

메탄/산소 난류 확산화염의 연소 특성에 관한 연구

이상민* · 김호근** · 김한석* · 안국영†

A Study on Combustion Characteristics of Turbulent Methane/Oxygen Diffusion Flames

Sang Min Lee*, Ho Keun Kim**, Han Seok Kim* and Kook Young Ahn†

ABSTRACT

The combustion characteristics of 0.03MW turbulent methane/oxygen diffusion flames have been investigated to give basic informations for designing industrial oxyfuel combustors. NOx reduction has become one of the most determining factors in the combustor design since 3-5% nitrogen is intrinsically included from the current oxygen producing processes. Flame lengths and NOx concentrations were measured by varying flow velocities with and without installing quarls. Flame stabilities are significantly enhanced by oxyfuel combustion in contrast to air-fuel combustion. Flame length decreases with increasing fuel or oxygen velocity because of the enhancement of turbulent mixing. NOx concentration was reduced with increasing flow velocities. This can be attributed to the entrainment of inert product gases into flame decreasing flame temperature. The installation of quarl on the burners rather increased NOx concentration since the quarl blocked the entrainment above the nozzles.

Key Words : Oxyfuel Combustion, Flame Length, Entrainment, NOx, Quarl

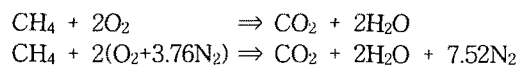
기 호 설 명

d_f	Fuel Nozzle Diameter [mm]	d_o	Oxidizer Nozzle Diameter [mm]
u_f	Fuel Velocity [m/s]	u_o	Oxidizer Velocity [m/s]
h_f	Flame Height [mm]	θ_q	Quarl Angle [°]

1. 서 론

최근 들어 산화제로 공기 대신 산소를 사용하는 순산소연소(oxyfuel combustion)기술이 활발히 개발, 적용되고 있다.[1] 순산소연소를 하게 되면 연소과정에서 공기 중에 포함된 질소의 불필요한 기열을 제거할 수 있기 때문에 에너지효율이 크게 증가하게 된다.

다음은 이론당량비(equivalence ratio)에서 공기연소 및 순산소연소의 반응식을 나타낸다.



산화제 중 질소의 제거로 인해 연소효율이 증가할 뿐만 아니라 배기가스의 체적(volume)이 크게 감소하고, 이론적으로 NOx 생성이 원천적으로 봉쇄된다. 또한 이산화탄소 및 수증기의 기체복사(gas radiation)도 크게 증가한다.[2]

표 1은 산화제로 각각 공기와 산소를 사용했을 때 연소특성을 나타낸다.[3]

* 한국기계연구원 환경기계기술연구부

** 한양대학교 대학원

† 연락처자, kyahn@kimm.re.kr

표 1 공기연소와 순산소연소의 비교

	air-fuel	oxyfuel
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

표에서 보듯이 순산소연소를 하게 되면 가연한계의 확장, 화염전파속도의 증가, 단열화염온도의 증가로 인해 화염의 안정성 및 열전달 효율이 커질 것으로 예측된다. 이러한 장점들에도 불구하고 순산소 연소기술은 산소를 제조하는 비용 때문에 이제까지 고온을 필요로 하는 유리용해 등에 제한적으로 적용되어왔다. 하지만 최근들이 산소제조기술의 발달과 함께 제조단가가 떨어지면서 점차 경제성을 갖추어 가고 있다.[4]

한편 교토의정서(Kyoto Protocol, 1997)에 의해 국제적으로 이산화탄소 배출량에 대한 규제가 반효될 예정이며, 이와 관련해서 이산화탄소 회수 기술에 관심이 모아지고 있다. 순산소 연소의 경우 배기가스에서 수분만 응축시키면 이산화탄소를 쉽게 회수할 수 있는 장점을 가지고 있다.[5]

하지만 경제성을 갖춘 산소제조과정에서 소량의 질소(3-5%)가 포함되는데, 순산소연소시 화염온도가 급격하게 증가하기 때문에 소량의 질소에도 상당한 량의 NOx가 생성된다. 따라서 순산소연소기를 설계하는 데 있어 NOx를 저감시키는 기술의 개발이 필수적이다.[4]

본 연구에서는 순산소 연소기의 설계 기본조건을 도출하기 위하여 메탄/순산소 난류 확산화염에서 유동 속도 및 켈(quarl) 등의 조건을 바꿔가면서 화염 및 배출 특성을 측정하는 실험을 수행하였다.

2. 실험장치 및 방법

메탄/산소 확산화염의 실험을 위한 실험장치의 구성도를 그림 1에 나타내었다. 실험장치는 유량공급부, 연소기 및 연소실, 배가스 농도 측정부로 구성된다.

연료인 메탄(>99.9%)과 산화제인 산소는 각각 질량유량계(mass flow controller; BROOKS)를 사용하여 공급하였다. 연료 유량은 50 lpm로 이 때 발열량은 30kW이며, 10% 과잉산소 조건에서 연소시켰다. 산소제조 가스 중 질소 불순물에 의한 NOx 배출특성을 알아보기 위하여 모든 경우 산화제에 3%의 질소를 첨가하였다.

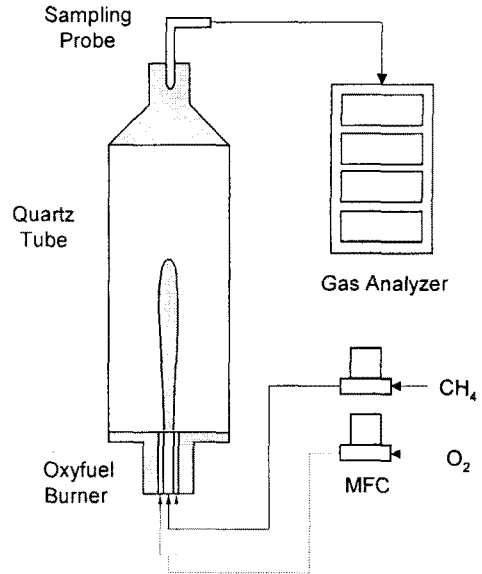


Fig. 1 실험장치의 구성도

연소기는 일반적인 동축류버너의 구조를 갖고 있는데, 가운데로 메탄, 그 주위로 산화제(산소/질소 혼합기체)가 공급된다.(그림 2) 본 연구에서는 연료 및 산화제 노즐의 직경을 바꿔 가면서 출구유속을 변화시킬 수 있게 하였다. 표 2는 연료 및 산화제의 노즐 크기 및 이에 따른 유속조건을 나타낸다.

표 2 연료, 산화제 노즐크기 및 유속조건

d_f [mm]	u_f [m/s]	d_o [mm]
2.70	146	7.36
3.65	80	9.52
4.21	60	10.47
5.16	40	10.8
7.29	20	12.98
		17.89

본 연소기는 켈(quarl)을 탈부착시킬 수 있게 제작하였다.(그림 2) 일반적으로 켈은 공기연소기

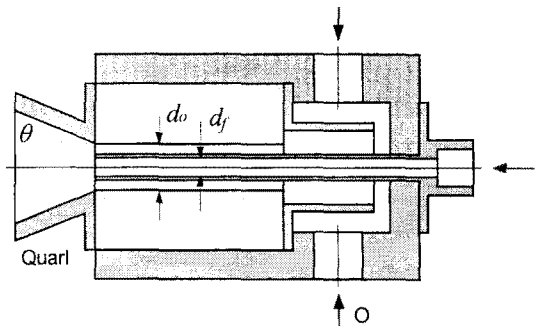


Fig. 2 순산소 연소기의 단면도

에서 화염 안정화 및 화염형상의 조절을 위해서 사용되고 있다.[6] 연소기쪽 쉘의 직경은 산화제 노즐의 직경과 동일하게 하였으며 쉘 각도를 0, 3, 7, 15도로 변화시켰다. 쉘의 길이는 32.5mm이다.

산화제 쪽으로 주변공기의 유입을 방지하기 위하여 버너 위로 직경 30cm, 길이 120cm의 석영관(quartz tube)을 설치하였다. 석영관은 연소실의 역할을 할 뿐만 아니라 화염가시화를 가능하게 한다.

배가스 측정을 위해서 연소실 출구부분에 수냉이 가능한 샘플링 프로브(sampling probe)를 설치하였고, NDIR 방식의 센서를 사용하여 NOx (3NF/F, 3ND CiTiCel; City Technology) 및 CO의 농도를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 질소농도에 따른 NOx량 변화

앞서 설명한 바와 같이 산소연소 시 산화제 중에 질소가 포함될 경우 배출되는 NOx 농도에 어떠한 영향을 미칠 것인가에 대한 실험을 수행하였다. 연료노즐 및 산화제 노즐 직경은 각각 5.16mm ($u_f=40\text{m/s}$), 10.8mm인 경우로 산화제에 질소몰 0-40%까지 변화시켜가면서 NOx 농도를 측정하였다.

그림 3은 질소농도의 변화에 따른 NOx 농도를 계측한 결과이다. 질소가 2.5%일 때가 오히려 40%일 때보다 더 많은 양의 NOx가 배출된다. 이는 산소농도가 높으면 화염온도가 증가하여 소량의 질소에도 NOx량이 급격하게 증가하기 때문이다. 따라서 산소연소기를 설계할 때 NOx 저감에 대한 고려가 필수적임을 나타내고 있다. 질소농도가 20% 이상에서는 NOx량이 서서히

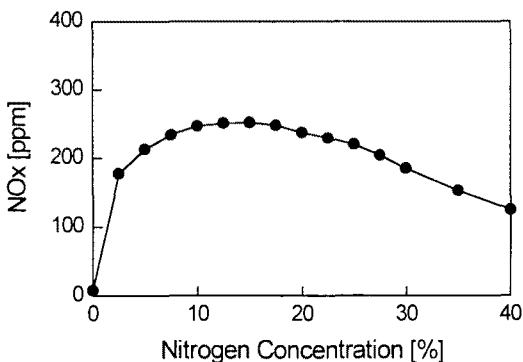


Fig. 3 산화제중 질소 농도에 따른 NOx량의 변화

감소하게 되는데, 이는 화염온도가 감소하기 때문이다.

3.2 유동 속도가 화염특성에 미치는 영향

순산소 연소기에서 연료 및 산화제의 유동속도에 따른 화염의 형상 및 특징 변화를 관찰하였다. 연료 및 산화제의 속도는 표 2에서 제시된 서로 다른 크기의 노즐을 교체하면서 변화시킬 수 있었다. 그림 3은 연료 노즐의 크기를 고정시

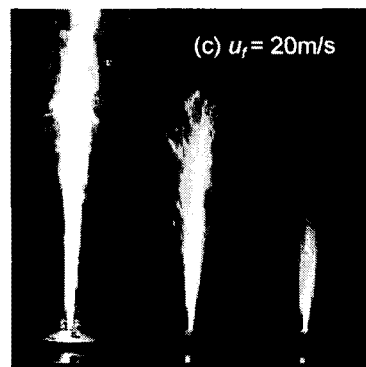
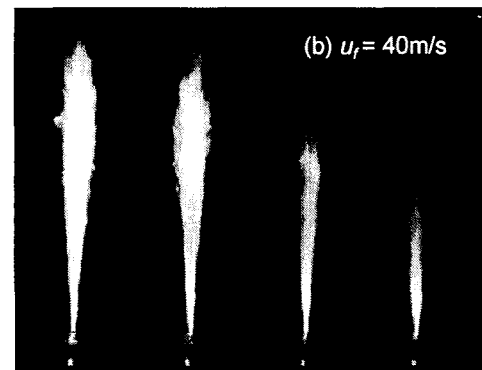
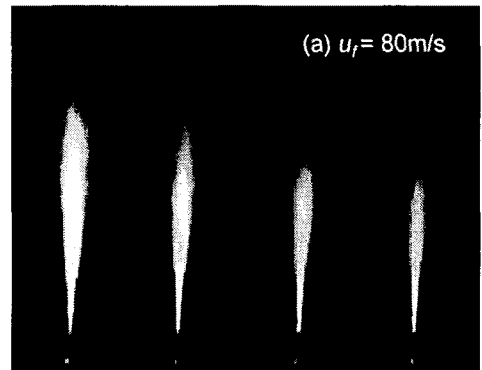


Fig. 4 유동속도에 따른 화염형상의 변화

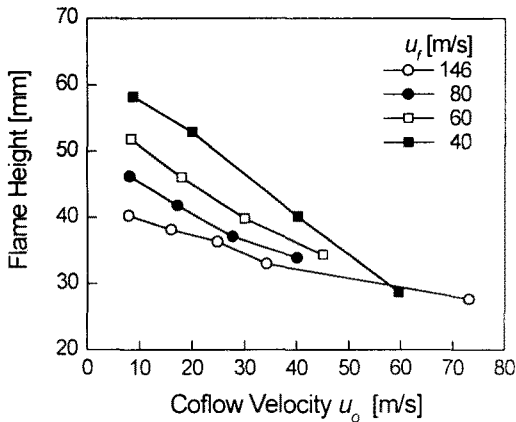


Fig. 5 유동속도에 따른 화염길이의 변화

킨 상태에서 산화제 노즐을 교체하면서 동축류 속도를 변화시켰을 때 화염형상의 변화를 촬영한 이미지이다. 연료 속도가 일정한 경우 동축류 속도가 증가함에 따라 화염의 크기 및 길이가 감소하였다. 또한 저속일 때 관찰되는 황색 화염이 속도가 증가하면 청색 화염으로 바뀌게 된다. 이는 화염길이의 감소로 인해 연료의 화염내 체류 시간이 감소하여 매연(soot)이 발생하지 않기 때문이다.

그림 5는 연료 및 동축류 산화제 속도의 변화에 따른 화염길이의 변화를 나타낸 그래프이다. 이때 화염길이는 가시적인 화염 경계로 정의하였다. 동축류 속도의 증가에 따라 화염길이는 감소하고, 또한 같은 산화제 속도에서는 연료 속도가 증가할수록 화염길이가 짧아지게 된다. 이는 유동속도가 증가함에 따라 난류 강도가 강해지고 또한 속도차에 의해 산화제 노즐 외부 기체의 유입(entrainment)량이 커져서 믹싱(mixing)이 원활해 지기 때문이다.[7] 또한 이 결과는 유동속도

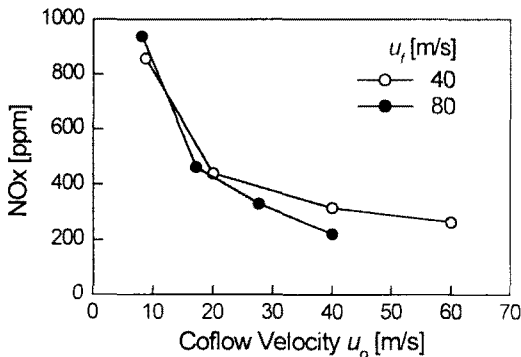
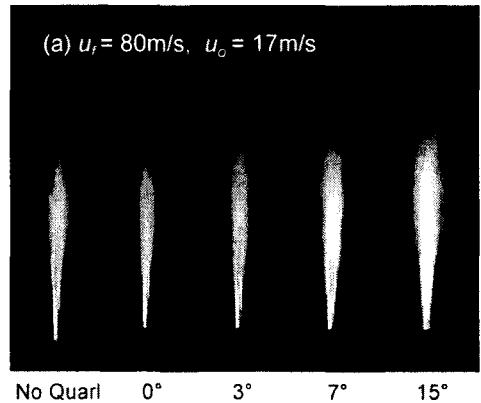


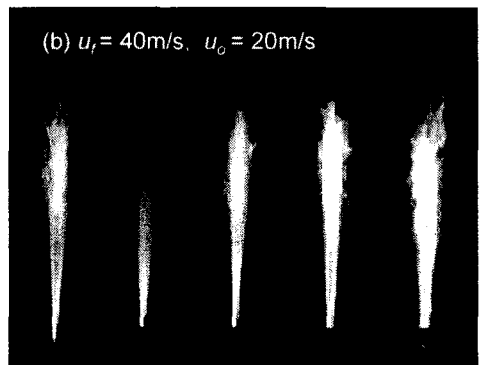
Fig. 6 유동속도에 따른 NOx량의 변화

를 조절함으로써 산소화염의 길이를 제어할 수 있음을 나타낸다.

그림 6은 연료 속도가 40, 80m/s일 때 동축류 속도를 증가시켜가면서 배기 NOx 농도의 변화를 측정한 결과이다. 동축류 속도가 낮을 경우 1000ppm에 가까운 다량의 NOx가 발생하게 되지만 속도를 증가시키면 200ppm 정도로 크게 감소하게 된다. 반면에 동축류 속도가 증가할수록 화염길이는 감소하는 모습을 보였다. 이러한 경우 속도증가에 의해 화염길이가 감소하면 화염의 체적이 줄어서 화염부의 온도가 상승하게 되고 따라서 NOx생성량이 증가할 것으로 예상되었다. 하지만 실험결과는 이와 상반되게 나타났다. 이는 다음과 같이 설명할 수 있다. 화염을 제외한 연소실 내부는 대부분 이산화탄소와 수증기의 혼합물, 즉 연소생성가스 로 구성이 된다. 유속이 빨라질수록 모멘텀(momentum) 차이에 의한 화염외부 기체의 유입량이 많아지고, 이러한 불활성 기체의 유입은 화염온도를 떨어뜨리기 때문으로 보인다. 이러한 효과는 로내재순환(in-furnace recirculation)이라고 한다.[2] 순산소연소에서 이러한 효과가 가능한 것은 화염의 안정성이 높기



(a) $u_f = 80\text{m/s}$, $u_0 = 17\text{m/s}$



(b) $u_f = 40\text{m/s}$, $u_0 = 20\text{m/s}$

Fig. 7 쉘각도에 따른 화염형상의 변화

때문으로 고속에서도 화염날림현상이 잘 일어나지 않기 때문이다. 한편 화염길이의 변화에 따른 CO의 농도를 측정 한 결과 모든 경우에 100ppm 이하로 나타났다. 따라서 화염길이의 단축에도 불구하고 불완전연소는 일어나지 않는 것으로 볼 수 있다. 이러한 실험 결과로부터 순산소 연소기 설계 시 NOx를 저감하는 방법으로 유동속도를 증가시키는 것이 유용한 방법임을 추론할 수 있다.

3.3 켈의 영향

공기연소기에서 켈은 노즐 바로 윗부분의 유동장을 보호하여 화염이 노즐 위에 안정적으로 부착될 수 있게 하는 역할을 한다.[6] 이때 켈의 재질을 석고로 하면 연소기의 가열을 막는 역할도 하게 된다. 상용 순산소 연소기에 대부분 켈이 장착되어 있는데, 본 연구에서는 켈이 화염형상 및 NOx 생성에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 켈의 각도는 0, 3, 5, 15도의 네가지 각도에 대해서 실험하였다.

그림 7은 켈을 설치한 경우 화염형상의 변화를 나타내고 있다. 0도 켈을 제외하고는 화염길이가 길어지는 현상이 관찰된다. 3도 이상에서는 켈이 화염상단의 유동을 보호하면서 각도가 커지기 때문에 유동속도가 느려지는 효과가 나타나기 때문으로 보인다. 반면에 0도 켈인 경우에는 속도 감소의 효과가 없는 동시에 바깥 방향으로의 산소 분사를 켈이 억제하기 때문에 화염으로의 산화제

공급이 원활해져서 화염길이가 짧아지는 것으로 해석된다.

켈의 각도에 따른 NOx 농도의 변화를 그림 8에 나타내었다. 연료속도가 40, 80m/s 두 가지 경우 모두 켈이 없을 때 보다 NOx량이 크게 증가하게 된다. 이는 켈이 노즐 상단에서 외부 기체의 유입을 막기 때문에 로내 재순환 효과가 상대적으로 감소하여 화염온도의 감소량이 작아지기 때문이다. 일반적인 상용 순산소 연소기에서 켈이 사용되고 있는데, 이러한 실험결과와는 켈이 NOx 저감에 오히려 불리하다는 것을 나타내고 있다.

4. 결론

0.03MW 메탄/순산소 난류 확산화염의 실험결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 순산소 연소에서 산화제에 소량의 질소를 첨가하여도 NOx의 생성이 급격하게 증가하는데, 이는 산소량의 증가에 따라 화염온도가 크게 증가하기 때문이다.
- 2) 연료나 산화제의 유동속도가 증가할수록 화염의 길이는 짧아지며 매연이 없는 청색 화염으로 변하게 된다. 이와 동시에 NOx의 생성도 줄어들게 되는데 이는 로내재순환 효과에 따라 화염온도가 감소하기 때문이다.
- 3) 켈을 설치하면 오히려 NOx량이 증가하는데, 이는 켈이 노즐 상부에서 외부기체의 유입을 막기 때문에 로내재순환 효과가 억제되기 때문이다.

NOx 저감의 측면에서 순산소 연소기 설계를 하는 경우 본 실험결과와는 켈이 없는 상태에서 유속의 증가시키는 방법을 제시하고 있다.

후 기

본 연구는 과학기술부 지원으로 수행하는 21세기 프론티어사업(이산화탄소 저감 및 처리 기술 개발)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

[1] C. E. Baukal, "The John Zink Combustion Handbook", CRC Press, 2000.
 [2] C. E. Baukal, "Industrial Burners Handbook",

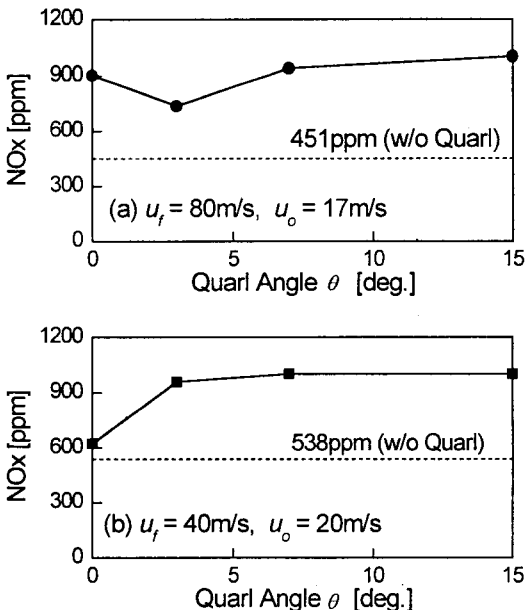


Fig. 8 켈각도에 따른 NOx량의 변화

CRC Press, 2003..

[3] M. Ditaranto, "Challenges of Oxy-fuel Combustion for CO₂-free Power Generation", *NTNU CO₂ Seminar*, 2002.

[4] 지정근, 이상훈, 문홍만, 이창하, "고순도 산소생산을 위한 공기분리 및 정제흡착과정", *제2회 이산화탄소 저감 및 처리기술 Workshop*, 2004.

[5] E. Croiset and K. V. Thambimuthu, "Coal Combustion with Flue Gas Recirculation for CO₂ Recovery", *4th Int. Conf. on Greenhouse Gas Control Tech*, 1998.

[6] J. C. Sautet, M. Ditaranto, J. M. Samaniego and O. Charon, "Properties of Turbulence in Natural Gas-Oxygen Diffusion Flames", *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, Vol. 26, No. 5, 1999.

[7] J. C. Sautet, L. Salentey and M. Ditaranto, "Large-scale Turbulent Structures in Non-premixed, Oxygen-Enriched Flames", *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, Vol. 28, No. 2, 2001.