

# H<sub>2</sub>/CO 합성가스의 난류 제트 확산화염에서 EINO<sub>x</sub> Scaling

황정재\* · 손기태\* · 김태성\* · 윤영빈\*\*

## EINO<sub>x</sub> scaling of H<sub>2</sub>/CO Syngas Non-premixed Turbulent Jet Flame

Jeongjae Hwang\*, Kitae Sohn\*, Taesung Kim\*, Youngbin Yoon\*\*

### ABSTRACT

EINO<sub>x</sub> scaling for H<sub>2</sub>/CO non-premixed turbulent jet flame was conducted. NO<sub>x</sub> concentration and flame length were measured simultaneously with varying flow conditions. Flame length increases with Reynolds number which means the flames in buoyancy-momentum transition region. We assessed the previous Chen & Driscoll's scaling with present results. However, the scaling cannot satisfy the present results. We proposed new scaling which is addressed the simplified flame residence time. The new scaling satisfies the results of H<sub>2</sub>/CO syngas flame as well as pure hydrogen flames.

**Key Words** : NO<sub>x</sub> emission, Syngas, Turbulent non-premixed flame, EINO<sub>x</sub> Scaling

열적 NO<sub>x</sub>의 생성은 화염온도와 화염체류시간에 지배적으로 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 특히 비예혼합화염은 전체 당량비에 관계없이 반응물의 밀도구배에 상응하는 온도구배를 가져 화염온도를 하나의 값으로 정의할 수 없다. 이러한 특성으로 인해 비예혼합 화염에서의 NO<sub>x</sub> 배출 특성은 화염체류시간으로 대변되는 경향을 보이며, 이에 관하여 많은 연구자들이 화염체류시간과 EINO<sub>x</sub>간의 상관관계에 대해 연구를 진행하여 왔다. Lavoie 등[1]은 수소난류확산화염에서  $d/U_f$ 로 정의된 jet time을 이용하여 EINO<sub>x</sub>의 경향을 예측할 수 있음을 보였으며, Peters [2]는 EINO<sub>x</sub>가  $L/U_f$ 로 정의된 화염체류시간에 비례함을 수치적으로 예측하였다. 하지만 유동이 빨라짐에 따라 예측 값과 실제 측정값의 차이가 증대되었다. Chen 등[3]은 이러한 차이를 난류가 증가함에 따른 화염면 면적 증가에 기인한 것으로 분석하고 Damkohler 수의 영향을 추가적으로 고려하여 다음의 스케일링을 제안하였다.

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

하지만 위의 1/2-power scaling은 hydrocarbon을 이용한 난류확산화염에서는 잘 맞지 않았다. Driscoll 등[4]은 He를 첨가한 수소난류확산화염에서 Thring 등[5]이 제안한 effective jet diamet

er 개념을 도입하여 1/2-power scaling이 성립함을 보였지만 모든 조성에 대해 한 라인으로 부합시키지는 못하였다. 반면, Chen 등[6]은 수치적 해석을 통하여 Damkohler 수에 따른 영향은 화염면의 증가보다는 non-equilibrium chemistry에 따른 영향이라고 보고하였다. 지금까지의 스케일링 연구는 수소를 이용한 난류확산화염에 대한 내용이 대부분이었다. 본 연구에서는 최근 활발히 연구 및 개발이 진행되고 있는 IGCC 연소기에서 사용되는 합성가스(H<sub>2</sub>/CO)를 이용한 난류 제트확산화염의 NO<sub>x</sub> 배출특성을 살펴보았다. 기존의 수소화염에 대한 스케일링 식이 잘 부합되는지 검증하고 다양한 조건에서 더 잘 부합시킬 수 있는 스케일링 식을 고안하였다.

본 연구에서 사용된 실험장치가 Fig. 1에 나타나 있다. 실험장치는 연소실, 유량 조절부, 가시화

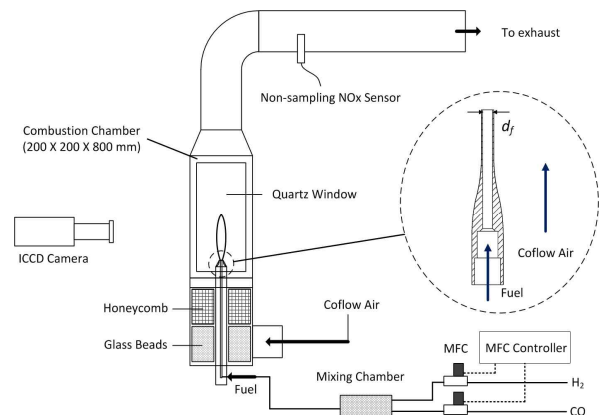


Fig. 1 Experimental apparatus.

\* 서울대학교 기계항공공학부

\*\* 연락처자, [ybyoon@snu.ac.kr](mailto:ybyoon@snu.ac.kr)

TEL : (02)880-1904 FAX : (02)-872-8032

Table 1 Experimental Conditions.

H <sub>2</sub> /CO [%Vol]	d <sub>f</sub> [mm]	Re <sub>f</sub>	Φ <sub>G</sub>
100/0,	2.5	4000 - 17000	0.5
75/25,	3.0	4000 - 17000	
50/50,			
25/75	3.5	4000 - 21000	

장치, NO<sub>x</sub> 측정장치로 구성되어 있다. 연소실은 200 x 200 x 800 mm의 직육면체 형상이고 가시화를 위해 네 면에 퀴즈를 장착하였다. 연소실 바닥면 가운데에 연료 노즐이 장착되어 있고 바닥면으로부터 공기공급을 위한 주위류가 흐른다. 연료로 사용된 수소(H<sub>2</sub>)와 일산화탄소(CO)는 MFC를 통하여 제어되었고, 3 mm 직경의 유리구슬로 가득찬 혼합챔버를 거쳐 공급되었다. 화염길이를 측정하기 위하여 OH\* 자발광 측정을 이용하였다. 자발광은 UV Macro 렌즈와 필터(WG305, UG11)를 장착한 ICCD(PI-MAX) 카메라를 이용하여 측정하였다. NO<sub>x</sub>는 노즐로부터 연소실 길이의 3배 떨어진 후류 배기구에서 측정되었으며 비샘플링 방식의 NO<sub>x</sub> Analyzer(MEXA-720, Horiba)를 사용하였다. 본 연구의 실험조건은 Table 1에 나타나 있다. 4가지의 H<sub>2</sub>/CO 연료조성과 3가지의 연료 노즐 직경에 대해 각각의 연료유동 조건을 바꾸어가며 실험을 수행하였다. 유동조건은 난류를 형성하기 위하여 Reynolds 수를 4000 이상으로 하였고, 전체당량비는 0.5로 고정하여 주위류를 공급하였다. 주위류는 모든 조건에서 0.2 m/s 이하로 화염 특성에 거의 영향을 미치지 않게 하였다.

열적 NO<sub>x</sub> 생성에서 지배적인 파라미터는 화염 체류시간인데 이는 화염의 길이, 연료의 노즐 출구속도 등에 의해 결정된다. 그러므로 화염의 길이가 NO<sub>x</sub> scaling에 주요한 파라미터임을 알 수

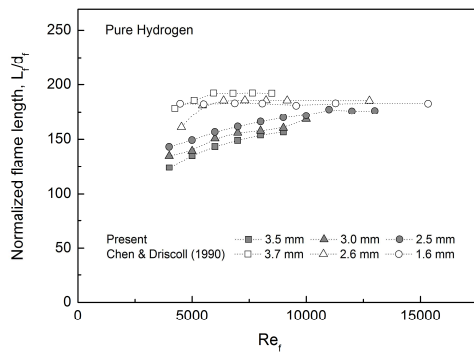


Fig. 2 Normalized flame lengths with Reynolds number for pure hydrogen jet flame.

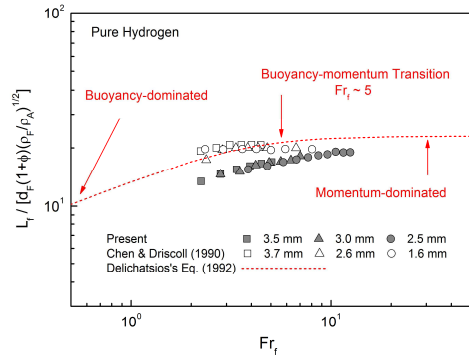


Fig. 3 Characteristic flame lengths according to characteristic Froude number.

있다. 순수 수소화염에 대해 본 연구에서 측정된 결과와 Chen & Driscoll [3]의 결과가 Fig. 2에 나타나 있다. Chen의 결과는 Reynolds 수가 증가함에 따른 화염길이의 변화가 거의 없는데 반해 본 연구의 결과는 화염길이가 어느 정도 증가하다가 Reynolds 수 10000 이상에서 일정해지는 것을 볼 수 있다. 일반적으로 난류화염은 모멘텀 지배적 영역에서는 Reynolds 수 증가에 따른 화염의 길이는 거의 일정하다고 알려져 있지만 본 연구의 결과는 그렇지 않았다. 위 결과들의 제트 화염 특성을 고찰하기 위해 Delichatsios [7]가 보고한 특성 Froude 수와 특성 화염길이의 empirical correlation과 비교해보았다. 이는 Fig. 3에 나타나 있다. Froude 수의 측면에서는 본 연구의 결과와 Chen의 결과 모두 모멘텀-부력 천이구간에 놓여 있음을 알 수 있다. 하지만 특성 화염길이의 측면에서 보면 Chen의 결과는 Froude 수에 대해 특성 화염길이가 일정함을 보이는 반면 본 연구의 결과는 Froude 수에 대해 특성 화염길이가 어느 정도 증가함을 보인다. 이와 같이 본 연구의 결과는 Delichatsios [7]의 관

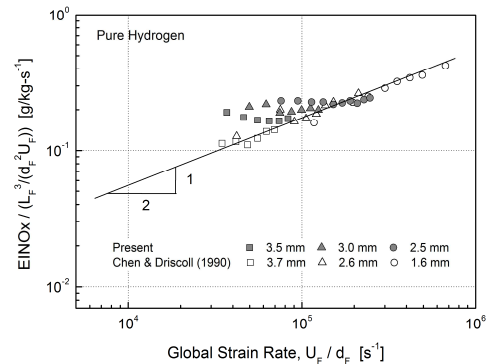


Fig. 4 Assessment of Chen & Driscoll's scaling for pure hydrogen jet flame

계식과 스케일의 차이는 보이지만 경향성은 잘 일치함을 알 수 있다. 스케일의 차이는 촬영 기법의 차이에 기인한 것으로 보인다. 일반적으로 온도 혹은 농도의 기준으로 측정된 화염의 길이는 직접 촬영한 화염의 길이보다 작다고 알려져 있는데 Delichatsios의 관계식은 직접 사진을 기반으로 한 것이고 본 연구의 결과는 OH\* 라디칼의 측정이므로 온도 혹은 농도를 기반으로 한 화염길이와 유사하기 때문이다. 위의 결과로 볼 때, Chen의 결과는 모멘텀 지배적 영역의 화염이라 볼 수 있고, 본 연구의 결과는 모멘텀-부력 천이영역에 있다고 볼 수 있다. 본 연구의 결과인 모멘텀-부력 천이영역에서도 Chen의 스케일링이 잘 부합하는지 검증하였다.

Figure 4에 Chen의 스케일링(식 (1))에 대한 본 연구의 순수 수소화염의 결과가 나타나있다. 본 연구의 데이터는 위의 스케일링과 잘 부합하지 않음을 알 수 있다. 즉, Chen의 스케일링은 모멘텀-부력 천이 구간에서의 난류제트 화염에 대해서는 만족을 시키지 못한다. Chen의 스케일링에서는 화염체류시간이  $L_f^3/U_f d_f^2$ 으로 표현되었는데  $L/d_f$ 가 일정한 모멘텀 지배 영역에서는 위의 화염체류시간은 다시  $L/U_f$ 로 대변될 수 있다. 이러한 간략화된 화염체류시간은 Peters [2]와 Lavoie [1]의 연구에서도 언급되었다. 간략화된 화염체류시간을 도입하여 새로운 스케일링 식을 제안하였고 아래에 나타나있다.

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

Figure 5에 새로운 스케일링에 대한 Chen의 결과와 본 연구의 결과가 나타나있다. 두 결과 모두 새로운 스케일링에 잘 부합됨을 알 수 있다. 즉, 새롭게 제안된 스케일링은 모멘텀 지배 영역에서 뿐만 아니라 모멘텀-부력 천이구간에서도

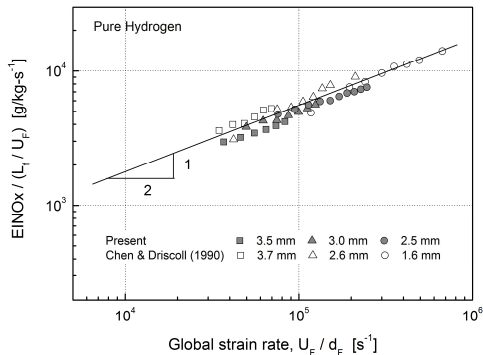


Fig. 5 Assessment of new scaling for pure hydrogen jet flame.

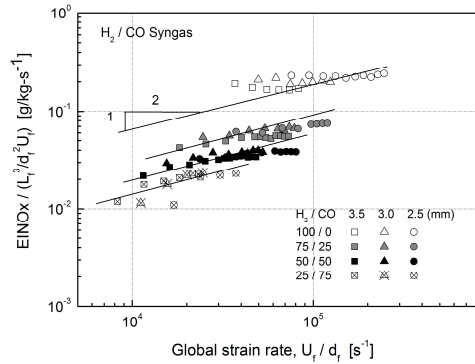


Fig. 6 Assessment of Chen & Driscoll's scaling for H<sub>2</sub>/CO syngas jet flames.

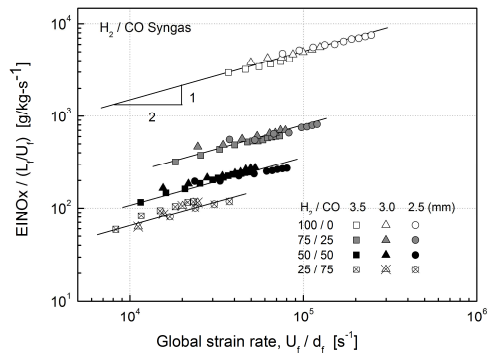


Fig. 7 Assessment of new scaling for H<sub>2</sub>/CO syngas jet flames.

모두 만족한다.

이어서 H<sub>2</sub>/CO 합성가스에 대해 EINO<sub>x</sub> 스케일링 검증을 수행하였다. 각각 조성비가 100/0, 75/25, 50/50, 25/75 H<sub>2</sub>/CO에 대해 수행하였고, Figure 6에 Chen & Driscoll [3]의 스케일링 결과가 나타나있다(식 (1) 참고). CO 농도가 높아 질수록 스케일링이 어느 정도 부합함을 볼 수 있다. 이는 CO 증가에 따른 화염 길이의 감소로 인해 제트화염이 모멘텀 지배 영역에 가까워진 것에 기인한 것으로 생각된다. 즉, Reynolds 수에 따른 화염길이의 변화가 미미해졌기 때문이다. 하지만 여전히 높은 global strain rate에서는 1/2-power scaling을 잘 만족시키지 못함을 볼 수 있다. 이어서 데이터들을 본 연구에서 제안한 새로운 스케일링(식 (2) 참고)과 비교해보았다. Figure 7에서 알 수 있듯이 새롭게 제안된 스케일링은 모든 합성가스의 조성비에 대해 1/2-power scaling을 아주 잘 만족시킨다.

본 연구를 통해 새로이 제안된 스케일링은 모멘텀 지배영역 뿐만 아니라 모멘텀-부력 천이영역에서도 아주 잘 만족함을 보였다.

## 후 기

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

## 참고 문헌

- [1] 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.
- [2] N. Peters, S. Donnerhack, "Structure and similarity of nitric oxide production in turbulent diffusion flames", *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 18, 1981, pp. 33-42.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] M.W. Thring, M.P. Newby, "Combustion length of enclosed turbulent jet flames", *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 4, 1952, pp. 67-74.
- [6] J.Y. Chen, W. Kollmann, "PDF modeling and analysis of thermal NO formation in turbulent nonpremixed hydrogen-air jet flames", *Combust. Flame.*, Vol. 88, 1992, pp. 397-412.
- [7] 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.