

대향분출 연소기의 난류화염 구조

조용진* · 윤영빈** · 이창진***

Flame Structure of Moderate Turbulent Combustion in Opposed Impinging Jet Combustor

Yongjin Cho, Youngbin Yoon and Changjin Lee

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), NO_x 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 NO_x reduction associated with moderate turbulent combustion.

Key Words : Moderate turbulent, Opposed impinging jet combustor, Strain rate distribution, NO_x .

기 호 설 명

Re_t : Turbulent Reynolds number	u' : Turbulent intensity
Ka : Karlovitz number	δ_f : Flame thickness
Da : Damköhler number	l_k : Komogrove Microscale
α : Shear strain rate	l_λ : Taylor Microscale
K : Mean strain rate	Λ : Integral length scale or Taylor macroscale
ϕ : Equivalence ratio	ϵ : Dissipation rate
S_L : Laminar flame speed	

1. 서 론

연소를 연구하는 목적은 연소효율을 극대화하는 것과 환경 친화적인 연소를 만들어내는데 그

주안점을 두고 있다고 할 수 있다. 현재 연료로 가장 많이 사용되고 있는 탄화수소계열의 연료의 경우 완전연소가 일어난다면 CO₂나 H₂O만이 배출되겠지만 불완전연소가 일어나는 경우, 미연탄화수소(Unburned Hydrocarbon), 일산화탄소(Carbon Monoxide), 질소산화물(NO_x)과 같은 유해물질을 배출하게 되며[1,2,3,4], 최근에는 인체에 직접적인 피해는 주지 않으나, 지구온난화 현상을 일으키는 온실가스로서 간접적 피해를 주

* 서울대학교 기계항공 공학부

† 연락저자, chaos94@snu.ac.kr

** 서울대학교 기계항공 공학부

*** 건국대학교 기계항공우주

는 것으로 알려진 이산화탄소(Carbon Dioxide)도 유해 배출물로 인식되어 주요 규제 대상으로 지정되기 시작하였다. 연소효율을 극대화하기 위해 고온영역에서 완전연소에 가까운 연소를 유도하면 출력증가와 함께 미연탄화수소의 배출을 억제할 수 있지만 Zeldovich 기구에 의해 NO_x의 생성량은 온도증가와 함께 증가하게 된다. 따라서 이러한 유해배출물을 저감하는 기술의 개발이 절실히 요구된다.

우리가 통칭 NO_x라 부르는 질소 산화물은 여러 질소 산화물 (N₂O₄, NO, N₂O, N₂O₃, N₂O₅, NO₂) 중 특히 NO₂와 NO를 가리키고 이 중에서도 NO가 대부분을 차지하고 있다.[1] 탄화수소계 열 연료의 연소과정에서 생성되는 NO의 주요 원인에는 다음의 3가지가 있다.

① 연소 반응으로 형성된 고온의 환경에서 산화제로 사용되는 공기중의 질소가 산소와 반응하여 생성되는 Thermal NO 기구

② 과농 상태의 탄화수소연료의 연소에서 탄화수소 자유기(radical)와 질소의 반응으로 생성되는 Prompt NO 기구

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

NO 생성에 대한 Thermal NO 기구와 Prompt NO 기구의 상대적인 기여도는 주로 온도를 변수로 하며, 온도가 증가함에 따라 Prompt NO 기구에 관련된 반응의 중요성이 점점 감소하고 Thermal NO 기구가 지배하게 된다.[5]

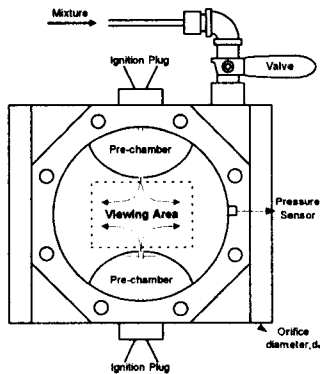


Fig. 1 Schematics of dual combustion chamber and opposed impinging

지금까지의 Thermal NO_x 저감대책들은 주로

Zeldovich 기구에 입각하여 연소실내의 최고화염 온도를 낮추는 방법들이 적용되어 왔다. 현재 주로 사용되는 배기가스 재순환 방식(EGR: Exhaust Gas Recirculation System)이나 희박연소 방법 등[6]은 NO_x 저감과 동시에 출력저하 및 미연탄화수소 배출물이 오히려 증가하며 출력 또한 감소되는 문제를 가지고 있다. 이 문제를 극복하기 위한 방법으로 연소실 내에 난류를 발생시키는 것이 매우 유용한 것으로 알려져 있는데 이를 위해 개발된 연소 방법이 대향분출 연소 방식이다.

Fig. 1은 이호근 등[13]의 실험에서 각각 13mm의 오리피스를 가지는 화염에서 5mm 오리피스의 분산화학반응영역으로 천이하는 것을 Modified Borghi diagram 상에서 도시한 것이다. 본 논문에서는 전단 변형률이 이러한 메카니즘에 어떠한 영향을 주는지에 중점을 두었다.

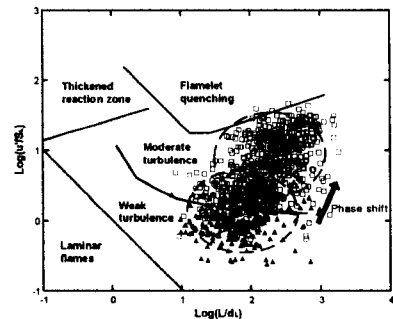


Fig. 1 Combustion phase shift in Modified Borghi diagram

2. 실험장치 및 방법

2.1 연소실

다음의 그림은 본 실험에 사용한 연소실의 사진이다. 연소실은 실물엔진에 가깝도록 직경 120 mm, 두께 40mm의 정적 원판형으로 제작되었으며, 부연소실이 없을 때 전체부피가 452 cc로써 4기통 1800 cc 소형승용차의 배기량에 맞게 제작되었다 연소기 내에는 2개의 부연소실을 부착할 수 있도록 제작되었는데, 이호근[13]의 실험결과에 의하면 부연소실의 부피비를 8.4%에서 17.5%까지 변화시켜도 연소특성에는 커다란 변화가 일어나지 않았으므로 이 실험에서는 실험목적에 부합하는 14.8%의 부피비를 가지는 부연소실을 사

용하였다.

Fig .2은 부연소실이 부착된 상태의 연소기를 보여주는데 PIV를 이용해 분석에 사용된 Viewing area를 동시에 표시 하였으며 부연소실에서 점화가 이루어져 주연소실의 중앙에서 만나 정체면을 형성하는 것을 간략히 도시하였다. 부연소실에는 각각 연소실의 벽면과 부착되어 있는 전기점화 플러그가 있으며 부연소실 중앙에는 주연소실로 연결되는 원형 구멍이 있는데 이 구멍의 직경을 각각 5, 9, 13mm로 변화시켜가며 주연소실로 분출되는 제트의 난류강도를 조절하여 실험하였으며 소염에 대한 실험에는 동일한 부피비의 3mm 오리피스 부연소실을 사용하였다.

2.2 실험장치

재점화 직전에는 화염에 의한 노이즈의 간섭이 비교적 작으므로 2color PIV를 사용하여 한 장의 이미지에 각각 색깔이 다른 두개의 이미지를 노출시켜서 cross-correlation 하는 방법을 사용하였다. 또 재점화가 일어나는 동안에는 화염에 의한 이미지의 간섭을 최소화 하기 위하여 두 장의 이미지에 각각 선후가 구분된 동일 파장의 레이저를 주사하여 기록하는 보다 근본적인 cross-correlation PIV 기법을 사용하였다. 화염의 영상을 제거하기 위해 532nm만을 투과 시키는 밴드패스 필터를 사용하였으며 PIV 측정과 동시에 압력을 계측하여 얻어진 데이터의 적합성을 확인하였다. PIV 실험을 위한 장치 구성은 2color PIV 기법과 cross-correlation 카메라를 이용한 PIV기법을 모두 사용하였다.

2.2.1 PIV setup

먼저 서로 다른 색을 가지는 레이저 2대를 사용하는 2color PIV 기법에 사용된 PIV 광원은 2대의 Nd:YAG Laser와 1대의 Dye Laser이다. 532 nm의 녹색파장을 띄는 Continuum Surelite I-10 Laser는 첫번째 이미지 노출을 위해, Spectra-Physics GCR-170 Laser는 두번째 이미지 노출을 위한 Dye Laser를 pumping하는데 사용되었다

이러한 2color PIV기법을 화학반응이 존재하는 경우에 적용하면 화염이 내는 파장과 가까운 적색광원에 의한 이미지의 노출은 화염에 의한

지나친 광량과 노이즈에 의해 입자의 산란을 확인할 수 없게 된다. 이것이 기본적으로 일반적인 카메라를 이용해 주사 되는 레이저의 파장만을 다르게 하여 한 장의 이미지에 두개의 프레임이 기록되더라도, PIV의 고질적인 문제인 방향모호성 문제를 야기하지 않고 cross-correlation이 가능하도록 해주는 2color PIV 기법의 한계이다.

이러한 문제를 해결하기 Cross-Correlation 카메라와 밴드패스필터를 사용하여 화염에 의한 노이즈를 제거하는데 화염이 있는 reacting 경우에 사용된 레이저는 위의 2color PIV에서 사용된 두개의 Nd:YAG Laser이다. 여기에서도 동일한 순서로 레이저는 발진되어 동기화 되고 단지 GCR-170 레이저의 2nd harmonic generator의 pole을 P-pole로 바꾸어서 Polarization beam splitter를 이용해 두개의 빔을 하나로 합치는 방법을 사용하게 된다.

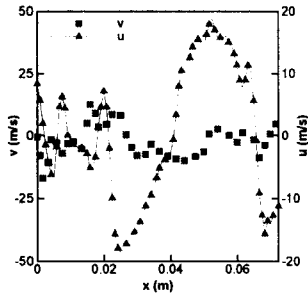
3. 실험 결과

3.1 PIV를 통한 속도장 분석

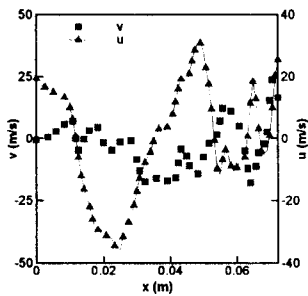
먼저 대향분출 연소기에서 부연소실로부터의 화염분출이 종료된 이후에 점화가 억제되다가 다시 점화가 일어나기 직전의 점화 전 유동장을 2color PIV를 이용해 분석하였다. 점화가 이루어진 후 오리피스 출구를 통해 분출되는 화염의 충돌에 의해 증가하는 전단변형률은 국부적으로 화염을 소염 시키거나 재점화를 억제하는 역할을 한다.[9] 화염분출이 종료되는 시점까지 증가하는 전단변형률은 어느 정도의 점화지연기간을 거친 후 다시 점화되는 현상을 보이는 데 이 때의 유동장을 연소가 진행될 때와 비교 분석하기 위해 본 실험을 수행하였다.

Fig .3의 (a),(b),(c)는 정성적인 유동장의 경향성을 확인하기 위해 각각의 Raw Image를 PIV 기법을 이용해 구한 속도장 결과의 정체면에서의 속도분포를 x방향(수평방향), y방향(수직방향) 속도 성분으로 나누어 나타낸 그림이다. 정체면의 위치는 13mm의 경우에 y축 방향 속도성분(v)의 진동이 가장 적게 나오는 평행선으로 결정하였고 x방향 속도는 오른쪽을 양(+), 왼쪽을 음(-)으로 정의하여 도시하였다. 그래프를 통해 13mm 오리피스의 경우에 정체면이 비교적 길고 균일하게 존재하며 9mm의 경우에 이러한 경향이 조금씩 깨어지다가 5mm에 가서는 정체면을 확인할 수

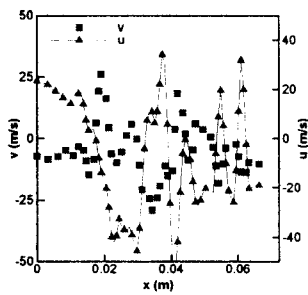
없도록 혼합현상이 강한 유동장이 형성된다는 것을 다시 확인 할 수 있었으며 또한 분출염의 속도벡터의 크기는 5mm의 경우에 역시 가장 크게 나온다는 사실을 확인할 수 있다.



(a) Velocity fluctuation at the stagnation plane (13mm)



(b) Velocity fluctuation at the stagnation plane (9mm)



(c) Velocity fluctuation at the center line (5mm)

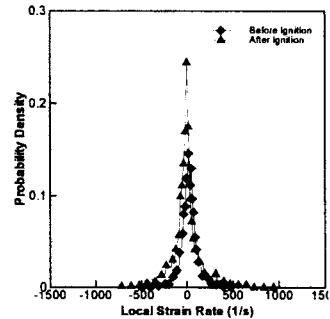
Fig. 3 Velocity fluctuation of 13mm to 5mm cases

3.2 점화전과 점화후의 전단 변형률 분포비교

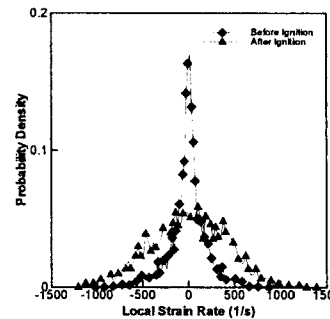
Fig. 4(a), (b)는 각각 13mm와 5mm의 경우에

대해 점화전과 점화후의 전단 변형률의 확률밀도의 비교를 위해 두 경우를 함께 도시한 그래프이다.

분산화학반응이 일어나고 NO_x 저감이 가장 많이 일어나는, 5mm의 오리피스를 사용한 Fig. 4(b)의 경우에는는 13mm의 경우와는 여러 면에서 다른 경향을 보이는데 점화 전에는 13mm의 경우와 정성적으로 거의 유사한 형태의 쌍기형 분포를 보이는데, 연소가 진행되고 있는 점화 후의 변형률 분포는 완만한 삼각형 모양의 분포를 나타낸다. 즉 원점을 중심으로 보이던 peak는 찾아볼 수 없으며(점화가 일어나면서 전단 변형률이 0이 되는 지점의 비중이 줄어들고), 변형률이 ±1000 (1/s) 이하인 중간영역의 전단 변형률의 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 할 것임을 짐작하게 한다.



(a) 13mm



(b) 5mm

Fig. 4 PDF distribution of strain rates before and after the ignition for 13mm and 5mm orifice diameters

3.3 당량비의 전단 변형률에 대한 영향

Fig. 5는 당량비를 각각 0.75, 0.95, 1.15로 변화시켜 3mm의 오리피스에서 실험하였을 때의 전단변형률 분포를 나타낸 그림이다. Fig. 5에서는 당량비가 변해도 유동장의 변형률의 분포는 큰 차이를 나타내지 않는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 연소유동장에 대한 속도분포는 단지 오리피스의 크기에 의해서 결정되며 당량비 변화에 대한 영향은 무시할 정도로 작다는 것을 알 수 있다. 특히 이 결과는 재점화가 일어나기 직전의 결과이므로, 당량비 변화에 따른 Lewis수와 열확산의 영향보다는 작은 부피비(14.8%)의 부연소실의 점화에너지와 이에 따른 분출 압력 및 분출 초기속도에 의한 영향이 지배적이기 때문에 이러한 결과가 나타난다고 생각된다.

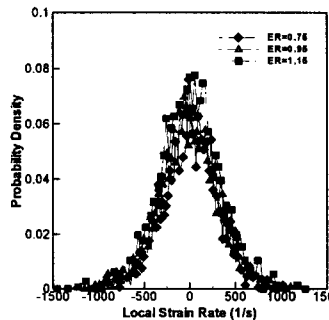


Fig. 5 PDF distribution of strain rates for various equivalence ratios (3mm)

4. 결론

1. 오리피스 직경이 감소하면 분출화염의 유속이 빨라지는 것과 동시에 정체면을 형성하지 않고 혼합이 증대된 난류 유동장을 형성하게 되고 재점화에 의한 연소는 정체면 중심이 아닌 전체적으로 균일하게 퍼진 활성기들을 중심으로 발생하게 된다. 여기에 결론을 입력합니다.

2. 분산화학반응 (Distributed Reaction or Moderate Turbulent regime)이 일어나는 5mm 오리피스의 경우 전단변형률 분포는 중간 영역 (± 1000 1/s)의 변형률의 분포가 증가하고 그 분포는 전유동장에 걸쳐 균일하게 분포되는, 특징적인 형태를 가진다.

3. 점화 전의 유동장의 변형률 분포는 주로

오리피스의 크기에 의해 결정된다. 동일한 오리피스 조건에서 당량비 변화에 따른 유동장의 변화를 살펴 보았는데 그 결과 유동장의 변화는 미미하며 유동특성은 오리피스의 형태와 크기에 의해 좌우된다는 사실을 알 수 있었다

참고문헌

- [1] Patterson, D. J. and Henein, N. A. Emissions from Combustion Engines and their Control, Ann Arbor Science Publisher Inc., 8th printing, pp 117-142, 1980.
- [2] Heywood, J. B., Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill, pp. 567-571, 1988.
- [3] Arcoumanis, C., Internal Combustion Engines, Academic Press, pp 69-94, 1988.
- [4] 김경원, 자동차 연료의 저공해화 기술; 대한기계학회 92년도 에너지 및 동력공학 부문 강연집, pp. 49-61, 1992.
- [5] Michaud, M. G. and Westmoreland, P. R., Chemical Mechanisms of NOx Formation for Gas Turbine Conditions, Twenty-Fourth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 879-887, 1992.
- [6] Leighton, P. A., Photochemistry of Air Pollution, Academic Press, New York, 1961.
- [7] Warnatz, J., Gas Turbine Combustion-Chemistry of Combustion Processes, von Karman Institute for Fluid Dynamics, Lecture Series 1990-02, February 19-23, pp. 29-36, 1990
- [8] Germane, G. J., Woody, C. G., and Hess, C.C., Lean Combustion in Spark-Ignited Internal Combustion Engines - A Review, S.A.E. No. 831217, 1983.
- [9] Kumagai, S. and Kimura, I., The Effect of Turbulence on Flame Propagation in Gases, 4th International Symposium on Combustion, Williams & Wilkins, pp. 667-669, 1953.
- [10] 정경석, 부연소실이 있는 밀폐연소실내의 예혼합기 연소특성에 관한 연구, 서울대학교 대학원 박사학위논문, 1988.

- [11] 박홍복, 부연소실 방식 원판형 밀폐연소실 내의 연소특성에 관한 연구, 서울대학교 대학원 석사논문, 1991.
- [12] 최성만, 대향 분출염 연소방식에 NO_x 저감기구에 관한 수치해석 연구, 서울대학교 대학원 박사논문, 1994.
- [13] 이호근, 대향 분출염 연소방식에 의한 NO_x 생성 저감에 관한 실험적 연구, 서울대학교 대학원 박사논문, 1997.
- [14] R. G. Abdel-Gayed and Derek Bradley, Combustion Regimes and the Straining of Turbulent Premixed Flames, *Combustion and Flame* 76, pp. 213-218, 1989.
- [15] 임성규, 대향분출염 연소방식에 의한 NO_x 생성저감에 대한 전단변형률의 영향, 서울대학교 대학원 석사논문, 2000년.
- [16] H. Tennekes and J. L. Lumley, *A First Course in Turbulence*, The MIT Press, 1972.
- [17] Borghi, R., On the Structure of Turbulent Premixed Flames, *Recent Advances in Aeronautical Science*, C. Brnuo & C. Casc (Eds), Pergamon, 1984.