동축공기가 있는 H_2/CO 비예혼합 난류 제트화염의 질소산화물 배출 상사식에 대한 실험적 연구

손기태* · 황정재* · Nicolas Bouvet* · 윤영빈*†

An Experimental Study on Scaling of Nitrogen Oxide emissions of H2/CO Non-premixed Turbulent Jet Flame with Coaxial Air

Kitae Sohn*, Jeongjae Hwang*, Nicolas Bouvet*, Youngbin Yoon*†

ABSTRACT

The effect of fuel composition and coaxial air on the nitrogen oxide emission index was studied in a non-premixed turbulent jet flame. Validity of experimental setup and methodology is checked. The NOx emission trend is similar with previous works in hydrogen flame, but it's not well in H_2/CO flame. Normalized EINOx scaling with modified S_G applying near-field concept was conducted. Experimental data don't collapse single correlation curve, but partially same trend is observed in all cases.

Key Words : H2/CO flame, Turbulent non-premixed jet flame, Coaxial air, effective jet diameter, EINOx scaling

익히 알려진 바와 같이 열적 NOx의 생성은 화염온도와 화염체류시간에 크게 영향을 받는다. 화염체류시간은 화염의 구조 특성을 보여주는 대표적인 파라미터로써 NOx 생성과 화염구조사이에는 밀접한 상관관계가 존재한다고 할 수 있다. Chen[1]은 단순제트화염에서 화염체류시간(τ_R)과 Damkholer number(Da), Reynolds number (Re)를 파라미터로 한 EINOx 스케일링을 수행하여 다음의 상관관계식을 제안하였다.

$$EINOX/(L_f^3/d_F^2 U_F) \sim Re^{m-\frac{1}{2}} Da^n \qquad (4)$$

연료가 수소인 경우 m=1/2, n=-1/2으로 화염체류시간으로 평준화된 EINOx는 Da과 반비례관계에 있는 global strain rate(S_G, U_F/d_F)의 1/2 제곱에 선형적으로 비례함을 보였다. 이를 바탕으로 Kim[2]은 변형된 S_G를 파라미터로 하여 동축공기가 있는 수소난류제트화염에서도 1/2 제곱 비례가 성립함을 보였으며, Weiland[3]와 Oh[4]는 각각 유효직경을 도입한 Da와 S_G를 사용하여 스케일링을 수행하였다.

본 실험에서는 수소난류제트화염에서 수행된 화염길이 연구를 바탕으로 하여 다른 조성비를 가진 H2/CO 제트화염에서 연료조성비에 따른 영향을 살펴보고 질소산화물 배출지수에 관한 스케일링을 시도하였다.

실험장치는 Fig 1과 같다. 연소실은 200mm x 200mm의 단면을 가지고 높이가 800mm이며, 배기덕트로 이어진다. 연소실 하단 가운데에 연료노즐이 위치해 있고 연료노즐을 동축공기노즐이 감싸고 있다. 연료노즐과 동축공기노즐 주위로 동축류가 흐를 수 있도록 구성되어 있다. 연료노즐은 3.00mm의 내경과 3.90mm의 외경을 가지고 동축공기는 12.4mm의 내경을 가진다. MFC를 이용하여 연료(수소, 일산화탄소)와 동축공기의 유량을 조절하였으며, 총당량비(ϕ_G)를 0.5로 일정하게 유지하기 위하여 동축류를 공급하였다. 단순 난류 제트화염조건에서 동축류에 의한 화염길이 변화를 측정한 결과, 총당량비 0.5 이하에서는 동축류의 유량(속도)에 관계없이 화염길이가 일정하였다. 따라서 본 실험에서 동축류는 화염장의 유동에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 볼 수 있다.

난류제트화염은 노즐 및 유동 속도 조건에 따라 부착화염, 부상화염, 화염날림 현상이 관측된다. 본 실험은 선행 연구[5]에서 파악된 화염안정화 지도를 바탕으로 부착화염 영역에서만 수행되었다. 실험조건을 표1에 나타내었다. 3가지의 연료(H_2/CO) 조성비(%vol. 100/0, 75/25, 50/50)에서 노즐 출구 레이놀즈수(Re_F)를 4000~15000의 범위로 맞춘 후, 특정 U_A/U_F가 되도록 UA를 맞춰 실험을 수행하였다.

* 서울대학교 기계항공공학부
† 연락저자, ybyoon@snu.ac.kr
TEL : (02)880-1904 FAX : (02)-872-8032

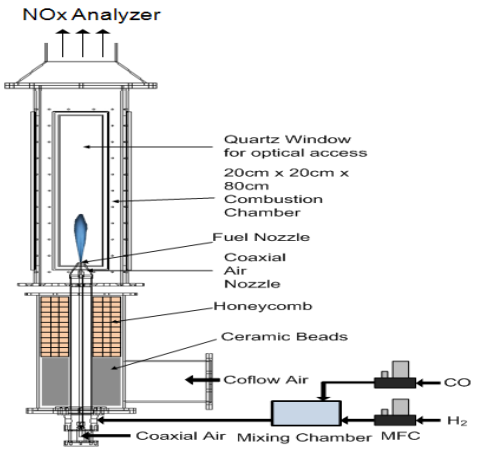

Fig. 1 Schematic diagram of syngas turbulent non-premixed jet flame combustor

Table 1 Experimental condition

	H_2 100%	H_2 75% / CO 25%	H_2 50% / CO 50%
U_f [m/s]	149 - 373	74 - 207	47 - 130
U_a [m/s]	0 - 43	0 - 50	0 - 40
Re	4000 - 10000	5000 - 14000	5000 - 14000
U_a / U_f	0 - 0.309		
U_∞[m/s]	≈0.2		
ϕ_G	0.5		

화염길이는 ICCD Camera(PI-MAX 1K, Princeton Instruments Inc.)를 이용하여 관측한 OH^* 자발광 이미지를 통해 측정하였다. 선행연구[6]에서는 OH^* 자발광 강도 감소구간에서의 변곡점까지의 거리를 화염길이로 정의하였으나, 변곡점을 명시하기가 쉽지 않다. 따라서 가시화염 이미지에서 사용하는 방식과 같이 최대 강도의 문턱치(threshold)를 정하여 이미지를 후처리 한 후에 노즐입구에서 화염끝단까지의 축 방향 거리로 화염길이를 정의하였다. 선행연구[2,4]에 따르면 가시화염 이미지를 이용한 경우에는 문턱치값(5~30%)에 관계없이 화염길이가 일정하다고 한다. 하지만 본 실험에서 사용한 OH^* 자발광 이미지의 경우에는 문턱치값 반비례하여 화염길이가 감소하였다. 따라서 비교를 위해서 선행 연구[1]에서 측정된 단순확산 화염길이를 바탕으로 하여 문턱치를 정하였다.

NOx의 측정은 질소산화물이 더 이상 반응을 하지 않으며 유동이 충분히 발달된 후류에서 비샘플링방식의 질소산화물 분석기(Mega-720NOx, Horiba Co.)를 이용하여 측정하였다.

H_2/CO의 조성비에 관계없이 EINOx는 다음의 식을 통해 구할 수 있다.

$$EINOx = 0.001\chi_{NOx}\left(\frac{MW_{NO}}{MW_F}\right)\left(\frac{1+(4.76/\Phi_G)}{2}\right), [g/kg] \quad (5)$$

배기가스 중의 질소산화물은 대부분이 NO이므로 식(5)에서 NO의 분자량을 사용하였다. 먼저 U_A/U_F 및 연료조성 따른 NOx 생성량의 변화 추이를 살펴보았다. 관측값(ppm)은 실험환경에 직접적으로 영향을 받기 때문에 EINOx와는 다른 현상론적 의미를 가진다.

1. U_A/U_F가 증가할수록 NOx가 감소한다. 이는 화염길이의 감소로 인해 τ_R이 감소하였기 때문이다.
2. Re_F가 증가할수록 NOx가 감소한다. 이는 동일한 화염길이에서 연료속도의 증가로 인해 τ_R이 감소하였기 때문이다.
3. 높은 U_A/U_F에서는 연료 조성과 U_A/U_F에 둔감하다. 이는 화염길이의 변화가 크지 않기 때문이며 H_2/CO 화염에서도 열적 NOx가 지배적임을 알 수 있다.

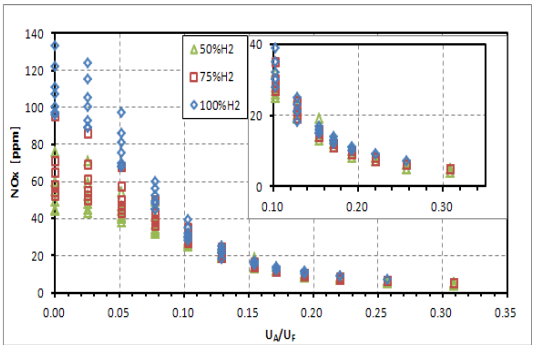

Fig. 2 Measured NOx versus U_A/U_F

다음으로 EINOx 스케일링을 수행하였다. 이전 연구와의 비교를 위해 Kim의 스케일링을 적용시켜 Fig. 3에 나타내었다. 화염체류시간에 적용된 화염의 체적은 화염길이의 세제곱으로 정의하였고, 화염길이는 U_A/U_F별 평균 화염길이를 적용하였다. 100% H2의 경우에는 기존의 스케일링을 잘 따르지만 CO가 함유된 경우에는 기존의 스케일링과는 거리가 멀다. 다만 확인할 수 있는 점은 첫째로 각 연료별로 동일한 U_A/U_F의 곡선을 따라서는 1/2 제곱 비례를 하고 있으며, 둘째로 U_A/U_F=0.3 근처에서 경향이 달라지는 움직임을 보이고 있다는 것이다.

Kim[2]의 S_G는 수소난류제트화염에서 유도된 파라미터이므로 CO가 함유되었을 때는 다른 추세를 보이는 것은 당연한 결과이다.

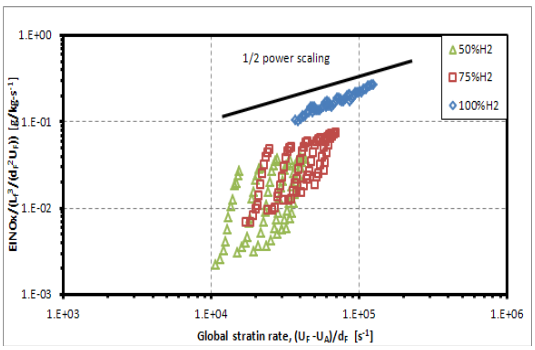

Fig. 3 Comparisons of normalized EINOx with previous work's scaling

이번에는 Oh[4]와 같이 유효직경을 도입한 S_G를 이용하여 스케일링을 수행하였다. Oh는 far-field concept의 유효직경을 도입하였지만, 본 실험에서는 화염길이의 추세와 가장 부합되는 near-field concept[5]의 유효직경을 도입하였다.

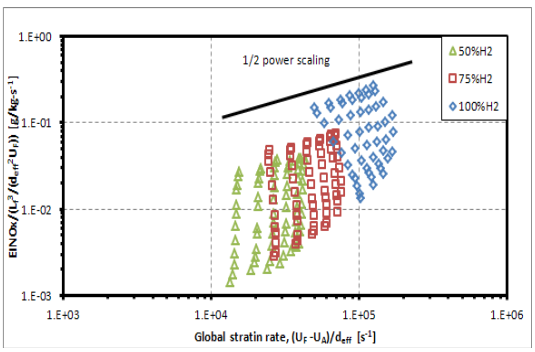

Fig. 4 normalized EINOx versus the global strain rate applied near-field concept

Fig. 4과 같이 normalized EINOx는 U_A/U_F와 조성비에 영향을 받기 때문에 τ_R과 S_G만으로는 적절한 상관관계를 찾기가 불가능하다. 또한 변형된 S_G는 U_A/U_F의 영향을 포함하고는 있지만 특성을 정확하게 보여주지는 못했다. 이러한 결과는 Chen[1]이 제안한 식(4)를 통해 예상할 수 있다. m, n은 제트의 연료에 따라 달라진다. 즉, m, n은 연료와 동축공기의 비율(U_A/U_F)과 H2/CO의 조성비(100/0, 75/25, 50/50)에 따라 다른 값을 나타내므로 단순수소난류화염에서와 같이 Re영향을 무시할 수 없으며, n의 값도 1/2이 아닌 다른 값을 가질 수 있다. 다만 고무적인 것은 모든 조성비에서 동일한 U_A/U_F을 따라 1/2제곱 비례 법칙 따른다는 점이다. 이는 조성비에 따라 적절한 m을 구한다면 적어도 단순화염제트의 경우에 하나의 라인에 데이터가 모두 부합될 수 있음을 보여준다.

후 기

본 연구는 서울대학교 IAAT와 연계된 교육과학기술부의 중견연구자지원사업(0498-20110009)과 지식경제부의 재원으로 KETEP의 지원을 받아 수행한 신재생에너지기술개발사업(0420-20110006)의 연구 결과이며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

[1] R.H. Chen, J.F. Driscoll, 1990, Nitric oxide levels of jet diffusion flames: effects of coaxial air and other mixing parameters, Proc Combust Inst, Vol.23, pp. 281-288

[2] S.H. Kim, Y. Yoon, I.-S. Jeung, 2000, Nitrogen oxides emissions in turbulent hydrogen jet non-premixed flames: Effects of coaxial air and flame radiation, Proc Combust Inst, Vol.28, pp. 463-471

[3] N. Weiland, R. H. Chen, Effects of coaxial air on nitrogen-diluted hydrogen jet diffusion flame length and NOx emission, 2010, Proc Combust Inst, Vol.33, pp. 2983-2989

[4] J. Oh, J. Hwang, Y. Yoon, 2010, EINOx scaling in a non-premixed turbulent hydrogen jet with swirled coaxial air, Int J Hydrogen Energy Vol.35, pp. 2310-2328

[5] 황정재, Nicolas Bouvet, 윤영빈, 2011, 동축공기 조건에서 H_2 /CO 난류 제트 확산화염의 화염길이, KOSCO SYMPOSIUM 논문집, pp. 271-274

[6] M. Ditaranto, J.C. Sautet, J.M. Samaniego, 2001, Structural aspects of coaxial oxy-fuel flames, Experiments in Fluids, Vol.30, pp. 253-261