시켰다. Bray 등[5]에 따르면 대향 분출화염에서 오리피스 간의 거리, H는 난류강도에 큰 영향을 주는 요소이므로 이를 35mm로 고정하였다. 부 연소실의 부피는 이호근의 실험 결과[3]에 따라 14.8%로 고정하였다. 화학 반응물의 특성을 변화시키기 위해 당량비 Φ 를 변화 시켰으며, 연료는 프로판 공기 혼합가스(propane-air mixture)를 사용하였다. 자세한 실험 조건은 Table 1과 같다.

Table 1 Experimental conditions

Orifice size, d_o (mm)	Equivalence ratio, Φ	Fuel	Initial pressure
3, 4, 5	0.85, 0.95	propane-air mixture	1 atm

2.2 실험 방법

2.2.1 PIV/OH PLIF 동시측정

실험 방법으로는 속도장을 측정하는 PIV와 화학반응의 특성을 나타내는 OH PLIF을 Fig. 2와 같은 시스템을 구성하였고, 동시에 측정하여 유동의 특성과 화학반응이 어떠한 관계를 가지고 있는지를 살펴보았다.

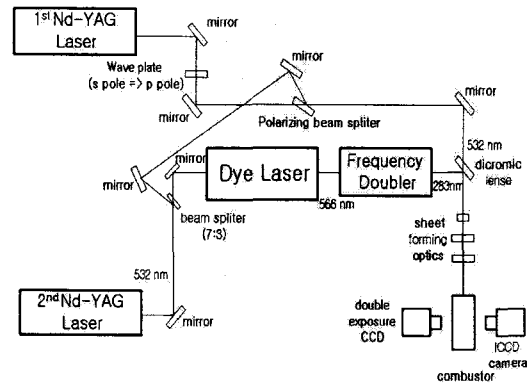


Fig. 2 Schematic of the simultaneous PIV and OH PLIF measurements

PIV 측정을 위해서 1008×1018 해상도의 Kodak ES1.0 CCD 카메라를 사용하였고, OH PLIF 측정을 위해서는 640×480의 Stanford Computer Optics사의 ICCD 카메라를 사용하였다.

2.3 실험에 관련된 주요 인자

2.3.1 전단 변형률(shear strain rate ; δ)과 오리피스 직경(d_o)

Abdel-Gayed와 Bradley[6]는 전단 변형률과 난류 예혼합 연소 영역 천이와의 관계를 연구하는 과정에서, 전단 변형률이 화염면을 분산시키며, 더 강해질 경우 소멸에 이른다는 것을 알아냈다. Jacqueline 등[7]은 난류 예혼합 화염의 속도와 신장(stretch)이 밀접한 관계에 있으며, 신장(stretch)의 대부분을 전단 변형률이 구성하고 있음을 밝혔다.

Darabiha 등[8]은 전단 변형률의 예혼합 층류 화염에 대한 영향을 연구하여, 특정한 값 이상의 전단 변형률은 화염을 부분적으로 소멸시킨다는 것을 알아냈다.

Bray 등[5]은 노즐 평균속도 V 와 노즐간의 거리, H 로부터 bulk strain rate 을 정의하여 이 값이 대향 분출 화염의 소멸에 중요한 역할을 한다는 것을 밝혀 내었다.

이 밖에도 많은 연구에서 난류연소시 화염에 가장 큰 영향을 주는 유동의 특성이 전단 변형률이며, 난류의 생성 원인이 외부 유동의 전단 변형률임은 이론적으로도 밝혀져 있다. 따라서, 유동의 특성을 대표하는 값으로 전단 변형률을 설정하였다.

이호근[3]의 연구에서 오리피스 직경의 변화로만 난류연소의 영역을 천이시킬 수 있음을 확인하였다. 따라서 유동특성을 변화시키는 인자로 오리피스 직경 d_0 를 설정하였다.

2.3.2 OH 신호(σ)와 당량비(Φ)

OH기(radical)와 CH기는 여러 가지 다른 형태의 반응 영역을 표시하며, 구체적으로는 각각 반응기(radical)의 재결합 영역과 연료의 분해(decomposition) 영역을 표시한다[9]. OH기와 CH기가 국소적인 반응률을 잘 나타내는지에 대한 의문도 제기 되고 있지만, 여전히 두 개의 반응기는 실제적으로 PLIF을 위한 중요한 화학종으로 자리잡고 있다[9]. 따라서, 화학반응 영역의 특성을 살펴보기 위해 OH 신호를 측정하였다.

또한, Bray 등[5]은 대향 분출 난류 화염에서 화학반응이 당량비, Φ 의 변화에 민감하게 반응함을 알아냈다. 이로부터 화학반응의 특성을 변화시키는 요소로 당량비(Φ)를 설정하였다.

2.3.3 난류 길이 스케일 (Length scale of turbulent flows)

a) Integral length scale (L)

난류 유동에서 물리적으로 가장 크게 형성될 수 있는 돌기(eddy)의 평균 크기를 뜻한다. 즉 낮은 진동수와 큰 파장을 갖는 돌기의 크기를 말한다.

b) Taylor Microscale (l)

Integral length scale(L)보다는 작고 Kolmogorov scale(l_k)보다는 큰 길이 스케일이다. 이 값은 평균 변형률과 관계가 깊으며 다음 식과 같이 표현될 수 있는데 분모는 평균 변형률을 의미한다.

$$l_x = \frac{u'_{x,rms}}{\sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2}} \quad (2.1)$$

c) Kolmogorov Microscale (l_k)

난류 유동과 관련된 가장 작은 길이 스케일이다. Kolmogorov length scale은 난류 운동 에너지가 소산되어 유체의 내부에너지가 증가하는 현상인 Energy cascade와 관련된 수준의 돌기 크

기를 나타낸다. 이 길이 스케일은 난류의 소산률과 관계가 깊으며 다음 식 (2.2)과 같이 소산률을 통해 Kolmogorov 길이 스케일을 나타낼 수 있으며,

$$l_k \approx \left(\frac{u^3}{\epsilon_0}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (2.2)$$

소산률(ϵ_0)은 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$\epsilon_0 \equiv \frac{\delta(ke_{turb})}{\delta t} \approx \frac{\frac{3}{2}u'^2_{rms}}{L} \quad (2.3)$$

2.4 Borghi 및 Modified Borghi 선도

Fig. 3(a)는 Borghi[1]가 난류화염 영역을 구분한 선도(diagram)이며, Fig. 3(b)는 Lipatnikov와 Chomiak이 최근의 결과들을 모아서 좀더 세분적으로 구분한 선도이다[2].

가로축의 L 과 δ_L 은 각각 적분길이 스케일과 층류 화염두께이며, 세로축의 u' 와 S_L 은 각각 난류강도와 층류 화염 속도이다.

난류화염의 영역은 크게 thick flame 과 wrinkled flame으로 나눌 수 있다. 또한 천이화염과 분산반응화염을 구분하는 경계를 Klimov-Williams 가설 (Klimov-Williams criterion)이라 부르며, Karlovitz 수(Ka)가 1인 경계이다. Karlovitz 수(Ka)는 다음과 같이 정의된다.

$$Ka = \frac{\delta_f / S_L}{1/K} = \frac{\Delta A}{A} = \frac{dA}{dt} \frac{1}{A S_L} \quad (2.4)$$

화염 두께(δ_f)와 난류 화염 전파 속도(S_L)의 비는 화학 반응 속도를 의미하고 평균 변형률의 역수 ($1/K$)는 물리적인 유동의 흐름 시간을 뜻한다. 일반적으로 강한 난류일수록 Ka 가 크며 Ka 는 평균 변형률(K , mean strain rate)과 비례한다.

평균 변형률 K 는 다음과 같은 식으로 정의한다.

$$K = \sqrt{\left(\frac{\partial u_x}{\partial x}\right)^2} \quad (2.5)$$

분산반응화염은 유동의 변형률이 심해서 점화가 억제되는 현상이 먼저 나타나기 때문에 일반적으로는 형성되기 힘들며 대부분의 경우 $Ka=1$ 이 되는 수준에서 소멸이 발생한다. 그러나 이호근[3]은 대향분출화염에서 오리피스 직경을 5mm로 줄인 경우 분산반응화염이 형성됨을 보였다.

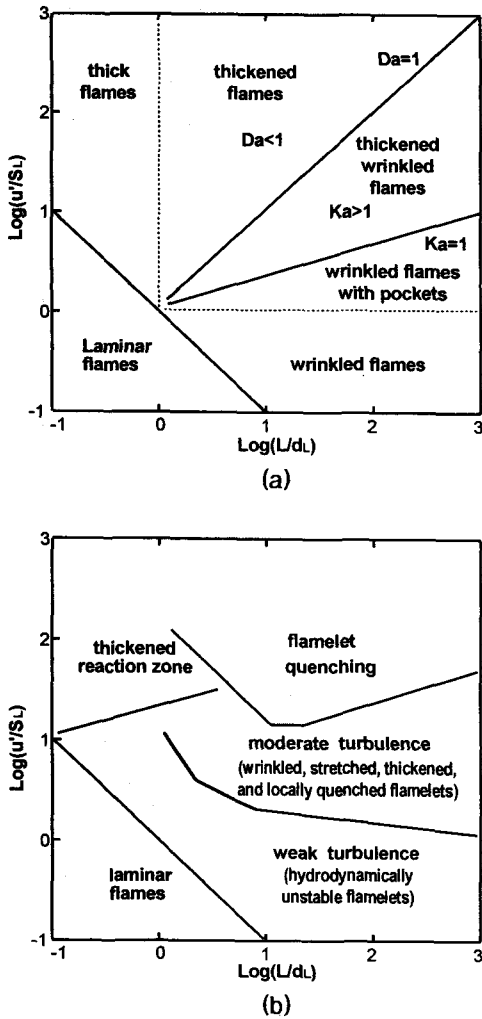


Fig. 3 (a) Borghi diagram (b) Modified diagram

Damköhler 수(Da)는 예혼합 화염의 경우, 열이 생성물에서 반응물로 퍼지는 시간(flow)과 화학반응 시간(react time)의 비이며 일반적으로 다음과 같이 정의된다.

$$Da = \frac{\tau_{flow}}{\tau_{react}} = \frac{L/\delta_f}{u'/S_L} \quad (2.6)$$

이 식에서 δ_f 는 화염의 두께이며 L은 적분 길이 스케일(integral length scale), u' 은 난류 강도(turbulent intensity), S_L 은 층류 화염 전파 속도(laminar flame displacement speed)를 의미한다.

따라서 Damköhler 수가 $Da \gg 1$ 인 경우에는 평형반응(equilibrium)이 일어난다고 볼 수 있으며 반대로 $Da \ll 1$ 인 경우에는 동결화학반응(frozen flow reaction)이 일어난다고 판단할 수

있는데, Borghi diagram에서 thick flame 영역을 나타내며, 분산반응(distributed reaction) 또는 well-stirred reactor 라 불리며, 이 영역은 작은 스케일의 높은 난류강도와 연관되어 있다. 적분길이 스케일 L이 층류 화염 두께 δ_L 보다 작다 ($L < \delta_L$)는 조건이 이 영역의 충분조건이다. 그리고 열발생(heat release)을 제어하는 화학반응이 모든 난류 스케일에 걸쳐서 일어난다. 하지만, 이러한 영역은 화염의 소멸(quenching)현상 때문에 제한적으로 발생한다[2,7,10].

Wrinkled flame은 reaction sheet 또는 flamelet regime으로도 불리며, 큰 스케일의 작거(weak)나 중간정도(moderate) 세기의 난류와 관계된다. 이 영역의 충분 조건은 Kolmogorov microscale, η 가 δ_L 보다 매우 큰 값($\eta \gg \delta_L$)을 가질 때이다. 그리고 화학반응 영역이 주름지고(wrinkled) 얇은(thin) 영역에 제한되어 있으며, 이러한 화학반응 영역이 미연의 반응물과 기연의(burned) 생산물을 분리시킨다. 이 영역은 다시 Fig. 3(b)와 같이 약한 난류의(weak turbulent) 주름상 화염(wrinkled flame)과 중간 세기 난류의(moderately turbulent) 주름상 화염으로 구분된다.

약한 난류(weak turbulence) 영역은 $u' \leq S_{L,0}$ 의 조건에서 발생하며, flamelet 불안정(instability)이 존재한다. 이러한 불안정 요소는 전단 변형률(strain rate)에 의해 감소되는 것으로 알려져 있다[2].

중간 세기 난류(moderate turbulence) 영역은 u' 이 $S_{L,0}$ 보다 매우 클 때 발생하며, 이 영역에서는 난류에 의해 화염의 표면 면적(flamelet surface area)이 증가한다. 그리고 화학 반응 영역이 적분길이 스케일에 비해 좀더 두터우며, 난류에 의한 화염 신장(flamelet stretching)에 의해 부분적으로 소멸이 발생한다[1,2]. 전체적으로 이 영역에서는 난류강도가 증가하면서 반응영역이 증가하여 화학 반응률이 증가하고, 부분적으로는 소멸 현상이 발생한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 압력선도

3.1.1 용어의 정의

Fig. 1의 연소기 특성상 점화 후 어느 정도의 점화지연(ignition delay)이 발생한 후 주 연소실에서 점화가 발생한다[3]. 이호근[3]과 손민호[11]의 결과에 의하면 주연소실의 점화는 점화 초기의 유동장 분포와 반응기(radical)의 분포에 큰 영향을 받는다. 따라서 이때의 상태가 d_0 나 Φ 의 조건 변화에 따라 여러 형태의 화염을 보일 것으

로 판단하여, 첫 번째 점화가 발생하는 지점으로 부터 2ms 후쯤 되는 1.8기압에 중점을 두고 관찰하였다. 소염 기준은 Fig. 4.1에서 압력상승이 없을 때 소염이 발생한 것으로 판단하였다. Fig. 4.1에서 t_a 와 t_b 는 각각 압력선도에서의 첫 번째, 두 번째 점화발생시점을 나타낸다. Fig. 4.2는 오리피스 직경이 5mm 일 때의 대향 분출 화염의 schlieren 사진이다. 직경이 3mm, 4mm 인 경우에도 비슷한 유형으로 연소되는데, 부연소실에서 점화가 되면 주연소실에서 재점화가 일어나고, 오리피스 직경에 따라 주연소실로 공급되는 난류 운동에너지의 차이가 생기게 되어 주연소실내의 화염구조에 영향을 주게 된다.

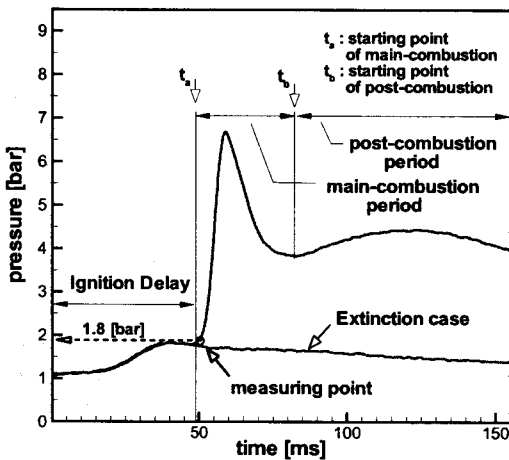


Fig. 4.1 Pressure history and definition of terminology

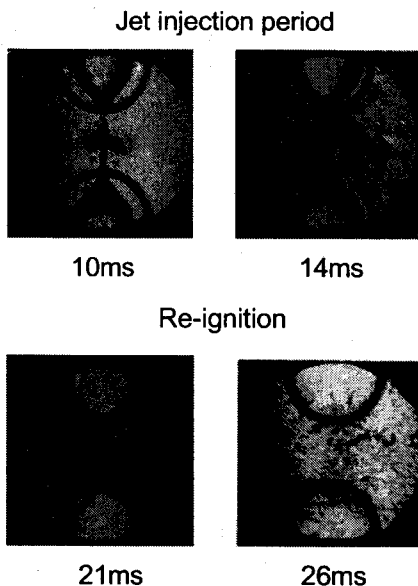


Fig. 4.2 Orifice $d_0 = 5\text{mm}$, Schlieren Photography

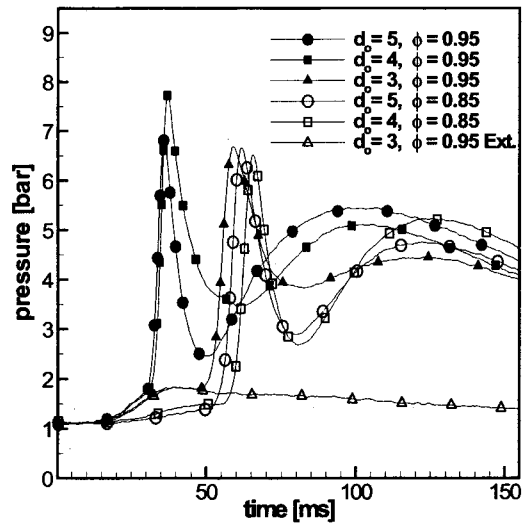


Fig. 5 Pressure histories

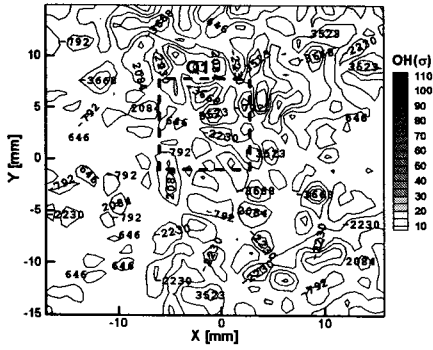
3.1.2 압력선도의 고찰

Fig. 5는 각 경우에 있어서의 압력선도이다. 특이한 점은 d_0 가 3mm인 경우에는 동일한 조건에서도 재 점화되는 현상과 소염되는 현상이 모두 존재하였다. 따라서 $d_0=3\text{mm}$, $\Phi=0.95$ 를 조건(critical point)으로 판단하였다.

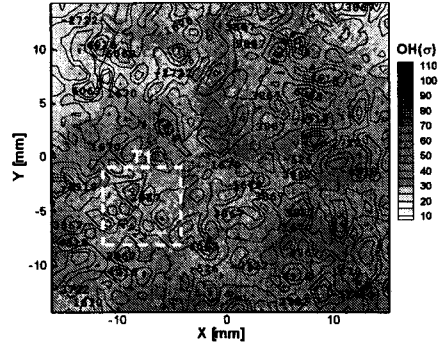
d_0 가 4mm 인 경우에는 Φ 가 0.95일 때, 0.85 일 때 보다 점화발생 시점(t_a)이 먼저 나타나며, 두 번째 점화 발생시점(t_b)에서도 압력이 더 높다는 것을 알 수 있다. 이는 높은 당량비로 인하여 화학반응이 빨리 진행되기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 6의 이미지에서 OH 신호, σ 의 분포가 이 경우($d_0=4\text{mm}$, $\Phi=0.95$)에 있어 다른 경우보다 좀더 넓게 분포된 것으로 도 알 수 있다. 하지만, d_0 가 5mm 인 경우는 점화 발생시점(t_a)은 더 먼저 나타나는 반면에 4mm의 경우와 달리 Φ 가 0.85 인 경우에 t_b 시점에서 압력이 더 높게 나타난다. 이는 $d_0=4\text{mm}$ 의 경우에서처럼 화학반응으로만 설명될 수 없는 현상이다. 이러한 결과로부터 난류화염에서는 연소특성이 단순히 화학반응에 의해서가 아닌 유동특성과의 상호 조화에 의한 현상임을 알 수 있다.

3.2 동시측정 이미지

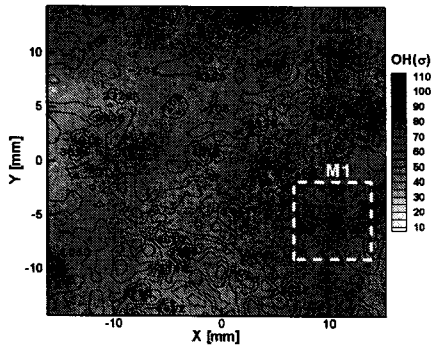
앞에 첨부한 Fig. 6은 각각의 경우에 있어서 Fig. 1의 측정영역에 대한 동시측정 이미지이며, 등고선은 전단 변형률, 배경이미지는 OH 신호의 분포이다. Fig. 6(a)는 전체적으로 소염이 일어난 경우이다. 그리고 각 경우에 있어 유동 특성과 화학반응의 특성은 다르지만, 각기 한가지 난류 화염 형태를 보이지 않고 여러 가지 화염영역을 포함하고 있는 것으로 판단하였다.



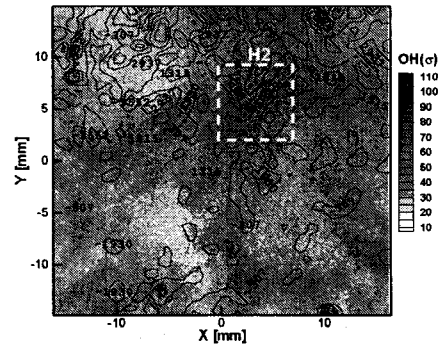
(a) $d_0=3\text{mm}$ $\Phi=0.95$ extinction



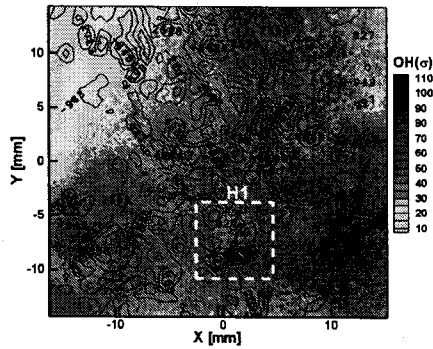
(b) $d_0=3\text{mm}$ $\Phi=0.95$



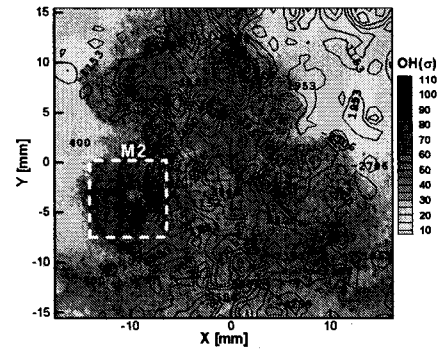
(c) $d_0=4\text{mm}$ $\Phi=0.95$



(d) $d_0=5\text{mm}$ $\Phi=0.95$



(e) $d_0=4\text{mm}$ $\Phi=0.85$



(f) $d_0=5\text{mm}$ $\Phi=0.85$

Fig. 6 Image of the simultaneous PIV/OH PLIF measurements

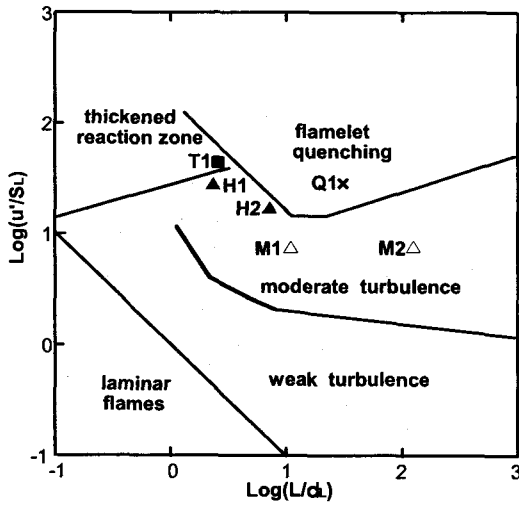


Fig. 7 Matching selected regions with modified Borghi diagram. $\langle u \rangle_{\text{time}} = \langle u \rangle_{\text{volume}}$ due to the assumption of homogeneous turbulence in selected regions whose size is about $8\text{mm} \times 8\text{mm}$.

따라서, 화학반응이 활발한 부분과 부분적인 소염 현상이 발생하는 곳에 대해 Fig. 7의 결과를 토대로 하여 좀더 부분적으로 관찰하였다.

Fig. 7은 선택된 영역의 난류강도를 구한 후 modified diagram에 표시하였다. 난류 강도를 구할 때는 한 점에 대하여 시간 평균을 구해야 한다. 하지만 본 연구에서 PIV를 통하여 구한 값은 transient 한 경우의 순간(instantaneous) 이미지이므로 속도에 대한 시간 평균이 불가능하다. 하지만, 선택된 영역의 크기가 $8\text{mm} \times 8\text{mm}$ 로 매우 작으므로 선택된 영역에 대하여 균질(homogeneous)이라 가정하고 시간 평균이 공간 평균과 같다고 가정한 후 난류강도를 구하였다. 적분길이 스케일(integral length scale) 역시 난류강도, u' 의 상관관계(correlation)를 시간에 대한 평균을 공간평균으로 대체 하였다.

3.3 점화 전, 후의 전단변형률

Fig. 8의 (a), (b)는 강한 난류연소의 영향으로 작은 스케일의 강한 전단 변형률을 가진 주머니 화염이 발견되는 5mm 오리피스에 경우에 대해 높은 전단변형률을 가지는 영역의 변화를 각각 '점화 전'과 '점화 후'로 나누어 도시한 그래프이다. 점화 전에는 이러한 높은 전단변형률을 가진 화염 구조는 주로 분출염이 만나는 축을 중심으로 비교적 크게 형성하지만, 점화 후에는 이 영역의 변형률이 작은 크기로 전 영역에 걸쳐 넓고 균일하게 분포하는 것을 확인할 수 있다. 이것은 공간적으로 넓게 분포하는 이러한 구조가 'moderate turbulent' 영역의 주머니 구조화염과

일치할 것으로 보이며 위에서 확인한 5mm의 확률밀도함수의 경향성과 'moderate turbulent' 영역 화염의 또 다른 특성으로 보인다.

결과를 종합하여 볼 때, 오리피스 직경이 작아지면 연소양상은 작은 스케일의 주머니 화염구조가 유동장에 넓게 분포하는 분산화학반응 영역으로 천이하게 된다. 분산화학 반응 영역에서는 전체적인 온도는 상승되지만 강한 난류로 인해 고온 영역의 넓이가 줄어들기 때문에 고온에 영역에서 집중적으로 생성되는 NO_x 발생량이 줄어들게 된다. 이는 오리피스 직경이 작아지는 경우 NO_x 의 배출량이 줄어든다는 이호근[3]의 실험 결과를 설명한다. 1000(1/s) 이하의 전단변형률은, 난류유동의 돌기(eddy)들의 생성과 감쇠 및 그 변화주기(turnover time)와 관련되어 화학반응과의 상호작용에 의해 연소를 분산반응 화염영역에서 발생시키고, 결과적으로 중간영역의 온도가 전 유동장에 걸쳐 균일하게 발생하여 열적 NO_x 의 발생을 최소화하는 것을 효과적으로 돕는 것으로 보인다.

3.4 전단 변형률과 화염의 위치

서론에서 기술하였듯이[1,2] 유동과 화학반응은 서로의 상호 작용 하에 화학반응이 촉진될 수도 있고, 경우에 따라서는 반응이 억제되어 소염에 이르게 된다. 이러한 난류연소의 특징으로부터 난류의 특성을 대표하는 전단변형률과 화학반응의 특성을 대표하는 OH 신호가 어떠한 관계가 있는지를 살펴보기 위해 Fig. 9 같은 선도를 그려보았다. 세로축의 σ 는 각 경우에 있어서 OH 신호이며, 가로축의 ϵ 는 전단 변형률이다.

Lipatnikov 와 Chomiak[2]에 따르면 난류화염 영역에서 가장 많이 나타나는 영역이 moderate turbulence 영역이며, 본 연구에서도 가장 많이 나타났다. 따라서, Fig. 6의 이미지와 Fig. 9의 선도에서 moderate turbulence 영역에 해당하는 것을 먼저 선별한 후 이 영역을 기준으로 하여 다른 영역을 판단하였다.

서론에서 언급하였듯이 moderate turbulence 영역에서는 난류강도가 증가하면서 화학반응이 증가하며, 부분적으로는 소염이 발생한다. Fig. 9의 (c)와 (d)선도에서 전단 변형률, ϵ 가 증가하면서 OH신호, σ 도 증가하는 경향을 보인다. 그리고 Fig. 9(c)에 해당하는 Fig. 6(c)의 H1 영역의 이미지를 보면 부분적으로 소염된 영역을 포함하고 있고, Fig. 7에서 moderate turbulence의 가장 높은 부분에 위치에 있음을 알 수 있다. 따라서, 선도 Fig. 9(c)를 high moderate turbulence 라 하였다.

그리고 당초 weak turbulence 영역으로 예상했던 Fig. 6의 M2 영역은 Fig. 7에서 moderate turbulence 영역에 존재한다. 그리고 일반적으로

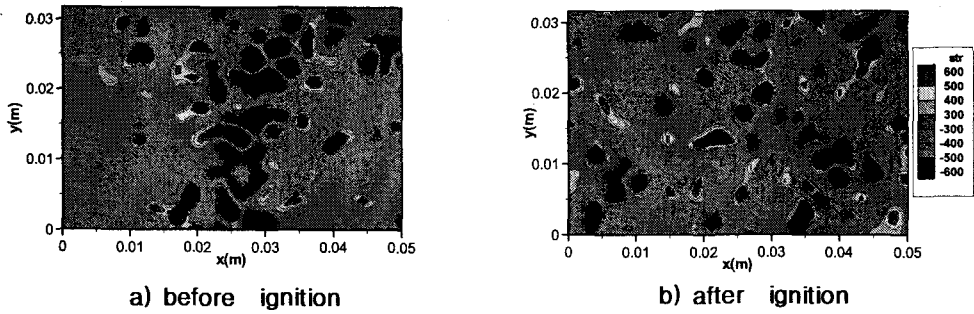


Fig. 8 The contour of strain rate distribution for 5mm orifice diameter

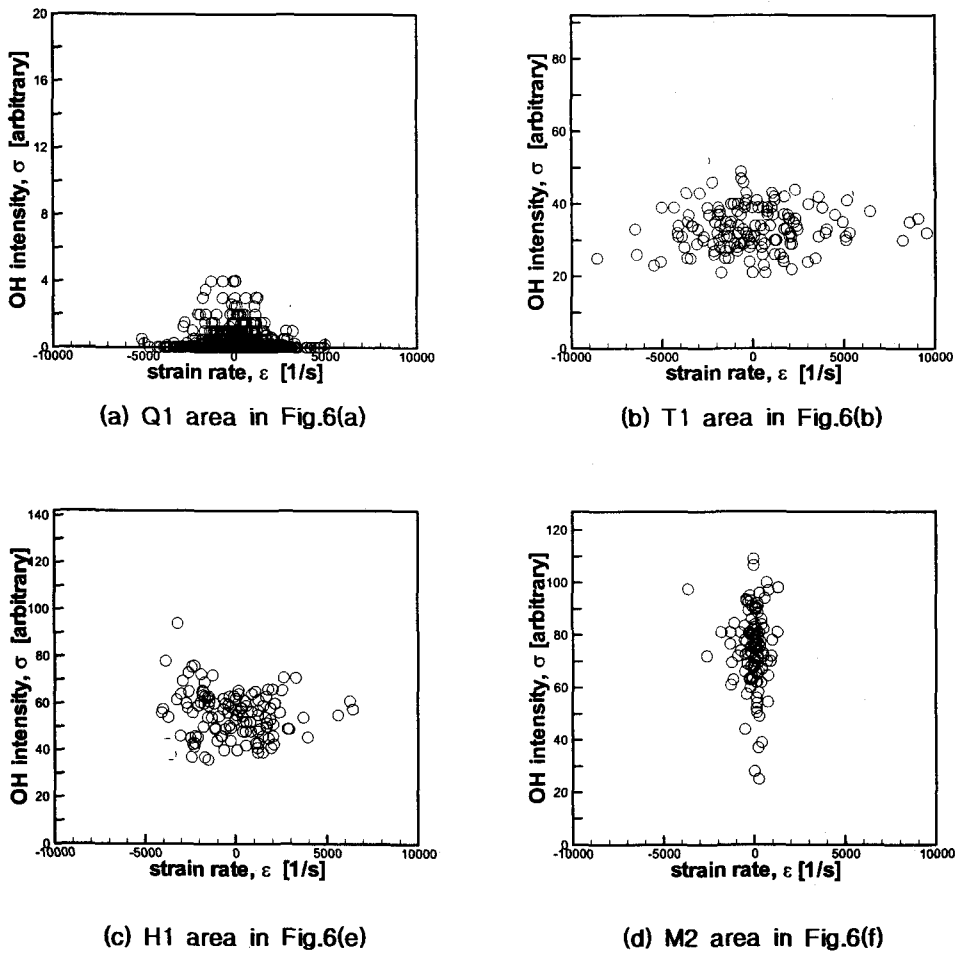


Fig. 9 Matching of the strain rate and OH signal

난류강도가 증가하면서 화염의 속도가 증가하는 데, 영역 M2 영역의 OH 신호 강도가 가장 크게 나타난다. 따라서 이 영역은 weak 보다는 moderate turbulence의 특징을 나타내며, Fig.7에서도 moderate turbulence의 중심부에 위치하므로 moderate turbulence 라 하였다.

Fig. 6(a)는 소염시의 이미지이며, 이에 해당하는 선도가 Fig. 9(a)이다. 또한 이 영역은 modified diagram 상에서 quenching 의 영역에 해당한다. 따라서 소염시는 Fig.9(a)와 같은 특징을 나타낸다고 할 수 있다.

Thickened flame은 강한 난류와 연관되어 있으며, 난류의 작은 eddy에 의해 화학 반응영역이 분산된 형태[2]를 가진다. 또한 소염 되기 직전의 영역에 해당한다. 이러한 영역은 Fig. 6(b)의 T1 영역에서처럼 화염이 뿌옇게 존재하며, 또한 이 영역의 난류 강도는 Fig. 7의 modified diagram 상에서 thickened reaction zone 에 해당한다. 따라서, 이에 해당하는 선도 Fig. 9(b)를 이 영역의 특징이라고 정하였다. 여기서, Fig. 9(a)와 (b)를 비교하면, 데이터의 분포 형태가 비슷하다. 즉 낮은 전단 변형률에 상대적으로 높은 OH신호가 존재하고, 전단 변형률이 큰 곳에 상대적으로 낮은 신호가 존재한다. 이러한 특징은 소염의 경우에 있어서 더욱 뚜렷해진다. 하지만, 전단 변형률의 크기에 있어서는 같은 오리피스 크기(d_0)인 경우임에도, 완전히 소염된 경우의 최대값(± 5000) 보다 화염이 남아 있을 때의 최대값(± 10000)이 크다는 것을 알 수 있다. 이러한 현상의 이유는 화학반응이 유동 속에서 에너지원으로 작용하여 난류의 강도가 증가되기 때문인 것으로 추정된다.

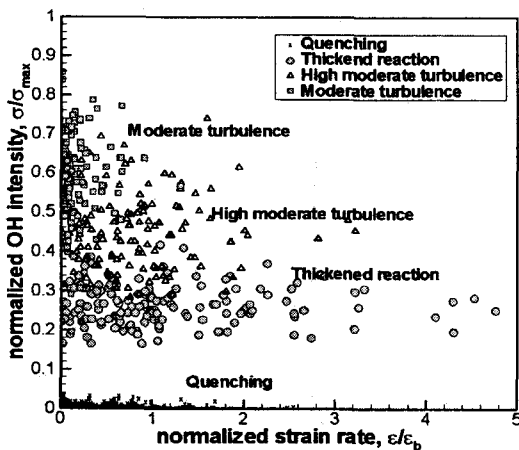


Fig. 10 Diagram of turbulent premixed flames based on strain rates and OH intensities. The strain rates and OH intensities are normalized by bulk strain rate, $\epsilon_b = V_{max}/H$ and maximum OH intensity, σ_{max} , respectively.

이것의 근거로 Fig.7 에서 thickened reaction 에 서 난류 강도가 크게 나타나는 것을 들 수 있다.

3.5 선도의 결합

위에서 선택된 Fig. 9의 선도를 종합하여 Fig. 10에 나타냈으며, 전단 변형률은 절대값을 취하였다. 그리고 각 영역들을 modified diagram과 비교하여 명칭을 부여하였다. σ_{max} 는 선택된 영역 중 OH 신호의 최고 값이며, ϵ_b 는 Bray등[5]에 의해 정의된 bulk strain rate로, 최고 속도 V_{max} 를 오리피스 거리 H 로 나눈 값으로 설정 하였으며, 여기서는 2000/s의 값을 가진다.

4. 결론

정적 연소실 내에서 프로판-공기 예혼합기를 사용 대향 분출 난류 화염을 발생시켜 이를 유동장을 파악할 수 있는 PIV와 화염의 정보를 얻을 수 있는 OH PLIF의 동시 측정을 이용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 난류연소는 화학반응이나 유동 특성 중 하나의 특성으로는 설명할 수 없으며, 두 가지 요소를 모두 고려해야 한다.
2. 난류의 특성을 전단 변형률(ϵ)로, 화학반응의 특성을 OH 신호(σ)로 대체하여 새로운 측정 방법에 맞고 좀더 실용적인 선도를 제시하였다.
3. High moderate turbulence에서 moderate turbulence의 경우보다 화염신호가 더 작게 나온다. u'/S_L 의 값이 약 5 이상이 되면 화염의 주름이 깨지기 시작하고 화염이 분무 형태로 무화되기 시작하여 소염에 가까워지기 때문이다.
4. Quenching의 경우 명확하게 전단 변형률이 증가하면서 화염신호가 약해지며 종 모양(bell-shaped)의 형태를 띈다.
5. Thickened reaction는 화염의 기하학적 구조에 의해 소염과의 경계에서 나타나는 현상으로 쉽게 관찰되지 않는 현상이나, 본 연구에서는 관찰되었으며 이 역시 소염으로 가는 과정으로 화염신호가 전단 변형률이 증가하면서 감소하고 있음을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실 사업(MI-0104-00-0058)의 연구 지원을 받았으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Borghi, R., *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 14, 1988, pp. 245.
- [2] Lipatnikov, A. N. and Chomiak, J., "Turbulent Flame Speed and Thickness," *Prog. Energy Combust. Sci.*, 2002. pp. 1-74.
- [3] 이호근, "대향분출염 연소방식에 의한 NOx 생성 저감에 관한 실험적 연구," Ph.D Thesis, 서울대학교, 1997.
- [4] Kostiuk, L. W., Bray, K. N. C. and Cheng, R. K., "Experimental Study of Premixed Turbulent Combustion in Opposed Streams. Part II," *Combust. Flame*, Vol. 92, 1993, pp. 396-409.
- [5] Bray, K. N. C., Champion, M. and Libby, P. A., "Extinction of Premixed Flames in Turbulent Counterflowing Streams with Unequal Enthalpies," *Combust. Flame*, Vol. 107, 1996, pp. 53-64.
- [6] Abdel-Gayed, R. G. and Bradley, D., "Combustion Regime and Straining of Turbulent Premixed Flame," *Combust. Flame*, Vol. 78, 1989, pp. 213-218.
- [7] Chen, J. H. and Im, H. G., "Correlation of Flame Speed with Stretch in Turbulent Premixed Methane/Air Flames," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 27, 1998, pp. 819-826.
- [8] Darabiha, N., "The Effect of Strain Rate on a Premixed Laminar Flame," *Combust. Flame*, Vol. 64, 1986, pp.203-217.
- [9] Kothnur, P. S., Tsurikov, M. S., Clemens, N. T., Donbar, J. M. and Carter, C. D., "Planar Imaging of CH, OH and Velocity in Turbulent Nonpremixed Jet Flames," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 29, 2002.
- [10] Chomiak, J. and Jarosinski, J., "Flame Quenching by Turbulence," *Combust. Flame*, Vol. 48, 1982, pp. 241-249.
- [11] 손민호, "대향분출화염의 분산화학 반응구조와 소멸한계의 영향," MS Thesis, 서울대학교, 2002.