

## H<sub>2</sub>/CO 합성가스의 비예혼합 난류 제트화염에서 화염 길이와 EINO<sub>x</sub> 스케일링

황정재\* · 손기태\* · Nicolas Bouvet\*\* · 윤영빈\*\*†

### Flame Length and EINO<sub>x</sub> Scaling of Syngas H<sub>2</sub>/CO Turbulent Non-premixed Jet Flames

Jeongjae Hwang, Kitae Sohn, Nicolas Bouvet and Youngbin Yoon

#### ABSTRACT

The flame lengths and NO<sub>x</sub> emission characteristics of syngas H<sub>2</sub>/CO turbulent non-premixed jet flames were investigated. The flame length which is the main parameter governs NO<sub>x</sub> emission was studied for various syngas compositions. The flame length was compared with previous correlation between Froude number and flame height and it shows that they have good agreements. It was confirmed that the turbulent jet flames herein investigated are in the region of buoyancy-momentum transition. NO<sub>x</sub> emission was reduced with increased Reynolds number and CO contents in syngas fuel and with decreased fuel nozzle diameter which is attributed by decreased flame residence time. Previous EINO<sub>x</sub> scaling based on flame residence time of  $L_f^3/(d_f^2 U_f)$  satisfies only the jet flame in momentum-dominated region, not buoyancy-momentum transition region. The simplified flame residence time ( $L_f/U_f$ ) was adopted in modified EINO<sub>x</sub> scaling. The modified scaling satisfies the jet flames not only in momentum-dominated region but in buoyancy-momentum transition region. The scaling is also satisfied with H<sub>2</sub>/CO syngas jet flames.

**Key Words** : Turbulent jet flame, NO<sub>x</sub>, EINO<sub>x</sub> scaling, Flame length, Syngas flame

#### 1. 서론

최근 신재생 에너지에 대한 필요성이 대두되면서 IGCC(Integrated Gasification Combined Cycle)에 대한 관심이 높아지고 있다. IGCC 발전소는 석탄을 가스화한 연료를 사용하는데 이를 통상적으로 합성가스(syngas)라 부른다. 이러한 석탄가스화 합성가스는 주로 H<sub>2</sub>와 CO로 이루어져 있고 그 외에 H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> 등이 아주 작은 비율로 포함되어 있다[1]. 최근 이러한 H<sub>2</sub>와 CO의 합성가스 연구에 대한 수요가 늘어나면서 층류화염전파속도[2,3], 자발화 특성[4,5], chemical kinetics[6,7] 뿐 아니라 NO<sub>x</sub> 배출[8,9] 등의 배기배출물 특성에 대한 연구도 활발히 이루어지고 있다. IGCC 가스터빈 연소기의 경우 합성가스에 포함된 H<sub>2</sub>의 빠른 화염전파속도로 인해 화염의 역화 등의 위험성을 가지는 예혼합 방식의 연소 대신 확산화염 방식의 연소를 대부분 택하고 있다. 그럼에도

불구하고 합성가스를 이용한 난류 제트 확산화염에 대한 연구가 상대적으로 활발하지 않은 실정이다.

지난 수십 년간 질소산화물(NO<sub>x</sub>) 생성의 kinetics에 대한 이해는 여러 연구를 통하여 많은 발전을 이루어왔다. NO<sub>x</sub>의 생성 메커니즘은 크게 세 가지로 분류된다: thermal NO<sub>x</sub>, prompt NO<sub>x</sub>, fuel NO<sub>x</sub>. Thermal NO<sub>x</sub>는 높은 온도에 의한 공기 중의 질소가 산화하는 것으로 extended Zeldovich 메커니즘에 의해 형성되고 prompt NO<sub>x</sub>는 탄화수소계열의 라디칼들이 질소를 때림으로써 생성된 NH, HCN, H<sub>2</sub>CN, CN-등이 산화하면서 생성되며 fuel NO<sub>x</sub>는 질소분을 포함하고 있는 연료가 연소가 일어나는 동안에 자유 라디칼이 되었다가 다시 NO를 형성하면서 생성된다. Thermal NO<sub>x</sub>는 온도에 크게 지배를 받고 수백 ppm까지 발생하는 반면 prompt NO<sub>x</sub>는 온도에 민감하지 않고 10에서 30 ppm 사이에서 발생하는 것으로 보고되고 있다[10]. 그러므로 연소 온도가 높은 가스터빈 등의 실증적인 연소기에서는 thermal NO<sub>x</sub>가 NO<sub>x</sub> 생성의 주요 인자라 할 수 있겠다. Fuel NO<sub>x</sub>는 석탄이나 오일 등의 연료에 질소분을 포함하고 있는 연소에

\* 서울대학교 기계항공공학부

\*\* Fire Research Division, Engineering Laboratory, NIST, USA

† 연락처자, ybyoon@snu.ac.kr

서 중요한 NO<sub>x</sub> 생성 메커니즘이다. 본 연구에서 사용된 H<sub>2</sub>/CO 합성가스는 연료 중에 질소분을 포함하고 있지 않고 탄화수소계열의 라디칼이 생성되지 않는 것으로 판단되므로 주 생성 메커니즘이 thermal NO<sub>x</sub>라 할 수 있겠다. Som 등[11]은 수치적인 연구를 통해 H<sub>2</sub>/CO 합성가스의 NO<sub>x</sub> 생성은 thermal NO<sub>x</sub>가 지배적임을 검증하였다.

난류 제트 확산화염에서의 NO<sub>x</sub> 배출 특성에 대한 연구는 많이 이루어져왔다. 특히 prompt NO<sub>x</sub>를 배제할 수 있는 수소 화염에 대한 연구가 많이 이루어졌다[10,12-14]. Lavoie와 Schlader[12]는 수소-공기의 확산화염에 대한 NO<sub>x</sub> 배출 특성을 연구하였고 NO<sub>x</sub> level은 특성 “jet time”으로 스케일 될 수 있음을 확인하였다. Peters와 Donnerhack[10]은 확률밀도함수와 점근 분석을 이용하여 EINO<sub>x</sub>에 대한 이론적인 식을 도출하였고 다음과 같다:  $EINO_x = c L_f^3 / (d_f^2 U_f)$ . 여기서  $L_f$ 는 화염의 길이,  $d_f$ 는 연료노즐 직경,  $U_f$ 는 연료 출구속도이고  $c$ 는 상수로서 chemical kinetics에 의존한다. Peters는 실험결과와의 비교에서 오차가 발생함을 보고하였고 이러한 오차는 난류의 효과를 고려하지 않았음에 기인할 가능성이 높다고 보고하였다. 이어서 Chen과 Driscoll[13]은 난류의 효과를 고려한 EINO<sub>x</sub> scaling을 수행하였다. 난류의 증가로 인한 화염면의 wrinkling에 의해 증가하는 화염의 면적은 Reynolds 수로 스케일 된다는 것과 두꺼워지는 화염의 두께가 strain rate과 Damkohler 수로 스케일 된다는 것을 고려하여 다음과 같은 scaling 식을 도출하였다.

$$\frac{EINO_x}{(L_f^3/d_f^2 U_f)} \sim \left(\frac{U_f}{d_f}\right)^{1/2} \quad (1)$$

Gabriel 등[14]은 위의 scaling이 대부분의 실험 및 수치적인 연구에서 잘 맞음을 확인하였다. 이어서 Driscoll 등[15]은 복사 냉각, 부력 등을 배제할 수 있는 헬륨 첨가 수소 화염에 대해 유효 제트 직경을 도입하여 scaling을 수행하였다. 모든 연료 조성에 대해 1/2 scaling을 잘 따름을 확인하였지만 한 라인 상에 부합시키지는 못하였다.

본 연구에서는 앞에서 소개된 수소에 대한 이전 연구들을 확장하여 H<sub>2</sub>/CO 합성가스를 연료로 하는 난류 제트 확산화염에서의 EINO<sub>x</sub> scaling을 수행하였다. NO<sub>x</sub> 형성에 지배적으로 영향을 미치는 화염길이의 특성을 살펴본 후 연료조성, Reynolds 수, 연료직경 등에 대한 NO<sub>x</sub> 배출 특성을 알아보았다. 수소 화염에 대한 이전 scaling을 검증하고 수정된 scaling을 제시하였으며 이를 수소 화염 및 합성가스 화염에 적용하여 검증하였다.

## 2. 실험 장치 및 방법

본 연구에 사용된 실험장치가 Fig. 1에 나타나있다. 실험장치는 연소실, 유량 조절부, 가시화장치, NO<sub>x</sub> 측정장치로 구성되어있다. 연소실은 200 × 200 × 800 mm의 직육면체 형태이고 가시화를 위해 네 면에 퀴츠창을 장착하였다. 연소실 바닥면 가운데에 연료 노즐이 장착되어 있고 노즐은 stainless steel로 만들어

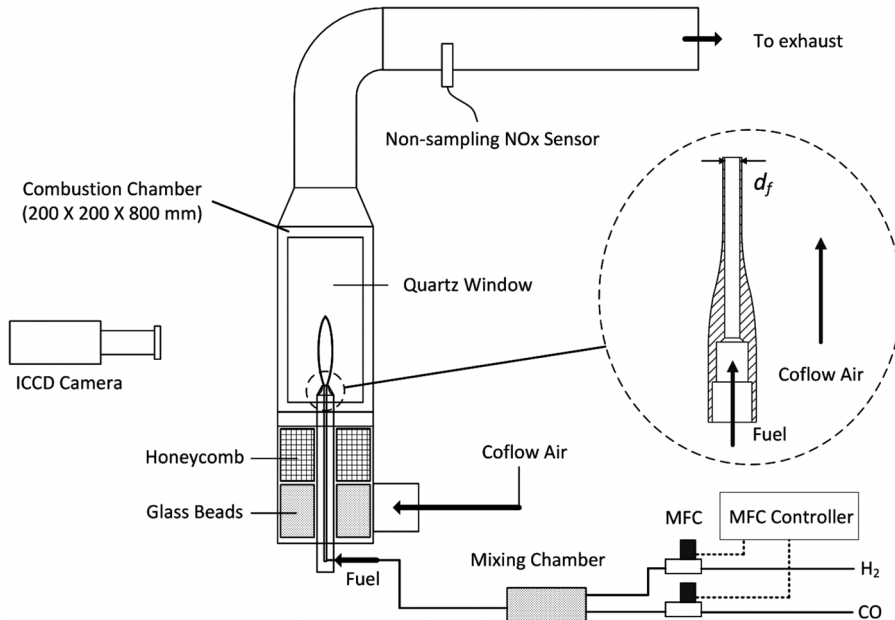


Fig. 1. Schematic of the experimental apparatus and nozzle geometry for non-premixed jet flame.

졌으며 내경( $d_i$ )은 각각 2.5, 3.0, 3.5 mm의 세 종류이다. 주위류(Coflow air)는 유리구슬과 허니컴을 지나 연소실 바닥면에서 연료 노즐 주위로 공급되었는데 이는 글로벌 당량비를 조절하기 위함이다. 주위류의 평균속도는 0.2 m/s 이하로 반응이 일어나는 영역의 유동장에 거의 영향을 미치지 않았다.

연료로 사용된  $H_2$ (순도 99.95%, Air liquid)와 CO(순도 99.95%, Air liquid)는 각각 MFC(Mass Flow Controller)의 제어를 통해 공급하였고 두 연료의 혼합의 증대를 위해 3 mm 직경의 유리구슬로 가득 찬 혼합챔버를 거쳐 공급하였다. 주위류는 교정된 초크 오리피스(choked orifice)를 통해 유량이 조절되었다.

연료는 모두 난류의 조건에서 분사되었는데 모든 노즐 및 연료조성의 조건에서 Reynolds 수를 4,000 이상으로 하였다. 연료의 Reynolds 수는  $Re_f = (U_f \cdot d_i) / \nu_f$ 로 정의되는데  $\nu_f$ 는 연료의 동점성 계수이다. 각 조성에서의 동점성 계수는 상용 코드인 CHEMKIN의 물성치 계산을 이용하여 획득하였다. 합성가스의 조성은 100/0, 75/25, 50/50, 25/75의  $H_2/CO\%$  범위에서 실험을 수행하였다. 본 연구의 실험 조건은 Table 1에 나타나있다. 각 조성에 대한 물성치는 Table 2에 나타나있다.

화염의 형상 및 길이를 측정하기 위해  $OH^*$  자발광 측정을 수행하였다. ICCD 카메라( $512 \times 512$  pixel, PI-MAX, Princeton Instruments Inc.)를 이용하였고 UV-Nikkor( $f = 105$  mm;  $f/4.5$ )의 렌즈에 필터(WG-305, UG-11)를 장착하여 측정하였다. 노출시간은 0.4 msec 이었고 50장의 이미지를 평균하였다. 화염은 최고 밝기신호의 5% 이상으로 정의되었다.  $NO_x$ 는 연소실 후류 배기구에서 측정되었으며 비샘플링 방식의  $NO_x$  Analyzer(MEXA-720, Horiba)를 사용하였다. 노즐로부터 연소실 길이의 3배, 4배, 5배 후류에서 모두 측정해본 결과 모두 같은 값을 가짐을 확인하여 3배 후류에서 측정하였다.

**Table 1.** Experimental conditions

$H_2/CO$ [%Vol]	$d_f$ [mm]	$Re_f$	$\Phi_G$
100/0,	2.5	4000-17000	0.5
75/25,	3.0	4000-17000	
50/50,	3.5	4000-21000	
25/75			

**Table 2.** The properties of  $H_2/CO$  mixture(@300 K, 1 bar)

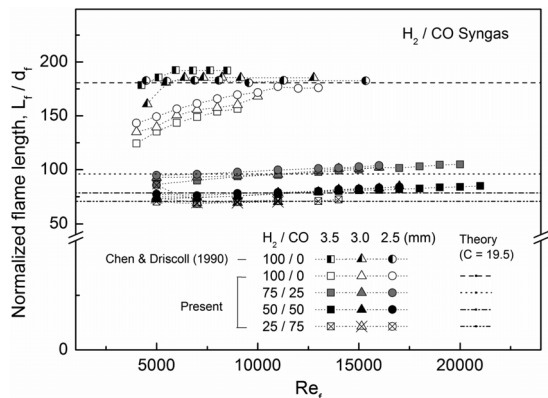
$H_2/CO$ [%Vol]	100/0	75/25	50/50	25/75
$\rho_f$ [ $kg/m^3$ ]	0.082	0.346	0.610	0.874
$\mu_f$ [ $\mu Pa \cdot s$ ]	9.17	15.3	17.0	17.6
$f_{st}$	34.061	8.064	4.574	3.192
$T_{st}$ [K]	2385	2377	2376	2379

확산화염의 경우 연료와 산화제가 잘 섞여서 연소가 되는 것이 아니므로 글로벌 당량비가 1이라고 해서 공급되는 공기가 모두 반응에 참여한다고 볼 수 없다. 그러므로 글로벌 당량비가 1 이하가 되도록 공기를 공급해주어야 반응물이 모두 산화될 수 있다고 생각된다. 주위류의 공급량(당량비의 변화)이 화염 길이와  $NO_x$  생성에 미치는 영향을 알아보았다. 주위류 유량을 높여줄수록(당량비가 낮아질수록) 당량비 0.5까지 화염길이가 어느 정도 증가하고  $NO_x$  발생도 증가하는 결과를 보였다. 당량비 1에서 0.5 구간에서는 공기량이 증가할수록 연료가 좀 더 완벽히 후류에서까지 연소가 되기 때문에 화염길이가 증가한 것으로 생각되고, 그에 따라서 화염체류시간이 길어지므로  $NO_x$  발생도 증가한 것으로 생각된다. 당량비 0.5 이하에서는 공기량이 증가할수록 화염길이는 일정하고  $NO_x$  발생이 약간 줄어들었는데 이 구간에서는 반응물들이 모두 산화되어 공기량에 관계없이 화염길이가 일정하고 과잉 공기에 따른 화염온도의 감소로 인해  $NO_x$  발생량이 약간 줄어드는 것으로 생각된다. 그러므로 본 연구에서는 모든 조건에서 글로벌 당량비를 0.5로 고정하여 실험을 수행하였다.

### 3. 결과 및 논의

#### 3.1. $H_2/CO$ 제트화염의 화염 길이

열적  $NO_x$  생성에서 지배적인 파라미터는 화염체류시간인데 이는 화염의 길이, 연료의 노즐 출구속도 등에 의해 결정된다. 그러므로 화염의 길이가  $NO_x$  scaling에 주요한 파라미터임을 알 수 있다. Fig. 2에 Chen과 Driscoll[13]의 결과와 본 연구의 결과, 그리고 이론식에 의한 값이 나타나있다. 본 연구의 결과를 보면 Reynolds 수가 증가할수록 화염의 길이가 증



**Fig. 2.** Normalized flame lengths with Reynolds number for pure hydrogen and syngas flames: Chen & Driscoll's results, present results, and theoretical values.

함을 알 수 있다. 일반적으로 난류화염이 모멘텀 지배적인 영역에 있다면 Reynolds 수에 무관하게 화염 길이가 일정하다고 알려져 있지만 본 연구의 결과는 Reynolds 수에 따라 증가하는 현상을 보이는데 이는 다음 단락에서 논의하겠다. 합성가스에서 CO의 함유량이 증가함에 따라 화염의 길이가 감소함을 보이는데 이는 화염 길이의 스케일링에서 확인할 수 있다. Chen과 Driscoll은 화염길이의 스케일링을 다음의 이론식과 같이 보고하였다[13].

$$\frac{L_f}{d_f} = C(1+f_{st}) \cdot (\rho_f/\rho_a)^{1/2} \quad (2)$$

$L_f$ 는 화염의 길이,  $f_{st}$ 는 stoichiometric air-fuel mass ratio,  $\rho_f$ 는 연료의 밀도,  $\rho_a$ 는 공기의 밀도이다. Table 2에서 알 수 있듯이 합성가스에서 CO의 함유량이 증가할수록  $f_{st}$ 의 감소율이  $\rho_f^{1/2}$ 의 증가율보다 더 크기 때문에 화염 길이가 감소함을 확인할 수 있다. 위의 식에서 C는 상수로서 모든 구성에 대해 같다고 보고 그 값을 19.5로 하면 Fig. 2의 점선들과 같이 나타날 수 있다. 그래프에서 확인할 수 있듯이 화염 길이가 이론식과 아주 잘 일치함을 확인할 수 있다.

Fig. 2에서 순수 수소화염의 Chen과 Driscoll의 결과와 본 연구의 결과를 비교해보았다. Chen의 결과는 Reynolds 수가 증가함에 따른 화염길이의 변화가 거의 없는데 반해 본 연구의 결과는 화염길이가 어느 정도 증가하다가 Reynolds 수 10,000 이상에서 일정해지는 것을 볼 수 있다. 일반적으로 난류 제트화염은 모멘텀 지배적 영역에서는 Reynolds 수 증가에 따른 화염의 길이는 거의 일정하다고 알려져 있지만 본 연구의 결과는 그렇지 않았다. 위 결과들의 제트화염 특성을 고찰하기 위해 Delichatsios[16]가 보고한 특성 Froude 수와 특성 화염길이의 실험적 관계식과 비교해보았다. Delichatsios는 특성 Froude 수와 화염 길이와의 관계의 실험적 관계식을 다음과 같이 도출하였다.

$$\frac{L_f}{d_f} = \frac{13.5 Fr_f^{2/5}}{(1+0.07 Fr_f^2)^{1/5}} (f_{st}+1)(\rho_f/\rho_\infty)^{1/2} \quad (3)$$

$Fr_f$ 는 특성 Froude 수이고 다음과 같이 표현된다.

$$Fr_f = \frac{U_f}{\left(\frac{\Delta T_{fa}}{T_\infty} g d_f\right)^{1/2} (f_{st}+1)^{3/2} \left(\frac{\rho_f}{\rho_\infty}\right)^{1/4}} \quad (4)$$

$T_\infty$ 는 주위 공기의 온도,  $\Delta T_{fa}$ 는 화염의 modified 평균 온도,  $g$ 는 중력가속도이다. Delichatsios에 따라

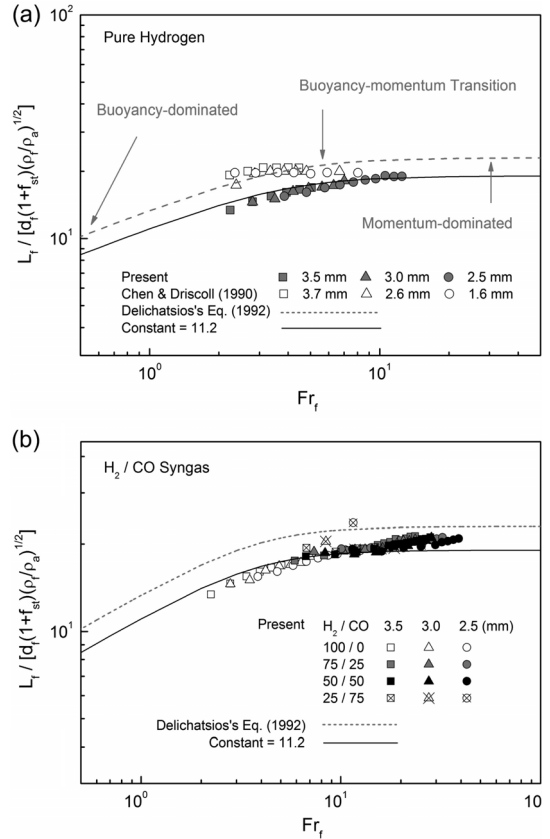


Fig. 3. Characteristic flame length with characteristic Froude number for Delichatsios's empirical correlation, Chen and Driscoll's results, and present results: (a) for pure hydrogen (b) for H<sub>2</sub>/CO syngas.

만 난류 화염은 특성 Froude 수에 따라 화염길이가 증가하는 부력 지배적 영역, Froude 수에 관계없이 화염길이가 일정한 모멘텀 지배적 영역, 그리고 그것들의 천이구간(모멘텀-부력 천이영역)으로 구분된다고 보고하였다. 즉, 난류 화염이라 할지라도 Reynolds 수 혹은 Froude 수에 따라 화염길이가 증가하는 영역이 존재한다. Fig. 3(a)에 Delichatsios의 관계식(점선)과 Chen의 실험결과, 본 연구의 실험결과에 대한 비교가 나타나있다. Chen의 실험 결과는 Froude 수가 모멘텀-부력 천이영역에 존재함에도 불구하고 특성 화염길이가 일정한 모멘텀 지배적인 제트화염의 특성을 보이고 있다. 반면 본 연구의 결과는 Froude 수가 모멘텀-부력 천이구간에 존재하면서 특성 화염 길이는 어느 정도 증가하는 경향을 보이는데 이는 Delichatsios의 관계식과 그 경향성이 일치함을 확인할 수 있다. 하지만 관계식과 본 연구의 결과 간에 스케일의 차이를 보이는데 이는 화염 측정법의 차이에 기인하는 것으로 보인다. 일반적으로 직접촬영

을 통한 화염길이의 측정은 온도나 농도를 기준으로 한 화염길이보다 길다고 알려져 있다. Delichatsios는 관계식에 직접 사진 촬영을 통해 측정한 Kalghatgi[17]의 화염길이 결과를 이용하였고 본 연구에서는  $\text{OH}^*$  자발광을 통해 측정하였다.  $\text{OH}^*$  자발광은 온도나 농도를 기준으로 한 측정에 더 가깝다고 볼 수 있기 때문에 본 연구의 결과가 Delichatsios의 관계식보다 조금 더 작은 것으로 생각된다. 만약 관계식의 상수를 13.5 대신 11.2로 바꾼다면 본 연구의 결과가 관계식과 아주 잘 맞음을 알 수 있다(Fig. 3(a)의 실선). Fig. 3(b)에  $\text{H}_2/\text{CO}$  합성가스 결과에 대한 Delichatsios 관계식의 비교가 나타나 있다. 순수 수소 화염의 경우와 마찬가지로 경향성은 관계식과 유사하지만 스케일의 차이를 보이는데 위와 같이 상수를 13.5에서 11.2로 바꾸면 스케일까지도 잘 일치하는 것을 볼 수 있다(Fig. 3(b)의 실선). Fig. 2를 보면 CO가 증가할수록 Reynolds 수에 따른 화염길이 증가의 증가율이 감소하는 것을 확인할 수 있는데 이는 화염길이가 감소함에 따라 좀 더 모멘텀 지배적인 영역에 가까워졌기 때문으로 생각된다. 이는 Fig. 3(b)에서도 확인할 수 있는데 합성가스 연료에 CO의 함유량이 늘어날수록 좀 더 모멘텀 지배적 영역으로 가까워지는 것을 알 수 있다. 하지만 여전히 Froude 수 증가에 따라 특성 화염길이가 어느 정도 증가하므로 본 연구에서 실험된 합성가스의 제트화염은 모멘텀 영역에 존재하기보다 모멘텀-부력 천이영역에 존재한다고 할 수 있다.

### 3.2. NOx 배출 특성

Fig. 4에 합성가스의 조성, 연료노즐의 직경 및 Reynolds 수에 따른 NOx 배출 특성이 나타나 있다. Reynolds 수가 증가함에 따라 NOx 배출이 감소하는 경향을 보인다. 같은 연료노즐 직경 및 연료 조성에서 Reynolds 수가 증가함에 따라 연료속도가 증가하게 되고 연료속도 증가로 인해 NOx 생성에 크게 영향을 미치는 화염체류시간이 짧아졌기 때문이다. 순수 수소 화염의 경우 Reynolds 수 증가에 따라 화염이 어느 정도 증가하지만 화염길이 증가가 화염체류시간의 증가에 미치는 영향이 연료속도의 증가가 화염체류시간의 감소에 미치는 영향보다 작기 때문에 결과적인 NOx 배출은 감소하게 된다. 노즐 직경이 작을수록 NOx 배출이 감소하는 것을 볼 수 있는데 이는 노즐 직경 감소에 따른 화염 길이의 감소로 인해 화염체류시간이 감소하였기 때문으로 볼 수 있다. Fig. 4(b)에는 각 조건에 대한 EINOx 특성이 나타나 있다. 전체적인 경향은 NOx의 특성과 동일하지만 합성가스 연료의 조성에 따른 스케일이 차이가 있다. 연료 조성에 따른 스케일의 차이가 NOx 배출특성의 경우보다 EINOx의 경우가 훨씬 큰 것을 알 수 있다. 이

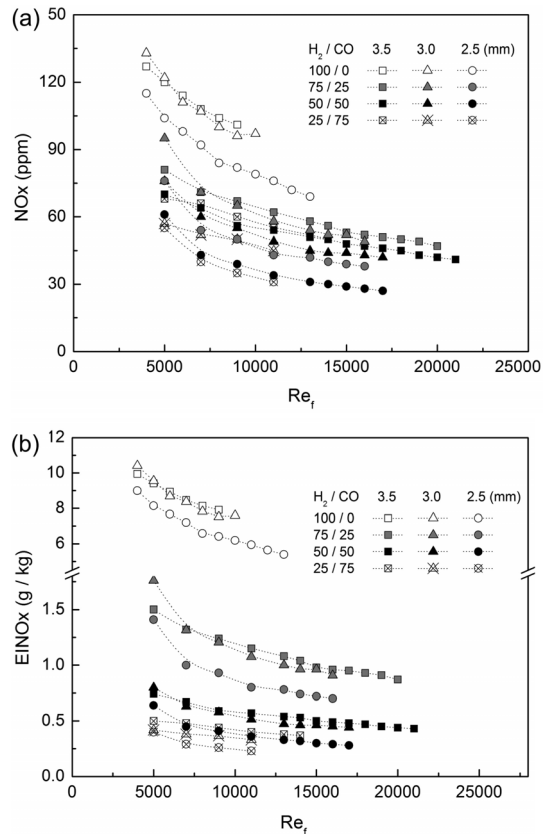


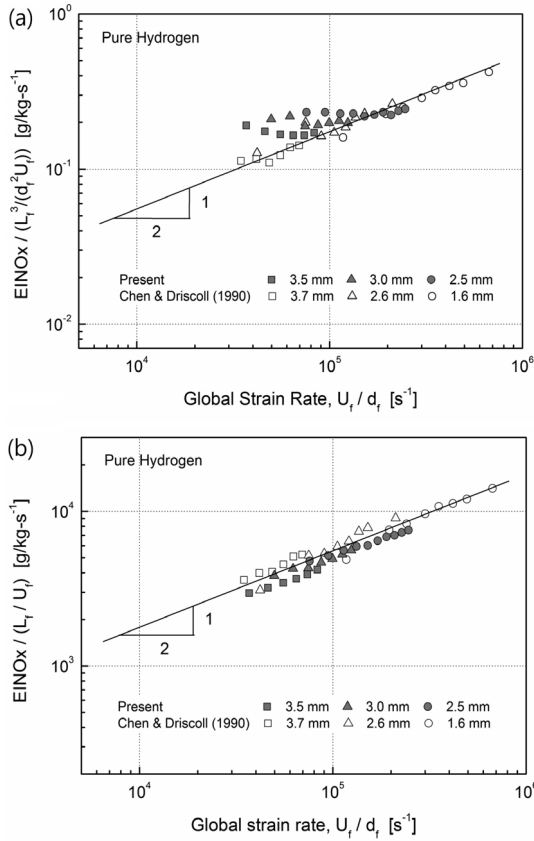
Fig. 4. NOx emission characteristics according to the syngas mixture composition, fuel nozzle diameter, and Reynolds number: (a) NOx in ppm, (b) EINOx.

것은 연료 1 kg당 생성되는 NOx의 gram 수로 정의되는 EINOx의 특성에 기인한다. 밀도가 작은 수소가 1 kg이 연소될 경우가 밀도가 훨씬 큰 합성가스 1 kg이 연소될 경우보다 훨씬 큰 질량의 공기와 반응을 하기 때문이다. 따라서 밀도가 작을수록 EINOx가 큰 경향을 보인다.

### 3.3. EINOx scaling

#### 3.3.1. $\text{H}_2$ 제트화염의 EINOx scaling 평가

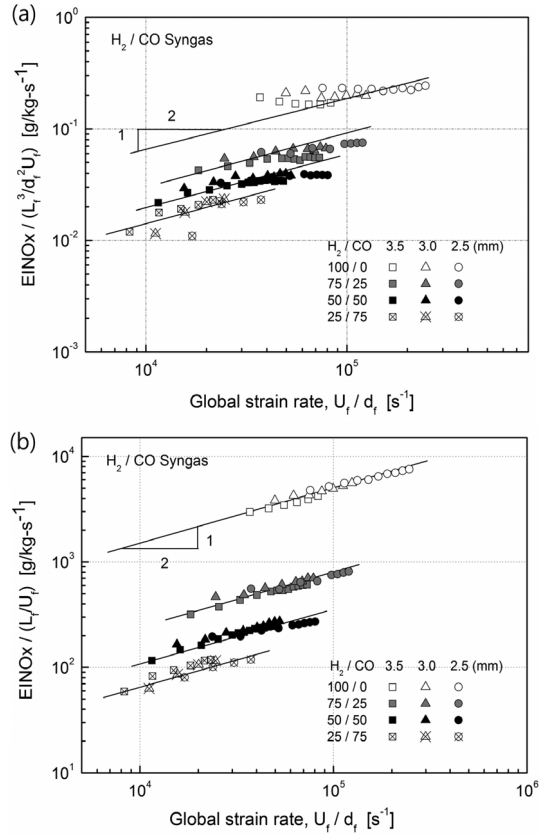
순수 수소화염에서의 Chen과 Driscoll의 EINOx scaling(Eq. (1))을 본 연구의 순수 수소화염에 대한 결과에 검증해보았다. Fig. 5(a)에 그 결과가 나타나 있다. Chen의 실험 결과는 1/2-power scaling을 잘 따르는 반면 본 연구의 결과는 1/2 기울기를 따르지 못하고 기울기가 거의 0에 가까움을 알 수 있다. 단, 연료노즐 2.5 mm의 경우에서 Reynolds 수 10,000 이상의 조건, 즉, 화염의 길이가 일정한 조건에서는 1/2 기울기를 만족하였다. 즉, Chen의 scaling은 연료 속도에 대해서 화염의 길이가 일정한 모멘텀 지배적 영



**Fig. 5.** EINOx normalized by flame residence time versus global strain rate for pure hydrogen jet flame: (a) Chen's scaling based on  $L_f^3/(d_f^2 U_f)$ , (b) modified scaling based on  $L_f/U_f$ .

역의 화염에서는 잘 만족을 하지만 화염의 길이가 변화하는 본 연구의 영역인 모멘텀-부력 천이구간에서는 잘 만족하지 못함을 알 수 있다. 본 연구의 결과는 같은 연료노즐의 조건에서 연료속도가 증가할수록 화염의 길이가 증가함에 따라 화염체류시간으로 정규화 된 EINOx가 거의 일정하다. 반면 화염의 길이가 일정하게 되면 1/2 기울기를 잘 따른다. 즉, 화염길이 증가에 따른 화염체류시간은 화염 길이의 3승에 비례하게 되면서 그 변화가 아주 큰 반면 1/2 기울기를 잘 따르는 화염길이 일정 구간에서는  $L_f/d_f$ 가 일정하기 때문에 화염체류시간이 화염길이에 비례하게 된다. 즉, 화염체류시간은  $L_f/U_f$ 로 나타낼 수 있고 이 때 1/2 기울기를 잘 따른다. 이렇게 간략화 된 화염체류시간을 Chen의 scaling에 도입하여 새로운 scaling을 수행하였고 다음과 같다.

$$\frac{EINOx}{(L_f/U_f)} \sim \left(\frac{U_f}{d_f}\right)^{1/2} \quad (5)$$



**Fig. 6.** EINOx normalized by flame residence time versus global strain rate for H<sub>2</sub>/CO syngas jet flame: (a) Chen's scaling based on  $L_f^3/(d_f^2 U_f)$ , (b) modified scaling based on  $L_f/U_f$ .

Fig. 5(b)에 수정된 scaling에 대한 Chen의 결과와 본 연구의 결과가 나타나있다. Chen의 결과와 본 연구의 결과 모두 1/2-power를 아주 잘 만족함을 볼 수 있다. 즉, 수정된 scaling은 Reynolds 수에 따라 화염 길이가 일정한 모멘텀 지배영역의 제트화염 뿐만 아니라 화염길이 어느 정도 증가하는 모멘텀-부력 천이영역의 제트화염에 대해서도 잘 만족함을 확인하였다.

### 3.3.2. H<sub>2</sub>/CO 합성가스 제트화염의 EINOx scaling

순수 수소화염에서의 1/2-power scaling을 H<sub>2</sub>/CO 합성가스에 대해서 검증해보았다. Fig. 6(a)에 Chen의 scaling(Eq. (1))에 대한 합성가스의 결과가 나타나 있다. 각각의 조성별로 1/2-power를 어느 정도는 만족시키지만 많이 벗어남을 확인하였다. 합성가스 연료의 CO 함유량이 늘어남에 따라 화염체류시간으로 정규화 된 EINOx의 크기가 현저히 작아지는 것을 볼 수 있는데 이는 앞서 설명한 바와 같이 화염길이 작아짐에 따른 화염체류시간의 감소에 비해 높

은 연료 밀도로 인한 EINOx의 감소가 더 크기 때문이다. CO 함유량이 많을수록 1/2 기울기를 조금 더 잘 만족시키는데 이것은 화염길이 감소함에 따라 모멘텀 지배영역에 더 가까워지기 때문이다. 하지만 여전히 1/2 기울기에서 벗어남을 확인할 수 있다. Fig. 6(b)에 앞서 제안한 수정 scaling에 대한 본 연구의 H<sub>2</sub>/CO 합성가스의 검증이 나타나있다. 모든 조성에 대하여 1/2 기울기를 아주 잘 만족하고 있음을 확인할 수 있다. 본 결과에 따르면 간략화 된 화염체류 시간이 기존의 화염체류시간보다 모멘텀 지배영역 뿐 아니라 모멘텀-부력 천이구간의 화염의 EINOx를 scaling 하는데 있어 더 적절한 파라미터라고 할 수 있다. 또한 순수 수소화염 뿐만 아니라 H<sub>2</sub>/CO의 합성가스에 대해서도 아주 잘 만족함을 알 수 있다. 하지만 위의 scaling도 모든 연료조성에 대해 한 라인으로 부합시키지는 못한다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 EINOx의 정의에 기인하는 것으로 생각된다. EINOx는 연료 1 kg이 기준이 되는데 1 kg이 연소될 때 연료의 몰 수 및 반응에 참여하는 공기의 몰 수는 연료의 분자량에 따라 크게 차이가 난다. 특히 분자량 약 2의 H<sub>2</sub>와 분자량 약 28의 CO로 이루어진 합성가스의 경우 그것의 조성에 따라 크게 차이가 난다. 본 연구에서의 scaling은 화염의 구조 및 화염체류시간과 NOx의 배출특성의 상관관계를 나타내는 것이므로 단위 무게의 연료 기준이 아닌 NOx 생성량에 직접적인 영향을 미치는 질소를 포함하고 있는 공기가 기준이 되어야 할 것으로 생각된다. scaling을 모든 조성에 대해 한 라인으로 부합시키기 위해서는 위에서 언급한 내용에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

#### 4. 결론

H<sub>2</sub>/CO 합성가스의 난류 제트 확산화염의 화염 길이 특성 및 NOx 배출 특성 실험을 통하여 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 비교적 작은 Reynolds 수의 난류제트화염이 Reynolds 수의 증가에 따라 화염의 길이가 증가하는 모멘텀-부력 천이구간에 존재하였고 화염 길이에 대한 Delichatsios의 관계식과 잘 일치함을 확인하였다.
- 2) NOx의 발생은 Reynolds 수가 증가할수록, 합성가스 연료에 CO가 증가할수록, 연료노즐 직경이 작을수록 감소한다. 이는 각각 연료속도 증가, 화염길이 감소에 따른 화염체류시간 감소에 기인한다.
- 3) 기존의 화염체류시간  $L_f^3/(d_f^2 U_f)$ 을 기준으로 한 EINOx scaling은 모멘텀 지배영역에서는 1/2 기울기를 잘 만족하였지만 Reynolds 수 증가에 따라 화염의 길이가 증가하는 모멘텀-부력 천이영역에서는 1/2

기울기를 만족하지 못하였다.  $L_f/U_f$ 로 간략화 된 화염체류시간을 도입하여 수정된 scaling은 모멘텀 지배영역 뿐만 아니라 모멘텀-부력 천이영역까지도 1/2 기울기를 잘 만족시켰다. 하지만 모든 연료조성에 대해 한 라인으로 부합하지 못하였고 이를 부합시키기 위해서는 적절한 기준을 제시하여 scaling을 수행할 필요가 있다.

#### 후기

본 연구는 서울대학교 IAAT와 연계된 교육과학기술부의 중견연구자지원사업(2011-0016455)과 지식경제부의 재원으로 KETEP의 지원을 받아 수행한 신재생에너지기술개발사업(No. 2011951010001C)의 연구 결과이며 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- [1] R. M. Jones, N. Z. Shilling, IGCC gas turbines for refinery applications, Schenectady, NY: GE Power Systems, 2003.
- [2] A. K. Das, K. Kumar, C. -J. Sung, Laminar flame speeds of moist syngas mixtures, Combust. Flame, Vol. 158(2), 2011, pp. 345-353.
- [3] N. Bouvet, C. Chauveau, I. Gökalp, F. Halter, Experimental studies of the fundamental flame speeds of syngas (H<sub>2</sub>/CO)/air mixtures, Proc. Combust. Inst., Vol. 33(1), 2011, pp. 913-920.
- [4] F. L. Dryer, M. Chaos, Ignition of syngas/air and hydrogen/air mixtures at low temperatures and high pressures: Experimental data interpretation and kinetic modeling implications, Combust. Flame, Vol. 152(1-2), 2008, pp. 293-299.
- [5] S. M. Walton, X. He, B. T. Zigler, M. S. Wooldridge, An experimental investigation of the ignition properties of hydrogen and carbon monoxide mixtures for syngas turbine applications, Proc. Combust. Inst., Vol. 31(2), 2007, pp. 3147-3154.
- [6] M. Chaos, F. L. Dryer, Syngas combustion kinetics and applications, Combust. Sci. Technol., Vol. 180(6), 2008, pp. 1053-1096.
- [7] P. Saxena, F. A. Williams, Testing a small detailed chemical-kinetic mechanism for the combustion of hydrogen and carbon monoxide, Combust. Flame, Vol. 145(1-2), 2006, pp. 316-323.
- [8] J. Lee, S. Park, Y. Kim, Effects of fuel-side nitrogen dilution on structure and NOx formation of turbulent syngas non-premixed jet flames, Energy Fuels, Vol. 26, 2012, pp. 3304-3315.

- [9] D. E. Giles, S. Som, S. K. Aggarwal, NOx emission characteristics of counterflow syngas diffusion flames with airstream dilution, *Fuel*, Vol. 85, 2006, pp. 1729-1742.
- [10] N. Peters, S. Donnerhack, Structure and similarity of nitric oxide production in turbulent diffusion flames, *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 18, 1981, pp. 33-42.
- [11] S. Som, A. I. Ramirez, J. Hagerdorn, A. Saveliev, S.K. Aggarwal, A numerical and experimental study of counterflow syngas flames at different pressures, *Fuel*, Vol. 87, 2008, pp. 319-334.
- [12] G. A. Lavoie, A. F. Schlader, A scaling study of NO formation in turbulent diffusion flames of hydrogen burning in air, *Combust. Sci. Technol.*, Vol. 8, 1973, pp. 215-224.
- [13] R. -H. Chen, J. F. Driscoll, Nitric oxide levels of jet diffusion flames: Effects of coaxial air and other mixing parameters, *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 23, 1990, pp. 281-288.
- [14] R. Gabriel, J. E. Navedo, R. -H. Chen, Effects of fuel Lewis number on nitric oxide emission of diluted H<sub>2</sub> turbulent jet diffusion flames, *Combust. Flame*, Vol. 121, 2000, pp. 525-534.
- [15] J. F. Driscoll, R. -H. Chen, Y. Yoon, Nitric oxide levels of turbulent jet diffusion flames: Effects of residence time and damkohler number, *Combust. Flame.*, Vol. 88(1), 1992, 37-49.
- [16] M. A. Delichatsios, "Transition from momentum to buoyancy-controlled turbulent jet diffusion flames and flame height relationships", *Combust. Flame.*, Vol. 92, 1993, pp. 349-64.
- [17] G. T. Kalghatgi, Personal communication-Flame height raw data, The 9th International Colloquium on Gas Dynamics of Explosion and Reactive Systems, 1983, Poitiers, France.