

질소희석이 부상된 수소 난류확산화염의 화염안정성에 미치는 영향

오정석* · 윤영빈**

Nitrogen Dilution Effects on Liftoff Flame Stability in Non-premixed Turbulent Hydrogen Jet with Coaxial Air

Jeongseog Oh* · Youngbin Yoon**

ABSTRACT

The study of nitrogen dilution effect on flame stability was experimentally investigated in non-premixed turbulent lifted hydrogen jet with coaxial air. hydrogen gas was used as a fuel and coaxial air was injected to make flame liftoff. And both of the fuel jet and coaxial air velocity were fixed as $u_F=200$ m/s and $u_A=16$ m/s, while nitrogen diluents mole fraction was varied from 0 to 0.2. For the analysis of flame structure and flame stabilization mechanism, the simultaneous measurement of PIV/OH PLIF had been performed. It was found that the turbulent flame propagation velocity increased as decreasing of nitrogen mole fraction. We concluded that the turbulent flame propagation velocity was expressed as a function of turbulent intensity, even though the mole fraction of nitrogen diluents gas was changed.

초 록

질소 희석 가스가 수소화염의 화염안정성에 미치는 영향을 실험적으로 연구하였다. 연료는 수소이며 수소화염을 부상시키기 위하여 동축공기를 사용하였다. 이때 수소의 속도는 200 m/s이고 동축공기의 속도는 16 m/s로 고정하였다. 질소 희석 가스는 연료 공급라인에 주입되었으며 전체 연료 부피의 0~20%까지 주입하였다. 화염구조분석을 위하여 PIV/OH PLIF 동시측정 기법을 사용하였다. 수소 난류 확산화염 화염안정성 실험을 통하여 질소 가스 주입에 따라 부상화염 높이는 증가하였으며, 난류 화염 전파속도는 감소하였다. 그리고 난류 화염전파속도는 난류강도의 함수로 표현될 수 있었다.

Key Words: Lifted hydrogen flame(수소부상화염), Nitrogen dilution(질소 희석), Simultaneous PIV/OH PLIF measurement(PIV/OH PLIF 동시측정)

* 서울대학교 기계항공공학부원

** 서울대학교 기계항공공학부

연락처, E-mail: jeongs5@snu.ac.kr

1. 서 론

부상화염(lifted flame)은 일반적인 노즐에 부

착된 화염(attached flame)에 비하여 화염 밀단에서의 활발한 혼합에 의해 화염의 크기가 작고 NOx 배기배출물 수준이 낮은 장점을 가지고 있다. 그러나 화염의 부상으로 인해 화염이 안정화되는 영역이 줄어들어 단점이 있다.

Muniz와 Mungal [1]은 메탄과 주위류(coflow air)를 사용한 실험적 연구에서 반응영역 중 온도가 가장 높은 지점들을 화염면으로 보고 화염면에서 노즐에 가장 가까운 한 점을 화염이 안정화되는 지점(leading point)으로 정의하였다. 이 때 화염면에서의 화염전파속도(flame propagation velocity)는 국소 난류강도(local turbulent intensity)에 비례하여 증가한다는 결론을 얻었다.

난류영역에서의 화염안정화에는 유동조건에 의해 많은 영향을 받는데 난류화염전파속도는 난류강도, 신장률, 와류도 등의 함수로 알려져 있다 [2]. 만약 연료에 비반응 물질을 넣게 되면 화염면에서의 열확산(thermal diffusivity)과 물질 확산(mass diffusivity)의 비가 달라져 화염전파속도는 변하게 된다. 일반적으로 희석가스의 주입은 반응영역에서의 온도를 떨어트리게 되어 질소산화물의 수준이 낮아지는 이점이 있는 것으로 알려져 있다 [3].

화염안정화 기구에 대한 많은 연구자들의 노력에도 불구하고 아직 밝혀지지 않은 영역들이 존재한다. 본 연구에서는 상온(20℃), 상압(1 atm), 동축류 조건에서 질소희석에 따른 화염안정화 기구를 다루고자 한다. 따라서 본 연구의 목적은 연료(수소)와 공기의 속도를 동일하게 하고 질소 희석가스를 수소 공급라인에 주입하였을 때 화염안정화 지점에서의 난류 화염전파속도 변화와 화염안정화 기구를 밝히는 것이다.

2. 실험방법

2.1 실험장치

실험 장치는 크게 연소기와 레이저 및 광학기기, 그리고 영상취득장치 등의 세 부분으로 나뉜다. 먼저 연소기는 200×200 mm² 너비와 800 mm 높이의 제어체적을 가지고 있으며 광학적 접근이 가능하

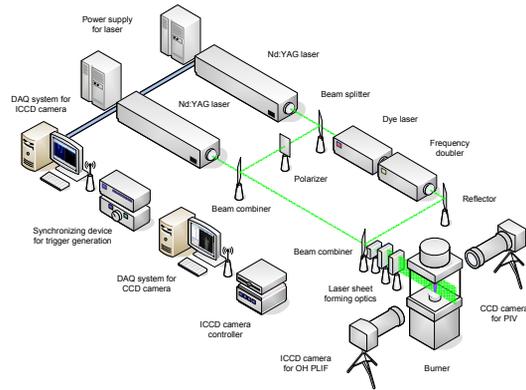


Fig. 1 Schematic diagram of simultaneous PIV/OH PLIF measurement setup

도록 네 개의 합성석영재질의 평판(quartz plate)으로 둘러싸여져 있다. 사용된 연료노즐은 내경, $d_f=3.66$ mm, 두께 0.2 mm의 원통형이며, 이 주위를 내경 $d_A=14.1$ mm의 동축류 노즐이 둘러싸고 있다. 다음으로 PIV(Particle Image Velocimetry)와 OH PLIF(Planar Laser Induced Fluorescence) 동시 측정을 위하여 두 대의 Nd:YAG 레이저(532 nm, 300 mJ/pulse, Continuum co. Surelite 1; Spectra-Physics co. Quanta-Ray)와 Dye 레이저(10 mJ/pulse; Lumonics co. HyperDYE-300), Frequency doubler(Lumonics co. HyperTRACK-1000)를 사용하였다 (Figure 1).

2.2 실험방법

부상화염의 거동은 노즐출구 속도에 의해 민감하게 변화한다. 특히 본 실험조건은 완전히 발달된 난류영역이므로 레이놀즈 수 변화에 따른 유동장의 변화보다는 노즐출구에서의 속도에 따라 부상화염의 변화가 두드러지므로 노즐 출구에서의 유동 속도를 고정하고 질소희석가스 첨가에 따른 부상화염의 거동을 보기위하여 연료 노즐 출구속도(u_F)를 200 m/s로, 동축공기속도(u_A)를 16 m/s로 고정하였다. 이 때 질소 희석가스의 몰농도(X_{N_2})는 0~0.2 사이에서 변화하여 주입하였다. 연료 노즐 출구에서의 레이놀즈 수를 구하기 위하여 $Re_T=u_T d_T/\nu$ 로 정의하였다. 여기서 ν 는 상온에서 수소와 질소 혼합기의 동점성계수이다. 실험조건

Table 1 Experimental condition

	Case 1	Case 2	Case 3
u_F [m/s]	fixed as 200		
u_A [m/s]	fixed as 16		
Re_F^*	6654.5	10876.7	14610.8
X_{N_2}	0.0	0.1	0.2
L [mm]	536.1~592.8	477.1~525.0	363.1~394.5
H [mm]	54.9~57.5	58.2~62.6	70.1~76.8

* $Re_F = \frac{u_F \cdot d_F}{\nu}$ where ν : kinetic viscosity for H_2 and N_2 mixture at 1 atm and 20 °C

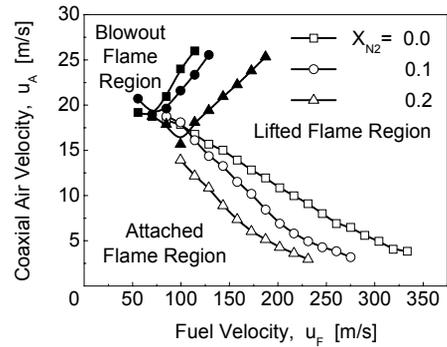
은 Table 1에 정리하였다.

3. 실험결과

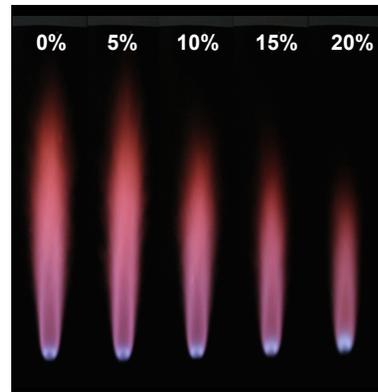
3.1 화염안정화 지도

Figure 2 (a)는 유동 속도를 일정하게 하고 질소 희석가스의 몰농도를 0.0, 0.1, 0.2로 변화하였을 때 연료 및 공기의 속도 증가에 따른 화염안정화 지도를 나타내고 있다. 화염안정화 지도는 크게 부착화염영역(attached flame region)과 부상화염영역(lifted flame region), 날림화염지역(blowout flame region)으로 나뉜다. 여기서 질소 몰농도가 증가함에 따라 부착화염지역의 크기는 감소하나 날림화염지역의 크기는 증가함을 볼 수 있다. 이는 같은 연료속도에서 질소 농도변화에 따른 모멘텀 증가가 화염을 노즐에서 후류방향으로 밀어내어 화염이 보다 쉽게 부상 및 날림 현상이 일어나는 것으로 생각된다. 수소나 탄화수소 화합물 계열의 기체연료를 사용한 일반적인 제트에서의 부상화염 거동은 노즐출구에서의 연료 속도를 증가시키기에 따라 부상화염의 높이는 증가하며 가연한계에 이르러서는 화염 밑단이 격렬하게 섭동하다 화염날림이 일어나 소멸된다고 알려져 있다 [3,4].

Figure 2 (b)는 희석농도를 달리하였을 때 부상화염의 직접사진을 나타내고 있다. 질소농도 증가에 따라 부상화염높이는 증가하나 화염높이와 반응영역길이는 감소함을 알 수 있다. 연료 속도를 고정하였으므로 희석가스 농도증가는 노즐출구에서의 모멘텀 증가와 화염밑단에서의



(a)



(b)

Fig. 2 (a) stability map, (b) Visible flame appearance

수소농도 감소를 가져오게 되어 화염이 후류로 밀리게 된다. 또한 상대적인 수소연료량의 감소로 인하여 반응영역의 길이와 화염높이가 줄어들게 된다.

3.2 화염안정화 기구

본 연구에서 화염안정화 지점은 반응영역에서 노즐에 가장 가까운 상류지점으로 정의하였으며, 이때의 문턱 값은 OH 형광신호 최고 강도의 20%로 하였다. 또한 화염안정화 지점에서는 혼합기가 충분히 예혼합되어 국소유동속도(local flow velocity)와 난류 화염전파속도(turbulent flame propagation velocity)가 일치한다고 가정하였다. 또한 화염안정화 지점에서는 국소유동속도(local

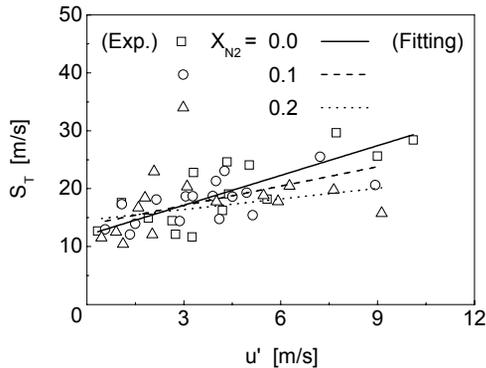


Fig. 3 Experimental approximation of turbulent burning velocity and rms flow velocity fluctuation

flow velocity)와 난류 화염전파속도(turbulent flame propagation velocity)가 일치한다고 가정하였다.

Figure 3은 난류 화염전파속도와 난류강도(축방향 속도의 섭동)와의 관계를 나타낸 그림이다. 난류강도가 증가할수록 화염면이 증가하게 되고 화염면이 전파하는 난류 화염전파속도도 증가하며 이 둘 사이의 관계가 선형적임을 알 수 있다. 그리고 질소 희석의 세 가지 경우 속도 rms 값(u')이 비교적 작을 때에는 화염전파속도 차이가 나지 않았으나 u' 가 증가함에 따라 차이가 커져서 전체적으로 기울기가 달라진 것을 알 수 있다. 이는 질소희석으로 인하여 반응물의 농도가 달라지므로 화염면에서의 난류 화염전파속도가 줄어들게 되는 것으로 판단된다. 또한 동축공기로 인하여 화염 밀단에서의 섭동으로 인하여 전체적으로 화염전파속도의 분포가 흩어져있는 것으로 볼 때 부상화염이 유동에 민감히 반응하며 화염밀단에서의 연료와 공기의 혼합이 활발히 이루어지는 것으로 생각된다.

4. 결 론

부상된 수소 난류화산화염에서 질소희석가스 사용에 따른 난류화염전파속도 변화와 화염안정

화기구에 대한 연구를 수행하여 다음의 결론을 얻었다.

(1) 질소 희석가스의 농도를 증가함에 따라 부상화염 높이는 감소하였다.

(2) 화염안정화 지점에서의 난류화염전파속도는 난류강도에 의해 증가하고 질소 희석가스 농도 증가에 따라 감소하였다.

5. 후 기

본 연구는 서인천 발전본부 중장기 기술과제 “가스터빈(GE7FA DLN-2.6) 연소기의 연소불안 정성 제어기법 개발”의 일환으로 수행 되었으며, 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Muniz, L. and Mungal, M. G., "Instantaneous Flame-Stabilization Velocities in Lifted-Jet Diffusion Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 111, 1997, pp. 16~31.
- Lipatnikov, A. N. and Chomiak, J., "Turbulent flame speed and thickness: Phenomenology, evolution, and application in the multi-dimensional simulations," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 28, 2002, pp. 1-74.
- Wu, Y., Al-Rahbi, I.S., Lu, Y. and Kalghatgi, G. T., "The stability of turbulent hydrogen jet flames with carbon dioxide and propane addition," *Fuel*, Vol. 86, 2007, pp. 1840-1848.
- Brockhinke, L., Haufe, S. and Kohse-Hönghaus, S., "Structural properties of lifted hydrogen jet flames measured by laser spectroscopic techniques," *Combustion and Flame*, Vol. 121, 2000, pp. 367~377.