

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2010.34.3.275

수소 난류 확산화염에서의 선회류에 의한 배기배출물 특성

오 정 석*† · 윤 영 빈*

* 서울대학교 기계항공공학부

Characteristics of NOx Emission in a Swirl Flow in Nonpremixed Turbulent Hydrogen Jet with Coaxial Air

Jeongseog Oh*† and Youngbin Yoon*

* School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul Nat'l Univ.

(Received September 8, 2009 ; Revised December 22, 2009 ; Accepted December 22, 2009)

Key Words: EINOx(질소산화물 배출지표), Turbulent hydrogen jet(난류 수소 제트), Swirl flow(선회류), Non-premixed flame(확산화염)

초록: 동축공기 수소 난류 확산화염에서 선회류가 NOx에 미치는 영향을 연구하였다. 공기와의 혼합을 증가시키기 위해 동축공기관에 스월러의 각도를 30, 45, 60, 90°로 바꾸어가며 화염길이와 질소산화물 배출수준을 측정하였다. 연료 속도를 85.7~160.2 m/s, 동축공기 속도는 7.4~14.4 m/s로 조절하였다. 실험을 통해 동축 공기 속도 증가에 따라 화염길이와 질소산화물 배출수준은 증가하였고, 회전류 증가에 따라 감소함을 관찰하였다. EINOx에 미치는 동축공기와 회전류 영향을 상사하기 위하여 far-field 개념의 유효직경($d_{F,eff}$)을 도입하여 동축공기와 선회류에 의한 혼합효과를 표현하였다. 질소산화물 배기배출지표는 화염체류시간($\sim\tau_R^{1/2.8}$)과 전체 신장률($\sim S_G^{1/2.8}$)에 영향을 받았다.

Abstract: The effect of swirl flow on NOx in a nonpremixed turbulent hydrogen jet with coaxial air was studied. The swirl vane angle was varied from 30° to 90°. The fuel jet air velocity and coaxial air velocity were varied in an attached flame region as $u_F=85\sim160\text{m/s}$ and $u_A=7\sim14\text{m/s}$. The objective of the current study was to analyze the characteristics of nitrous oxide emission in a swirl flow and to propose a new parameter for EINOx scaling. The experimental results show that EINOx decreases with the swirl vane angle and increased with flame length. Further, EINOx scaling factors can be determined by considering the effective diameter ($d_{F,eff}$) in a far field concept. The EINOx increased in proportion to the flame residence time ($\sim\tau_R^{1/2.8}$) and the global strain rate ($\sim S_G^{1/2.8}$).

- 기호설명 -

- d_A : 동축공기 노즐 직경
- d_F : 연료 노즐 직경
- $d_{F,eff}$: 연료 노즐 유효직경
- EINOx: 질소산화물 배출지표
- L : 화염길이
- r : 반경방향 거리
- S_G : 전체 신장률
- t_{tip} : 연료 노즐 테두리 두께
- u_A : 동축공기 노즐출구 속도
- u_F : 연료제트 노즐출구 속도
- u_∞ : 주위류 노즐출구 속도
- x : 축방향 거리
- τ_R : 화염체류시간

1. 서 론

수소는 청정연료로서 미래의 친환경적인 에너지원으로 각광받고 있다. 그러나 수소화염은 연소시 높은 온도로 인하여 열적 NOx 생성 메커니즘이 지배적으로 배기배출특성에 영향을 미치고 있다. 수소 확산화염의 경우 연소현상을 이해하기 위한 기초 연구로서 배기배출물에 미치는 인자들에 대한 다양한 연구가 진행되어 왔다.

Peter와 Donnerhack⁽¹⁾에 따르면 질소산화물 배출지수(EINOx)는 연소되는 연료의 질량유량과 반응영역의 크기에 비례한다고 보고하였다. 또한 거대와류 구조가 화염길이(L)와 EINOx와도 상호 관련이 있음을 밝혔다. 실험식은 아래의 식 (1)과 같다.

$$EINO_X \sim \frac{L^3}{\rho_F \times u_F \times d_F^3} \quad (1)$$

† Corresponding Author, jeongs5@snu.ac.kr

여기서 ρ_F 는 20°C, 1기압에서의 수소밀도이다.

Chen과 Driscoll⁽²⁾은 화염길이와 질소산화물 배출가스에 미치는 연료-공기 혼합인자를 연구하여 EINO_x 상사인자로서 연료 제트 레이놀즈 수(Re_F)와 담켈러 수(Da_F)를 제안하였다. 이 때 상사인자와 EINO_x와의 상관관계는 다음의 식 (2)와 같다.

$$\frac{EINO_x}{L^3/(u_F \times d_F^2)} \sim \frac{Re_F^{m-1}}{Da_F^n} \quad (2)$$

여기서 Da 는 $((u_F/d_F)/(S_L/\alpha))^{-1}$ 이고 S_L 은 층류화염 전파속도이며 m 과 n 은 반응에 사용되는 연료에 따라 달라지는 상수로서 동축공기를 사용하지 않은 수소 제트의 경우 $m=1/2, n=1/2$ 이다.

Kim 등⁽³⁻⁵⁾은 동축 공기를 사용한 수소제트에 희석률을 변화한 실험적 연구에서 EINO_x가 전체 신장률($S_G=(u_F-u_A)/d_F$)에 영향을 받음을 보였고 이를 다음의 식 (3)으로 나타내었다.

$$\frac{EINO_x}{L^3/(u_F \times d_F^2)} \sim (u_F - u_A)/d_F \quad (3)$$

여기서 $L^3/(d_F^2 \times u_F)$ 은 화염체류시간(flame residence time, τ_R)이다.

본 연구에서는 선행연구⁽³⁻⁶⁾에서 제안된 동축공기 수소제트 화염에서의 EINO_x 상사인자를 선회류로 확장하여 적용해 보았다. 이때 수소난류화산화염에서 공기와의 혼합을 증가시키기 위하여 동축 공기(coaxial air)에 스윌러(swirler)를 사용하였다. 본 연구의 목적은 화염밀단의 구조변화와 질소산화물 수준을 측정함으로써 수소 화산화염의 배기배출특성을 규명하는 것이다.

2. 실험방법

2.1 실험장치

실험 장치는 연소기와 레이저 및 광학기기, 그리고 영상 취득 장치 등의 세 부분으로 구성되어 있다(Fig. 1). 수소난류화산화염이 형성되는 연소기의 크기는 가로와 세로 및 높이가 200×200×800 mm이고 연소기 가운데에는 내경, $d_f=3.65$ mm, 두께, $t_f=0.21$ mm인 연료 노즐과 지름, $d_A=14.1$ mm의 동축류 노즐이 위치한다. 연료와 동축 공기 노즐 둘레에는 주위류를 분사하기 위한 허니컴이 설치되어 있다. 동축 공기의 특성인 혼합효과를 증가

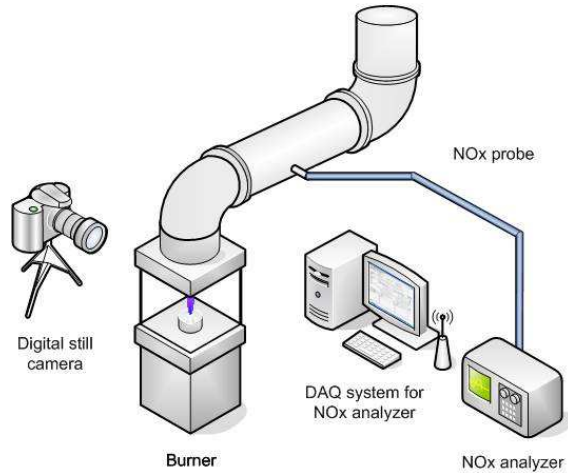


Fig. 1 Schematic diagram of an experimental setup for direct photo and NO_x emission measurements

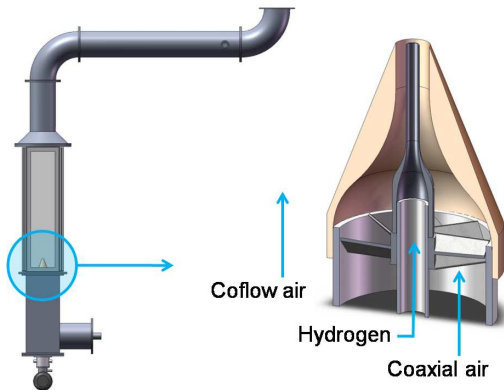


Fig. 2 Burner geometry and nozzle profile

시키기 위하여 동축 공기 공급관에 회전날개(swirl vane)를 장착하였다. 화염길이를 측정하기 위하여 디지털 카메라(Canon 20D mounted with a Canon EF 24-70 mm f/2.8L USM lens)를 사용하여 가시 화염 사진을 촬영하였다. 연소시 생성된 질소산화물은 전자식 NO_x 센서(Mega-720NO_x, Horiba Co., Kyoto, Japan)를 사용하여 측정하였다. 센서의 위치는 주위의 온도가 800 K 이하로 NO가 더 이상 산소와 반응하지 않는 안정된 상태이고 유동의 반경방향으로의 NO_x 농도 구배가 일정하여 위치별 NO_x 측정 오차를 최대한 줄일 수 있는 배기관 후단으로 하였다.

2.2 실험조건

연료 및 동축 공기 속도 변화와 회전날개 각도(swirl vane angle)를 30, 45, 60, 90°로 바꾸어가며 화염길이와 질소산화물 배출수준을 측정하였다.

Table 1 Experimental condition

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Swirl angle	30	45	60	90
u_F (m/s)	85.7 ~ 160.2			
Re_F	2844 ~ 5316			
Fr_F	$0.20 \times 10^6 \sim 0.72 \times 10^6$			
u_A (m/s)	7.4 ~ 14.4			
u_∞ (m/s)	less than 0.1			

여기서 선회각도는 반경방향(r)과 회전날개 사이의 각도(θ)로 정의하였다. 연료 노즐 출구속도(u_F)를 85.7~160.2 m/s, 동축 공기 속도(u_A)는 7.4~14.4 m/s로 조절하였다. 그리고 측정된 NOx 농도를 질소산화물 배기배출지표(Emission Index of NOx)로 표현하기 위하여 연소기로 주입되는 주위류 공기의 양을 조절함으로써 전체 당량비(global equivalence ratio)를 $\phi_G=0.5$ 로 고정하였다.

연료 제트의 레이놀즈 수(Reynolds number)와 프라우드 수(Froude number)는 각각 $Re_F=u_F \times d_F / \nu_F$, $Fr_F=u_F^2 / (d_F \times g)$ 으로 정의하였다. 여기서 $\nu_F(=1.1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s})$ 는 상온에서 수소의 동점성 계수이고 $g(=9.8 \text{ m/s}^2)$ 는 중력가속도를 의미한다. 본 연구에서의 실험조건을 Table 1에 정리하였다.

3. 실험결과

3.1 화염 안정화 지도

연료 속도, 동축 공기 속도 및 선회류의 강도를 조절하여 화염 안정화 지도를 작성하였다(Fig. 3). 유동조건에 따라 부착화염지역(attached flame region), 부상화염지역(lifted flame region), 날림화염지역(blowout region)으로 구분할 수 있었다. 동축 공기의 선회류 강도를 결정하는 회전날개 각도를 조절한 결과 부착화염지역은 넓어졌고 날림화염지역은 좁아졌다. 이는 화염안정성(flame stability)이 화염밑단(flame base)에서의 화염전파 속도(flame propagation velocity)가 연료와 공기 노즐로 분출되는 축방향(x) 유동속도에 크게 영향을 받기 때문으로 생각된다. 즉, 선회각도의 감소가 분출되는 미연가스의 축방향 유동속도를 줄이게 되어 결과적으로 화염이 보다 고속의 유동조건에서도 노즐에 안정적으로 부착될 수 있는 조건이

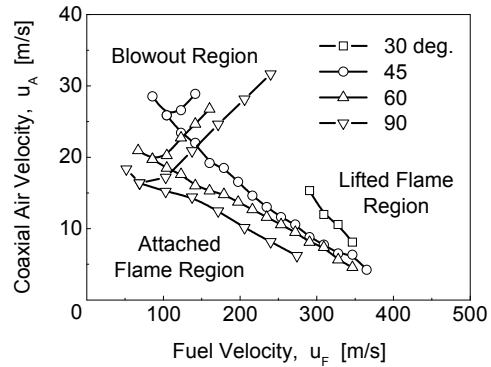


Fig. 3 A stability map shows three divisions; attached flame region, lifted flame region, and blowout region

형성되기 때문이다. 부상화염과 날림화염의 경계면에서도 이와 유사한 결과를 보이는데 이 역시 선회각도 감소에 따른 축방향 유동속도감소가 화염 안정성을 넓히는 요인으로 생각된다.

Figure 4는 $u_F=123 \text{ m/s}$ 이고 $u_A=11 \text{ m/s}$ 인 유동조건에서 촬영한 가시화염 사진이다. 선회각도를 감소시킴에 따라 화염의 길이가 줄어들고 화염의 폭은 증가하는 것을 알 수 있다. 특히 선회각도가 30° 인 경우 노즐 출구에서의 강한 반경방향(r)의 유동으로 인해 화염의 폭이 가장 크게 벌어져 있는 것을 볼 수 있다. 일반적으로 화염길이의 감소는 미연가스가 고온에 노출되는 시간이 짧아 지므로 열적 NOx 메커니즘에 의한 질소산화물 배출 수준이 낮아진다고 알려져 있다.⁽¹⁾ 특히 수소의 경우 단열화염온도가 탄화수소계열의 화합물에 비하여 고온이고 연료내의 탄소원자가 없으므로 프롬프트 NOx 메커니즘이 존재하지 않아 질소산화물 배출에는 열적 NOx가 지배적인 영향력을 끼치게 된다. 또한 수소 확산화염의 경우 화염밑단에서 저온이고 연료가 농후한 영역에서는 NNH 메커니즘에 의해 NOx가 생성되기도 하나 실험적으로 화염밑단에서의 생성되는 NOx 보다는 화염 후단에서 생성되는 NOx가 전체 화염에서 생성되는 NOx 생성량에 지대한 영향력을 미치는 것으로 알려져 있다.^(2,7)

본 연구에서는, Fig. 4(a)~(e)에서 보듯, 단순 제트화염에 동축공기와 선회류를 사용하여 수소 확산화염에 미치는 혼합효과(local premixing effect)와 신장효과(flame stretch effect)가 질소산화물 배출수준에 미치는 영향에 대하여 다루고자 한다. 질소산화물 배출수준이 가시화염 길이와 같은

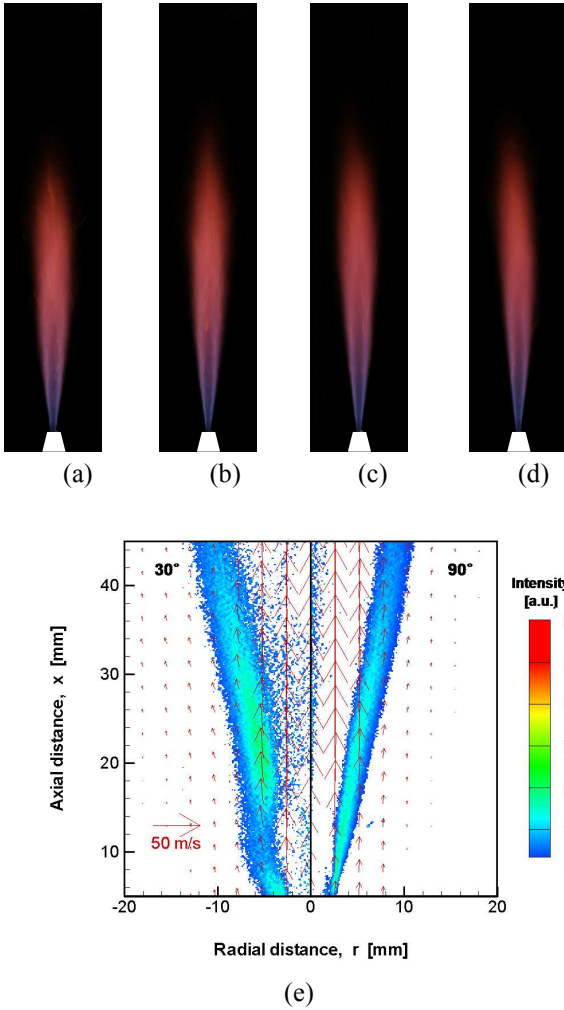


Fig. 4 Visible flame appearance at a swirl vane angle of (a) 30, (b) 45, (c) 60, and (d) 90 degrees on the fixed flow condition of $u_F=123$ m/s and $u_A=11$ m/s. And (e) shows swirl flow visualization under condition of $u_F=123$ m/s and $u_A=11$ m/s in cases 1 (left) and 4 (right): time-averaged flow field near fuel jet nozzle exit was superimposed with the distributions of 2-dimensional (Abel-convoluted) OH^* chemiluminescence

화염의 거시지표와 상호 관련성을 가지는 이유는 배기배출물 생성 과정에서의 화학반응(chemical reaction)이 평형상태(equilibrium chemistry)보다는 유동에 의한 혼합효과, 화염면에서의 복사로 인한 열손실(radiation heat loss), 희석가스(dilution gas)에 의한 광학적 두께(optical thickness) 차이, 또는 반응영역의 두께변화(flame thickness variation) 등에 영향을 받아 비평형상태(non-equilibrium chemistry)에서 이루어지기 때문이다.⁽³⁾

Figure 5는 수소와 공기를 사용한 단순제트에서의 선행연구결과⁽²⁾를 본 유동조건에서의 결과와

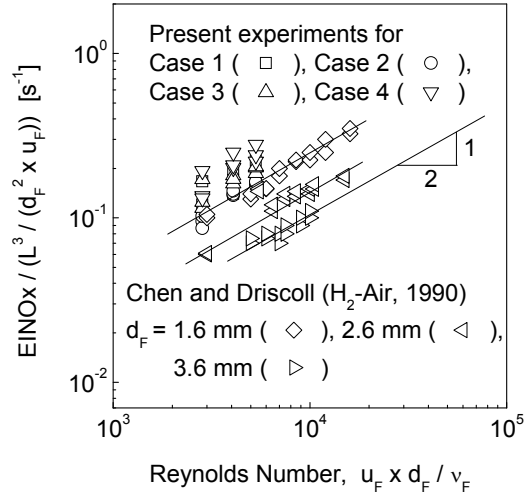


Fig. 5 Comparison of the present study with the results in a simple jet, reported by Chen and Driscoll,⁽²⁾ before applying new parameters to EINOx scaling

비교한 실험결과이다. 선행연구결과에서 보듯 연소로 인한 반응영역에서의 EINOx 생성경향은 연료제트의 레이놀즈 수에 0.5 승으로 비례하는 것을 알 수 있다. 본 실험조건에서도 선행연구와 같은 경향성을 보였으나 선회각도에 따른 EINOx 생성 수준은 다르게 나타났다. 회전 날개 각도가 45~90° 인 경우 각도가 클수록 반응영역의 단위체적 당 EINOx 생성수준이 높게 나타났다. 화염신장이 늘어나게 되면 국소적으로 혼합기의 농도구배가 낮아지게 되고 화학반응률이 떨어지게 되어 질소산화물의 생성률이 떨어지게 된다. 그러나 수소의 경우 화염밀단에서 회전류로 인한 화염신장의 증가는 혼합기의 국소농도 감소가 화염후류에서의 미연가스 유입이 증가하는 효과가 있어 오히려 열적 NOx 생성이 증가하는 결과를 가져오기도 한다. 특히 수소화염의 경우 탄화수소계열의 화염과 달리 열적 NOx가 총 배기배출물 생성에 미치는 영향이 크므로 화염후류에서 연소되는 미연가스의 양은 중요해진다.

3.2 유효직경

Figure 4(a)~(d)에서의 가시화염변화와 Fig. 5에서의 EINOx 배출결과에서 보듯 회전류에 의한 혼합효과와 신장효과는 화염의 거시지표(화염길이와 폭 및 배기배출물 수준)에 변화를 주게 된다. 이러한 회전류의 영향을 EINOx 상사에 적용하기 위하여 유효직경(effective diameter, $d_{F,eff}$)이라

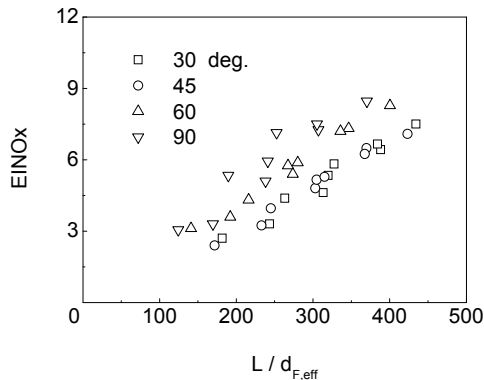


Fig. 6 Tendency of EINOx and the normalized flame length ($L/d_{F,eff}$) as varying swirl vane angles from 30 to 90 degrees

는 개념을 적용하였다.

유효직경은 연료와 동축공기 등의 두 개 이상의 노즐을 개념적으로 하나로 보는 것으로 반응 영역에서의 연료와 공기의 혼합을 관점에 따라 far-field 개념과 near-field 개념으로 나눌 수 있다. 메탄에 수소를 희석한 조건에서의 화염을 실험적으로 연구한 Karbasi와 Wierzba⁽⁸⁾에 따르면 연료주위를 둘러싸며 분출하는 주위류는 외부에서의 추가적인 공기유입을 억제하고 연료 공기 혼합기의 화학양론적 특성(stoichiometric characteristics)을 변화하여 화염구조와 배기배출 특성 그리고 화염안정성에 영향을 준다고 한다. 그러므로 연료와 공기 이중관 구조의 경우 노즐 출구 근처에서의 연료와 공기의 혼합특성이 좋지 않은 경우를 near-field 개념으로 노즐로부터 멀리 떨어져 혼합기가 주위의 공기와 희석되어 예혼합 특성을 지니는 경우를 far-field 개념으로 명명하였다. 즉 near-field 개념의 경우 단순제트(simple jet)와 같은 부착화염의 특성이 강하고 far-field 개념은 연료공기 혼합특성이 좋은 부분 예혼합 특성이 강한 조건에 적용이 가능하다. 본 연구에서는 회전된 동축 공기를 사용하여 화염밀단에서의 혼합효과와 신장효과를 증가하였으므로 혼합기의 상태가 부분 예혼합된 경우에 가깝다고 할 수 있다. 이러한 특성을 고려하여 본 연구에서는 선행연구를 참고하여 EINOx 상사에 혼합효과를 반영한 상사인자로서 far-field 개념의 유효직경을 유도하였다.^(9,10) Far-field 개념을 사용한 연료와 공기 이중동축관의 유효직경 관계식은 아래의 식 (4)와 같다.

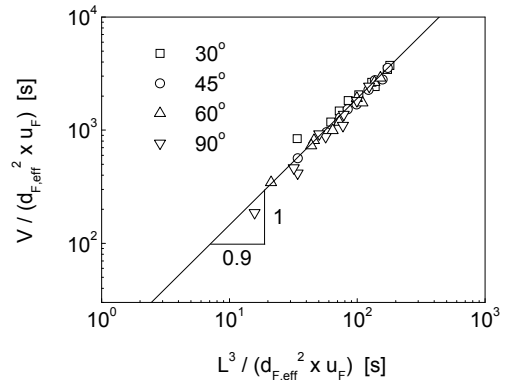


Fig. 7 Comparison of the flame residence time between a parameter based on the flame length and a factor considered with the flame width

$$d_{F,eff} = d_F \left(\frac{\rho_{F,eff}}{\rho_A} \right)^{1/2}$$

where

$$\rho_{F,eff} = \frac{\rho_F u_F^2 \left(\frac{\pi}{4} d_F^2 \right) + \rho_A u_A^2 \left[\frac{\pi}{4} \left(d_A^2 - (d_F + 2 \cdot t_F)^2 \right) \right]}{u_F^2 \left(\frac{\pi}{4} d_F^2 \right) + u_A^2 \left[\frac{\pi}{4} \left(d_A^2 - (d_F + 2 \cdot t_F)^2 \right) \right]} \quad (4)$$

유효직경, 식 (4)은 연료공기 혼합기의 운동량과 질량유량의 비를 무차원화 한 것으로 물리적으로 연료가 주위로부터 공급(air entrainment)되는 공기와 예혼합되어 혼합기의 밀도가 공기 밀도에 근사하게 됨을 의미한다. 특히 연료의 밀도가 작고 공기와의 밀도차가 크면 클수록 측정값이 far-field 개념과 잘 일치하게 된다. 여기서 동축공기의 회전효과를 고려하여 식 (4)에서 u_A 대신 실질적 축방향 속도 성분인 $u_A \times \sin \theta$ 를 사용하였다.

3.3 EINOx 스케일링

연소에 있어서 상사 해를 구하는 이유는 화염 길이나 폭, 질소산화물 배기배출 수준과 같은 화염의 거시지표를 사용하여 관심 있는 대상의 발생원인과 결과에 대한 상호관계를 명확히 하여 이를 예측하는 것에 있다. 이러한 화염의 거시지표를 사용한 상사관계가 가능한 이유는 앞서 3.1에서 언급한 바와 같이 연소시 화학반응이 평형반응(equilibrium chemistry)이 아니라 유동에 의한 난류가 반응영역에 영향을 주게 되어 그 결과 비평형 화학반응(non-equilibrium chemistry)으로 일어나기 때문이다. 만약 화학반응이 평형상태로 일

어한다면 생성물은 주입되는 반응물의 농도에 항상 비례하게 된다. 그러므로 본 연구에서는 선회류를 사용한 동축 공기를 사용하여 여기서 발생하는 혼합효과와 신장효과를 유효직경의 개념에 사용하여 EINO_x와의 상사법칙을 구하고자 한다.

앞서 3.2에서 제안된 far-field 개념의 유효직경을 사용하여 화염길이과 EINO_x와의 상관관계를 Fig. 6에 나타내었다. Figure 6에서 EINO_x는 모든 실험조건에서 유효직경으로 무차원화된 화염길이에 선형적으로 비례하였다. 만약 노즐에서 분출된 혼합기가 축방향으로 진행하면서 반응을 한다고 가정한다면 EINO_x는 반응영역의 길이에 비례하는 관계를 가지게 된다. 그러나 여기서 회전날개 각도에 따른 EINO_x의 분포가 여전히 존재하므로 유효직경 이외의 상사인자에 대한 고려가 필요하다.

앞서 Fig. 4(a)~(e)의 실험결과를 볼 때, 동축 공기의 회전효과에 의해 화염길이 변화와 함께 화염의 폭도 변화하는 것을 관찰 할 수 있다. 선행

연구로서 Chen과 Driscoll⁽²⁾에 따르면 수소를 사용한 단순제트에서는 $L^3 \sim d_F^2 \times u_F$ 의 관계에 있다고 한다. 즉 반응영역의 크기가 화염길이의 삼승에 비례하는 관계를 가진다. 그러나 본 실험조건에서는 Fig. 4에서 보듯 선회류에 의한 가시화염의 변화가 발생하기 때문에 이를 반응영역의 크기로 환산하여 화염길이와의 관련성을 살펴본 결과 Fig. 7과 같은 차이가 발생하였다. 즉 EINO_x의 상사인자로서 화염폭에 대한 고려가 필요함을 알 수 있다. 여기서 새로운 상사인자로서 화염폭(W)을 고려한 화염체류시간(flame residence time, τ_R)을 $V/(d_{F,eff}^2 \times u_F)$ 로 정의하였다. 여기서 $V=W^2 \times L$ 이고 W는 가시화염사진에서 측정된 화염폭이다.

Figure 8(a)는 EINO_x와 새로이 정의된 화염체류시간과의 상관관계를 보여주고 있다. EINO_x는 체류시간의 2/5 승에 지수 함수적으로 비례($EINO_x \sim \tau_R^{1/2.8}$)함을 알 수 있다. 즉 질소산화물 배출수준이 반응물이 화염내에서 체류하는 시간에 영향을 받는다는 것을 알 수 있고 이로서 수소화염에서의 질소산화물은 화염후단에서 주로 발생하는 열적 NO_x 메커니즘에 크게 영향을 받는다는 것을 유추할 수 있다.

본 실험에서 사용된 동축공기(coaxial air)는 축방향으로 분사되는 공기제트로 정의되며 주위류(coflow air)와 비교하였을 때 동축공기의 경우 축방향으로의 거리에 반비례한 관계로 속도가 감소되는 특성($u_A \sim 1/x$)을 지니고 있다.^(11,12) 이러한 동축공기는 연료제트의 축방향 거리에 따른 속도 감소에 영향을 미치며 연료와 공기의 모멘텀 차이로 인해 혼합특성에도 영향을 미쳐 궁극적으로 화염구조와 배기배출물의 차이를 가져온다. 이러한 연료속도와 동축공기 속도와의 차이를 본 연구에서는 전체 신장률(global strain rate, $S_G=(u_F-u_A \times \sin\theta)/d_{F,eff}$)로 정의하였다. Figure 8(b)는 EINO_x와 전체 신장률과의 관계를 나타내고 있다. 선회류를 사용한 수소화염에서는 $EINO_x \sim S_G^{1/2.8}$ 의 관계를 보였다. 이는 연료와 공기 속도차이에 의해 화염이 신장될수록 EINO_x가 많이 발생된다는 것을 의미한다.

Figure 9에 화염체류시간과 전체 신장률과의 관계를 나타내었다. 두 상사인자는 대체적으로 서로 비례하는 관계를 가졌다. Figures 8과 9에서 나타난 EINO_x와 화염체류시간 및 전체 신장률의 관계를 Fig. 10에 나타내었다. 이의 실험식은 아래의 식 (5)와 같다.

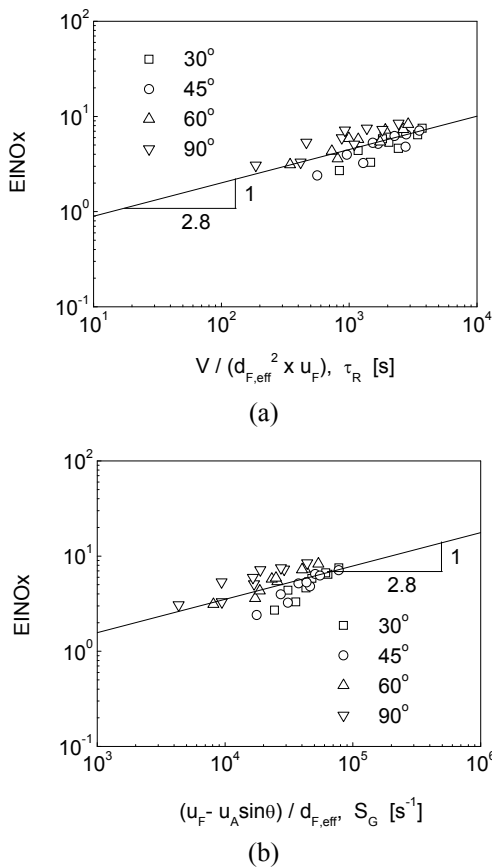


Fig. 8 Scaling of the flame residence time (τ_R) and the global strain rate (S_G) on EINO_x in swirled coaxial air; A trend shows (a) $EINO_x \sim \tau_R^{1/2.8}$ and (b) $EINO_x \sim S_G^{1/2.8}$

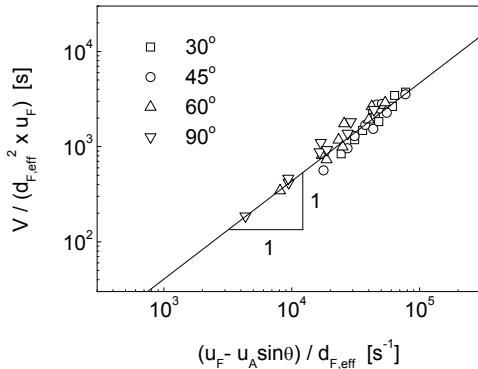


Fig. 9 Flame residence time versus global strain rate

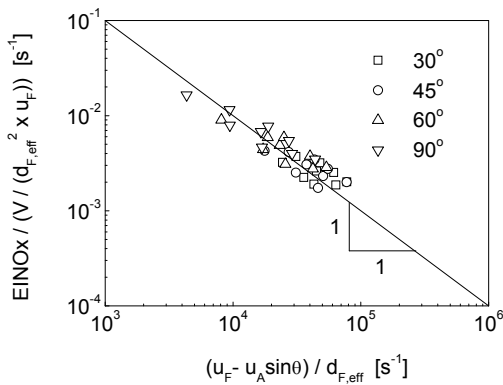


Fig. 10 EINOx normalized by the flame residence time versus the global strain rate

$$\frac{EINO_X}{V/(u_F \times d_{F,eff}^2)} \sim \frac{1}{(u_F - u_A \times \sin\theta)/d_{F,eff}} \quad (5)$$

식 (4)의 물리적 의미는 반응영역에서 단위체적당 발생한 EINOx는 전체 화염 신장률에 반비례함을 뜻한다. 이를 동축공기를 사용하지 않은 단순제트에서의 결과, 식 (2)와 선회류를 사용하지 않은 동축공기 연료제트에서의 결과, 식 (3)과 비교하여 볼 때 실험조건과 본 연구에서 정의된 상사인자 사용에 따른 차이로 생각된다.

4. 결론

수소와 동축 공기를 사용한 난류 확산화염에서 부상특성과 화염안정화 메커니즘을 연구하여 다음의 결론을 얻었다.

(1) 동축 공기 속도 증가에 따라 화염길이와 질소산화물 배출수준은 증가하였고, 회전류 증가에

따라 감소하였다.

(2) EINOx에 미치는 동축 공기와 회전류 영향을 상사하기 위하여 far-field 개념의 유효직경($d_{F,eff}$)을 도입하여 기존 상사식에서 표현하지 못한 동축 공기와 선회류에 의한 혼합효과를 표현하였다.

(3) EINOx는 화염체류시간($\sim \tau_R^{1/2.8}$)과 전체 신장률($\sim S_G^{1/2.8}$)에 영향을 받았다. 이는 배기배출물 생성이 유동에 의한 비평형 화학반응(non-equilibrium chemical reaction)에 지배적인 영향을 받기 때문이다.

후 기

본 연구는 서인천 발전본부 중장기 기술과제 “가스터빈(GE 7FA DLN-2.6) 연소기의 연소불안정성 제어기법 개발”의 일환으로 수행 되었으며, 서울대학교 항공우주신기술연구소의 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Peters, N. and Donnerhack, S., 1981, "Structure and Similarity of Nitric Oxide Production in Turbulent Diffusion Flames," Proceedings of the Combustion Institute, 18, pp. 33~42.
- (2) Chen, R. H. and Driscoll, J. F., 1990, "The Role of the Recirculation Vortex in Improving Fuel-Air Mixing Within Swirling Flames," Proceedings of the Combustion Institute, 23, pp. 281~288.
- (3) Kim, S. H. and Yoon, Y., Jeung, I. S., 2000, "Nitrogen Oxides Emissions in Turbulent Hydrogen Jet Non-Premixed Flames: Effects of Coaxial Air and Flame Radiation," Proceedings of the Combustion Institute, 28, pp. 463~471.
- (4) Kim, S. H., 2001, "A Study on the NOx Emission Characteristics In Turbulent Hydrogen Nonpremixed Flames," Ph.D. thesis, Seoul national university.
- (5) Kim, S. H., Kim, M., Yoon, Y., and Jeung, I. S., 2002, "The Effect of Flame Radiation on the Scaling Of Nitrogen Oxide Emissions In Turbulent Hydrogen Non-Premixed Flames," Proceedings of the Combustion Institute, 29, pp. 1951~1956.
- (6) Kim, M. and Yoon, Y., 2007, "Flame Residence Time

- and Strain Rate in Turbulent Hydrogen Non-Premixed Jet Flames with Coaxial Air," Proceedings of the Combustion Institute, 31, pp. 1609~1616.
- (7) Rørtveit, G.J. and Hustad, J.E., 2002, "Effects of Diluents on NO_x Formation in Hydrogen Counterflow Flames," *Combustion and Flame*, 130, pp. 48~61.
- (8) Karbasi, M. and Wierzbna, I., 1998, "The Effects of Hydrogen Addition on the Stability Limits of Methane Jet Diffusion Flames," *International Journal of Hydrogen Energy*, 23(2), pp. 123~129.
- (9) Dahm, W. and Maymant, A. G., 1990, "Blowout Limits of Turbulent Jet Diffusion Flames For Arbitrary Source Conditions," *AIAA Journal*, 28(7), pp. 1157~1165.
- (10) Sautet, J.C. and Stepowski, D., 1998, "Evolution of the Effective Nozzle Diameter in the Buoyancy Free Development of Turbulent Jets with Variable Density," *Experiments in Fluids*, 25, pp. 280~282.
- (11) Driscoll, J.F., Chen, R.H., and Yoon, Y.B., 1992, "Nitric Oxide Levels of Turbulent Jet Diffusion Flames, Effects of Residence Time And Damköhler Number," *Combustion and Flame*, 88, pp. 37~49.
- (12) Malström, T.G., Kirkpatrick, A.T., Christensen, B., and Knappmiller, K.D., 1997, "Centerline Velocity Decay Measurements in Low-Velocity Axisymmetric Jets," *Journal of Fluid Mechanics*, 246, pp. 363~377.