

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

조용진\* · 김지호\* · 조태영\* · 윤영빈\*\*†

## Research on Structure of Turbulent Premixed Opposed Impinging Jet Flame with Simultaneous PIV/OH PLIF measurements

Yongjin Cho, Jiho Kim, Taeyoung Cho, and Youngbin Yoon

### ABSTRACT

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. However, these are still lack of geometric information, which may be very important to flame quenching. Hence, fractal dimensions ( $D_f$ ) of the OH images are adopted as an additional information. Finally, the flame structure diagram proposed in this research has three parameters, which consist of strain rates, OH intensities and fractal dimensions. The results show that this diagram classifies turbulent premixed flames more effectively based on flame structures. The regime of weak turbulence is limited to narrow strain ranges and has the fractal dimension of about 2. In the regime of moderate turbulence, OH intensities increase as strain rates increase and the values of fractal dimensions are 1.8  $D_f$  1.95. The regimes of thickened reaction and flame extinction (quenching) show bell-shaped and their values of fractal dimensions are 1.5  $D_f$  1.7 and 0.9  $D_f$  0.6, respectively.

**Key Words** : Simultaneous measurements, Turbulent Premixed flames, Fractal dimension

### 기 호 설 명

$u'$ 난류강도	$S_L$ 층류화염 속도
$L$ 적분길이 스케일	$\delta$ 전단 변형률
$\delta_L$ 층류화염 두께	$\sigma$ OH 신호 강도

## 1. 서 론

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

실험적으로 난류화염영역을 구분하기 위해서는 이호근의 경우[3]처럼 적분길이 스케일(integral length scale; $L$ )을 점 측정방식인 LDV 등으로 구해야하며, 측정과정에서 Taylor 가정 등을 도입해야한다. 또한, 층류화염 두께( $\delta_L$ )나 층류화염 속도( $S_L$ )등을 이론 치로 가정하거나 다른 방법을 이용하는데, 이러한 값들을 정의하는데 있어 많은 논란이 있어왔다. 더구나 최근에는 점 측정방식인 LDV 보다는 2차원 속도장을 측정할 수 있는 PIV의 사용이 증가하고 있고, 화학 반응 영역을 잘 표시해주는 LIF 기법등이 발달하여, 이러한 기법들을 사용하는 추세이다. 따라서, 본 연구에서는 새로운 측정방식에 맞는 선도를 제시하고, 기존의 Borghi 선도를 대체 할 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

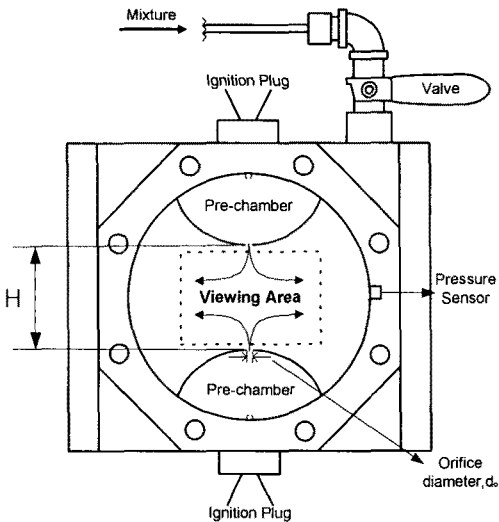


Fig. 1 Opposed impinging jet combustor

지금까지 예혼합 난류화염에 대한 연구시 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. 분출 되는 과정에서 수십 ms 동안 점화 지연이 발생하며, 점화 지연이 발생하는 동안 주 연소실내에서 기연가스와 미연가스의 혼합이 이루어지고, 재 점화시에 난류연소가 발생하게 된다.

#### 2.1.2 실험조건

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

Table 1 Experimental conditions

Orifice size, $d_o$ (mm)	Equivalence ratio, $\Phi$	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 구성고, 동시에 측정 하여 유동의 특성과 화학반응이 어떠한 관계를 가지고 있는지를 살펴보았다.

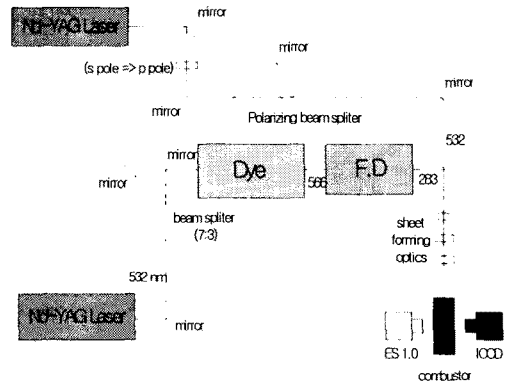


Fig. 2 Schematic of the simultaneous PIV/OH PLIF measurements

PIV 측정을 위해서 1008×1018 해상도의 ES1.0 correlation 카메라를 사용하였고, OH PLIF 측정을 위해서는 640×480의 ICCD 카메라를 사용하였다.

### 2.3 실험에 관련된 주요 인자

#### 2.3.1 전단 변형률(shear strain rate; $\delta$ ) 과 오리피스 직경( $d_o$ )

Abdel-Gayed 와 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 알아 냈다.

Bray 등[5]은 노즐 평균속도, V와 노즐간의 거리, H로부터 bulk strain rate;  $\delta_b = V/H$  을 정의하여 이 값이 대향 분출 화염의 소멸에 중요한 역할을 한다는 것을 밝혀 내었다.

이 밖에도 많은 연구에서 난류연소 시 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 친이 시킬 수 있음을 확인하였다. 따라서, 유동특성을 변화 시키는 인자로 오리피스 직경,  $d_0$ 를 설정 하였다.

### 2.3.2 OH 신호(OH signal; $\sigma$ ) 와 당량비( $\Phi$ )

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 나타내는데 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 측정 하였다. 또한, Bray 등[5]은 대향 분출 난류 화염에서 화학반응이 당량비,  $\Phi$ 의 변화에 민감하게 반응함을 알아냈다. 이로부터 화학반응의 특성을 변화 시키는 요소로 당량비( $\Phi$ )를 설정하였다.

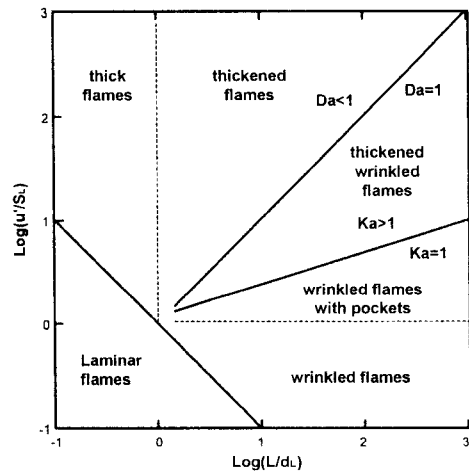
### 2.3.3 프랙탈 차원(fractal dimension; $D_f$ )

Chomiak 등[10]과 Lipatnikov 등[2]은 난류 화염의 소멸에 대해 연구하면서 화염의 기하학적 형태가 소멸특성에 중요한 역할을 하고 있음을 밝혀냈다. 또한, Jacqueline 등[7]은 화염의 신장장(stretch)이 큰 영역에서는 곡률(curvature)이 전단 변형률과 함께 신장(stretch)의 주요 구성인자임을 확인하였다. 이처럼 화염의 기하학적 구조는 화염의 영역 변화에 큰 영향을 주며, 특히 화염의 소멸에 있어서 중요한 역할[2]을 한다. 하지만, 전단 변형률과 OH 신호는 이러한 기하학적 정보를 포함 하고 있지 않다. 따라서, 이에 대한 대안이 필요하다.

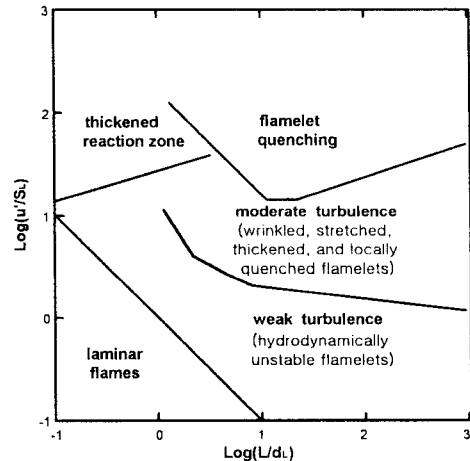
Gouldin[11]과 Gulder[12] 는 난류 예혼합 화염의 화염면 모델링에 프랙탈 기하를 이용하였다.. 또한, 에어로졸 분야에서도 프랙탈 차원을 이용

에어로졸의 기하학적 형태가 에어로졸 덩어리(agglomerate) 형성에 영향을 줌을 밝혀 내었다 [13]. 이처럼 많은 분야에서 기하학적 정보를 얻는데 프랙탈 차원을 이용하고 있다[14]. 본 연구에서도 기하학적 정보를 얻기위해 프랙탈 차원을 이용하였으며, 자기 유사성(self-similarity)이 없는 경우의 구조에 대하여 쉽게 적용할 수 있는 Mandelbrot의 Box-Counting Dimension[14]을 이용하였다.

### 2.4 Borghi 및 Modified Borghi 선도



(a)



(b)

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

Fig. 3(a)는 Borghi[1]가 난류화염 영역을 구분한 선도(diagram)이며, Fig. 3(b)는 Lipatnikov와 Chomiak이 최근의 결과들을 모아서 좀더 세부적으로 구분한 선도이다[2]. 가로축의  $L$ 과  $\delta_L$ 은 각각 적분길이 스케일과 층류 화염 두께이며, 세로축의  $u'$ 와  $S_L$ 은 각각 난류강도와 층류화염 속도이다.

난류화염의 영역은 크게 thick flame과 wrinkled flame으로 나눌수 있다.

Thick flame은 분산반응(distributed reaction) 또는 well-stired reactor라 불리며, 이 영역은 작은 스케일의 높은 난류강도와 연관되어 있다. 적분길이 스케일,  $L$ 이 층류화염 두께,  $\delta_L$ 보다 작다( $L < \delta_L$ )는 조건이 이영역의 충분 조건이다. 그리고 열발생(heat release)를 제어하는 화학반응이 모든 난류 스케일에 걸쳐서 일어난다. 하지만, 이러한 영역은 화염의 소멸(quenching)현상 때문에 제한 적으로 발생한다[2,7,10].

Wrinkled flame은 reaction sheet 또는 flamlet regime으로도 불리며, 큰 스케일의 작거(weak)나 중간정도(moderate) 세기의 난류와 관계된다. 이 영역의 충분 조건은 Kolmogrov 길이 스케일,  $\eta$ 가  $\delta_L$ 보다 매우 큰 값( $\eta \gg \delta_L$ )을 가질때이다. 그리고 화학반응 영역이 주름지고(wrinkled) 얇은(thin) 영역에 제한되어 있으며, 이러한 화학반응 영역이 미연의 반응물과 기연의 생산물(burned products)을 분리시킨다. 이 영역은 다시 Fig. 3(b)와 같이 약한 난류의(weak turbulent) 주름상 화염(wrinkled flame)과 중간세기 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 화학반응률이 증가하고, 부분적으로는 소멸현상이 발생한다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 압력선도

##### 3.1.1 용어의 정의

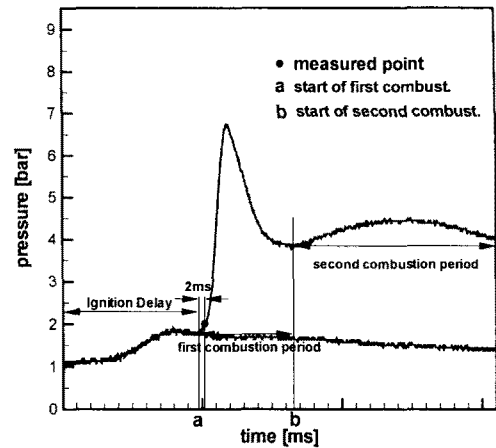


Fig. 4 Pressure history and definition

Fig.1의 연소기 특성상 점화 후 어느정도의 점화지연(Ignition delay)이 발생한 후 주 연소실에서 점화가 발생한다[3]. 이호근[3]과 손민호[15]의 결과에 의하면 주연소실의 점화는 점화 초기의 유동장 분포와 반응기(radical)의 분포에 큰 영향을 받는다. 따라서 이때의 상태가  $d_0$ 나  $\phi$ 의 조건 변화에 따라 여러 형태의 화염을 보일 것으로 판단하여, 첫 번째 점화가 발생하는 지점 즉, a로부터 2ms 후에 중점을 두고 관찰하였다. 소멸기준은 Fig. 4의 a 시점에서 압력상승이 없을 때 소멸이 발생한 것으로 판단하였다.

#### 3.1.2 압력선도의 고찰

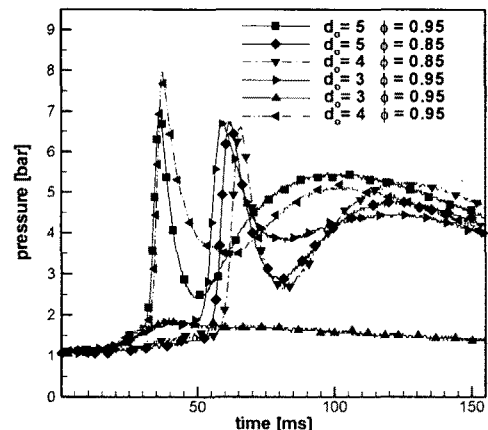


Fig. 5 Pressure histories

Fig. 5는 각 경우에 있어서의 압력선도이다. 특이한 점은  $d_0$ 가 3mm인 경우에는 같은 조건임에도 재점화와 소염이 동시에 존재하였다. 따라서  $d_0=3\text{mm}$ ,  $\Phi=0.95$ 를 임계점(critical point)으로 판단하였다.

$d_0$ 가 4mm인 경우에는  $\Phi$ 가 0.95일 때 0.85일 때 보다 점화발생 시점(a)가 짧으며, 두 번째 점화 발생시점(b)에서도 압력이 더 높다는 것을 알 수 있다. 이는 높은 당량비로 인하여 화학반응이 빨리 진행되기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 6의 이미지에서 OH 신호,  $\sigma$ 의 분포가 이 경우( $d_0=4\text{mm}$ ,  $\Phi=0.95$ )에 있어 다른 경우보다 좀더 넓게 분포된 것으로도 알 수 있다. 하지만,  $d_0$ 가 5mm인 경우는 점화 발생시점(a)은 더 짧을 반면에 4mm의 경우와 달리  $\Phi$ 가 0.85인 경우에 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

뒤에 첨부한 Fig. 6은 각각의 경우에 있어서 Fig.1의 viewing area에 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, 각각 한 가지 난류 화염 형태를 보이지 않고 여러 가지 화염영역을 포함하고 있는 것으로 판단하였다. 따라서, 화학반응이 활발한 부분과 부분적인 소염현상이 발생하는 곳에 대해 각각 L()와 Q()로 명칭을 부여하여 좀더 부분적으로 관찰하였다.

### 3.3 전단 변형률과 화염의 위치

본 장에서는 2.4장에서 살펴본 각 영역의 특징적인 현상과 본 실험 결과를 비교 분석할 것이다.

2.4장에서 기술하였듯이[1,2] 유동과 화학반응은 서로의 상호 작용하에 화학반응이 촉진될 수도 있고, 경우에 따라서는 반응이 억제되어 소염에 이르게 된다. 이러한 난류연소에 특징으로부터 난류의 특성을 대표하는 전단 변형률과 화학반응의 특성을 대표하는 OH 신호가 어떠한 관계가 있는지를 살펴보기 위해 Fig. 7과 같은 선도를 그려보았다. 세로축의  $\sigma/\sigma_{\max}$ 는 각 경우에 있어서 OH 신호와 신호의 최대값이며, 가로축의  $\delta$ 는 전단 변형률을,  $\delta_b$ 는 Bray등[5]에 의해 정의

된 bulk strain rate으로 여기서는 1000/s의 값을 가진다

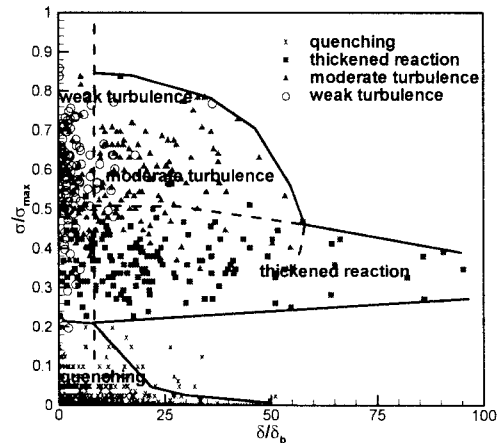


Fig. 8 Schematic of the turbulent reaction zone

Lipatnikov 와 Chomiak[2]에 따르면 난류화염 영역에서 가장 많이 나타나며 연구자료가 많은 영역이 moderate turbulence 영역이며, 또한 가장 특징적이다. 따라서, Fig. 6의 이미지와 Fig. 7의 선도에서 moderate turbulence 영역에 해당하는 것을 먼저 선별한 후 이 영역을 기준으로 하여 다른 영역을 판단하였다.

2.4장에서 언급하였듯이 moderate turbulence 영역에서는 난류강도가 증가 하면서 화학반응이 증가하며, 부분적으로는 소염이 발생한다. Fig. 7의 (c),(d), 그리고 (e) 선도에서 전단 변형률,  $\delta$ 가 증가하면서 OH 신호,  $\sigma$ 도 증가하는 경향을 보인다. 그리고 Fig. 6에서 각각 (c)와 (d)에 해당하는 Q2와 Q3의 이미지를 보면 부분적으로 소염된 영역을 포함하고 있음을 알 수 있다. 따라서, 선도 (c)와 (d)가 moderate turbulence 영역의 특징을 나타내고 있다고 할 수 있다.

Weak turbulence 영역의 특징은 영역은 2.4장에서 설명했듯이  $u' \leq S_{L,0}$ 의 조건에서 발생한다. 그리고 Moderate turbulence에서 보다 상대적으로 약한 난류영역에서 발생한다. 따라서, 화염 신호 역시 약한 전단 변형률에 분포하게 된다. 이러한 특징을 나타내는 선도가 Fig. 7 (f)라 할 수 있다.

Fig.6 (a)는 소염시의 이미지이며, 이에 해당하는 선도가 Fig.7 (a)이다. 따라서 소염시는 Fig.7(a)와 같은 특징의 선도를 가진다고 할 수 있다.

Thickened flame은 Fig.3 (b)의 Modified 선도에서 보듯이 강한 난류와 연관되어 있으며, 난류

의 작은 에디에 의해 화학 반응영역이 분산된 형태[2]를 가진다. 또한 소염되기 직전의 영역에 해당한다. 이러한 영역에 해당하는 영역은 Fig. 6(b)의 Q1에 해당한다고 할 수 있으며, 이러한 이미지에 해당하는 선도가 Fig. 7(b)이다. 여기서, Fig. 7(a)와 Fig. 7(b)를 비교하면, 데이터의 분포 형태가 비슷하다. 즉 낮은 전단변형률에 상대적으로 높은 OH신호가 존재하고, 전단 변형률이 큰 곳에 상대적으로 낮은 신호가 존재한다. 이러한 특징은 소염의 경우에 있어서 더욱 뚜렷해진다. 하지만, 전단변형률의 크기에 있어서는 같은 오리피스 사이즈( $d_0$ )인 경우임에도, 완전히 소염된 경우의 최대값( $\pm 50$ )보다 화염이 남아 있을 때의 최대값( $\pm 100$ )이 크다는 것을 알 수 있다. 이러한 현상의 이유는 화학반응이 유동속에서 에너지원으로 작용하여 난류의 강도가 증가되기 때문인 것으로 추정된다.

위에서 선택된 Fig. 7의 선도를 종합하여 Fig. 8에 나타냈으며, 전단변형률은 절대값을 취하였다. 그리고 각 영역들을 Fig. 3(b) Modified diagram과 비교하여 명칭을 부여하였다.

### 3.4 프랙탈 차원의 결정

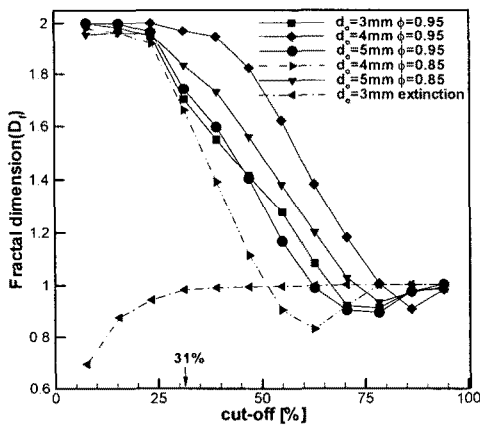


Fig. 9 Fractal dimensions as increasing cut off value

2.3.3장에서 설명하였듯이 화염분포의 기하학적 정보를 얻기 위해 프랙탈 기하를 구해야 한다. 이를 위해 Mandelbrot의 Box-Counting Dimension[14]을 이용하였는데, 이 방법의 특성상 화염이 전혀 없는 부분과 화염이 존재하는 부분이 명확히 구별되어야 한다. 즉, 관찰하고자 하는 영역내에서 신호가 0인 부분이 존재해야만 프랙탈 차원( $D_f$ )을 구할 수 있다. 하지만, OH 반

응기의 경우 그 영역이 매우 넓게 나타나므로 화학반응이 활발하지 않은 곳도 신호가 존재하게 된다. 이렇게 되면 선택된 이미지 전체에 OH신호가 존재하게 되어 어떠한 경우든  $D_f=2$  즉, 2차원의 값을 가진다. 따라서, 화학반응이 활발한 -OH신호가 강한-부분을 제외한 곳은 OH신호( $\sigma$ )가 0이라고 가정해야만 한다. 하지만, 이것에 대한 특별한 기준이 없다. 따라서, Fig. 6의 여섯가지 경우에 대해 Fig. 9에서처럼 기준값(cutt off value)을 바꾸어가면서 프랙탈 차원을 구해 보았다. 기준값을 각 경우의 최대값으로부터 31%로 설정하고 그 이하를 0으로 처리 하였을 때 각 경우의 차원이 구별되는 값을 가지게 된다. 따라서 모든 부분이미지의  $D_f$ 값을 구할때는 이 기준에 따라 구하였다. 이러한 방법으로 구한  $D_f$ 값은 상대적인 값이다. 하지만, 화염의 기하학적 특성을 정량적으로 나타냄으로써 Fig. 8에 구분된 영역들을 좀더 구별되게 구분할 수 있다.

Fig. 10은 위의 기준에 의해 구한 Fig. 6의 부분영역에 대한  $D_f$ 값이다. 소염영역(EXT)과 thickened reaction 영역(Q1)은 다른 부분과 확연하게 구분이 되는 것을 알 수 있다. 그리고 L로 표기된 화학반응이 비교적 활발한 영역들 중 난류강도가 강하여 전체적으로 소염이 발생하는  $d_0=3\text{mm}$  인 경우에  $D_f$  값이 가장 작은 것이 특징이다.

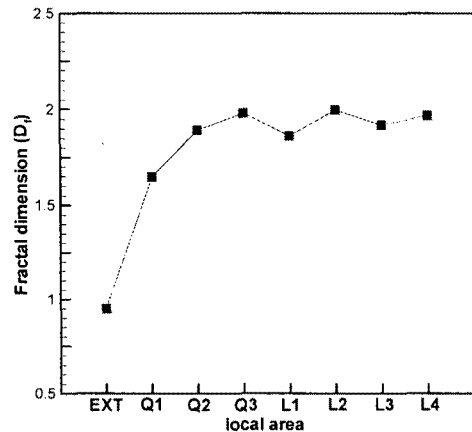


Fig. 10 Fractal dimension in local areas.

### 3.5 3차원 선도

Fig. 11는 Fig. 8의 선도와 3.4장에서 구한 프랙탈 차원( $D_f$ )을 합한 선도이다. 이 선도에서는  $D_f$ 의 값의 범위를 정확한 값에 제한 시키지 않고 넓게 설정하였다. 그 이유는 3.4장에서 언급하였듯이  $D_f$ 값을 구하는 방법에 따라 조금씩 다른 값

을 가질 수 있기 때문이다. 하지만, 같은 난류연소 영역에 포함된다 할지라도 기하학적 구조는 조금씩 다를 수 있다. 이러한 점을 고려하면  $D_f$ 의 값은 어느 정도의 범위를 가지게 된다. 따라서,  $D_f$ 의 값을 구하는 과정에서 발생하는 오차는 아무런 의미가 없게 된다.

Fig.9 와 Fig.10으로부터 weak turbulence 영역은  $D_f=2$ , moderate turbulence 영역은  $1.8 \leq D_f \leq 1.95$ 의 값을 가지며, thickened reaction은  $1.5 \leq D_f \leq 1.7$ , quenching에서는  $0.6 \leq D_f \leq 0.9$  일 것으로 추정된다.

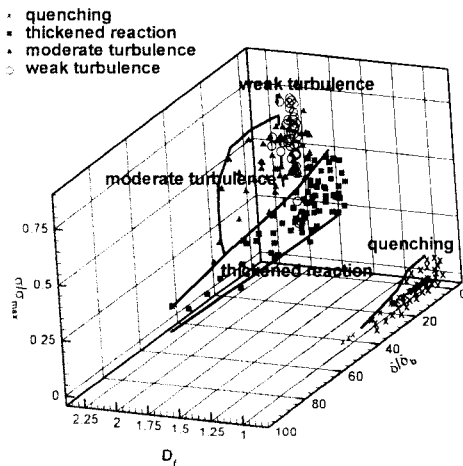


Fig. 11 Diagram suggested for replacing Borghi diagram.

#### 4. 결론

1) 3.1장의 압력선도에서 보았듯이 난류연소는 화학반응이나 유동특성중 하나의 특성으로는 설명할 수 없으며, 두가지 요소를 모두 고려해야 한다.

2) 난류의 특성을 전단변형률( $\delta$ )로, 화학반응의 특성을 OH 신호( $\sigma$ )로 대체하고, 여기에 화염의 기하학적 구조를 고려하기 위해 프랙탈 차원( $D_f$ )을 추가하여, 계측 방법의 근래 동향에 알맞으면서 Borghi 선도를 대체 할 수 있는 Fig. 12와 같은 새로운 선도(diagram)을 제시하였다.

#### 참고문헌

- [1] Borghi R. Prog Energy Combust Sci Vol. 14, 1988, p.245.
- [2] A.N. Lipatnikov and J. Chomiak, "Turbulent flame speed and thickness", Prog. Energy Combust Sci, 2002, pp. 1-74.
- [3] 이호근, "대향분출염 연소방식에 의한 NOx 생성 저감에 관한 실험적 연구", 서울대학교 박사학위 논문, 1997.
- [4] L.W. Kostiuik, K.N.C. Bray, and R.K. Cheng, "Experimental Study of Premixed Turbulent Combustion in Opposed Streams. Part II", Combust. Flame Vol. 92, 1993, pp. 396-409.
- [5] K.N.C. Bray, M. Champion, and Paul A. Libby, "Extinction of Premixed Flames in Turbulent Counterflowing Streams with Unequal Enthalpies", Combust. Flame Vol. 107, 1996, pp. 53-64.
- [6] R.G. Abdel-Gayed and D. Bradley, "Combustion Regime and Straining of Turbulent Premixed Flame", 1989, Combust. Flame Vol. 78, pp.213-218.
- [7] Jacqueline H. Chen and Hong G. IM, "Correlation of Flame speed with Stretch in Turbulent Premixed Methane/Air Flames", 27th Symp. on Combust., 1998, pp.819-826.
- [8] N. Darabiha, "The effect of strain rate on a premixed laminar flame", Combust. Flame. Vol. 64, 1986, pp.203-217.
- [9] P.S Kothnur, M.S. Tsurikov, N.T. Clemens, J.M. Donbar, and C.D. Carter, "Planar Imaging of CH, OH and Velocity in Turbulent Nonpremixed Jet Flames", 29th Symp. on Combust., 2002.
- [10] J. Chomiak and J. Jarosinski, " Flame Quenching by Turbulence", Combust. Flame Vol. 48, 1982, pp.241-249.
- [11] F.C. Gouldin, " An Application of Fractals to Modeling Premixed Turbulent Flames", Combust. Flame Vol. 68, 1987, pp.249-266.
- [12] O.L. Gulder, "Turbulent Premixed Combustion Modeling Using Fractal Geometry", 23th Symp. on Combust., 1990, pp. 835-842.
- [13] S. K. Friedlander, "Smoke, Dust, and Haze 2ed.", Oxford New York, 2000, pp.222-248.
- [14] H. O. Peitgen, H. Jurgens, and D. Saupe, "Fractal for the Classroom", Vol. 1, Springer-Verlag New York, Inc., 1992.
- [15] 손민호, "대향분출화염의 분산화학 반응구조와 소염한계의 영향", 서울대학교 석사학위논문, 2002.

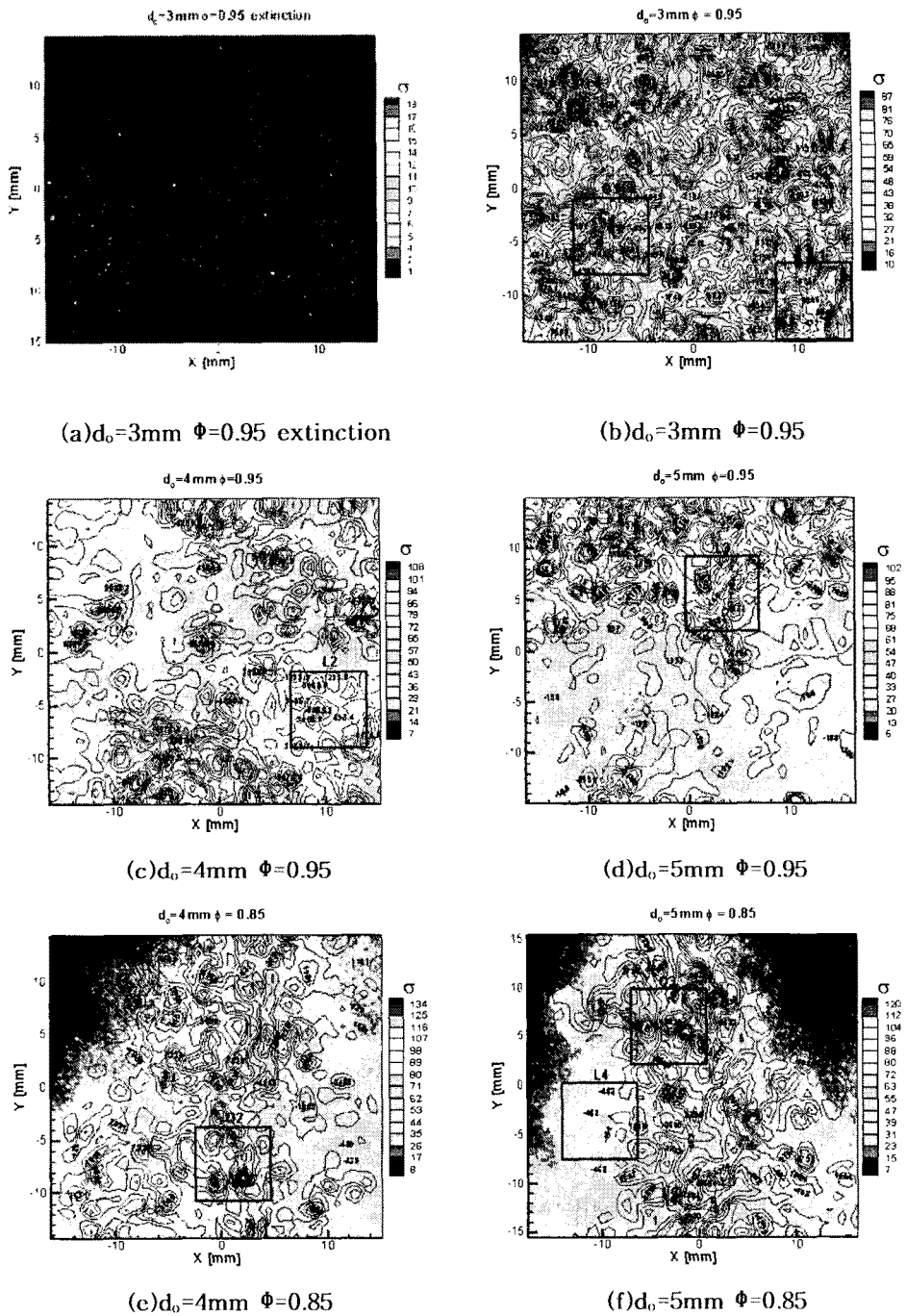
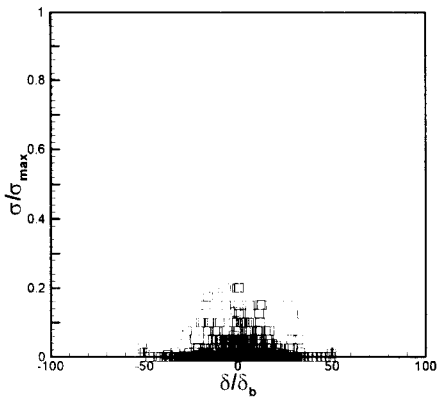
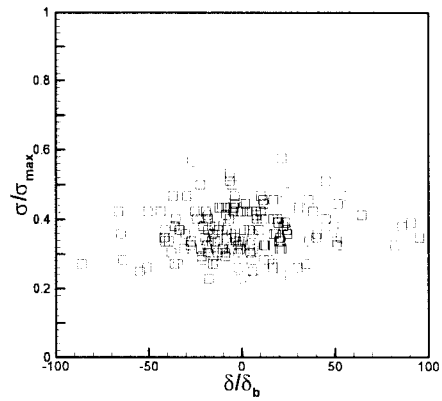
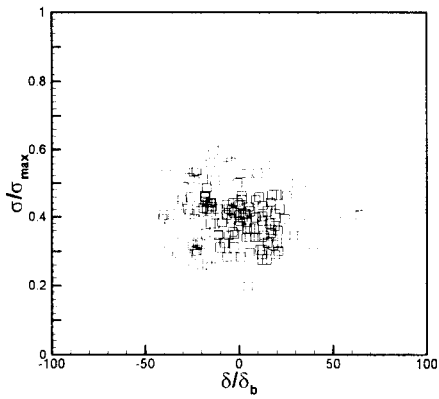


Fig. 6 Image of the simultaneous PIV/OH PLIF measurements

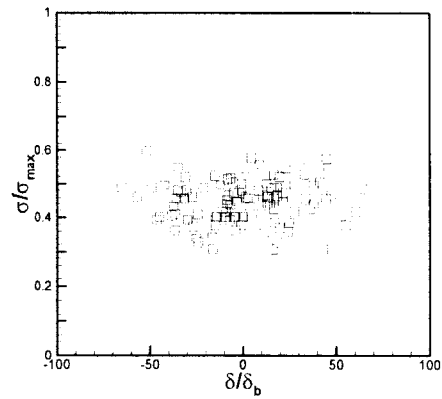


(a)  $d_0=3\text{mm}$   $\Phi=0.95$  extinction

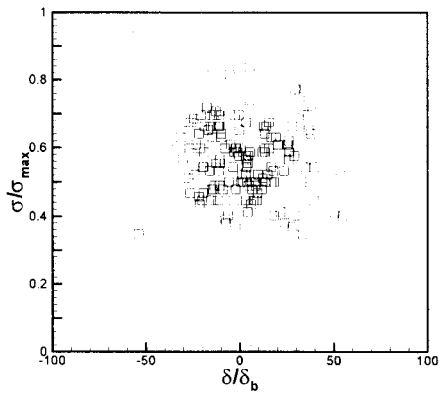
(b) Q1 in Fig.6



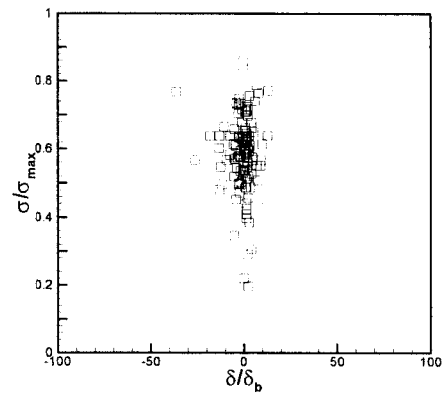
(c) Q2 in Fig.6



(d) Q3 in Fig.6



(e) L1 in Fig.6



(f) L4 in Fig.6

Fig. 7 Matching of the strain rate and OH signal