

< 기술논문 >

메탄 산소 확산화염에서 유속 변화에 따른 연소특성

김호근[†] · 이상민^{*} · 안국영^{*} · 김용모^{**}
(2005년 3월 25일 접수, 2005년 9월 26일 심사완료)

Combustion Characteristics for Varying Flow Velocity on Methane/Oxygen Diffusion Flames

Ho-Keun Kim, Sang-Min Lee, Kook-Young Ahn and Yong-Mo Kim

Key Words: Oxy-Fuel Combustion(순산소 연소), Flame Length(화염길이), Entrainment Rate(유입량)

Abstract

The combustion characteristics of methane oxygen diffusion flames have been investigated to give basic information for designing industrial oxyfuel combustors. NOx reduction has become one of the most determining factors in the combustor design since the small amount of nitrogen is included from the current low cost oxygen production process. Flame lengths decreased with increasing fuel or oxygen velocity because of the enhancement of mixing effect. Correlation equation between flame length and turbulent kinetic energy was proposed. NOx concentration was reduced with increasing fuel or oxygen velocity because of the enhanced entrainment of the product gas into flame zone as well as the reduction of residence time in combustion zone.

기호설명

L^* : 무차원 화염길이, f_s : 이론 공연비
 L_f : 화염 길이, d_f : 연료직경
 d_o : 산화제 직경, ρ_f : 연료 밀도
 ρ_∞ : 산화제 밀도, U_f : 연료 유속
 U_o : 산화제 유속, ΔT_f : 단열화염온도차
 T_∞ : 산화제온도

1. 서 론

대기오염의 정도가 심각해지면서 세계 각국은

자국의 환경을 보호하기위한 환경규제조치를 강화하고 그에 따른 수입물품에 대한 규제 또한 강력하게 추진하고 있다. 이러한 환경규제조치의 강화와 더불어 화석에너지고갈에 대비하기 위하여 저배출, 고효율의 연소시스템 개발에 박차를 가하고 있다.

연소현상에서 주로 배출되는 대기오염물질로 NOx, SOx, CO, 및 CO2 등이 있으며, 현재까지 연소를 최대한 제어하여 대기오염물질을 줄이기 위한 노력이 한창이다.

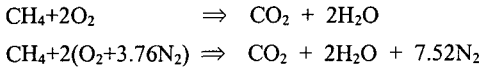
특히 산화제로 공기대신 산소를 사용하는 순산소 연소는 시스템의 열효율을 상승시키고 배출물 저감이 가능하며 이론적으로 NOx 배출 제어가 가능하게 되어 신 연소기술로 각광받고 있다. 또한 2005년 2월 기후변화협약이 발효됨으로써 배가스에서 CO2 처리가 용이한 순 산소 연소의 중요성이 점차 커지고 있다.

다음은 이론당량비로 반응할 때 순 산소 연소인 경우와 공기연소인 경우의 반응식을 나타낸다.

[†] 책임저자, 회원, 한양대학교 대학원
E-mail : kimhokeun@hanmail.net
TEL : (042)868-7392 FAX : (042)868-7284

^{*} 회원, 한국기계연구원 대기환경그룹

^{**} 회원, 한양대학교 기계공학부



위의 반응식을 통해서 알 수 있듯이 순 산소 연소는 공기 중의 N₂ 성분이 공급되지 않고 산소만 공급되므로 질소의 불필요한 가열로 인한 열손실을 줄일 수 있어 그만큼 열효율 상승을 가져오게 된다. 또한 N₂가 공급되지 않으므로 NO_x 발생을 미연에 방지하여 NO_x 배출을 제어할 수 있다. 순 산소 연소인 경우 출구에서 배가스 성분이 CO₂와 H₂O 로만 구성되기 때문에 온실가스로 알려진 CO₂ 가스를 간단한 냉각시스템을 이용하여 수분을 제거함으로써 쉽게 CO₂를 추출할 수 있게 되는 장점을 가지고 있다.⁽¹⁻²⁾

Table 1 은 산화제로 각각 공기와 산소를 사용했을 때 연소특성을 도표화 한 것이다. Table 1에서 보다시피 순 산소 연소를 하게 되면 가연한계의 확장, 화염전파속도의 증가, 단열화염온도의 증가로 인해 화염의 안정성 및 열전달 효율이 커질 것으로 예측할 수 있다. 그러나 이러한 장점들에도 불구하고 순 산소 연소기술은 산소를 제조하는 비용 때문에 이제까지 고온을 필요로 하는 유리용해로 등에 제한적으로 적용되어 왔다. 하지만 최근 들어 산소제조기술의 발달과 함께 제조단가가 떨어지면서 점차 경제성을 갖추어 가고 있는 반면 저비용 산소제조과정에서 소량의 N₂(3~5%)가 포함되거나 대기 공기가 연소로내로 침투하게 되어 고온의 산소화염조건에서 소량의 질소에도 다량의 NO_x가 발생하는 문제점도 지적되고 있다.⁽³⁾

최근 순 산소 연소가 주목을 받으면서 제트 확산화염에서의 화염길이 특성,⁽⁴⁾ 이산화탄소 재순환이 순 산소 난류제트 확산화염에 미치는 영

Table 1 Comparison between air-fuel combustion and oxy-fuel combustion

	air-fuel	oxy-fuel
Flammability Limit	7-15 %	5-50 %
Laminar Burning Velocity [cm/s]	30	390
Adiabatic Flame Temperature [K]	2200	3050
Flue Gas Volume	3.5	1

향,⁽⁵⁾ 산소부화연소에서 CO₂ 첨가에 대한 연소 특성,⁽⁶⁾ 연소용 공기 중 N₂의 CO₂ 대체에 대한 연소특성 해석⁽⁷⁾ 등 많은 연구가 진행되고 있으나 아직까지 실험 및 해석 자료가 부족한 상황이다.

본 연구에서는 메탄/산소 화염 실험을 통해 순 산소 연소기의 설계 기본조건을 도출하고자 하였다. 유동조건 변화에 대한 화염계측 및 배가스 측정 실험을 수행하였고, 산화제 속도와 화염길이에 대한 상관관계식을 제안하였다.

2. 실험 장치 및 방법

메탄 산소 확산화염에서 유속 변화에 따른 화염특성을 실험적으로 확인하기 위하여 Fig. 1과 같이 실험 장치를 구성하였다. 실험장치는 유량공급부, 연소기 및 연소실, 배가스 농도 측정부로 구성된다.

연료인 메탄(>99.9%), 산화제인 산소(>99.9%), 질소는 각각 질량유량계(Mass Flow Controller, BROOKS)를 사용하여 공급하였다. 연료 유량은 50 lpm(연료 발열량 기준: 30kW)이며 산소 유량은 110 lpm으로 과잉산소 10%에 해당된다. 그리고 산소량을 기준으로 3%에 해당되는 N₂를 공급하여 연소조건에 따른 NO_x 발생량의 변화를 측정하였다.

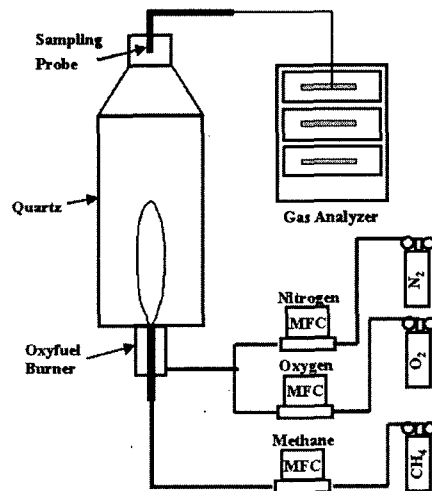


Fig. 1 Experimental apparatus

연소실은 직경 30cm 길이 70cm인 석영관을 이용하여 외부공기의 차단과 동시에 화염이 가시화 되도록 하였다. 비디오카메라를 이용하여 각 실험조건에서 30초 동안 가시화염을 촬영하고 시간에 따른 화염길이의 평균값을 난류 화염길이라고 정의하였다.

배가스 측정을 위해서 연소실 출구부에 직경 10cm의 배기덕트를 설치하였다. 거기에 스테인레스 수냉식 프로브(sampling probe)를 삽입하여 가스를 포집하고 포집된 가스는 수분제거기를 통하여 수분을 제거하고 가스분석기(Greenline MK-2)를 이용하여 NO_x, CO 농도를 측정하였다. 수냉식 프로브내의 수분에 의해 NO₂ 용해는 무시할 만큼 작기 때문에 수분에 의한 용해는 무시하였다.⁽⁸⁾

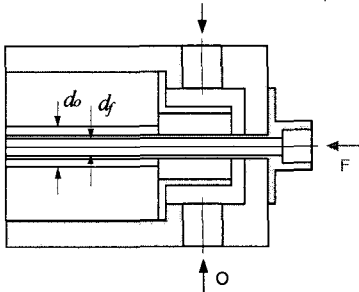


Fig. 2 Schematic of oxyfuel combustor

Table 2 Experimental conditions

u_f [m/s]	d_f [mm]	u_o [m/s]	d_o [mm]
80	3.65	8.1	17.89
		17.2	12.98
		27.7	10.80
		39.9	9.52
60	4.21	8.3	17.89
		18.0	12.98
		30.0	10.80
		45.0	9.52
40	5.16	8.7	17.89
		20.0	12.98
		35.9	10.80
		40.2	10.47
20	7.29	59.6	9.52
		10.0	17.89
		28.5	12.98
		77.3	10.80

Fig. 2에 나타난 것처럼 연소기는 일반적인 동축류 버너 구조를 하고 있으며 중앙에 연료 노즐이 있고 주위로 산화제인 산소가 공급되는 구조이며 본 연구에서는 연료 및 산화제 노즐의 직경을 바꿔 출구유속을 변화시킬 수 있게 하였다. Table 2에 연료 및 산화제의 노즐 직경 및 유속을 나타내었다. 연료 노즐의 두께는 1mm로 동일하게 유지하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 유속조건에 따른 화염특성

순 산소 연소기에서 연료 및 산화제 유속을 변화시켜가면서 화염형상 및 특성을 측정하였다. Fig. 3은 각각의 연료유속에서 산화제 유속을 변화시켜가며 실험한 화염이미지이다. 공기화염의 경우 선화기 혹은 보염기가 없는 Fig. 2와 같은 일반적인 동축류버너의 경우 유속이 10m/s 부근에서 화염 날림 현상이 발생하는데 순 산소 화염의 경우 연료 혹은 산화제 유속이 10m/s 이상에서도 안정된 화염을 형성함을 확인 할 수 있었다. 이러한 화염안정성의 급격한 증가는 Table 1에서 살펴본 바와 같이 화염전파속도가 증가하기 때문이다.

Fig. 3에서 보다시피 연료유속이 고정된 상태에서 산화제 유속을 증가시키면 화염길이가 짧아지는 것이 관찰된다. 이는 산화제 유속이 증가할수록 난류강도의 증가로 혼합특성이 향상되기 때문으로 예측된다.⁽⁹⁾

Fig. 3의 산화제 유속이 낮은 경우 매연에 의해 화염이 적염을 띠는데 산화제 유속이 증가하면서 적염이 청염으로 변해가는 것을 확인할 수 있다. 이는 난류강도 증가로 혼합특성이 향상되어 화염 길이가 짧아지고 그로 인한 연료의 화염 내 체류 시간이 감소되어 매연(soot)발생이 억제되기 때문이다.⁽¹⁰⁾

연료속도 80m/s, 40m/s일 때 연소기 출구에서의 CO발생량을 Fig. 4에 나타내었다. 측정된 CO농도가 모두 100ppm 이하일뿐더러 산화제 유속 증가에 따라 오히려 CO의 농도가 감소하는 것으로 보아 화염길이가 짧아지는 것이 미연가스의 발생, 즉 불완전연소와는 관계가 없음을 확인할 수 있다.

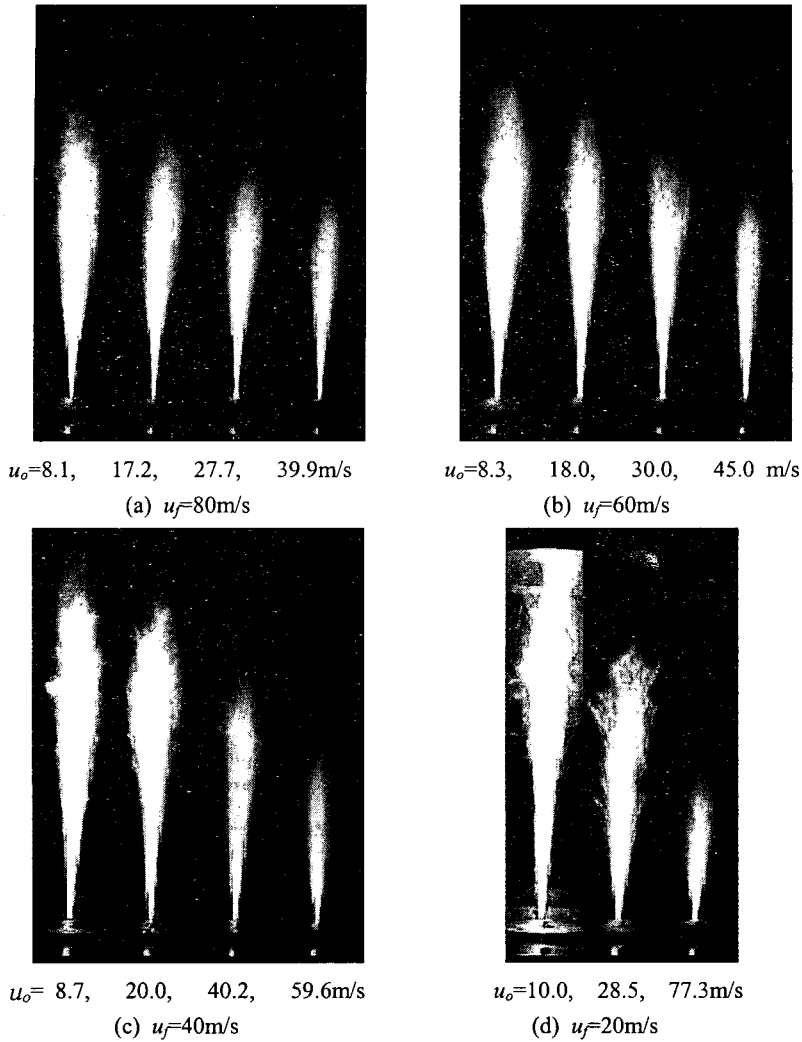


Fig. 3 Flame images with increasing oxidizer velocities at (a) $u_f=80$, (b) 60, (c) 40 and (d) 20m/s

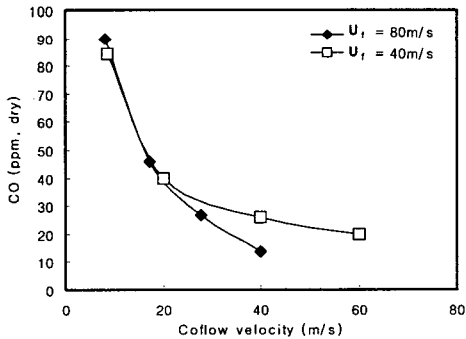


Fig. 4 Variation of CO emission with increasing oxidizer velocities at $u_f = 80$ m/s and 40m/s

3.2 유속조건에 따른 화염길이특성

순 산소 연소기에서 연료 및 산화제의 유속 변화에 따른 화염길이 특성을 알아보기 위하여 Fig. 3의 실험조건에서 유속변화에 따른 화염길이 특성을 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 5에서 보듯이 피 연료유속이 고정된 상태에서 산화제 유속이 증가하게 되면 화염길이가 짧아지고 마찬가지로 산화제 유속이 동일한 조건에서는 연료유속이 증가하면서 화염길이가 짧아지는 것을 확인할 수 있다. 이는 연료 및 산화제 유속이 증가하면서 난류강도의 증가로 인해 혼합 특성이 향상되기 때문이다. 본 실험결과는 연료 유속 및 산화제 유속을 조절함으로써 순 산소 화

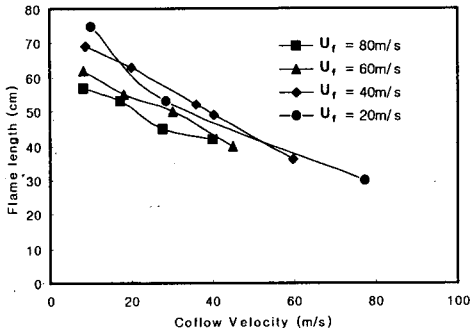


Fig. 5 Variation of flame lengths with increasing oxidizer velocities at various fuel velocities

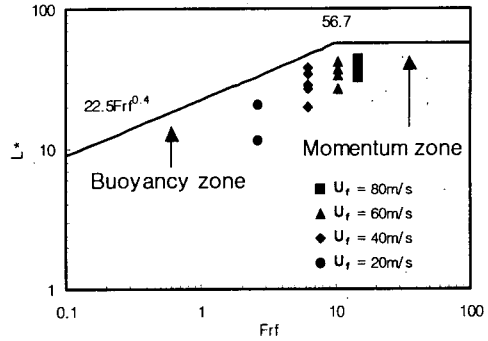


Fig. 6 Variation of nondimensionalized flame length according to flame Froude number

염의 길이를 제어할 수 있음을 나타낸다.

실제 산업용 순 산소 연소기의 화염길이를 제어하기 위하여 화염길이에 대한 상관관계식을 도출하고자 하였다.

Delichatsios는 질량보존방정식, 운동량방정식, 에너지방정식을 유동함수로 유도하고 화염길이에 대한 상사특성을 이용하여 화염에 작용하는 운동량 플럭스와 부력과 관계를 화염 Froude 수 Fr_f 로 정의하고 화염길이에 대한 아래의 관계식을 제안하였다.⁽¹¹⁻¹³⁾

$$L^* = \frac{L_f f_s}{d_f (\rho_e / \rho_\infty)^{1/2}} \quad (1)$$

$$Fr_f = \frac{v_e f_s^{3/2}}{(\rho_e / \rho_\infty)^{1/4} (\Delta T_f / T_\infty \cdot g \cdot d_f)^{1/2}} \quad (2)$$

Kim et al.⁽⁴⁾는 위 관계식을 이용하여 순산소 화염길이에 대하여 아래와 같은 상관관계식을 도출하였다.

$$L^* = 22.5 Fr_f^{0.4} \quad (Fr_f \leq 10) \quad (3)$$

$$L^* = 56.7 \quad (Fr_f > 10) \quad (4)$$

Fig. 6은 Froude 수에 따른 무차원 화염길이를 나타낸 그래프로 실선은 식 (3), (4)의 상관관계식을 나타낸다. 본 연구의 실험결과는 상관관계식보다 화염길이를 작게 예측하고 있는데, 이는 식

(3), (4)가 산화제 유속이 낮은 조건에서 얻어진 결과이기 때문이다. 또한 산화제 유속의 증가에 따라서 무차원 화염길이는 더 짧아지게 되는데 이로부터 산화제 유속이 화염길이에 영향을 주고 있음을 알 수 있다.

유속의 증가, 즉 난류강도의 증가로 인해 화염 길이가 짧아지기 때문에 난류 운동에너지를 사용하여 상관관계식을 도출하고자 하였다. Fig. 7은 산화제 속도에 대한 난류운동에너지와 식 (3), (4)의 순 산소 연소에서의 화염길이 상관관계식으로부터 얻어진 화염길이 $L(th)$ 을 실제 실험을 통하여 얻어진 값의 비로 나타낸 것이다. 여기서 난류 운동에너지를 구하는 식은 다음과 같다.⁽¹⁴⁾

$$k = \frac{3}{2} (U_{ref} * T_i)^2 \quad (5)$$

위 식에서 U_{ref} 는 초기 산화제 유속 조건이며 T_i 는 난류강도로 U_{ref} 의 10%로 가정하였다.

Fig. 7을 보면 난류운동에너지와 아주 잘 상관되는 것을 알 수 있다. 그 결과로 다음과 같은 상관관계식을 얻을 수 있었다.

$$\frac{L^*}{L(th)} = 7 * 10^{-5} k^2 - 0.0104k + 0.7614 \quad (6)$$

3.3 유속조건에 따른 NOx 특성

유속 변화에 따른 NOx 특성을 알아보기 위하여 연료 유속 80m/s, 40m/s 에 대하여 산화제 유

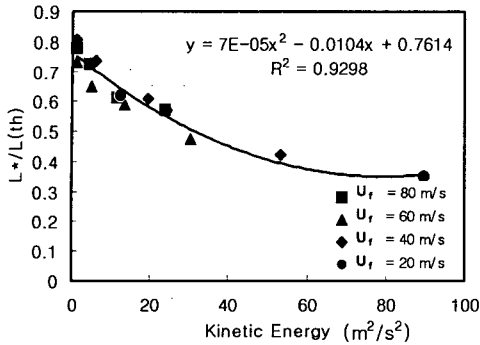


Fig. 7 Nondimensionalized flame length according to turbulent kinetic energy

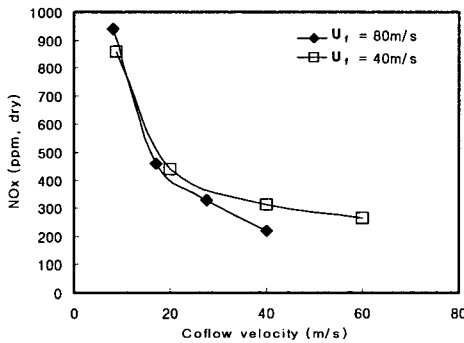


Fig. 8 Variation of NOx emission with increasing oxidizer velocities at $U_f=40\text{m/s}$

속을 증가 시켜가면서 연소실 출구에서 NOx 특성을 Fig. 8에 나타내었다.

NOx 특성을 보게 되면 연료 및 산화제 유속이 증가하면서 NOx가 감소하고 있는 것을 볼 수 있다. 연료 및 산화제의 유속이 증가하면서 난류강도가 증가하고 그로 인하여 혼합특성이 향상되어 화염길이가 짧아지게 되고 또한 순 산소 연소에서 사용된 연소기가 화염안정화를 위한 부가장치 없이 제트분사형식을 하고 있어서 연료 및 산화제의 속도가 증가하면 할수록 외부영역으로부터 생성가스가 유입되어 화염온도를 낮추게 되고 따라서 NOx가 감소하게 된다. 좀 더 설명을 명확하게 하기 위하여 Fig. 9에 도식화 하였다. 그림에서 보다 시피 공기화염에 비하여 순 산소 화염이 화염안정성이 크게 확대되므로 고속분사가 가능하고 이로 인하여 연소실 내부 재순환으로 인한 생성가스 유입(entrainment)으로 화염온도를 감소시켜 NOx가 감소하게 된다.⁽¹⁵⁻¹⁶⁾

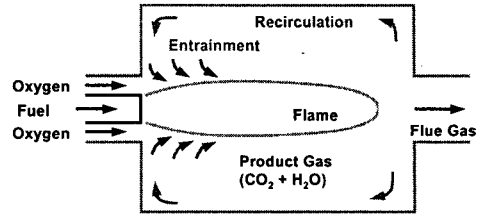


Fig. 9 Schematic diagram of in-furnace recirculation

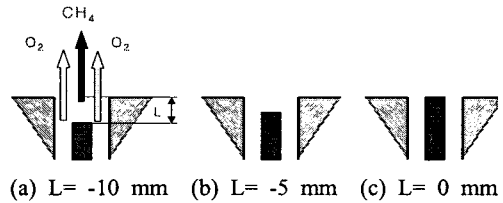


Fig. 10 Experimental conditions for nozzle intrusion test

이런 원리로 실제 산업용 연소기에 적용되고 있는데, 고속분사연소기(High Speed Combustor) 및 DOC(Dilute oxygen combustor)등이 그 예이다.⁽³⁾

3.4 연료노즐의 위치에 따른 유입특성

생성가스의 유입(entrainment)으로 인한 NOx 감소효과를 실험적으로 확인하기 위하여 Fig. 10에서와 같이 연료 노즐의 길이를 짧게 하여 연료제트로 인한 생성가스의 유입을 차단하는 실험을 수행하였다.

연료속도 40m/s일 때 산화제 유속을 변화 시켜가며 노즐의 위치에 따른 NOx발생 특성을 Fig. 11에 나타내었다. 동일한 산화제 유속조건에서 연료 노즐의 위치가 산화제 출구에 멀어질수록 NOx가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 노즐이 짧게 되면 연소기는 예혼합 연소기 형태를 띠게 되어 혼합특성이 향상되게 되고 그에 따라 NOx가 저감되리라 예상되지만 그 반대로 NOx가 증가되는 결과를 보였다. 이는 노즐의 위치가 산화제 출구에서 멀어질수록 생성가스의 유입을 막게 되고 따라서 로내 재순환 효과의 감소로 인하여 연소반응영역에 온도가 상승하게 되어 NOx 발생이 증가되는 것임을 알 수 있다.

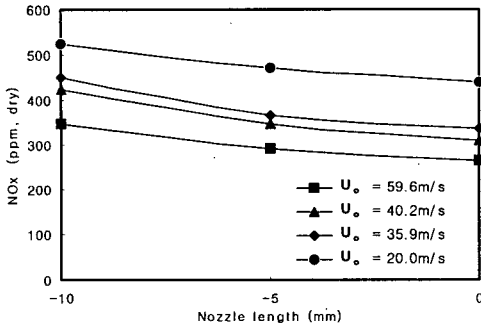


Fig. 11 Variation of NO_x emission with increasing nozzle intrusion at various oxidizer velocities

4. 결론

순 산소 연소기를 제작에 관한 설계기준을 도출하기 위하여 메탄 산소 확산화염에서 유속변화에 대한 실험을 수행하였고 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 연료나 산화제의 유속이 증가할수록 화염길이는 짧아지며 메연이 없는 청염으로 변하게 된다. 이를 통하여 연료 속도 및 산화제 속도로 순 산소 화염의 길이를 제어할 수 있음을 확인하였다.

(2) 산화제로 순산소를 사용하였을 경우의 화염안정성이 급격하게 증가하였는데, 이는 화염전파속도가 산화제로 공기를 사용하였을 때보다 월등하게 빠르기 때문이다.

(3) 산화제 유속에 대한 난류운동에너지를 구하고 이론적인 화염길이와 실제 화염길이 비를 이용하여 다음과 같은 순 산소 화염에서 산화제 유속에 대한 상관관계식을 도출하였다.

$$\frac{L^*}{L(th)} = 7 \cdot 10^{-5} k^2 - 0.0104k + 0.7614$$

(4) 연료 및 산화제의 속도가 증가할수록 외부 영역으로부터 생성가스의 유입(entrainment)량이 증가되어 화염온도를 낮추게 되고 따라서 NO_x가 감소하게 된다.

후 기

본 연구는 과학기술부 지원으로 수행하는 21세

기 프론티어 사업(이산화탄소 저감 및 처리 기술 개발)의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Charles, E. Baukal, 1998, "Oxygen-Enhanced Combustion," *CRC Press*, Ph.D.
- (2) Charles, E. Baukal, 2000, "The John Zink Combustion Handbook," *CRC Press*.
- (3) Charles, E. Baukal, 2003, "Industrial Burners Handbook," *CRC Press*.
- (4) Kim, H.K., Lee, S.M., Kim, H.S., Ahn, K.Y. and Kim, Y.M., 2004, "Flame Length Characteristics of CH₄/O₂ on Jet Diffusion Flame," *KSME Spring Conference*.
- (5) Cha, M.S., Kim, H.K., Kim, H.S. and Ahn, K.Y., 2003, "Effects of CO₂ Recirculation on Turbulent Jet Diffusion Flames with Pure Oxygen," *KOSCO SYMPOSIUM*, the 26, pp. 255~260.
- (6) Kim, H.S., Kim, H.K., Ahn, K.Y. and Kim, Y.M., 2004, "Characteristics for Effects of CO₂ Addition to Oxygen-Enriched Combustion," *Trans. of the KSME*, Vol. 28, No. 1, pp. 9~15.
- (7) Kim, H.S., Ahn, K.Y., Kim, H.K., Lee, Y.W. and Lee, C.E., 2003, "A Study on the Characteristics of Combustion for Substituting CO₂ for N₂ in Combustion Air," *Journal of KOSCO*, Vol. 7, No. 4, pp. 29~34.
- (8) Chen, R. H. and Driscoll, J. F., 1990, "Nitric Oxide Levels of Jet Diffusion Flames: Effects of Coaxial Air and Other Mixing Parameters," *21th Symposium on Combustion*, pp. 1181~1188.
- (9) Ditaranto, M., Sautet, J. C. and Samaniego, J. M., 2001, "Structural Aspects of Coaxial Oxy-Fuel Flames," *Experiments in Fluids*, Vol. 30, pp. 253~261.
- (10) Bachtenbach, B. and Leuckel, W., 1996, "A Simplified Phenomenological Model for Soot Growth Based on Plug Flow Reactor Experiments," *26 th Symposium on Combustion*.
- (11) Delichatsios, M.A., 1981, "String Turbulent Buoyant Plumes. 1. Similarity," *Combustion Science and Technology*, Vol. 24, pp. 191~195.
- (12) Delichatsios, M.A., 1988, "On the Similarity of Velocity and Temperature Profiles in String(Variable

- Density) Turbulent Buoyant Plumes," *Combustion Science and Technology*, Vol. 60, pp. 253~266.
- (13) Delichatsios, M.A., 1993, "Transition from Momentum to Buoyancy-Controlled Turbulent Jet Diffusion Flames and Flame Height Relationships," *Combustion and Flame*, Vol. 92, pp. 349~364.
- (14) Tennekes, H. and Lumley, J. L., "A First Course in Turbulence," *THE MIT PRESS*.
- (15) Weber, R., 1996, "Scaling Characteristics of Aerodynamics, Heat Transfer, and Pollutant Emissions in Industrial Flames," *26th Symposium on Combustion*, pp. 3343~3354.
- (16) Weber, R., Verlaan, A. L., Orsino, S. and Lallemand, N., 1999, "On Emerging Furnace Design Methodology that Provides Substantial Energy Savings and Drastic Reductions in CO₂, CO and NO_x Emissions," *J. of the Institute of Energy*, Vol. 72, pp. 77~83.
- (17) Brown, J.T., 1991, "100% Oxygen-Fuel Combustion for Glass Furnaces," *Ceram. Eng. Sci. Proc.*, Vol. 12, pp. 594~609.
- (18) Dankert, T. K., Tuson, G. B., 1996, "Demonstration on an Ultra-LOW NO_x Oxygen-Fuel Glass Melting System," *Ceram. Eng. Sci. Proc.*, Vol. 17, No. 2, pp. 47~54.
- (19) Sautet, J. C., Ditaranto, M., Samaniego, J. M. and Charon, O., 1999, "Properties of Turbulence in Natural Gas-Oxygen Diffusion Flames," *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, Vol. 26, pp. 647~656.
- (20) Sautet, J. C., Salentey, L. and Ditaranto, M., 2001, "Large-Scale Turbulent Structures in Non-Premixed Oxygen Enriched Flames," *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, Vol. 28, pp. 277~287.
- (21) Baukal, C. E. and Gebhart, B., 1997, "Oxygen-Enhanced Natural Gas Flame Radiation," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 40, pp. 2539~2547.
- (22) Beltrame, A., Porshnev, P., Merchan, W. M., Saveliev, A., Fridman, A., Kennedy, L. A., Petrova, O., Zhdanok, S., Amouri, F. and Charon, O., 2001, "Soot and NO Formation in Methane-Oxygen Enriched Diffusion Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 124, pp. 295~310.
- (23) Lallemand, N., Breussin, F., Weber, R., Ekman, T., Dugue, J., Samaniego, J. M., Charon, O., Van. Den., A. J., Van. Der., J., Fujisaki, W., Imanari, T., Nakamura, T. and Iino, K., 2000, "Flame Structure, Heat Transfer and Pollutant Emissions Characteristics of Oxy-Natural Gasflames in the 0.7-1MW Thermal Input Range," *J. of the Institute of Energy*, Vol. 73, pp. 169~182.