

대향 제트 정체점 주변의 난류 화염에 관한 연구

고일민* · 서정일 · 홍정구** · 신현동***

An Experimental Study on Turbulent Counter Jet Flame near Stagnation Point

Il Min Ko*, Jeong Il Seo, Jung Goo Hong**, Hyun Dong Shin***

ABSTRACT

A characterization of turbulent reacting flows has proved difficult owing to the complex interaction between turbulence, mixing, and combustion chemistry. There are many types of time scales in turbulent flame which can determine flame structure. This counter jet type premixed burner produces high intensity turbulence. The goal is to gain better insights into the flame structures at high turbulence. 6 propane/air flames gave been studied with high velocity fluctuation in bundle type nozzle and in one hole type nozzle. By measuring velocity fluctuation, turbulent intensity and integral length scale are obtained. And sets of OH LIF images were processed to see flame structure of the mean flame curvatures and flame lengths for comparison with turbulence intensity and turbulent length scales. The results show that the decrease in nozzle size generates smaller flow eddy and mean curvatures of the flame fronts, and a decrease in Damköhler number estimated from flow time scale measurement.

기 호 설 명

Da Damköhler Number
 Ka Kalovitz Number
 ℓ_0 Integral Length Scale
 R_{uu} Correlation Coefficient

ℓ_K Kolmogorov Length Scale
 V_{nozzle} Nozzle Exit Velocity
 δ_L Laminar Flame Thickness
 u Velocity fluctuation
 \bar{u} Mean Velocity

1. 서 론

자연에서 일어나는 대부분의 연소 현상은 난류 연소를 동반하며 엔진, 보일러, 가스 터빈, 맥동 연소기 등 많은 실용 연소기에서 난류 연소를 이용하고 있다. 따라서 실용 연소기의 설계에 있어 난류 화

염에 대한 연구는 필수적이며 연소 연구가 시작된 이후 난류 연소의 해석을 위해 많은 노력이 있었다. 난류 연소는 복잡한 난류 유동의 해석과 더불어 난류 유동과 화학 반응의 상호 작용에 의해 발생하는 다양한 물리 화학적 변화를 함께 고려해야 하는 어려움이 있다. 일반적으로 난류 화염은 층류 화염에 비하여 매우 큰 연소 속도를 가진다. 때문에 대부분의 실제 연소 장치에서는 비교적 좁은 공간 내에서 빠른 혼합과 열 방출이 가능하도록 난류 유동을 발생시키고 있다. 실제 산업 현장에서 사용되는 연소 시스템은 일반적으로 시간적, 공간적으로 급격하게 변화하는 연소장이 사용되므로 난류

* LG화학

** 한국과학기술원 기계공학과 대학원

*** 한국과학기술원 기계공학과

† 연락저자, hdshin@kaist.ac.kr

화염은 기술적인 측면에서 매우 중요하다. 그러나 상호 작용하는 유동장과 화염대의 복잡성으로 인해 경험적인 측면에 의존한 모델링이 대부분이다. 난류 연소장에서 난류 강도와 화염의 특성에 따라 다양한 형태의 난류 화염이 존재할 수 있다. 연료와 산화제의 조건이 결정되면 난류 화염은 난류 유동장, 즉 난류 유동의 스케일과 난류 강도에 따라 구분할 수 있다[2]. Fig. 1은 Bogie 등이 제안한 난류 유동장에 따라 변화하는 난류 화염을 보여 준다[4]. 그림에서 보는 바와 같이 난류 화염은 유동장과의 상호 작용에 의해 크게 화염편 영역(flamelet zone), 분포 반응 영역(distributed reaction zone), 완전 혼합 영역(well stirred reaction zone)의 세 가지 영역으로 나눌 수 있으며 각 영역에서의 화염의 형태와 해석 방법 그리고 응용 범위가 달라진다.

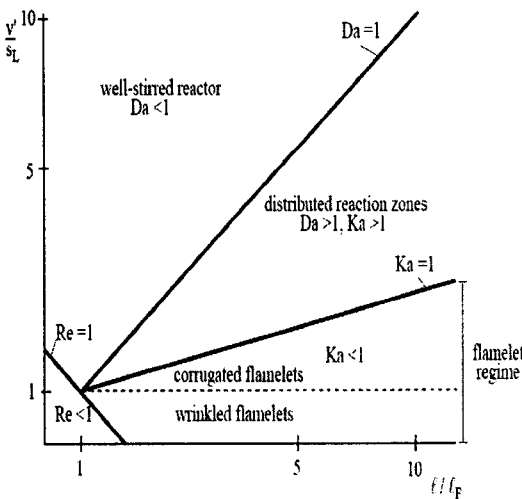


Fig. 1 Turbulent Flame Classification[4]

현재 대부분의 상용 연소기에서 사용되며 자연계에서 가장 많이 존재하는 영역은 flamelet zone이다. 이 영역에서 유동은 비교적 낮은 난류 강도를 가지며 이때 난류 화염은 수많은 층류 화염의 집합체로 생각할 수 있음이 많은 연구자에 의해 주장되어 왔다[3]. 또한 기존 연구자들은 이 부분의 난류 화염을 층류 화염편의 앙상블로 표현하는 층류 화염편 모델(laminar flamelet model)을 제안하였다. 층류 화염편 모델을 사용하면 순간적인 난류 유동장에 의해 지배받는 화염을 같은 조건의 유동장 하의 층류 화염의 정보를 통해 모사할 수 있으며 층류 화염의 정보를 난류 화염의 해석에 바로 적용할 수 있는 장점이 있다[3].

Flamelet zone에서 난류 강도를 보다 증가시키면 distributed reaction zone의 화염이 발생한다. 이

영역은 난류 강도가 큰 영역으로 난류 유동의 길이 스케일이 화염의 두께 스케일과 비슷해지는 영역으로 여기서는 flamelet zone과 같이 난류 유동과 화염이 명확히 구별되지 않으며 층류 연소장과는 다른 형태의 화염이 존재하는 것으로 알려져 있다.

Well stirred reaction zone의 화염은 distributed reaction zone에 비해 더욱 큰 난류 강도를 가질 때 발생한다. 이 영역에서는 유동의 시간 스케일이 화염의 반응 시간 스케일보다 작아 지게 되어 유동장의 변화가 더 이상 화염의 반응에 영향을 줄 수 없는 이상적인 형태의 연소가 가능하다. Well stirred 연소기의 경우 열손실이 있는 연소기 벽 근처를 제외하고는 균일한 온도와 물성을 가지는 연소장의 형성이 가능하므로 주로 유동의 영향을 배제한 순수 화학 반응에 대한 연구나 균일한 조건의 화염이 필요한 soot의 생성 및 산화 메커니즘의 연구 등에 활용된다.

안정된 난류 화염을 만들기 위하여 Yoshida는 대향 제트 형태의 화염을 얻고 유동 사이의 거리를 바꾸어 가면서 화염의 안정성을 관찰하였다[6]. 또, Bedat 등은 스윙(swirl) 형태의 버너를 만들었다[7]. 스윙의 형태와 유속을 변화시켜 가면서 유동의 특성 시간을 결정하였다. 실험에서 얻은 데이터를 가지고 버너에 존재하는 화염에서의 Karlovitz 수가 1과 비슷한 크기를 가진다고 생각하였다. 하지만 유동의 특성 시간을 결정할 때 유동의 길이 스케일을 직접 측정하지 않고, 버너의 지름을 유동의 적분 길이 스케일이라고 가정하였다. 따라서 길이 스케일과 화염의 관계보다는 스윙 장치가 유동 특성을 변화시켜 화염 구조를 바꾼다는 사실을 강조하였다. 이와는 달리 Soika 등은 메탄과 공기로 만든 예혼합 화염에서 속도 변동 및 길이 스케일 등을 일정하게 유지한 상태에서 당량비를 변화시켜서 Borghi Chart에서 distributed reaction zone에 해당하는 조건을 만들었다[8]. Cho 등은 대향 제트 형태 화염의 정체점에서 난류의 강도 변화에 따른 난류 화염 속도의 변화를 직접 측정하였다. 유동의 정체점에서는 난류의 강도와 화염 속도가 선형적인 관계를 보이며 이 결과로 유추한 층류 화염 속도가 이론적인 값과 일치함을 확인하였다[9]. Kostiuik 등은 대향 제트 화염에서 보다 넓은 구역에서의 화염 곡률을 측정하였다[10]. 화염 곡률은 대향 제트의 중심 부분에서 가장 작음을 밝혔으며, 이 중심 부분(정체점)이 난류 화염에서의 flamelet region이라고 생각하였다. Tanahashi 등은 CH와 OH 라디칼을 측정하여 화염면의 전후단을 모두 관찰하였다[11]. 중앙에는 순수 메탄 그리고 원형의 주위류로 메탄과 공기의 혼합 기체를 공급하였다. 같은 적분 길이 스케일에서 속도의 변화에 의한 서로 다른 레이놀즈 수에 따른 CH/OH 라디칼의 상을 얻었다. 여기서 반응

대와 비반응대가 만나는 지점을 확대하여 그곳에서의 화염대와 난류 에디의 모습을 관찰하였다.

그동안 기존의 연구자들은 강한 난류 화염을 안정화시켜 화염의 특성을 계측하려고 노력하였고 그와 동시에 화염의 형상을 분석하여 Borghi Chart에서의 이론적인 난류 화염의 구분을 보다 구체적으로 하고자 하였다. 본 연구에서는 난류 유동장을 정의하는 방법으로서 유동의 시간 스케일을 사용하였고 화염의 순간 형상을 레이저 계측을 통하여 알아보았다. 이 때 유동장과 화염 형상 사이의 관계를 보다 구체적으로 알아보려고 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치 및 실험조건

대향류 형태의 난류 화염을 재현성 있게 발생시킬 수 있는 실험실 스케일의 연소기를 Fig. 2와 같이 제작하였다. Mass Flow Controller(MFC)에 의하여 공기, 연료(C_3H_8)가 각각 따로따로 혼합 챔버(mixing chamber)로 투입이 되어 완전 혼합된 예혼합기를 형성하였고, 이를 두 개의 노즐로 공급하였다. 보염을 위하여 직경 93mm의 세라믹 허니컴(honeycomb)으로 둘러싸여 있다. 허니컴은 주변으로의 열손실을 막는 역할을 한다. 여기에는 아무런 유동이 공급되지 않으며, 또한 허니컴의 작은 구멍들은 유동장의 형태에 영향을 미치지 않는다고 가정하였다.

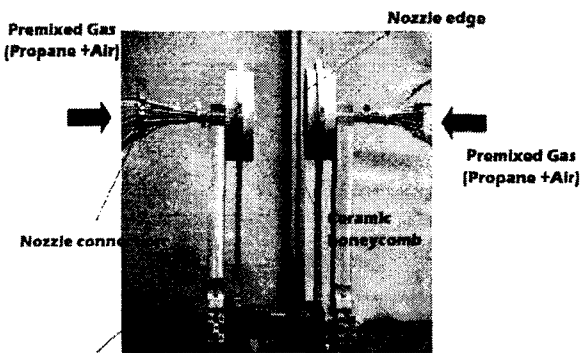
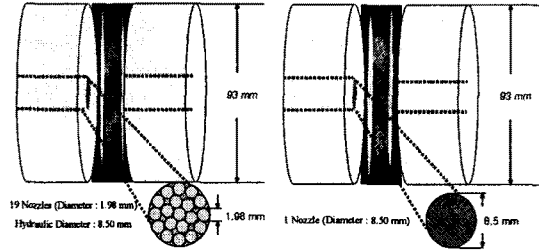


Fig. 2 Counter Jet Burner

유동장의 적분 길이 스케일에 변화를 주기 위하여 두 가지 노즐 형태를 만들었다. Fig. 3과 같이 다중노즐(bundle type)의 경우에 내경 1.85mm인 노즐 19개를 중심에 대하여 대칭이 되도록 묶었다. 이와 같은 다중노즐 두 개를 서로 마주보도록 배치하였다. 마찬가지로 단순노즐(one hole)에서는 내경이 8.5mm인 관을 대칭이 되도록 배치하였다. 이것은 다중노즐의 수력 직경(hydraulic diameter)에 해

당하는 값이 되겠다. 이렇게 하면 두 형태의 노즐에 동일한 유량이 공급되었을 때 노즐의 출구에서의 평균 유속을 같게 만들 수 있다. 본 실험에서는 유동의 특성(적분 길이 스케일, 속도 변동)만을 변화시키기로 하였으므로 다중노즐과 단순노즐 모두 연료 주입은 동일한 방법으로 하였다.



(a) Bundle Type

(b) One Hole Type

Fig. 3 Two Nozzle Types of Counterflow Jet

2.2 속도의 측정

대향류 형태의 유동장에 대한 속도 변동(velocity fluctuation)을 특정하기 위하여 열선풍속계(hotwire anemometer, DANTEC, 56C7 CTA Bridge)를 사용하였다. 속도 변동을 측정하기 위해서 충분한 주파수(50kHz)로 신호를 받았으며, 이를 위하여 열선풍속계의 반응 특성 시간을 위의 주파수에 맞도록 조절하였다. 그런 후에 오실로스코프를 사용하여 50kHz 주파수로 1초 동안 50000번 속도를 추출하였다.

속도 성분을 얻기 위하여 열선풍속계의 보정이 필요하였는데 이를 위하여 균일한 완전 발달 유동을 만들기 위한 수축 노즐을 사용하였으며, 마이크로마노메터를 노즐 출구에 설치 후에 유리관으로 둘러싸서 외부 유동의 간섭을 최소화하였다. 동일한 위치에서 열선풍속계와 마이크로마노메터의 속도 정보를 얻어 이것을 보정에 이용하였다.

2.3 적분 길이 스케일의 측정

유동의 시간 스케일을 알아보기 위하여 적분 길이 스케일을 측정하였다. 같은 시간 간격을 가지고 속도 측정 장치를 공간적으로 배치한 후에 여기서 얻어진 공간적 상관관계가 0이 되는 지점을 유동의 적분 길이 스케일로 정의하는 것이 보통이다. 하지만 본 실험에서는 난류 유동이 넓은 공간에 일정하게 분포하지 않고 또한 여러 가지 공간적인 제약이 따르기 때문에 동일 위치에서의 속도를 측정하고 Taylor의 가정을 도입하여 적분 길이 스케일을 얻

었다. 본 연구에서는 신호를 50KHz 주파수로 50000번 측정하여 그것의 시간적 상관 관계를 얻었다(식1).

$$R_{uu}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T u(t)u(t-\tau)dt \quad (\text{식1})$$

상관 관계를 시간에 대해 무한대까지 적분하고 속도의 제곱으로 나누어 주면 적분 길이 스케일을 구할 수 있다(식 2).

$$\text{integral time scale} = \frac{1}{u^2} \int_0^\infty R_{uu}(\tau)d\tau \quad (\text{식2})$$

실험에서 사용한 조건들은 다음과 같다.

Table 1 Experimental Conditions

Fuel	Propane
Equivalence Ratio	1.0
Laminar Flame Velocity	0.44 m/s
Laminar Flame Thickness	5.08×10^{-4} m
Viscosity	1.90×10^{-4} m ² /s

2.4 OH 라디칼 측정 방법

화염의 순간적인 반응 특성을 알아보고 그 형상을 보기 위하여 OH 라디칼의 레이저 형광 신호를 통하여 화염 형상을 알아보았다. OH 라디칼은 연소 반응에서 매우 중요한 라디칼의 하나로 분광 스펙트럼이 비교적 간단하고 감도가 좋아 LIF(laser induced fluorescence)를 이용한 농도 측정이 일찍부터 이루어져 왔다. 따라서 화염의 형상을 알아보기 위한 중요한 방법으로 사용되어 왔다.

본 연구에서는 이를 위하여 Nd:YAG 레이저(Continuum; Powerlite Precision II 8010), 색소 레이저(Continuum; ND6000), 주파수 배가기(frequency doubler)로 구성된 광원을 사용하였다. 광원에서 나온 빛은 cylindrical 렌즈와 spherical 렌즈를 통과하면서 평면광(폭 15mm, 8 nsec duration)이 된다. 형광 신호의 검출을 위해서 ICCD 카메라를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 화염의 형상

앞장에서 언급한 실험 방법을 사용하여 대향 제트에서의 OH 라디칼의 분포 특성을 도시하였다(Fig. 4).

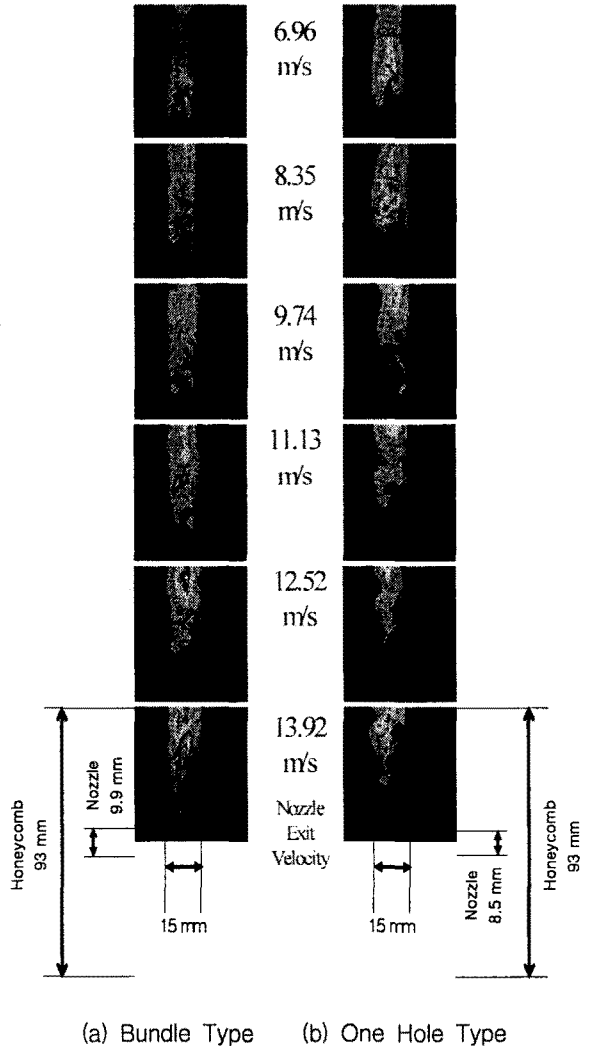


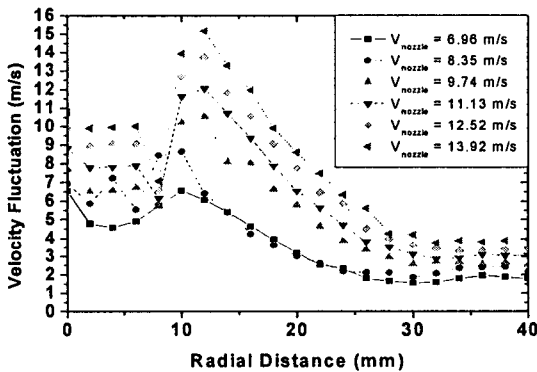
Fig. 4 OH Radical of Turbulent Flame in Counterflow Jet

이 순간상들은 화염의 순간적인 거동을 나타내어 준다. 노즐의 직경에 따라서 유동장의 길이 스케일이 달라짐을 확인할 수 있다. 다중 노즐의 정체점 근처에서 작은 에디들이 반응대와 함께 존재하는 것이 보인다. 단순 노즐의 형상 사진에서 나타나는 에디의 크기는 다중 노즐의 경우보다 큼을 볼 수 있었다. 다중 노즐에서 나타난 작은 에디는 유동의

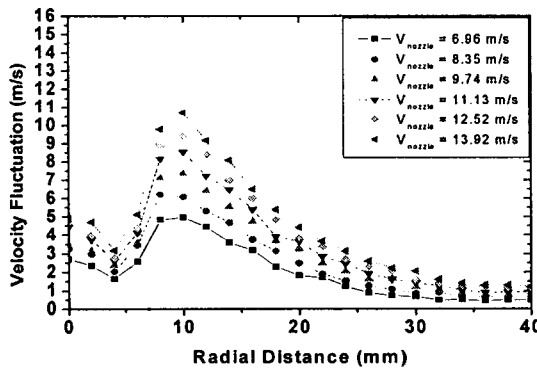
시간스케일이 작음을 보여주고 있으며 여기서의 화염은 단순 노즐의 화염에 비하여 상대적으로 유동의 효과를 무시할 수 있는 화염으로 생각된다.

3.2 난류 강도 분포

난류 강도 분포를 살펴보면, Fig. 5에서와 같이 다중 노즐과 단순 노즐에서 같은 경향을 관찰할 수 있었다. 강도가 최대가 되는 지점은 다중 노즐의 경우 노즐 중앙에서 12mm, 단순 노즐의 경우 10mm 지점이다. 다중 노즐에서는 노즐의 출구 유속이 증가함에 따라서 난류 강도가 증가하였다. 난류 강도를 나타내는 속도변동은 유동의 평균 속도에 비례한다는 사실을 확인하였다. 이 경향은 단순 노즐에서도 마찬가지로 관찰할 수 있었다. 또한 같은 노즐 출구 유속에서 다중 노즐 형태의 대향 제트가 더 큰 반경 방향 속도를 가짐을 볼 수 있다.



(a) Bundle Type

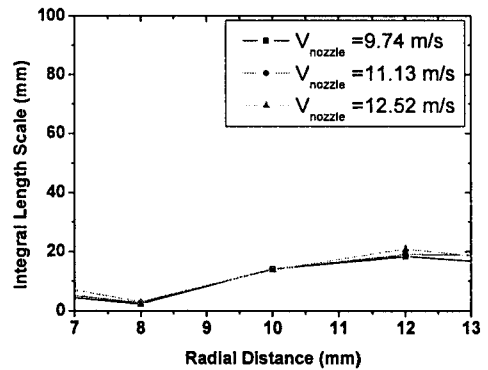


(b) One Hole Type

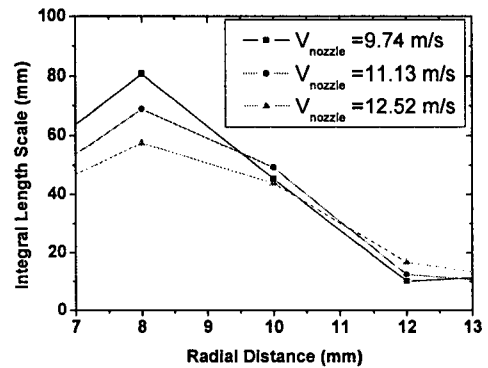
Fig. 5 Turbulent Intensity of Bundle Type Nozzle and One Hole Type Nozzle

3.3 정체점 주변에서의 적분 길이 스케일

대향 제트 내 유동 길이 스케일을 알아보기 위하여 Fig. 6과 같이 대향 제트의 정체점 부근에서 적분 길이 스케일을 계산하여 알아보았다. 반경 방향의 속도 변동을 이용하여 적분 길이 스케일을 측정하였다. 앞장의 화염 형상에서 나타난 작은 에디들을 유동장의 시간 스케일을 직접 측정함으로써 확인하여 보았다. 그 결과 적분 길이 스케일은 노즐의 직경과 무관하지 않았다. 다중 노즐의 정체점 주변에서의 적분 길이 스케일은 단순 노즐의 경우에 비해 매우 작은 값을 보였고 이것은 노즐의 직경에 대체로 비례하였다.



(a) Bundle Type



(b) One Hole Type

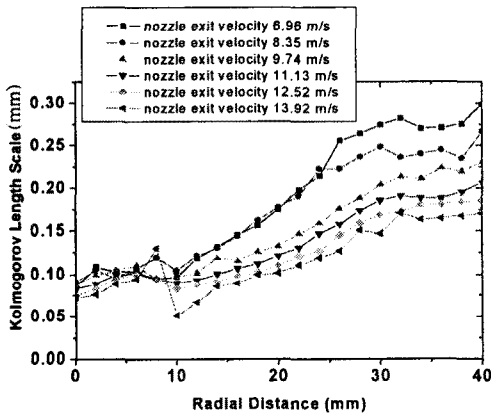
Fig. 6 Integral Length Scale of Bundle Type Nozzle and One Hole Type Nozzle

3.4 대향 제트의 Kolmogorov 길이 스케일 분포

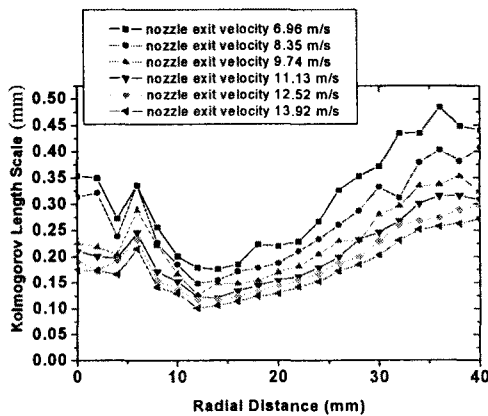
대향 제트 안에서의 전체적인 유동장 형태를 알

아보기 위하여 유동의 최소 난류 에디 크기를 나타내는 Kolmogorov 길이 스케일을 식 3[3]을 이용하여 Fig. 7에 나타내었다. 그 크기는 다중 노즐에서 0.1~0.3mm, 단순 노즐에서 0.1~0.5mm 이었다. 여기서 노즐의 정체점 뿐만 아니라 대향 제트의 전 영역에서 노즐의 직경 변화가 난류 유동의 에디 크기에 영향을 미친다는 사실을 알 수 있었다.

$$l_k = l_o Re_{l_o}^{-3/4} \quad (식3)$$



(a) Bundle Type



(b) One Hole Type

Fig. 7 Kolmogorov Length Scale of Bundle Type Nozzle and One Hole Type Nozzle

3.5 대향 제트의 난류 화염

대향 제트 내에서 화염이 어떤 경향을 가지는가 알아보기 위하여, 측정한 길이 스케일과 알려진 층류 화염 속도를 가지고 Damköhler 수를 알려주는 길이 스케일 비를 Fig. 8에 도시하여 보았다. 11.13m/s 의 노즐 출구 속도를 가지는 다중 노즐의 실험값을 Borghi Chart 에 나타내었는데 대향 제트 중심에서 5~10mm 지점에서 가장 Damköhler 수가 높은 화염이 존재함을 볼 수 있다. 또한 다중 노즐 대향 제트의 난류 화염은 전 영역에서 Damköhler 수가 1 근처의 값을 가진다는 사실을 알 수 있다. 이 구역의 화염은 유동의 시간 스케일과 반응의 시간 스케일의 차이가 없는 구간이라 생각된다.

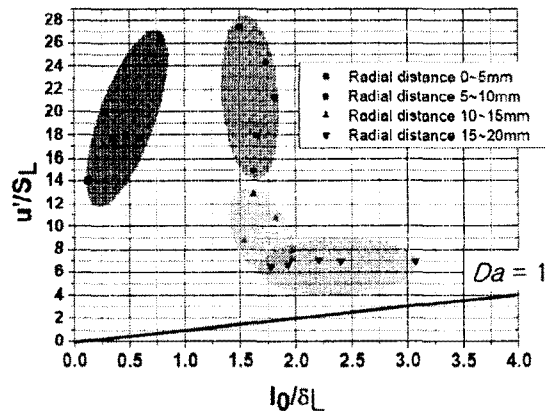


Fig. 8 Turbulent Flame in Counterflow Jet

4. 결론

본 연구에서는 대향 제트 연소기에서 다중 노즐(bundle type)과 단순 노즐(one hole)을 이용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 노즐의 직경을 작게 하면 대향 제트 전 구간에서 유동의 길이 스케일을 작게 만드는 효과가 있다. 특히, 정체점 부근에서 다중 노즐과 단순 노즐 사이의 유동의 적분 길이 스케일 차이는 노즐의 직경 차이와 일치함을 확인하였다.

2. Damköhler 수가 1에 근접하여 유동의 시간 스케일과 반응 시간 스케일이 비슷해지는 구역은 본

실험의 다중 노즐 대향 제트 전 구간에서 찾을 수 있었다.

3. 난류 화염에서, 유동의 시간 스케일을 확실히 정의하고 이것들을 가지고 화염을 특징짓는 것은 매우 어려운 문제이다. 유동의 에디 자체가 넓은 크기 범위를 가지고 있기 때문이다. 따라서 난류 화염을 구별할 때는 에디의 크기와 유동의 속도 그리고 반응이 유동의 에디에 미치는 영향 등을 동시에 고려하는 것이 필요하다고 생각된다.

후 기

본 연구는 연소기술연구센터(CERC)의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

- [1] Borghi, R., 1988, "Turbulent Combustion Modeling", Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 14, pp. 245-292
- [2] N. Peters, 2000, "Turbulent Combustion", Cambridge University Press
- [3] Stephen R. Turns, 1999, "Introduction to Combustion", McGraw-Hill
- [4] N. Peters, 1992, "Fifteen Lectures on Laminar and Turbulent Combustion", Ercoftac Summer School
- [5] Akira Yoshida, 1998, "Flame Structure and Emission Characteristics of a Jet Stirred Reactor", Smart Control of Turbulent Combustion
- [6] Akira Yoshida, 1999, "An Opposed Jet Burner for the Study of High Intensity Combustion", Meas. Sci. Technol., Vol.10
- [7] B. Bedat and R.K.Cheng, 1999, "Experimental Study of Premixed Flames in Intense Isotropic Turbulence", Combustion and Flame, Vol.100
- [8] Armin Soika, Friedrich DinKelacker and Alfred Leipertz, 1998, "Measurement of the Resolved Flame Structure of Turbulent Premixed Flames with Constant Reynolds Number and Varied Stoichiometry", 27th Symposium on Combustion, pp. 785-792
- [9] P.Cho and C.K.Law, 1985, "Structure and Propagation of Turbulent Premixed Flames Stabilizes in a Stagnation Flow", 21st Symposium on Combustion, pp.1493-1499
- [10] L.W.Kostiuk, I.G. Shepherd and K.N.C.Bray, 1999, "Experimental Study of Premixed Turbulent Combustion in Opposed Streams. Part III-Spatial Structure of Flames", Combustion and Flame, Vol 118, pp. 129-139
- [11] Mamoru Tanahashi, Shinichirou Murakami, Gyung Min Choi, Yuichi Fukuchi and Toshio Miyauchi, 2005, "Simultaneous CH-OH PLIF and Stereoscopic PIV Measurements of Turbulent Premixed Flames", Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 30, pp. 1665-1672
- [12] Williams, F. A., 2000, "Progress in Knowledge of Flamelet and Extinction," Prog. Energy Combust. Sci. 26, pp. 657-682.
- [13] Korusoy, E. and Whitelaw, J. H., 2002, "Extinction and Relight in Opposed Flames," Experiments in Fluids, Vol. 33, pp. 75-89.
- [14] Dibble, R. W. and Hollenbach, R. E., 1981, "Laser Rayleigh Thermometry in Turbulent Flames", Proc. Comb. Inst 18, pp. 1489-1499
- [15] Daily, J. W., 1997, "Laser Induced Fluorescence Spectroscopy in Flames", Progressive in Energy and Combustion Science, Vol. 23, pp.133-139
- [16] Nguyen, Q., V., Dibble, R. W., Carter, C. D., Fiechtner, G. J., and Barlow, R. S., 1996, "Raman-LIF Measurements of Temperature, Major Species, OH, and NO in a Methane-Air Bunsen Flame", Combustion and Flame, Vol. 105, pp.499-510
- [17] N. Peters, 1984, "Laminar Diffusion Flamelet Models in Non-premixed Turbulent Combustion", Prog. Energy Comb. Sci., Vol.10, pp.319
- [18] 정석호, 한재원, 정종수, 이원남, 고동섭, 김경수, 이기형, 강경태, "레이저 응용 연소 계측", 문운당, 2002