

대향분출화염의 분산화학반응 화염구조와 NOx 저감기구

손민호* · 조용진* · 윤영빈† · 이창진**
(2002년 2월 20일 접수, 2002년 7월 8일 심사완료)

Flame Structure of Moderately Turbulent Combustion in the Opposed Impinging Jet Combustor

Min Ho Sohn, Yongjin Cho, Youngbin Yoon and Changjin Lee

Key Words : Opposed Impinging Jet Combustor(대향 분출 연소기), Strain Rate Distribution (와도 분포), NOx

Abstract

The measurement of velocity and strain rate field has been conducted in opposed impinging jet combustion. When a smaller diameter (5mm) orifice of pre-chamber was used, previous studies had reported that the combustion phase showed a shift from weak turbulent combustion to moderate turbulent combustion in the modified Borghi Diagram. In the case with smaller orifice diameter (5mm), NOx emission was substantially reduced by a factor 1/2 while the combustion pressure remains at the same as that in the conventional combustion. Hence, in this study, the experiment setup using PIV technique was designed to identify the relation of the strain rate distribution and NOx reduction associated with moderate turbulent combustion. As a result, it was found that the highly strained pockets are widely distributed during the combustion in the middle of chamber when the orifice diameter is 5mm. And the corresponding PDF distribution of strain rates shows the smoothly distributed strain rate within the range of $|\pm 1000|$ (1/sec) rather than a spike shape about zero point. This is the unique feature observed in the combustion with 5mm orifice diameter. Therefore, it can be concluded that the substantial NOx reduction in opposed impinging combustor is mainly attributed to the strain rate distribution within the range of $|\pm 1000|$ resulting in the combustion phase shift to moderate turbulent combustion.

기호설명

S_L : 층류화염 속도
 u' : 난류 강도
 δ_L : 층류화염 두께
 L : 난류 적분 길이 스케일

1. 서론

우리가 통칭 NOx 라 부르는 질소 산화물은 여러 질소 산화물 중 NO₂ 와 NO 를 가리키고 이중에서도 NO 가 대부분을 차지하고 있다. 탄화수소 계열 연료의 연소과정에서 생성되는 NO 의 주요 원인에는 다음의 3 가지가 있다.

- (1) 연소반응으로 형성된 고온의 환경에서 산화제로 사용되는 공기중의 질소가 산소와 반응하여 생성되는 Thermal NO 기구
- (2) 과농 상태의 탄화수소연료의 연소에서 탄화

* 서울대학교 대학원 기계항공공학부
† 책임저자, 회원, 서울대학교 기계항공공학부
E-mail : ybyoon@plaza.snu.ac.kr
TEL : (02)880-1904
** 건국대학교 항공우주공학과

수소 라디칼과 질소의 반응으로 생성되는 Prompt NO 기구

(3) 연료 중에 포함되어 있는 질소의 산화에 의해 생성되는 Fuel NO 기구

현재는 질소가 거의 들어있지 않은 연료가 사용되므로 Fuel NO 기구에 의한 NO_x 생성은 무시할 수 있으며 Prompt NO 는 주로 연료가 충분히 예혼합된 탄화수소계열 연료의 확산화염에서 나타나므로 여기서는 Thermal NO 의 영향이 가장 크다.

Thermal NO 는 다음 세 반응으로 발생된다.



이를 확대 Zeldovich 기구라 하며, 질소원자의 정상상태 근사치를 구하고 산소원자의 농도는 평형상태에서 결정된다고 가정하면 NO 의 최대 생성률은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{d[NO]}{dt} = 6 \times 10^{16} T^{-\frac{1}{2}} \exp\left[-\frac{69090}{T}\right] [O_2]^{\frac{1}{2}} [N_2] \quad (4)$$

이 반응은 연소 반응에 비해 매우 느리게 진행되는 비평형 반응이며, NO 의 생성률이 화염면 후면의 연소가스 온도에 크게 지배되는 것을 보여준다.

이러한 이유로 현재까지의 NO_x 저감대책들은 주로 연소실내의 최고화염온도를 낮추는 방법들이 적용되어 왔으나 이러한 방법은 NO_x 생성량은 상당히 줄일 수 있으나, 동시에 출력저하 및 미연탄화수소 배출물의 증가를 수반하는 단점을 가지고 있다. 이러한 문제를 극복하기 위한 방법으로 연소실 내에 난류를 발생시키는 것이 매우 유용한 것으로 알려져 있다. 이러한 연소방법은 Kumagai 와 Kimura 등⁽¹⁾에 의해 실험적으로 연구되어졌다. 이러한 형태의 난류연소과정은 소위 대향 분출연 연소방식으로 발전되었으며 지난 10 여년간 Fujimoto 등,⁽²⁾ Yamaguchi 등,⁽³⁾ 정경석,⁽⁴⁾ 박홍복,⁽⁵⁾ 최성만,⁽⁶⁾ 이호근⁽⁷⁾ 등에 의해 계속 연구되었으며, 최대출력과 동시에 낮은 NO_x 생성량을 얻을 수 있는 특성이 있음이 여러 연구자들에 의해 확인되었다.

특히 이호근 등에 의해 화염의 형태가 개정된 Borgi 연소양상도⁽⁸⁾ 상의 moderate turbulent 영역으로 천이 된다는 사실이 밝혀졌는데, 이러한 화학 반응 영역에 대한 이해와 이에 따른 명확한 NO_x

저감 기구에 대한 이해가 부족한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 이러한 화학반응이 발견되는 유동장의 특성을 PIV 실험을 통하여 측정 및 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 연소실

다음의 Fig. 1 은 부연소실이 부착된 상태의 연소기를 보여주는데 PIV 를 이용한 분석에 사용된 viewing area 를 동시에 표시 하였으며 부연소실에서 점화가 이루어져 주연소실의 중앙에서 만나 정체면을 형성하는 것을 간략히 도시하였다. 연소실은 실물엔진에 가깝도록 직경 120mm, 두께 40mm 의 정적 원판형으로 제작되었으며, 부연소실이 없을 때 전체부피가 452cc 로써 4 기통 1800cc 소형 승용차의 배기량에 맞게 제작되었다. 이 실험장치는 기본적으로 이호근 등⁽⁷⁾의 실험에 사용된 것과 동일한 크기로 제작되었으며 레이저 측측을 위해 한쪽 측면에 slit 을 만들고 반대쪽 측면에는 압력 센서를 설치하였다. 연소기 내에는 2 개의 부연소실을 부착할 수 있도록 제작되었는데, 부연소실의 부피비의 변화에 따른 연소특성의 변화는 무시할 만하므로 본 실험에서는 14.8%의 부피비를 가지는 부연소실을 사용하였다. 부연소실에는 각각 연소실의 벽면과 부착되어 있는 전기점화 플러그가 있으며 부연소실 중앙에는 주연소실로 연결되는 원형 구멍이 있는데 이 구멍의 직경을 각각 5, 9, 13mm 로 변화시켜가며 주연소실로 분출되는 제트의 난류강도를 조절하여 실험하였으며 소멸에 대한 실험에는 동일한 부피비의 3mm 오리피스 부연소실을 사용하였다.

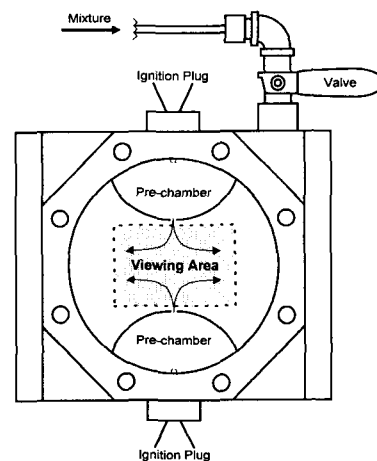


Fig. 1 Schematic of Impinging Jet Combustor

2.2 실험장치 set-up

점화 직전에는 2color PIV 를 사용한 cross-correlation 기법을 사용하고, 재점화가 일어나는 동안에는 화염에 의한 이미지의 간섭을 최소화 하기 위해 cross-correlation 카메라를 사용하여 2 장의 이미지에 각각 선후가 구분된 동일 파장의 레이저를 주사하고 기록하는 PIV 기법을 사용하였다. 화염의 영상을 제거하기 위해 bandwidth 10nm 의 532nm 용 밴드패스 필터를 사용하였으며 압력측정을 동시에 하여 데이터의 적합성을 확인하였다. PIV 실험을 위한 장치 구성은 Fig. 2 와 같은데 두 가지 PIV 기법 모두 그 구성은 유사하며 여기에는 cross-correlation PIV 에 사용되는 구성이 나타나 있다.

2.3 대향분출연소기의 특성과 실험위치

용어상의 혼동을 피하기 위해 먼저 본 실험의 측정기준이 된 압력곡선상의 위치를, 재점화가 일어나기 직전과 재점화가 일어나고 있는 연소반응기간 동안으로 구별하여 전자는 '점화 전', 후자는 '점화 후'라는 용어를 사용하였다. 다음 Fig. 3 에는 압력곡선과 이에 따른 실험위치를 간략히 도시하였다.

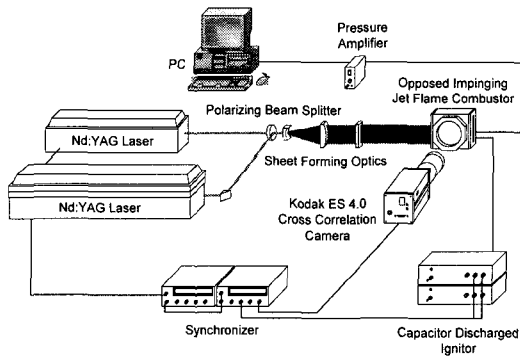


Fig. 2 Experimental set-ups for PIV

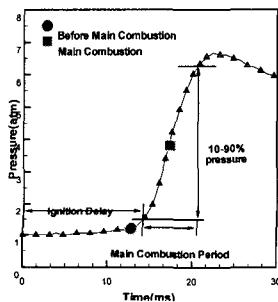


Fig. 3 Experimental measuring points

그림에 나타난 점화지연(Ignition delay)은 점화플러그의 점화시점부터 최고압력의 10%까지의 시간을 주연소기간은(Main combustion period)는 점화지연 종료후부터 최고압력의 90%에 도달할 때 까지 걸리는 시간으로 정의되며 대향분출연소기를 사용했을 때 그 연소특성은 Fig. 4 와 같다.

대향분출연소를 사용했을 때 오리피스 크기가 감소하여 난류강도가 강해지고 분출염이 연소기 중앙에서 만나면서 강한 전단변형률을 형성하는데 이는 점화지연을 증가시키는 반면, 주연소기간은 감소시키는 역할을 한다. 또한 이때 NOx 발생량도 현저히 감소하는 현상을 확인할 수 있었는데 특히 NOx 가 1/2 수준으로 격감하는 5mm 오리피스의 경우에는 LDV 실험을 통한 이호근⁽⁷⁾의 결과에서는 Borghi 연소양상도⁽⁸⁾ 상의 분산화학반응 영역의 연소가 일어남을 확인하였고 이 영역은 개정된 Borghi diagram⁽⁹⁾상의 moderate turbulent 연소 영역으로 구분될 수 있다.(Fig. 5) 따라서 이 실험에서는 주연소가 일어나기 직전('점화 전')과 주연소가 일어나는 시점('점화 후')으로 나누어 유동장의 특성의 차이를 분석하는 것을 목적으로 하였다.

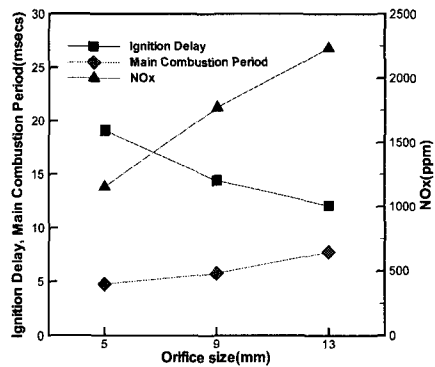


Fig. 4 Ignition delay, main combustion period and NOx emissions according to orifice size

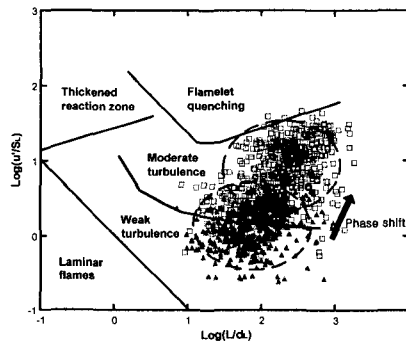


Fig. 5 Combustion phase in Modified Borghi diagram

3. 토의 및 결과

3.1 PIV 를 이용한 점화전의 속도장 분석

Fig. 6 의 (a), (b), (c)는 각각 13mm, 9mm, 5mm 직경의 오리피스를 가지고 점화 전에 측정된 Raw Image 이다. 이 이미지는 2 color PIV 를 이용해 주입 입자의 녹색 및 적색 산란이미지를 한 장의 사진에 찍은 이미지인데, 밀도차이를 보다 명확히 구별하기 위하여 역상을 취하였고, 이는 입자의 밀도차이와 연소실에서 발생하는 현상을 직관적으로 이해하는데 도움을 준다.

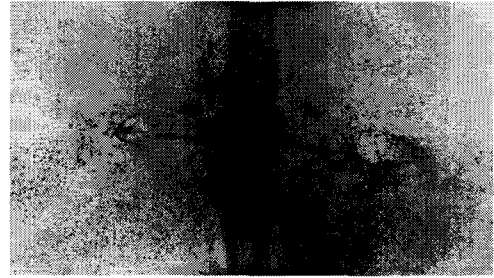
13mm 의 오리피스를 사용한 Fig. 6(a)에서는 분출화염이 비교적 연속적인 밀도변화를 보이며 유선의 형태로 충돌하며 연소실의 중앙에서 대칭적이고 평행한 정체면을 길게 형성한다. 9mm 의 Fig. 6(b)에서는 유사한 경향을 보이지만 분출화염의 유선의 밀도 분포를 통해서 13mm 의 경우와는 조금 다르게 전체적으로 균일한 밀도분포를 가진 형태의 화염이 분출되고 있음을 확인할 수 있으며 정체면의 길이가 다소 감소하는 것을 볼 수 있다. 오리피스의 크기가 작아질수록 분출유속은 증가하지만 정체면의 길이가 오히려 더 짧아지는 것은 분출유속의 증가는 정체면을 길게 형성시키는 역할 보다는 유동의 난류 에너지를 증가시키고 유동장에서 이를 축적하는 것을 돕기 때문이라고 생각된다.

Yamaguchi 등⁽³⁾은 부연소실 오리피스의 직경변화에 따른 분출화염의 구조를 파악한 실험에서 오리피스의 직경이 작아지면 분출염은 화염핵(flame kernel)이나 화염면(flame front)에서 활성기(active species)가 분출되는 형태로 천이되고, 주연소실에서의 연소는 주름상 층류화염에서 분산화학반응 화염으로 변화된다고 밝혔는데 본 실험의 Raw Images 를 통해 유사한 결론을 얻을 수 있었다.

즉, 13mm 와 9mm 의 경우 단지 오리피스의 크기만 변화하였을 뿐이지만 분출염의 형상과 구조 또한 변화하고 있음을 알 수 있으며 이러한 현상은 5mm 의 경우에 더욱 확연한 차이를 보인다. Fig. 6(c)에서는 더 이상 분출염의 형태가 층류의 특성을 보이지 않으며 작아진 오리피스에 의해 분출초기부터 강한 난류의 형상을 보이고 오리피스의 끝단(원주)에서 vortex 가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 또한 13, 9mm 의 경우에는 보이지 않던 난류에 의해 발생한 작은 주머니 구조가 많이 생성되는 것(pocket formation)을 확인할 수 있으며 이 경우에는 정체면을 형성하기 보다는 강한 난류 특성이 유동장을 뒤틀리고 충분히 섞이도록



(a) Inverted PIV raw image for 13mm orifice diameter



(b) Inverted PIV raw image for 9mm orifice diameter



(c) Inverted PIV raw image for 5mm orifice diameter

Fig. 6 PIV raw images according to orifice diameter

한다는 것을 확인할 수 있다.

특히 주목할 점은 위에서 보인 Fig 6 의 이미지들이 분출이 종료되고 재점화가 일어나기 직전인 ‘점화 전’에 측정된 것이라는 점이다. 즉 13, 9mm 의 경우에는 재점화가 일어나기 직전까지도 정체면을 형성하고 있기 때문에 재점화가 일어나는 시점에도 정체면을 중심으로 층류 또는 wrinkled laminar flame 의 형태로 연소가 이루어지겠지만 5mm 의 경우에는 이미 정체면의 형태를 확인할 수 없는 상태에서 충분히 섞여진 활성기와 주머니 구조들 주위에서 재점화가 이루어지므로 그 연소 형태는 비교적 광범위한 유동장에서 난류연소의 형태를 가지고 연소 될 것임을 쉽게 짐작할 수 있다.

3.2 점화전, 후의 전단변형을 분포비교

Fig. 7(a), (b)는 각각 13mm 와 5mm 의 경우 Fig.

1의 Viewing area의 이미지를 이용 각각의 이미지에 대해 확률밀도를 구한 후 그것을 비교 평균 한 값이며, 점화전과 점화후의 전단변형률의 확률밀도의 비교를 위해 두 경우를 함께 도시한 그래프이다. 13mm의 경우(Fig. 7(a))에는 점화전과 점화후의 변형률 분포는 0에 가까운 영역의 확률분포가 증가하는 경향을 보이지만 기본적으로는 원점을 중심으로 대칭되는 쌍기형태를 유지하며 기본적으로 13mm의 오리피스에 경우에는 재점화를 전후하여 변형률의 분포의 변화는 미미함을 알 수 있다. 또한 이 경우에는 주로 전단변형률이 ± 500 (1/s)보다 작은 영역이 주로 분포함을 확인할 수 있는데 이를 통해 직경이 13mm 일 때는 점성소산에 의한 난류 Energy cascade의 영향으로 발생하는 주머니 구조 화염(flame pocket)을 형성시키기에는 불충분한 작은 크기의 난류가 발생된다는 것을 알 수 있다. 분산화학반응이 일어나고 NOx 저감이 가장 많이 일어나는, 5mm의 오리피스를 사용한 Fig. 7(b)의 경우에는 다른 경향을 보이는데 점화 전에는 13mm의 경우와 정성적으로 거의 유사한 형태의 쌍기형 분포를 보이지만, 연소가 진행되고 있는 점화 후의 변형률 분포는 완만한 삼각형

모양의 분포를 나타낸다. 즉 원점을 중심으로 보이던 peak는 찾아 볼 수 없으며(점화가 일어날 때 전단변형률이 0으로 소멸되지 않고), 변형률이 ± 1000 (1/s) 이하인 중간영역의 전단변형률의 분포가 눈에 띄게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이 결과는 오직 5mm의 점화후의 경우에서만 발견되는 특징적인 현상인데, 따라서 이 영역에 있는 변형률이 분산화학반응으로 유동장을 천이 시키는 데 중요한 역할을 하는 것을 알 수 있다.

연소실에서 전단변형률은 연소시간을 감소시키는 역할을 함과 동시에 화염의 형상을 modified Borghi diagram 상에서 'moderate turbulent' 영역의 연소를 발생하게 한다. 이러한 경향은 분출화염의 강한 전단변형률에 의해 높은 화염 신장률을 가지는 화염으로 천이되는 현상을 보고한 Yoshida 등⁽¹⁰⁾과 Bedat 등⁽¹¹⁾의 논문에서 확인할 수 있다. 또한 Yoshida 등⁽¹²⁾은 기연 혼합기가 있는 화염영역에서 small-scale의 난류로 구성된 일련의 '뭉침' 형태의 난류가 넓게 분포하는 것을 확인하였는데 이러한 작은 스케일의 난류구조가 점화지연과 밀접한 관계가 있으며 분산화학반응 영역은 예열된 미연가스 혹은 부분적으로 반응이 일어나고 있는 기연 가스들의 vortex tube들의 형태로 이루어져 있으며 이러한 구조가 유동장의 분자단위의 혼합을 증대 시키는 역할을 하는 것을 확인하였다.

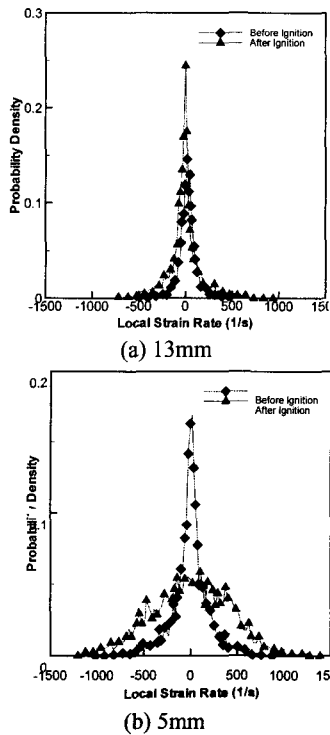


Fig. 7 PDF distribution of strain rates before and after the ignition for 13mm and 5mm orifice diameters

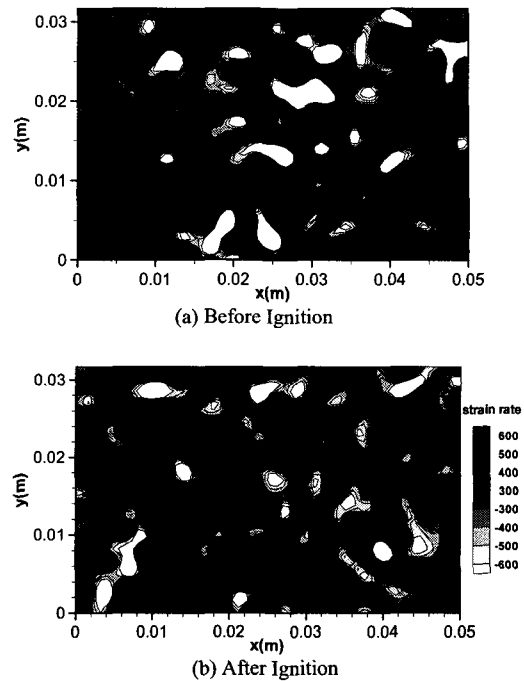


Fig. 8 The contour of strain rate distribution for 5mm orifice diameter

Fig. 8의 (a), (b)는 강한 난류연소의 영향으로 작은 스케일의 강한 전단변형률을 가진 주머니 화염이 발견되는 5mm 오리피스스의 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 함께 'moderate turbulent' 영역 화염의 또 다른 특성으로 보인다.

이상의 결과를 종합하여 볼 때, 오리피스 직경이 작아지면 연소양상은 작은 스케일의 주머니 화염구조가 유동장에 넓게 분포하는 'Moderate Turbulent' 영역 또는 분산화학반응 영역으로 천이하게 되고 결과적으로 NO_x의 발생량이 현저히 저감되게 된다.

± 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_x의 발생을 최소화하는 것을 효과적으로 돕는 것으로 보인다.

4. 결론

부연소실이 있는 대향 분출 화염의 연소과정은 제트분출기간과 주연소기간으로 나뉜다. PIV 기법을 이용해 점화 전과 후의 상태를 비교분석하고 'moderate turbulent' 영역에 해당하는 분산화학반응의 화염구조의 분석을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 오리피스 직경이 감소하면, 분출화염의 유속이 빨라지는 것과 동시에 분출화염의 형태도 화염면(flame front)이나 화염핵(flame kernel)에서 활성기(active species)의 형태로 변화한다. 따라서 작은 오리피스스의 경우에는 정체면을 형성하지 않고 혼합이 증대된 난류 유동장을 형성하게 되고 재점화에 의한 연소는 정체면 중심이 아닌 전체적으로 균일하게 퍼진 활성기들을 중심으로 발생하게 된다.

(2) 분산화학반응 (distributed reaction or moderate

turbulent regime)이 일어나는 5mm 오리피스스의 경우 전단변형률 분포는 중간 영역(± 1000 1/s)의 변형률의 분포가 증가하고 그 분포는 전유동장에 걸쳐 균일하게 분포되는, 특징적인 형태를 가진다. 이 영역의 변형률은 점성소산 이후의 작은 스케일의 주머니 구조 화염의 형성에 관여하며, 따라서 이 영역의 변형률의 분포가 비교적 적은, 오리피스스가 작은 경우에는 이러한 현상이 관찰되지 않았다.

본 연구에서는 PIV를 이용해 유동장의 형태와 경향을 정성적으로 확인하고 분산반응화염의 구조를 분석하였다. 특히 이러한 분석을 통하여 화염 분출에 의해 증가하는 전단변형률의 역할이 소염을 억제하고 점화지연을 증가시켜 보다 강한 난류연소를 보다 넓은 영역에서 빠르게 일으키도록 돕는 역할 뿐 아니라 점화 중에 발생하는 일정한 영역의 전단변형률이 난류 예혼합화염의 국부적인 화염구조를 결정하는데 중요한 역할을 하며, 화학반응과의 상호 반응으로 인하여 분산반응화염을 일으키는데 중요한 역할을 함을 확인하였다.

따라서 다음과 같이 대향분출염 연소기에서의 NO_x 저감 기구를 생각해 볼 수 있다. 대향분출염이 충분한 난류강도를 가질 때 국부적으로 집중되어 있는 높은 변형률을 가진 유동장이 형성되고 이러한 유동장은 다시 점성력에 의하여 일련의 '묶음(bundle)' 형태의 아주 작은 스케일의 높은 전단변형률을 가진 주머니 구조 화염을 발생하게 되고 이러한 점성소산 과정을 통해 난류 유동장에서 부분적으로 연소된 기연가스와 미연가스 간의 분자단위의 혼합이 촉진된다. 이렇게 형성된 작은 주머니 구조의 화염이 재점화를 일으키면서 'moderate turbulent' 영역에서의 반응을 일으키게 되는데 특히 본 논문에서 밝힌 것과 같이 크기가 ± 1000 (1/s) 이하의 전단변형률이 유동장 내에서 'moderate turbulent' 화학반응을 일으키는데 주요한 역할을 할 것으로 보인다. 결과적으로 주연소가 일어날 때 열적 NO_x의 발생이 급격히 증가하는 극고온 영역의 연소를 감소시켜서 동일한 출력을 유지하면서도 NO_x의 발생이 현저히 저감되는 친환경 고효율 연소가 이루어진다.

참고문헌

- (1) Kumagai, S. and Kimura, I., 1953, "The Effect of Turbulence on Flame Propagation in Gases," 4th International Symposium on Combustion, Williams & Wilkins, pp. 667-669.
- (2) Fujimoto, S., Kaneko, Y., and Tsuruno, S., 1984, "Possibility of Low-NO_x and High-load Combustion

- in Pre-mixed Gases," Twentieth Symposium (International) on Combustion, pp. 61~66.
- (3) Yamaguchi, S., Ohiwa, N., and Hasegawa, T., 1985, " Ignition and Burning Process in a Divided Chamber Bomb," *Combustion and Flame* 59, pp. 177~187.
- (4) Jeong, K. S., 1988, " A Study on Combustion Characteristics of Premixed Gases in a Closed Combustion Chamber with/without Prechambers," Ph. D. Thesis, Seoul National University.
- (5) Park, H. B., 1991, " A Study on Combustion Characteristics in the Closed Discal Combustion Chamber with prechamber," M.S. Thesis Seoul National University.
- (6) Choi, S. M., 1994, " An Numerical Study on Reduction of NOx Production by the Opposed Impinging Jet Flame," Ph. D. Thesis, Seoul National University.
- (7) Lee, H. G., 1997, " An Experimental Study on Reduction of NOx Production by the Opposed Impinging Jet Flame," Ph. D. Thesis, Seoul National University.
- (8) Borghi, R., " On the Structure of Turbulent Premixed Flames, Recent Advances in Aeronautical Science" , C. Brnuo & C. Casc (Eds), Pergamon, 1984
- (9) Chomiak et al., 1982, *Combustion and Flame* 48, p. 241.
- (10) Yoshida, A., 1988, " Structure of Opposed Jet Premixed Flame and Transition of Turbulent Premixed Flame Structure," *Proceedings of Combustion Institute*, Vol. 22, pp 1471~1478.
- (11) Bedat, B. and Cheng, R. K., 1995, " Experimental Study of Premixed Flames in Intense Isotropic Turbulence," *Combustion and Flame* 100: pp. 485~494.
- (12) Yoshida, A., Kakinuma, H. and Kotani, Y., 1996, " Extinction of Turbulent Premixed Flames by Small-scale Turbulent at Kolmogorov Microscale," *Twenty-Sixth Symposium, The Combustion Institute*, pp. 397~404.