

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2009.33.7.477

질소 희석이 수소 난류화염의 화염안정성에 미치는 영향

오 정 석* · 윤 영 빈*

(2008년 9월 30일 접수, 2009년 6월 8일 수정, 2009년 6월 8일 심사완료)

The Effect of N₂ Dilution on the Flame Stabilization in a Non-Premixed Turbulent H₂ Jet with Coaxial Air

Jeongseog Oh and Youngbin Yoon

Key Words: Flame Stabilization(화염안정성), Lifted Hydrogen Flame(수소부상화염), Turbulent Flow(난류), Nitrogen Dilution(질소 희석), Simultaneous Measurement(동시측정)

Abstract

The study of nitrogen dilution effect on the flame stability was experimentally investigated in a non-premixed turbulent lifted hydrogen jet with coaxial air. Hydrogen gas was used as a fuel and coaxial air was used to make flame liftoff. Each of hydrogen and air were injected through axisymmetric inner and outer nozzles ($d_F=3.65$ mm and $d_A=14.1$ mm). And both fuel jet and coaxial air velocity were fixed as $u_F=200$ m/s and $u_A=16$ m/s, while the mole fraction of nitrogen diluents gas was varied from 0.0 to 0.2 with 0.1 step. For the analysis of flame structure and the flame stabilization mechanism, the simultaneous measurement of PIV/OH PLIF laser diagnostics had been performed. The stabilization point was selected in the most upstream region of the flame base and defined as the point where the turbulent flame propagation velocity was equal to the axial component of local flow velocity. We found that the turbulent flame propagation velocity increased with the decrease of nitrogen mole fraction. We concluded that the turbulent flame propagation velocity was expressed as a function of turbulent intensity and axial strain rate, even though nitrogen diluents mole fraction was changed.

기호설명

d_A : 동축공기 노즐 직경
 d_F : 연료 노즐 직경
 H : 부상화염 높이
 Ka : 칼로비츠 수 ($= S_{xx} \cdot a / S_L^2$)
 L : 화염 길이
 r : 반경방향 거리

u_A : 동축공기 속도
 u_F : 연료 속도
 u' : 축방향 속도 섭동값
 \bar{u} : 축방향 평균속도
 S_T : 난류화염 전파속도
 S_{xx} : 축방향 신장률 ($= \delta u_x / \delta x$)
 x : 축방향 거리
 X_{N_2} : 질소희석 몰분율

† 책임저자, 회원, 서울대학교 대학원 기계항공공학부
 E-mail : jeongs5@snu.ac.kr
 TEL : (02)880-7396 FAX : (02)872-8032
 * 회원, 서울대학교 기계항공공학부

1. 서론

연소현상에 대한 기초 연구로서 화염안정성에

관한 연구들이 이론적, 수치 해석적, 실험적인 방법으로 진행되어져왔다.⁽¹⁻³⁾

부상화염(lifted flame)은 일반적인 노즐에 부착된 화염(attached flame)에 비하여 화염 밑단에서의 활발한 혼합에 의해 화염의 크기가 작고 NOx 배기배출물 수준이 낮은 장점을 가지고 있다. 그러나 화염의 부상으로 인해 화염이 안정화되는 영역이 줄어드는 단점이 있다.

화염이 안정화 되는 원인을 밝혀내기 위하여 많은 선행 연구들이 진행되어져 왔으며 지금까지 알려진 화염안정화 이론은 크게 세 가지 개념을 바탕으로 발전되어져 왔다. 세 가지 개념이란 혼합기가 완전 예혼합이라 가정하는 예혼합 화염 개념(premixed flame concept), 유동장에서의 농도 구배가 있는 경우인 부분 예혼합 화염 개념(partially premixed flame concept), 와류 등에 의한 유동 구조에 초점을 맞춘 거대 화염구조 개념(large flame structure concept)이다.⁽⁴⁾ 이러한 세 개념을 바탕으로 몇 가지 이론들이 여러 연구자들에 의해 제안되었다.⁽⁵⁾

Muniz와 Mungal⁽⁶⁾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.

화염전파속도를 이론적으로 고찰해보면 층류화염전파속도(S_L)의 경우 주위의 온도(T_u)와 압력(P), 혼합기의 당량비(ϕ) 및 비활성 가스 질량분율(T_{dil})의 함수로서 표현할 수 있다.⁽⁷⁾ 이는 아래의 식 (1)과 같다.

$$S_L = S_{L,ref} \left(\frac{T_u}{T_{u,ref}} \right)^\gamma \left(\frac{P}{P_{ref}} \right)^\beta (1 - 2.1 Y_{dil}) \quad (1)$$

여기서 $S_{L,ref}$ 는 기준온도($T_{u,ref}=298K$)와 압력($P_{ref}=1 \text{ atm}$)에서 층류 화염전파속도, $\gamma=2.18-0.8(\phi-1)$, $\beta=-0.16+0.22(\phi-1)$ 이다.

난류 화염전파속도(S_T) 역시 난류증가에 따라 화염면이 헝클어지고(wrinkled laminar flame region), 이는 난류강도와 층류 화염전파속도의 함수, 식 (2)로 표현할 수 있다.⁽⁸⁾

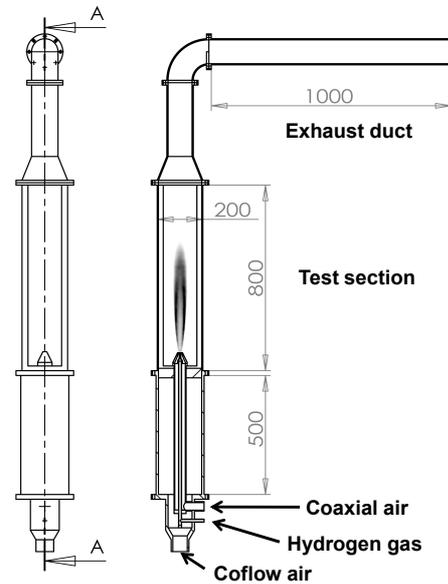


Fig. 1 Schematic diagram of combustor profile; both of fuel jet and coaxial air nozzle diameter are $d_f=3.66 \text{ mm}$ and $d_a=14.1 \text{ mm}$

$$S_T = \frac{\dot{m}}{\rho_u A} = \frac{\bar{A} + A_{wrinkles}}{\bar{A}} S_L = S_L + u' \quad (2)$$

여기서 \dot{m} 은 반응물의 질량유량, ρ_u 는 미연가스 밀도, \bar{A} 는 시평균(time-smoothed) 화염면 면적, $A_{wrinkles}$ 는 화염면이 헝클어졌을 때 화염소(flame-let)에 의해 늘어난 면적이다.

난류영역에서의 화염안정화는 유동조건에 크게 영향을 받고 난류화염전파속도는 난류강도(u'), 신장(K), 와류도(Ω) 등의 함수로 알려져 있다.⁽⁹⁾

만약 연료에 비반응 물질을 넣게 되면 화염면에서의 연료의 농도구배 및 열확산(thermal diffusivity)과 물질확산(mass diffusivity)의 비가 달라져 화염전파속도는 변하게 된다. 일반적으로 희석가스 주입은 반응영역에서 온도를 떨어트리게 되어 질소산화물 수준이 낮아지는 이점이 있다.⁽¹⁰⁾

본 연구에서는 상온(20°C), 상압(1 atm), 동축류 조건에서 질소희석에 따른 화염안정화 기구를 다루고자 한다. 그러므로 연구목적은 연료(수소)와 공기의 속도를 동일하게 하고 질소 희석가스를 수소라인에 주입하였을 때 화염안정화 지점에서의 난류 화염전파속도 변화와 화염안정화 기구를 밝히는 것이다.

Table 1 Experimental condition as a parameter of nitrogen diluents mole fraction(Lewis number effect) under fixed conditions of fuel jet and coaxial air velocity

	Case 1	Case 2	Case 3
u_F [m/s]	fixed as 200		
u_A [m/s]	fixed as 16		
u_∞ [m/s]	less than 0.1		
Re_F	6654.5	12099.2	14610.8
Le_F	0.465	0.354	0.295
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]	42.3~52.0	49.4~61.2	55.1~66.5

2. 실험방법

2.1 실험장치

실험 장치는 크게 연소기와 레이저 및 광학기기, 영상취득장치로 나눌 수 있다. 먼저 연소기는 200×200 mm² 너비와 800 mm 높이의 제어체적을 가지고 있으며 광학적 접근이 가능하도록 네 개의 합성석영재질의 평판(quart plate)으로 둘러싸여져 있다. 사용된 연료노즐은 내경, $d_F=3.65$ mm, 두께 0.2 mm의 원통형이며, 이 주위를 내경 $d_A=14.1$ mm의 동축류 노즐이 둘러싸고 있다.

PIV(Particle Image Velocimetry)와 OH PLIF(Planar Laser Induced Fluorescence) 동시측정을 위하여 두 대의 Nd:YAG 레이저(532 nm, 300 ml/pulse의 Continuum co. Surelite 1과 Spectra-Physics co. Quanta-Ray)와 Dye 레이저(Lumonics co. HyperDYE-300), Frequency doubler(Lumonics co. HyperTRACK-1000)를 사용하였다.

OH 라디칼은 283.66 nm에서 여기되는 $A^2\Sigma^+ + X^2\Pi$ 밴드의 $Q_1(6)$ 전자준위를 가지고 있으며, 방출되는 형광신호를 306~320 nm의 파장을 통과시키는 필터(UG-11, WG-305)와 렌즈(Nikkor f/4.5 105 mm UV macro)를 통하여 1024×1024 분해능의 ICCD 카메라(Princeton Instruments inc., PI-MAX 1K)로 촬영하였다. PIV 측정을 위해 직경 1 μ m SiO₂를 연료와 동축공기관으로 주입하였으며 532 nm의 레이저광에 의해 산란된 Mie scattering 신호를 1008×1018 px 분해능을 가지는 CCD 카메라(Kodak ES 1.0)로 취득하였다.

2.2 실험조건

부상화염 거동은 유동조건과 연소기의 형상에

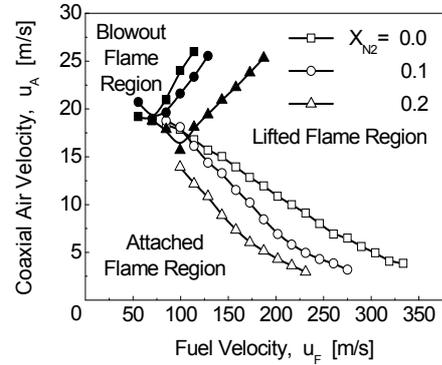


Fig. 2 Stability curve composed of three regions; attached flame region, lifted flame region, and blowout flame region

따라 민감하게 변한다고 알려져 있다.⁽¹¹⁾

특히 본 실험조건은 완전히 발달된 난류영역이므로 레이놀즈 수에 따른 유동장 변화보다는 연료와 공기의 노즐 출구속도에 의한 부상화염 변화가 두드러진다. 본 실험에서는 연료노즐 출구속도(u_F)를 200 m/s로, 동축공기 속도(u_A)를 16 m/s로 고정하고 질소희석가스 첨가에 따른 부상화염 거동을 보았다. 이 때 질소 희석가스 물분율(X_{N_2})은 0.0~0.2 범위 안에서 조절하였다. 연료노즐 출구에서의 레이놀즈 수(Re_F)와 루이스 수(Le_F)를 구하기 위하여 각각 $Re_F = u_F d_F / \nu$, $Le_F = k / \rho C_p D_{AB}$ 로 정의하였다. 실험조건을 Table 1에 정리하였다. 여기서 ν , D_{AB} 는 표준상태에서 수소와 질소 혼합기의 동점성계수, 확산계수이고 k 는 열전도계수이다.

3. 실험결과

3.1 화염안정화 지도

본 연구에서는 동축류 수소 난류확산화염에서 연료에 질소를 희석하였을 때의 부상화염 거동 및 화염안정화 기구를 규명하고자 하였다. 난류확산화염에서 화염면 전파는 난류강도, 신장률 등 유동장 특성에 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 또한 질소를 희석한 경우 열확산계수와 물질확산계수 변화에 의해 화염전파속도나 화염온도가 달라질 것으로 추정할 뿐 이에 대한 자세한 설명이 부족한 실정이다.

Figure 2는 유동 속도를 일정하게 하고 질소 희석가스의 몰농도를 0.0~0.2로 변화하였을 때 연료 및 공기의 속도 증가에 따른 화염안정화 지도를

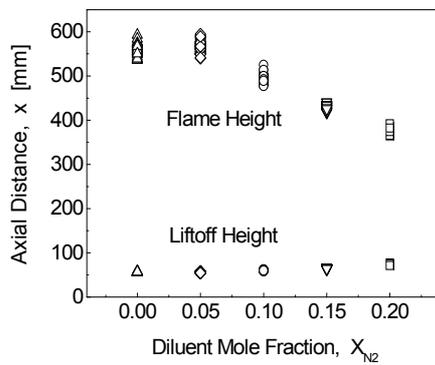


Fig. 3 Tendency of flame length and liftoff height

나타내고 있다. 화염안정화 지도는 크게 부착화염영역(attached flame region)과 부상화염영역(lifted flame region), 날림화염지역(blowout flame region)으로 나뉜다. 여기서 질소 몰분율이 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 소멸되는 것으로 생각된다. 수소나 탄화수소 화합물 계열의 기체연료를 사용한 일반적인 제트에서의 부상화염 거동은 노즐출구에서의 연료 속도를 증가시키기에 따라 부상화염높이는 증가하며 가연한계에 이르러서는 화염 밑단이 격렬하게 섭동하다 화염날림이 일어나 소멸된다고 알려져 있다.^(3,8) 그러나 부상화염 거동은 연료와 동축공기와 같은 유동조건에 민감하게 변화하므로 연료와 공기의 밀도비나 운동량비가 크게 차이는 경우 연료속도증가에 따라 부상화염의 높이가 감소하는 경우도 보고되고 있다.⁽¹²⁾

Figure 3은 희석농도를 달리하였을 때 부상화염 직접사진을 나타내고 있다. 질소농도 증가에 따라 부상화염높이(H)는 증가하나 화염높이(L)와 반응영역길이(=L-H)는 줄어들음을 알 수 있다. 실험조건에서 보듯 연료 공급관에 주입되는 질소량 증가에 따라 Le_F 수가 줄어들었는데 이는 물질확산계수 보다 열확산계수가 더 크게 줄어들었다는 것을 의미한다. 일반적으로 Le_F 수의 감소는 화염강도를 강화하므로 화염전파속도를 증가시킨다. 그러나 Fig. 3에서의 결과는 화염밑단이 후류로 밀리는 것으로 나타나는데 이는 Le_F 수 감소에 의한

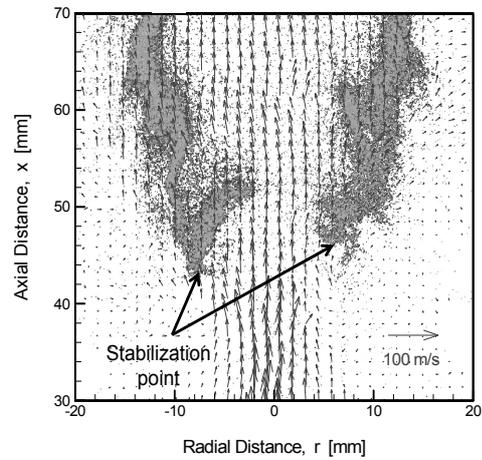


Fig. 4 Location of the stabilization point from the instantaneous image of simultaneous PIV/OH PLIF measurement result at Case 1

영향보다는 반응물의 절대 농도가 감소하여 화염전파속도가 줄어들고 따라서 화염이 보다 저속영역인 후류에서 안정화 되는 것으로 생각된다. 여기서 부상화염높이와 화염높이는 노즐출구에서 화염밑단(flame base)까지 그리고 화염밑단에서 화염끝(flame tip)까지의 축방향 거리로 정의하였으며 문턱값(threshold value)은 화염 최고 강도의 20%로 하였다.

3.2 화염안정화 지점

난류확산화염이 연료나 공기의 유속이 증가하여 부상하는 경우 화염밑단에서의 유동조건에 따라 예혼합화염 또는 부분 예혼합화염 형태를 띠게 되고 부상화염은 층류 화염전파속도가 최대가 되는 이론공연비선 근처에서 안정화하게 된다.^(3,13,14) 이때 화염안정화 지점(stabilization point)에서의 국소 유동속도는 난류 화염전파속도와 균형을 이룬다. 그러나 수소화염의 경우 층류 화염전파속도는 당량비(ϕ) 1.8에서 최대가 되는 것으로 알려져 있다.⁽¹⁵⁾ Tacke 등⁽⁴⁾에 따르면 주위류(coflow air)를 사용한 수소제트 부상화염에서 화염안정화 지점은 이론공연비선(stoichiometric line)보다 약간 바깥쪽에 위치하며 이는 large-scale turbulent structure의 영향을 받는다고 설명하였다.

Figure 4는 PIV로 촬영한 벡터장과 OH PLIF를 사용하여 촬영한 형광신호사진이다. 여기서 OH 라디칼은 three-body-reaction으로 생성되므로 CH

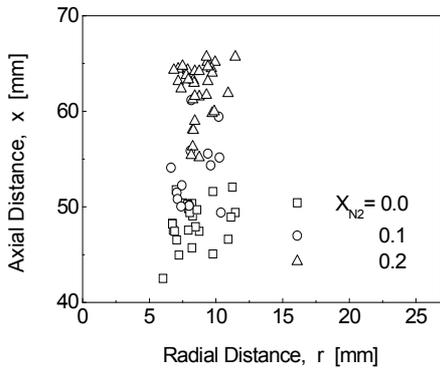


Fig. 5 Location of a stabilization points as varying nitrogen mixture fraction in hydrogen fuel jet

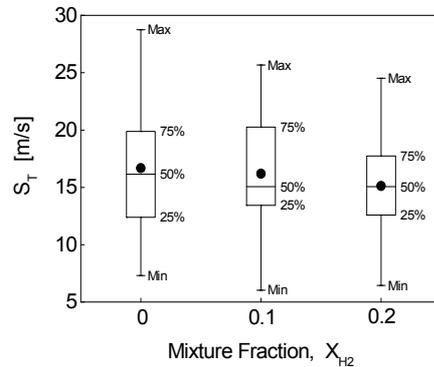


Fig. 6 Box chart showing the distribution of the turbulent burning velocity from $X_{N_2}=0$ to 0.2

라디칼의 two-body-reaction에 비하여 상대적으로 느린 반응을 가지지만 빠른 반응속도를 가지는 수소화염의 특성상 OH 형광신호를 열해리와 반응영역의 지표로 사용하였다. Figure 4에서 화염 밀단은 주위유동에 의해 화염면이 형클어진 것을 볼 수 있으며 후류로 갈수록 반응영역에서의 열 팽창으로 인하여 벡터가 화염바깥쪽으로 기울어짐을 알 수 있다. 본 연구에서는 화염안정화 지점의 위치를 화염밀단 반응영역에서 노즐에 가장 가까운 상류지점으로 정의하였으며, 이때의 문턱값은 OH 형광신호 최고 강도의 20%로 하였다. 또한 화염안정화 지점에서는 국소유동속도(local flow velocity)가 난류 화염전파속도(turbulent flame propagation velocity)와 균형을 이룬다고 가정하였다. Figure 5는 질소희석 농도 증가에 따른 유동장에서의 화염안정화지점의 위치분포를 나타내고 있다. 질소농도를 증가시킬수록 화염안정화 지점의 위치는 후류(down stream)쪽으로 그리고 중심축에서 바깥쪽으로 벗어나고 있다. 이는 Fig. 3에서 나타난 가시화염 결과와도 일치한다. 질소희석이 같은 조건에서의 화염안정화지점의 위치는 화염밀단의 섭동으로 인하여 상하좌우로 흩어져 분포하고 있다. 이는 시간에 따른 주위 유동조건의 변화가 크다는 것을 반증한다.

Figure 6은 위 Fig. 5의 조건에서 각각 화염안정화 지점에서의 난류 화염전파속도를 평균한 결과를 비교한 그림이다. 그림에서 연료에 공급되는 질소 희석가스의 물분율 증가에 따라 평균적으로 화염전파속도가 줄어듦을 알 수 있다.

유사한 실험 장치를 사용한 선행연구결과,⁽¹²⁾를

참고해 볼 때 화염안정화 지점은 고속의 수소 제트에서 벗어나 비교적 저속영역인 동축공기류와의 경계면에서 안정화되지만 동일한 노즐출구 유속조건에서 질소량 증가에 따른 모멘텀 증가와 수소농도 감소로 인하여 난류 화염전파속도가 줄어 화염안정화지점이 보다 후류의 저속영역으로 이동하여 안정화되는 것으로 생각된다.

3.3 화염안정화 기구

화염면에서의 반응(연소)은 내재적 불안정(intrinsic instability), 외부의 교란이나 반응물의 조성성분, 국소당량비 그리고 주위의 압력과 온도 등에 의해서 영향을 받는다.⁽⁷⁾ 내재적 불안정에는 화염면에서의 밀도차(preferential diffusion)와 국소적인 화염면 신장(strain rate, curvature) 이로 인한 화염면에서의 반응율(reaction rate) 변화가 있고, 외부에서 발생하는 교란 요소에는 난류강도(turbulent intensity), 와류(vortex, vorticity), 와류의 크기(integral length scale, Kolmogorov length scale) 등이 있다. 또한 연료나 공기흐름에 불활성화가스를 주입하면 반응물의 조성 비율이 달라져 열확산과 물질확산의 비(Lewis 수 또는 Schmidt 수)가 변화하고 이로 인해 화염전파속도나 화염면 온도가 변화한다.

수소 부상화염의 화염안정화지점 부근의 화염구조를 파악하기 위하여 OH PLIF 기법을 사용하였다. Figure 8은 OH PLIF를 이용하여 촬영한 OH 라디칼의 순간장 사진이며 이는 수소화염의 반응영역을 의미한다. Figure 8 (b), (d)에서 보듯 본 연구에서의 수소 부상화염은 비교적 넓게 퍼

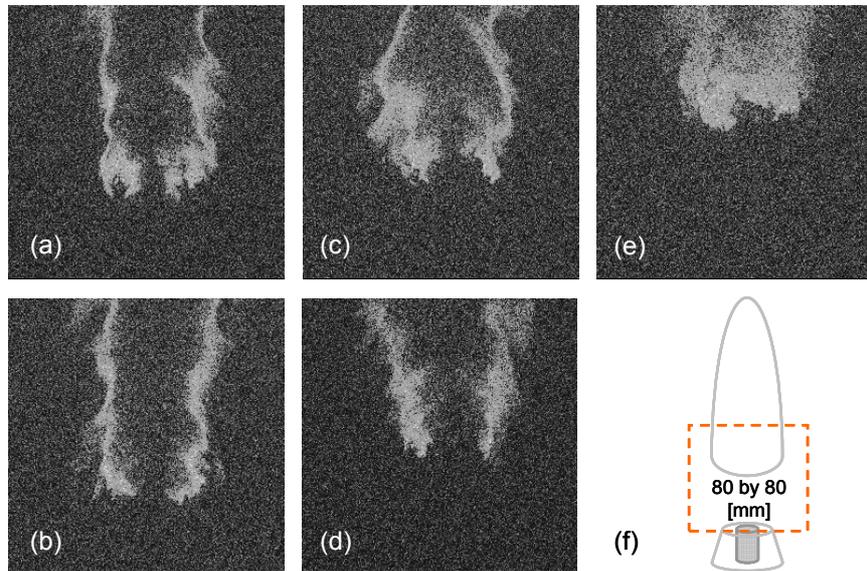


Fig. 8 Two types of flame structures in experimental cases, (a) and (b) for case 1, (c) and (d) for case 2, (e) for case 3: weak edge flames are (b) and (d), while premixed flame are (a), (c), (e)

진 약한 에지화염구조를 가졌다. 에지화염구조는 일차원적인 확산화염면을 가지며 이는 one-dimensional diffusion flamelet으로 설명되어진다. 하지만 수소의 경우 높은 상류로의 확산으로 인해 탄화수소계열의 연료에 비해 비교적 불안정하고 ($Sc < 0.5$) 약한 화염구조를 가지게 된다. 주위류를 사용하지 않은 난류수소 부상화염을 연구한 Tacke 등⁽⁴⁾에 따르면 본 실험에서와 동일한 약한 에지 화염구조를 관찰하였고 화염안정화지점이 이론공연비선상에서 상류로 떨어진 지점에 존재한다고 보고하였다. 이의 원인을 거대와류구조 (large scale eddy structure)에 의한 것으로 추정하였으나 유동장을 가시화하지는 않았다. 본 연구에서는 PIV 기법으로 유동장을 측정하였으나 Fig. 4에서와 같이 화염안정화지점 부근에서의 거대와류구조는 발견하지 못하였다. 그러나 본 실험에서는 Figure 8 (a), (c), (e)와 같이 부상된 난류 수소확산화염이 예혼합화염 구조를 가짐을 관찰하였다. 이는 비교적 넓은 반응면과 화염면이 난류에 의한 헝클어짐으로 특징되어진다. Mizobuchi 등⁽²⁾은 동축공기나 주위류가 없는 부상된 수소난류확산 화염에 대한 수치해석연구(DNS)로 본 실험에서와 유사한 예혼합화염 구조를 예측하였다. 이는 약한 에지화염구조가 난류에 의해 신장되어 일어나는 것으로 설명된다.

부상된 수소난류확산화염의 화염밀단 구조가

수소의 선택적 확산(preferential diffusion)에 의한 약한 에지화염구조를 가지고 난류에 의해 예혼합 화염구조로 전이 되는 과정을 반복한다면 화염안정화지점 부근에서의 연소상태는 부분예혼합화염으로 설명되어 질 수 있다. 즉 화염안정화에 영향을 미치는 인자가 기존의 에지화염 개념에서 설명되어지는 농도구배 및 반응면전후의 밀도차 뿐만아니라 난류강도만 축방향으로의 신장률과 간은 유동장의 영향을 동시에 받는 것으로 이해할 수 있다. 이를 실험적으로 확인하여 보았다.

Figure 8은 난류 화염전파속도와 난류강도(축방향 속도의 섭동)와의 관계를 나타낸 그림이다. 그림에서 난류강도가 증가함에 따라 화염전파속도가 증가함을 확인할 수 있다. 이는 화염안정화 지점에서의 화염전파속도가 난류강도의 영향을 받는다는 하나의 증거이다. 만약 부상된 난류 수소확산화염의 화염밀단에서의 반응영역구조가 에지화염구조를 가지게 된다면 화염전파속도는 전적으로 농도구배나 신장률에 의해 영향을 받게 되므로 Fig. 9에서와 같은 결과는 나올 수 없다. Figure 9에서 질소희석 농도 증가에 따른 화염전파속도와 난류강도의 기울기 차이는 그리 크지 않았다. 또한 난류강도 값이 낮은 영역에서 전체적으로 같은 난류강도 값이라 할지라도 화염전파속도가 위, 아래로 넓게 분포하는 것을 관찰하였는데 이는 에지화염 구조에서 관찰되어지는 flow divergence에 의한

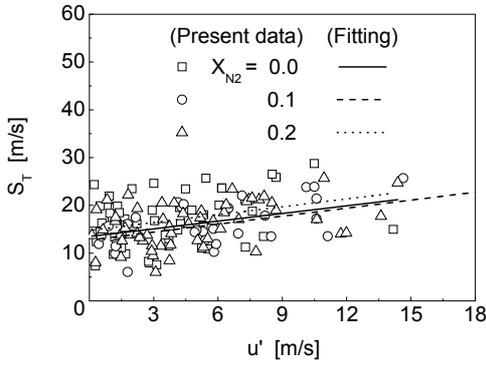


Fig. 9 Experimental approximation of turbulent burning velocity and rms flow velocity fluctuation showing gradient tendency as changing the diluents concentration of nitrogen mole fraction; $S_L=3.1 \text{ m/s}^{(19)}$

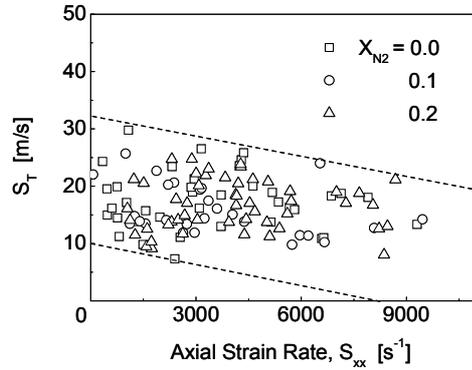


Fig. 10 Propensity of scattered data as results of comparison between turbulent burning velocity and axial strain rate

화염전파속도 변화로 생각되어진다.

예혼합화염에서 난류 화염전파속도에 영향을 주는 인자를 고찰해 보면 wrinkled flame 영역에서는 이론적으로 S_T 는 S_L 과 u' 의 함수로 표현된다. 그러나 난류도가 증가하고 주위의 유동과 혼합기의 조성이 복잡해짐에 따라서 여러 가지 다른 요소들의 영향을 받게 된다. 일반적으로 난류 화염전파속도는 $(u')^{0.5-0.12}$, $Ka^{0.3}$, $Da^{0.3}$, $(Re_T)^{0.5}$ 에 비례하는 것으로 알려져 있다.⁽⁹⁾ (여기서 Re_T 는 국소 레이놀즈 수이다.)

본 연구에서 관찰된 부분 예혼합된 부상화염의 화염안정화지점 부근에서 화염구조를 분석하고 화염면에서의 변화를 이론적으로 설명하기 위하여 아래의 수식을 도입하였다. 화염안정화지점부근에서 반응물이 예혼합되었다고 가정하고 반응물의 질량분율(Y_R) 변화와 물질이동을 식으로 표현하면 다음의 식 (3), (4)와 같다.^(16,17)

$$\frac{\partial Y_R}{\partial t} + V_{fs} \cdot \nabla Y_R = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial Y_R}{\partial t} + u \cdot \nabla Y_R = \frac{1}{\rho} \nabla \cdot (\rho D \nabla Y_R) + \frac{\dot{\omega}}{\rho} \quad (4)$$

여기서 $n(=\nabla Y / |\nabla Y|)$ 은 화염면에 수직 방향의 단위벡터, $\dot{\omega}$ 는 반응율, V_{fs} 는 반응물 속도(u)와 화염면에 수직방향으로 속도증가분(S_d)의 합이다.

식 (3)에서 (4)를 빼면 화염면에 대한 상대속도 (S_d , displacement speed), 식 (5)를 유도할 수 있다.

$$S_d = -\frac{\dot{\omega}}{\rho |\nabla Y_R|} - \frac{\nabla \cdot (\rho D \nabla Y_R)}{\rho |\nabla Y_R|} \quad (5)$$

$$= -\frac{\dot{\omega}}{\rho |\nabla Y_R|} - \frac{n \cdot (\rho D \nabla Y_R)}{\rho |\nabla Y_R|} - D(\nabla \cdot n)$$

where

$$\nabla \cdot (\rho D \nabla Y_R) = n \cdot (\rho D \nabla Y_R) + \rho D \nabla Y_R (\nabla \cdot n)$$

여기서 S_d 의 오른쪽 항은 각각 화염면에서의 반응(reaction), 수직방향 확산(normal diffusion), 수평방향 확산(tangential diffusion)을 나타낸다.

식 (5)에서 보듯 혼합기에 질소희석가스 물분율이 증가하게 되면 반응물 농도(Y_R)와 확산계수 (D), 반응율($\dot{\omega}$, reaction rate) 감소로 기연가스에서 미연가스 방향으로 화염전파속도가 줄어듦을 알 수 있다.

Figure 10은 질소 희석가스의 농도를 달리하였을 때 난류 화염전파속도(S_T)와 축방향 신장률 (S_{xx})의 관계를 나타낸 그림이다. 위 그림에서 나타나 있듯이 신장률이 증가할수록 난류 화염전파속도는 감소되는 것을 볼 수 있다. 그러나 희석가스의 농도 변화에 따른 난류 화염전파속도와 축방향 신장률 사이의 관계는 뚜렷한 경향성을 발견하지 못하였다. 이는 난류 화염전파속도는 화염면에서 신장률에 의해 영향을 받지만 희석가스의 농도는 화염면에서의 신장률에 큰 영향을 주지 못하기 때문인 것으로 생각된다. 다시 말해 축방향 신장률은 화염면이 늘어나는 비율을 증가시켜 연료와 공기의 반응면적을 증가시키는 유동

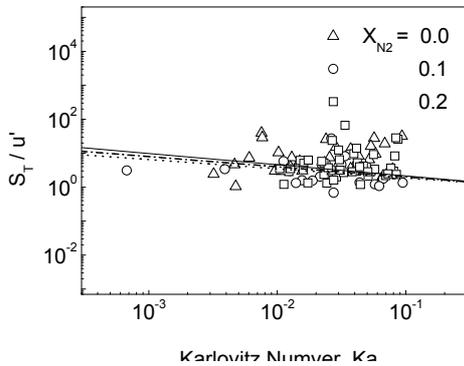


Fig. 11 Experimental correlation among the flame propagation velocity (S_T), Karlovitz number (Ka , ~axial strain rate), and rms flow velocity fluctuation (u')

장 특성이므로 화염면에서의 열 및 물질확산에 영향을 주는 희석가스 농도변화와는 관련성이 약하다는 것을 의미한다.

화염전파속도와 화염면 신장(K , stretch)과의 관계를 이론적으로 알아보기 위해 화염면 $A(t)$ 에서 벡터 G 와 속도 u 를 가지는 유속(flux)을 생각해본다. 이때 화염면에서 유속 변화율은 다음의 식 (6)으로 표현할 수 있다.^(1,17)

$$\frac{d}{dt} \int_{A(t)} G \cdot ndA = \int_{A(t)} \left(\frac{1}{\delta A} \frac{d(\delta A)}{dt} \right) dA \quad (6)$$

where

$$\begin{aligned} \frac{1}{\delta A} \frac{d(\delta A)}{dt} &= -nn : \nabla V_{fs} + \nabla \cdot V_{fs} \\ &= -nn : \nabla u + S_d \nabla \cdot n + \nabla \cdot u \end{aligned}$$

식 (6)에서 화염면 변화율($(1/\delta A)d(\delta A)/dt$)의 오른쪽 항은 각각 화염면에서 수직방향 신장률(axial strain rate, $S_{xx} = \delta u_x / \delta x$)과 수평방향 곡률(curvature), 화염팽창(dilatation)을 의미한다.

화염면은 와류나 반응물의 확산차에 의해 형클어지거나 신장되는데 이때 힘의 성분은 화염면에 수직(normal) 또는 수평(tangential) 방향으로 작용하게 된다. 수직 또는 수평방향으로의 화염면 신장은 속도의 시간에 따른 증가율 성분으로 화염면의 수직방향 신장률과 수평방향 곡률로 나뉜다. 여기서 화염면 신장은 화염면 전파속도에 영향을 미치고 화염면 전파속도는 화염면에서의 확산차로

인한 밀도변화율 및 반응율과 관련을 가지게 된다.⁽¹⁾ 본 연구에서는 화염안정화지점에서의 반경방향(r) 곡률 보다는 축방향(x)으로의 신장 효과가 더욱 큰 것으로 보고 곡률효과를 무시하였다.

Figure 11은 축방향 신장률과 난류강도의 관계를 나타낸 그림이다. 화염면에서 난류도가 증가하면 화염면이 형클어지게 된다. 난류도는 유체의 운동에너지(kinetic energy)로 인하여 발생한 와류(eddy) 또는 와동(vortex)이 유체의 고유성질(물성치)인 점성에 의해 소산(dissipation)되면서 Kolmogorov scale과 같은 보다 작은 와류 또는 와동으로 나누어지는 과정(energy cascade)을 거치게 되고 이는 궁극적으로 혼합기 원자 및 분자, 이온, 라디칼의 운동에너지 증가로 나타나게 된다.⁽¹⁸⁾

난류에서의 연소는 여러 요소들이 복잡하게 영향을 미치고 있기 때문에 아직 난류강도와 신장률과의 상호관계는 이론적으로 밝혀진 바가 없으나 본 연구에서는 실험에 의한 경험식으로 u'/\bar{u} 와 S_{xx} 의 관계가 지수 함수적으로 비례하는 것으로 나타났다. 그러나 Fig. 10에서 보듯 질소 희석가스 농도 증가에 따른 경향성은 관찰되지 않았다. 이는 S_{xx} 와 u'/\bar{u} 가 질소 희석에 의한 Lewis 수 변화보다는 주위의 유동 조건에 의해 더 크게 영향을 받는 것으로 생각된다.

4. 결 론

부상된 수소 난류확산화염에서 질소희석가스 사용에 따른 난류화염전파속도 변화와 화염안정화기구에 대한 연구를 수행하여 다음의 결론을 얻었다.

- (1) 질소 희석가스의 농도를 증가함에 따라 부상화염 높이는 감소하였다.
- (2) 상류로의 수소확산에 의한 약한 예지화염구조가 관찰되었고 이는 주위유동의 난류에 영향을 받아 예혼합화염 구조로 전이되었다.
- (3) 난류화염전파속도는 난류강도에 의해 증가하고, 축방향 신장률에 의해 감소하였다.

후 기

본 연구는 서인천 발전본부 중장기 기술과제 “가스터빈(GE7FA DLN-2.6) 연소기의 연소불안정성 제어기법 개발”의 일환으로 수행 되었으며,

지원에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Candel, S.M. and Poinso, T.J., 1990, "Flame Stretch and the Balance Equation for the Flame Area," *Combust. Sci. Technol.*, Vol. 70, pp. 1~15.
- (2) Mizobuchia, Y., Shinjoa, J., Ogawaa, S. and Takeno, T., 2005, "A Numerical Study on the Formation of Diffusion Flame Islands in a Turbulent Hydrogen Jet Lifted Flame," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 30, pp. 611~619.
- (3) Kalghatgi, G. T., 1984, "Liftoff Heights and Visible Flame Lengths of Vertical Turbulent Jet Diffusion Flames in Still Air," *Combust. Sci. Technol.*, Vol. 41, pp. 17~29.
- (4) Tacke, M. M., Geyer, D., Hassel, E. P. and Janicka, J., 1998, "A Detailed Investigation of the Stabilization Point of Lifted Turbulent Diffusion Flames," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 27, pp. 1157~1165.
- (5) Upatnieks, A., Driscoll, J. F., Rasmussen, C. C. and Ceccio, S. L., 2004, "Liftoff of Turbulent Jet Flames-Assessment of Edge Flame and Other Concepts Using Cinema-PIV," *Combust. Flame*, Vol. 138, pp. 259~272.
- (6) Muniz, L. and Mungal, M. G., 1997, "Instantaneous Flame-Stabilization Velocities in Lifted-Jet Diffusion Flames," *Combust. Flame*, Vol. 111, pp. 16~31.
- (7) Metghalchi, M. and Keck, J.C., 1982, "Burning Velocities of Mixtures of Air with Methanol, Isooctane, and Indolene at High Pressures and Temperatures," *Combust. Flame*, Vol. 48, pp. 191~210.
- (8) Turns, S.R., 2000, "An Introduction to Combustion-Second Edition," McGraw Hill, Nweyork, USA., p. 464.
- (9) Lipatnikov, A. N. and Chomiak, J., 2002, "Turbulent Flame Speed and Thickness: Phenomenology, Evolution, and Application in the Multi-Dimensional Simulations," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 28, pp. 1~74.
- (10) Wu, Y., Al-Rahbi, I.S., Lu, Y. and Kalghatgi, G. T., 2007, "The Stability of Turbulent Hydrogen Jet Flames with Carbon Dioxide and Propane Addition," *Fuel*, Vol. 86, pp. 1840~1848.
- (11) Lee, B.J., Kim, J.S. and Chung, S.H., 1994, "Effect of Dilution on the Liftoff of Non-Premixed Jet Flames," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 25, pp. 1175~1181.
- (12) Jeongseog Oh, Munki Kim, Yeongil Choi and Youngbin Yoon, 2008, "Study of Hydrogen Turbulent Non-premixed Flame Stabilization in Coaxial Air Flow," *Trans. of the KSME B*, Vol. 32, No. 3, pp. 190~197.
- (13) Takahashi, F., Mizomoto, M., Ikai, S. and Futaki, N., 1984, "Lifting Mechanism of Jet Diffusion Flames," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 20, 295~302.
- (14) Han, D. and Mungal, M.G., 2000, "Observations on the Transition from Flame Liftoff to Flame Blowout," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 28, pp. 537~543.
- (15) Lamoureux, N., Djebaili-Chaumeix, N. and Paillard, C.E., 2003, "Laminar Flame Velocity Determination for H₂-Air-He-O₂ Mixtures Using the Spherical Bomb Method," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 27, pp. 385~393.
- (16) Echehki, T. and Chen, J.H., 1999, "Analysis of the Contribution of Curvature to Premixed Flame Propagation," *Combust. Flame*, Vol. 118, pp. 308~311.
- (17) Han, I. and Huh, K.Y., 2008, "Roles of Displacement Speed on Evolution of Flame Surface Density for Different Turbulent Intensities and Lewis Numbers in Turbulent Premixed Combustion," *Combust. Flame*, Vol. 152, pp. 194~205.
- (18) Pope, S.B., 2000, "Turbulent Flows," Cambridge University Press, p. 188.
- (19) Lamoureux, N., Djebaili-Chaumeix, N. and Paillard, C.E., 2003, "Laminar Flame Velocity Determination for H₂-Air-He-CO₂ Mixtures Using the Spherical Bomb Method," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 27, pp. 385~393.