

Offset-대향 분출염의 NOx 생성특성

서종원* · 이창진**

NOx Production Characteristics of Offset-Opposed Impinging Jet Flame

Seo, jongwon and Lee, changjin

Key Words: NOx(질소산화물), offset-opposed impinging flame(offset-대향 분출염)
, distributed reaction flame(분산화학 반응염)

Abstract

The NOx production and combustion characteristics are experimentally compared with an offset with counter-orifice configuration. The offset-opposed impinging flame creates stronger vortex around the stagnation point than the opposed flame. The thermal and mass mixtures be improved and the delay of turbulence dissipation be occurred by the strong vortex. In result, the turbulent flame structure transferred from the wrinkled flame and the corrugated flame to the distributed reaction flame. It was found that the offset-opposed impinging flame decreased more NOx and improved the combustion efficiency than the opposed flame. The principal objective of this study is to develop the low NOx combustor by distributed reaction flame.

기호설명

Da : Damkohler number

Ka : Karlovitz number

Re : Reynolds number

S_L : laminar flame velocity, m/s

u' : turbulence intensity

d : orifice diameter, mm

h : offset 크기, mm

M : burned mass fraction

p : pressure, bar

T : time, msec

V : chamber volume, cc

ρ : density, kg/cm³

Subscripts

a : air

f : fuel

p : pre-chamber

t : main chamber

ac : alcohol

hg : mercury

* 건국대학교 항공우주공학과 대학원

** 건국대학교 항공우주공학과

1. 서론

탄화수소 계열의 연료가 연소시 발생하는 유해물질에는 미연탄화수소, 일산화탄소, NO_x 등이 있다. 특히 NO_x는 호흡기 질환, 산성비, 오존층 파괴 그리고 지구 온난화등 인체와 환경에 폐해를 일으키는 주요 유해물질중 하나이다. 대부분 NO_x는 최고화염온도가 높을수록 증가하는 Thermal NO기구에 의해서 생성된다. 이런 이유로 NO_x를 줄이기 위해 최고화염온도를 낮추기 위해 이용되는 배기가스 재순환 방식(EGR : Exhaust Gas Recirculating System), 수 분사(Water Injection)방식과 회박 연소 방법 등이 NO_x를 줄일 수 있으나 출력 저하 및 미연탄화수소등 기타 유해물질의 증가를 수반하는 단점이 있다. 이 문제를 극복하기 위해 연소실내에 난류를 발생시키는 방법이 제안되었다. 대표적인 방법으로는 소위 대향 분출염 방식이 있다. 이 연소방식이 NO_x 생성량을 감소시키며 동시에 최대출력을 향상시키는 특성이 있음을 확인하였다.[4] 이는 대향 분출염 방식에 의한 큰 난류강도에 의하여 화염구조가 주름상 층류화염과 천이 화염에서 분산화학반응화염으로 전이되기 때문인 것으로 밝혀졌다. 그러나 분산화학반응화염을 구현시키는 형성요인에 대한 확실한 해석은 이루어지지 않은 상태이다.

Bedat등[1]은 swirl burner를 이용한 실험에서 $Da > 1$, $Ka > 1$, $u/S_L > 1$ 일 때 예혼합 난류화염구조가 분산화학반응영역임을 확인하였다. Yoshida[2]는 opposed jet burner를 이용한 실험에서 화염구조는 미연지역의 주름상영역과 기연지역의 분산화학반응영역으로 나뉘어지며, 기연지역

에서 화학반응이 활발하며, 강한 vortex에 의하여 난류 유동장이 매우 균일해짐을 밝혔다. 그리고 난류의 에너지는 유동이 정체된 점으로부터 진행할수록 커다란 크기의 난류로부터 점차 작은 크기의 난류로 에너지가 전달되어 komogolov 난류크기에 이르러 소멸되는 것을 밝혔다. 이호근[4]은 대향 분출염 연소방식에서 NO_x는 단일 대향 분출염 모두 부연소실 체적이 증가할수록 감소한다는 것을 확인하였으며, 특히 대향 분출염일 경우, 오리피스 직경이 감소함에 따라 NO_x는 크게 감소한다는 것을 확인하였다. 그리고 오리피스 직경이 5mm일 경우 기연지역의 화염구조가 분산화학반응영역임을 확인하였다. 그러나 분산반응영역의 형성요인에 대해서는 밝히지 못하였다. Getel[3]등은 대향 분출염 방식에서 offset을 주어 최대압력 도달시간이 감소하고, 최대연소압력도 증가하여 연소효율이 향상됨을 확인하였다. 그러나 NO_x 등의 배기가스 분석과 연소장 유동해석 실험을 수행하지 않아 offset이 연소의 배기 특성과 연소실 유동장에 어떤 영향을 미치는지 확인하지 않았으며, offset 크기도 10mm 경우에 대해서만 실험을 수행하여 대향 분출염에서 offset 크기의 영향을 해석하기에는 미흡하였다. 하지만 offset은 커다란 크기의 vortex를 형성시켜 보다 오랫동안 난류에너지를 공급하여 난류의 소산지연을 발생시키기 때문에 NO_x량이 감소할 것으로 추론할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 대향 분출염에서 offset 크기가 5mm와 10mm 두 가지 경우에 대해 NO_x배출량과 연소압력 및 점화지연의 특성을 살펴 offset 크기에 대해 NO_x량이 어떤 영향을 받는지 확인하

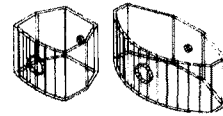
려 한다. 또한 offset에 의한 NOx 저감요인이 난류 소산지연이 발생하여 난류화염이 지속되어 분산화학반응염으로 화염구조의 전이에 의한 것인지를 확인하기 위하여 CH 자유기의 농도 분포를 측정하여 연소실내의 2차원 온도분포를 정성적으로 해석하고, PIV방법을 사용하여 유동장의 공간적 난류분포와 시간의 변화에 따른 난류의 지속시간을 측정하는 실험을 계획하고 있다.

2. 실험

2.1 연소실 및 실험장치

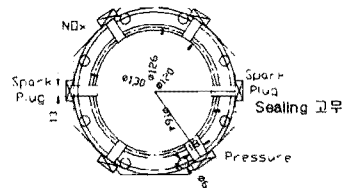
연소실은 두랄루민을 사용하여 내경 120mm, 깊이 40mm로 제작되었으며, 부연소실이 없을 때 전체부피가 452cc로 제작하였다. Fig. 1(b)는 제작된 연소실의 개략도 이다. ICCD 촬영을 위하여 전후방으로 한 쌍의 관측용 유리창(직경 140mm, 두께 20mm)과 PIV를 위하여 양쪽측면에 laser sheet window(50×25×10)을 설치하였다. 또한 각 계측밸브들을 설치하기 쉽도록 전체모양을 6각형으로 하였으며, 계측 밸브들은 부연소실의 크기를 고려하여 각 단면의 중심에서 최대한으로 laser window 쪽으로 치우치게 설치하였다. 연소실과 유리 사이의 기밀은 오링과 실리콘 개스킷을 사용하여 유지하였다. 좌·우에 점화플러그를, 상단에는 흡·배기 밸브를, 하단에는 압력계측소자를 설치하였다. 부연소실은 예전 실험에 근거하여 NOx를 가장 적게 발생시키는 18.8%와 가장 많고 제작이 용이한 12.83%를 제작하였다. 그리고 offset을 주기 위해 Fig. 4(a)와 같이 오리피스면을 평면으로 제작하였다. 예전 실험결과에서 오리피스 직경이 5mm인 경우에 분산화학반응이 일어난다는 결론을 내렸

다. 그리고 5mm 미만일 경우 소염이 일어난다고 하였었다. 이를 확인하기 위하여 오리피스 직경을 4, 5mm를 채택하였으며, 참고로 6mm 오리피스 직경을 추가하였다.



12.83% 18.8%

(a) 부연소실



(b) 주연소실

Fig. 1 부연소실과 주연소실

오리피스 위치는 Fig. 2와 같이 Gete[3]의 실험에 근거로 하여 5mm와 10mm의 offset을 주었다. offset은 모든 오리피스와 부연소실에 적용하였으며, 표.1은 실험의 경우의 수인 부연소실, 오리피스 직경, 그리고 offset 크기를 나타낸다.

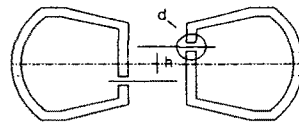


Fig. 2 부연소실의 offset과 orifice

Table 1 Pre-chamber, Orifice and Offset Scale

부연소실 (Vp/Vt)	58cc(12.83%)			85cc(18.8%)		
오리피스 직경 (mm)	4	5	6	4	5	6
Offset 크기 (h, mm)	0. 5. 10			0. 5. 10		

압력은 Kistler사의 Piezoresistive

Absolute Pressure Transducers로 계측하였으며, 증폭기는 Piezoresistive Amplifier를 사용하였다. NOx는 Yanagimoto사의 NOx 분석계(ECL-77A)를 이용하여 전자여기된 상태의 NO가 기저상태의 NO₂로 될 때 발하는 파장 580~2500nm인 발광의 강도를 계측함으로써 NOx의 농도를 측정하였다.

2.2 실험방법

Fig. 3은 실험 장비의 계통도이다. 먼저 진공 상태의 연소실내에 순도 99.9%의 프로판과 표준공기(산소-20.2%, 질소-79.8%)의 혼합기 가스(Φ=0.95)를 1bar상태로 충전하고, 유동이 정지되었다고 생각되는 2-3분 후에 용량방전 방식의 점화 장치(CDI, Capacitor Discharge Ignitor)로 점화를 한다. 이때 발생하는 유도전류를 Digital Memory Scope의 trigger 신호로 사용하여 압력 계측을 한다. 연소 후에 채집된 연소가스는 순수 질소가스로 희석하여 NOx 분석계로 분석한다.

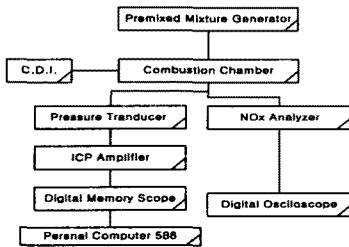


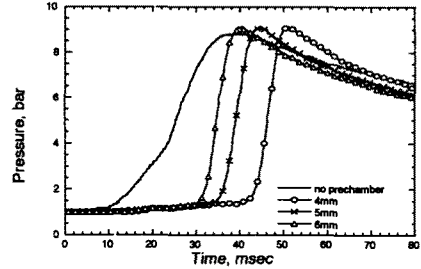
Fig. 3 실험장치 구성

2.3 실험 결과 및 검토

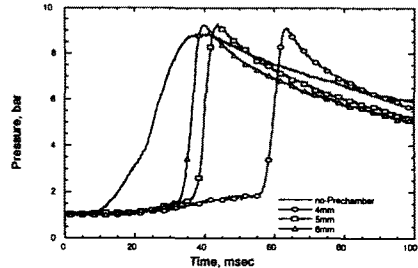
2.3.1 단일 분출염

Fig. 4는 단일 분출염 방식에서 압력선도를 나타낸 그림이다. Fig. 4(a)는 부연소실의 크기가 58cc(12.83%)인 경우이고, Fig. 4(b)는 85cc(18.8%)인 경우이다. 단일 분출염에서 최대 연소압력은 층류화염(no pre-chamber)보다 증가하였지만 오리

피스 직경에 대해 거의 일정하였다. 그러나 최대 압력에 도달시간은 오리피스가 작을수록 늦어지는 것을 볼 수 있다. 이는 예전 실험 결과[4]와 일치하는 것이다. 와 NOx 배출량 그리고 점화지연을 나타낸 그림이다.



(a) 58cc(12.83%)



(b) 85cc(18.8%)

Fig. 4 Pressure history w.r.t. orifice diameter (single pre-chamber)

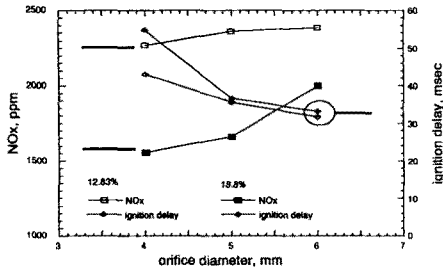
Fig. 4의 압력선도로부터 질량연소분율(burned mass fraction)을 구하여 식(4.1), 식(4.2)와 같이 점화지연을 부연소실에서 점화 후 혼합기가 10%(M10)타는데 까지 걸리는 시간, 주연소시간을 혼합기가 10%~90%(M10~M90)연소하는데 걸리는 시간으로 정의하여 Fig. 5와 Fig. 7 그리고 Fig. 7에 나타내었다.

$$M_{10} = \frac{(P-1)}{(P_{max}-1)} \times 100 = 10[\%]$$

$$\text{점화지연} = T_{M_{10}} - T_0 \quad \text{식(3)}$$

$$M_{90} = \frac{(P-1)}{(P_{max}-1)} \times 100 = 90[\%]$$

$$\text{주연소시간} = T_{M_{90}} - T_{M_{10}} \quad \text{식(4)}$$



(b) NOx and ignition delay

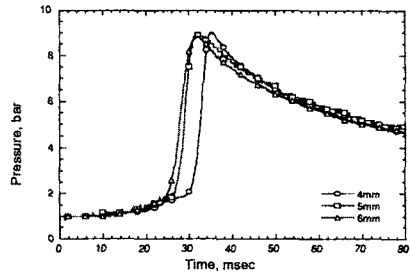
Fig. 5 NOx and ignition delay w.r.t. orifice diameter (single pre-chamber)

Fig. 5는 단일 분출염에서 오리피스 직경에 대해 NOx 생성과 점화지연을 나타낸 그림이다. 점화지연과 NOx는 부연소실의 크기에 영향을 받아 부연소실의 크기가 12.83%에서 18.8%로 커짐에 따라 점화지연은 오리피스 직경이 4mm일 때 43.1msec에서 54.8msec로 부연소실이 18.8%일 때 약 10msec정도 재 점화가 늦게 일어났다. NOx는 2270.7ppm에서 1556.5 ppm으로 약 31.4%가 감소하였다. 또한 점화지연과 NOx는 오리피스 직경에 크게 영향을 받아 부연소실이 18.8%일 때 오리피스가 6mm에서 4mm로 작아짐에 따라 점화지연은 33.2msec에서 54.8msec로 약 20msec정도 길어졌다. NOx는 2005.2ppm에서 1556.5ppm으로 약 22.37%로 감소하였다. 이처럼 단일 분출염일 경우 점화지연은 오리피스 직경에 크게 영향을 받아 오리피스 직경이 4mm보다 작아지면 화염이 소멸이 일어날 것으로 보인다. NOx량은 오리피스 직경보다 부연소실의 크기에 더 큰 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

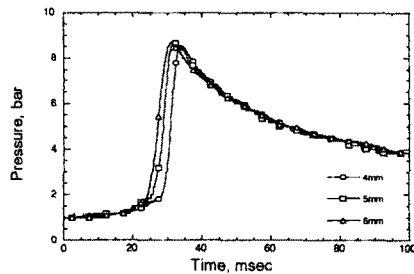
2.3.2 대향 분출염

Fig. 6은 대향 분출염의 압력선도를 나타낸 그림이다. 대향 분출염에서 최대 압력 도달시간은 단일 분출염보다 약

10msec정도 단축되어 보다 빠른 연소가 일어났음을 알 수 있다. 최대 압력은 부연소실의 크기에 따라 다른 경향을 나타내었는데, 먼저 12.83%의 부연소실인 경우 오리피스가 작을수록 최대 압력이 증가하였지만 18.8%의 부연소실인 경우는 오리피스가 클수록 높은 최대 압력을 나타내어 서로 상반된 결과를 얻었다. 그러나 그 변화는 미비하여 최대압력은 부연소실의 크기와 오리피스 크기에 별 영향을 받지 않는다고 할 수 있을 것이다.



(a) 58cc(12.83%)



(b) 85cc(18.8%)

Fig. 6 Pressure history w.r.t. orifice diameter (dual pre-chamber)

Fig.7은 대향 분출염의 연소특성을 나타낸 그림이다. Fig. 7에서 연소실내 최대 압력은 오리피스 직경과 부연소실의 체적에 거의 영향을 받지 않았으나 NOx 배출량과 점화지연은 오리피스와 부연소실의 크기에 크게 영향을 받음을 알 수 있다

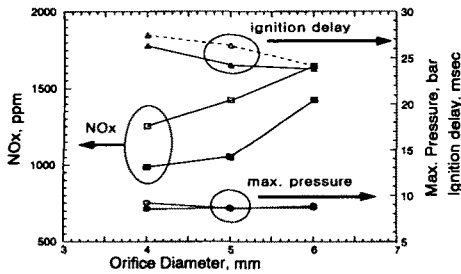


Fig. 7 Combustion characteristics of opposed impinging jet flame (○ □ △ : 12.83%, ● ■ ◆ : 18.8%)

먼저 부연소실의 크기가 증가할 때 점화지연은 27.4msec에서 26.3msec로 재점화가 빨리 일어났다. NOx 생성량은 크게 감소하여 오리피스 직경이 4mm일 때 1253.1ppm에서 987.2 ppm으로 약 21.3%가 감소하였다. 한편 부연소실이 18.8%일 때 오리피스 직경이 6mm에서 4mm로 감소함에 따라 점화지연은 23.7msec에서 26.3msec로 다소 증가하였다. NOx 배출량은 1425ppm에서 987ppm으로 약 30%가 감소하였다. 이처럼 대향 분출염에서 점화지연은 부연소실과 오리피스에 크게 영향을 받지 않지만, NOx량은 부연소실의 크기보다 오리피스의 크기에 크게 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 이는 오리피스가 감소함에 따라 난류강도가 증가하고 강한 유동변형률에 의하여 대향 분출염에 의한 화염구조가 주름상 및 천이 화염에서 분산화반응화염으로 천이 된 것 때문이라 하였다.[4]

2.4.2 Offset변화에 따른 연소 특성

Fig. 8은 대향 분출염에 offset을 주었을 때 연소실 최대 압력과 점화지연 특성을 나타낸 그림이다.

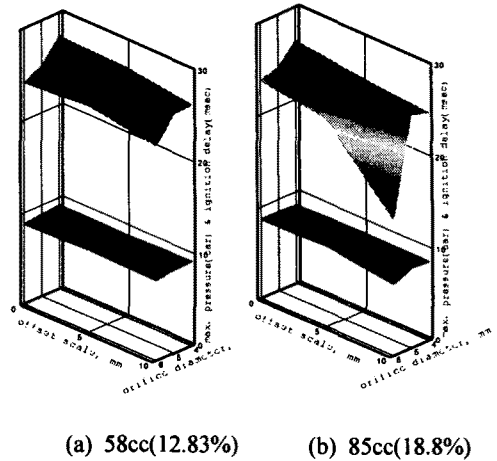
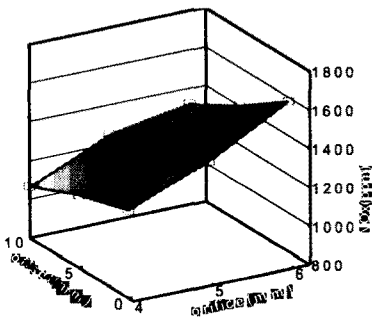


Fig. 8 Combustion characteristics of offset-opposed impinging jet flame

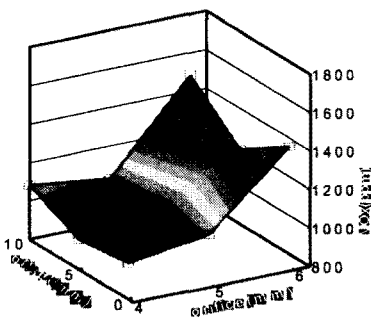
먼저 연소실 최대 압력은 크게 변하지는 않지만 작은 부연소실인 12.83%일 때 offset이 클수록 높은 압력이 나왔지만, 부연소실이 커져 18.8%일 때는 5mm offset일 때 가장 높은 압력이 나오다가 10mm offset일 때는 오히려 압력이 감소하는 경향을 나타냈다. 점화지연은 대체로 offset이 클수록 감소하였다. 이는 offset이 주어지면 그렇지 않은 경우보다 열 손실이 적어 그만큼 연소효율이 증가하였음을 의미한다. 점화지연은 5mm offset일 때는 다소 증가하다가 10mm offset이 주어지면 다시 감소하였다. 그러나 증감폭은 그리 크지 않아 모든 경우에 1msec 이내로 증감하였다.

Fig. 9는 대향 분출염에서 offset 크기 변화에 따른 NOx 배출량을 나타낸다. NOx는 오리피스 크기가 4mm이고 부연소실의 크기가 18.8%cc에서 offset 크기가 5mm일 때, offset이 없을 때보다 약 3%(987.2→954.5)가 감소하였다. 이는 offset이 큰 vortex를 형성시켜 보다 오랫동안 난류에너지를 공급하여 난류의 소

산지연을 발생시키기 때문인 것으로 추측된다. 그러나 offset이 10mm일 때는 오히려 약 9.6%(987.2→1081.9)가 증가하였다. 이는 너무 큰 offset에 의하여 너무 강한 vortex를 형성하여 공간적으로 분포된 화학반응을 억제하기 때문으로 여겨진다. 특히 12.83% 부연소실은 offset 크기가 커질수록 NOx는 계속 감소하고 있으나, 18.8% 부연소실은 5mm offset이 주어지면 NOx는 감소하다가 offset이 10mm로 커지면 오히려 증가하였다. 따라서 NOx를 줄일 수 있는 최적의 offset 크기는 5mm 내외 일 것으로 추측할 수 있다.



(a) 12.83% pre-chamber



(b) 18.8% pre-chamber

Fig. 9 NOx w.r.t. offset scale & orifice diameter

4. 결론

Offset이 있는 대향 분출염 방식에서 오리피스 직경, 부연소실 체적 그리고 offset 크기에 대해 NOx 생성 특성과 주연소실내 최대압력, 그리고 점화지연을 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

부연소실 개수에 대하여

주연소실내 최대 압력은 부연소실이 없는 경우보다 있는 경우에 증가하였지만, 부연소실의 개수에는 크게 영향을 받지 않았다. 그러나 점화지연과 NOx 생성량은 부연소실의 개수에도 크게 영향을 받았다. 대향인 경우 단일인 경우보다 오리피스가 4mm이고, 부연소실 크기가 12.83%이고, offset이 없는 경우, 점화지연은 43msec에서 27msec로 약 16msec 정도 빨리 최대 압력에 도달하였다. NOx는 2270.7ppm에서 1253ppm으로 약 44.8%나 감소하였다. 따라서 단일인 경우보다 대향인 경우에 연소효율이 좋아질 뿐 아니라 NOx도 상당히 감소시킬 수 있음을 알 수 있다.

부연소실 크기에 대하여

4mm 오리피스와 offset이 없을 때, 주연소실에 대한 부연소실의 체적이 12.83%에서 18.8%로 증가함에 따라, 대향 분출염인 경우 연소실내 최대압력은 다소 감소하였다. 점화지연은 27.4msec에서 26.3msec로 감소하여 단일 분출염과 상반된 결과를 얻었다. NOx는 1253ppm에서 987.2ppm으로 약 21%가 감소하였다. 따라서 대향인 경우 부연소실의 크기는 클수록 연소효율이 향상되고, NOx도 감소시킬 수 있다는 결론을 얻었다, 그러나 주연소실의 크기와 부연소실 사이의 거리에 제한을 받게 된다.

오리피스 직경에 대하여

대향 분출염인 경우 Offset이 없고 부연소실 체적이 18.8%일 때 오리피스 직경이 6mm에서 4mm로 감소함에 따라 최대 압력은 거의 일정하였으며, 점화지연은 23.8msec에서 26msec로 다소 증가한 반면에, NOx량은 크게 감소하여 1425 ppm에서 987ppm으로 약 30%감소하였다. 따라서 오리피스가 작을수록 연소효율은 크게 변화시키지 않으면서 NOx 생성량은 크게 감소시킬 수 있다는 것을 확인하였다.

Offset 크기에 대하여

Offset이 주어질 경우 최대 압력은 거의 일정하였으며, 점화지연은 offset 크기가 증가함에 따라 감소하여 보다 빨리 최대 압력에 도달하여 연소효율이 향상되었다. NOx는 오리피스 직경이 4mm이고 부연소실의 체적이 18.8%일 때, offset이 5mm일 경우에는 약 3%정도 감소하였으나 10mm일 경우에는 오히려 약 9.6%증가하였다. 따라서 적정수준의 offset이 주어지면 연소효율을 향상시킬 수 있으면서 NOx도 감소시킬 수 있었다. 본 실험 결과 5mm offset이 적정수준일 것이라 예측된다.

부연소실이 크고(18.8%), 소염이 일어나지 않는 오리피스 직경(4mm)에 적정수준의 offset (5mm)이 주어질 경우 연소실내 최대압력은 거의 변화시키지 않고 점화지연을 단축시켜 연소효율을 향상시킬 수 있으며, 최소의 NOx를 생성하였다. 이는 대향 분출염이 천이영역에서 분산반응영역에 걸쳐 일어난다면, offset에 의해 난류소산지연이 발생하여 화염구조가 좀더 분산반응 영역쪽으로 전이되었다는 것을 추론 할 수 있다. 이처럼 연소효율을 향상시키면서 NOx를 가장

적게 생성하는 부연소실이 18.8%, 오리피스 직경이 4mm이고, 5mm의 offset이 주어진 대향 분출염 방식이 최적의 연소기가 아닐까 사료된다. 앞으로 연소실내의 온도분포와 PIV를 통한 난류 유동장 분포를 측정하여 offset에 의해 형성된 강한 vortex에 의한 난류소산지연이 발생하는지 확인하려 한다.

후 기

본 연구는 97 에너지기술학술진흥사업 일환으로 수행되었으며, 연구비를 지원해주신 에너지 관리공단에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. B. Bedat and R. K. Cheng, "Experimental Study of Premixed Flames in Intense Isotropic Turbulence", Comb. and Flame Vol. 100, pp.485-494, 1995.
2. A. Yoshida, M. Narisawa, and H. Tsuji "Structure of Highly Turbulent Premixed Flames", 24nd Symp. on Comb. pp. 519-525, 1992.
3. Z. Gete and R. L. Evans, "An Experimental Investigation of Jet-Enhanced Turbulent Combustion", Comb. Sci. and Tech, Vol. 92 pp.349-365, 1993.
4. 이호근, "대향 분출염 연소방식에 의한 NOx 생성저감에 관한 실험적 연구", 서울대학교 박사학위논문, 1997
5. A. Yoshida, "Structure of Opposed Jet Premixed Flame and Transition of Turbulent Premixed Flame Structure", 22nd Symp. on Comb. pp.1471-1478, 1988.

6. C. Mounaim-Rousselle and I. Gokalp, "Strain Effects on the Structure of Counterflowing Turbulent Premixed Flames", 24th Symp. on Comb. pp.1199-1205, 1994.
7. L. W. Kostiuk, K. N. C. Bray, and R. K. Cheng, "Experimental Study of Premixed Turbulent Combustion in Opposed Streams. Part II - Reacting Flow Field and Extinction", Comb. and Flame Vol. 92, pp.396-409, 1993.
8. 서종원, 이창진, 윤영빈, " 분산화학 연소반응에 의한 저NOx 연소기 개발에 관한 연구", 제1회 에너지기술 학술진흥 Workshop, pp.49-54, 1998.