

고온 공기와 선회수에 의한 동축 분류 화염의 연소 특성

김진식* · 광지현* · 전충환** · 장영준**

Combustion characteristics of coaxial diffusion flame with high preheated and swirled air

Jin-sik Kim, Ji-hyun Kwark, Chung-hwan Jeon and Young-june Chang

Key Words: High preheated air(고온 공기), Dilution level(희석률), Swirl number(선회수)

Abstract

An experiment using high preheated and swirled air in the coaxial diffusion flame burner was carried out in order to decrease NO_x emission and improve the thermal efficiency. N₂ gas was used for diluent and propane was utilized for fuel. Combustion using high preheated air has two remarkable characteristics ; (1) low NO_x emission with increasing dilution level, (2) high thermal efficiency in the furnace. Also, swirled air can mix fuel and oxidizer well in condition of diffusion flme and maintain the stable combustion. The color of flame changes from yellow to blue green according to increasing the dilution level of mixture gas. NO emission decreased with increasing dilution level and the swirl number.

기호설명

- σ_r : 선회 공기 노즐의 내경과 외경의 직경비
- θ : 선회각도
- λ : 공기 과잉율

1. 서론

산업혁명 이후 지구 대기 오염 정도는 기하급수적으로 심각해져 왔으며 1900년대 중· 후반에 들어서는 그 정도가 더욱 심각해져 CO₂에 의한 지구 온난화와 이로 인한 많은 관련 피해와 오존

층 파괴 등 인류의 생존과 쾌적한 생활권이 위협받게 되었고 이의 보장을 위해 대기오염제어법안을 제정하게 되었다. 오늘날 이 규제 강화에 의해 각 산업 현장에서는 강화된 규제법안을 만족하기 위해 많은 노력을 하고 있으며, 이는 곧 회사의 이익과 생존과도 연관되어 있다.

현재 많은 대기오염물질 중 주된 관심의 대상이 되고 있는 물질 중의 하나인 NO_x는 산업용 연소에서 우선 제어해야할 대상으로 여겨지고 있으며, 이의 저감을 위해 많은 연구자들이 기술을 개발하고 있다. 현재까지 이러한 NO_x를 저감하기 위해 개발된 기술 중의 하나로 고온공기연소(highly preheated air combustion) 방식이 있다. 이는 대기로 버려지는 배가스(flue gas)의 폐열을 이용하여 연소 버너로 들어가는 연소용 공기(fresh air)를 예열·회색시켜 시스템의 열효율(thermal efficiency)를 높임과 동시에 NO_x emission의 배출을 저감할 수 있다.(1,2) 이 고온

* 부산대학교 대학원 기계공학과

** 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소

공기연소 방식에서 NOx를 저감시키는 원리는 고온의 연소용 공기를 이용함에 의해 연소 안정성이 증대되어 저산소 농도에서도 안정된 연소가 가능하여 최대 연소 온도가 감소하게 되고, 노내에 균일한 온도 분포가 이루어져 국소 고온 지역 생성을 억제하여 주요 NOx 생성 mechanism 중의 하나인 thermal NOx를 줄이는 것이다.

Suzukawa 등은 배가스의 폐열을 이용하여 공기를 예열하는 함으로써 단열화염온도(adiabatic flame temperature)를 높일 수 있고, 이로 인해 시스템의 heating potential(단열화염온도와 노 가스 온도 사이의 엔탈피 차)를 높일 수 있다고 하였으며, Nishimura 등은 KOBELCO 저 NOx 재생 버너(KOBELCO low-NOx regenerative burner)에 고온공기연소를 적용하여 NOx 배출에 관한 연소용 공기의 Straddle 각과 연료의 Inclined 각 사이의 관계를 규명하였다.

희석제(diluent)로는 배가스 뿐만 아니라, 질소(N2), 이산화탄소(CO2), 아르곤(Ar), 헬륨(He) 등의 불활성 가스 등도 사용되고 있으며, 희석제의 종류에 따라 NOx의 배출 특성도 달라진다. GABRIEL 등은 수소(H2) 난류 확산 화염에서 아르곤과 헬륨을 희석제로 사용하여 희석제의 종류가 NOx emission에 미치는 영향을 연구하였다. 뿐만 아니라 연료의 종류에 따라서도 NOx emission 배출 정도가 달라진다고 알려져 있다.

정용기 등은 FFB(flat flame burner)에 선회 공기 노즐을 사용하여 버너 출구에서 중심축 상에 배가스의 넓은 재순환 영역(recirculation region)이 존재함을 보여주었고, 김철민 등은 FFB에서 선회 공기 노즐의 선회수에 따른 NOx 배출 특성을 연구하였다

본 실험에서는 연료 노즐의 수직 단면에 대해 일정한 각을 가지고 있는 선회 공기 노즐을 사용하여 동축 버너에서 선회수와 연소부하, 고온으로 예열된 공기의 온도에 따른 화염 형상 및 NOx emission 배출 특성을 연구하고자 한다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

2.1 실험 장치

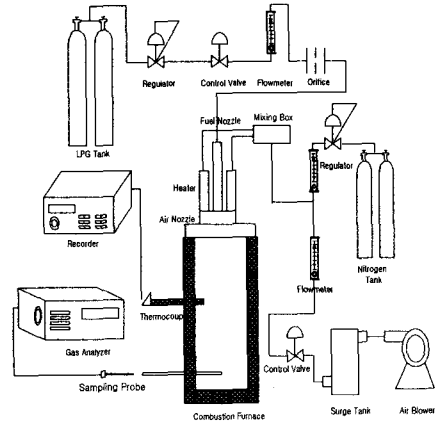


Fig. 1 Schematic of experimental devices

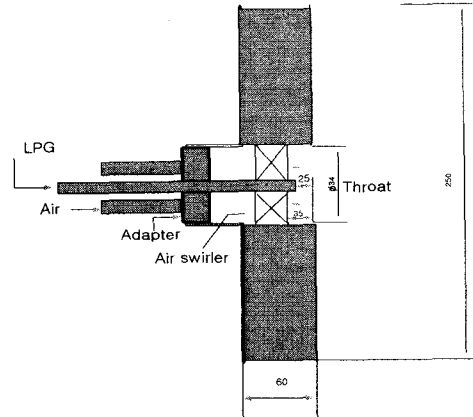


Fig. 2 Schematic of coaxial burner

본 연구에서 사용된 실험 장치는 Fig. 1과 같이 크게 버너와 연소로, 연료 공급 장치, 공기 및 희석제 공급 장치, 온도 취득 장치, 연소 가스 분석 장치로 구성되어 있다. 버너는 Fig. 2와 같이 타일부 직경 250mm, 목(throat) 직경 34mm, 목직관부 길이 60mm의 벤치 스케일 버너이다. 연료는 수직 방향으로 분출되고, 연료 노즐 주위는 노즐을 통해 노즐 수직 단면에 대해 일정한 각을 가지는 스윙 공기 노즐이 감싸고 있으며 두께 15mm의 원형 SUS에 2mm×3.5mm 크기의 슬릿상의 분출구 6개를 가지고 있어 산화제가 선회수에 따라 선회 유동을 하며 공급된다. 이 실험에 사용된 선회 노즐은 각각 축방향에 대해 0, 0.26, 0.6, 1.24의 선회수를 가진다. 여기서 선회수는 무차원수로서 분류내의 각 운동량을 노즐 반경과

축방향 운동량을 곱해 나눈값으로 다음의 값으로 정의하였다.

$$\text{선회수}(S) = \left(\frac{2 \tan \theta}{3} \right) \frac{(1 - \sigma_r^3)}{(1 - \sigma_r^2)} \quad (1)$$

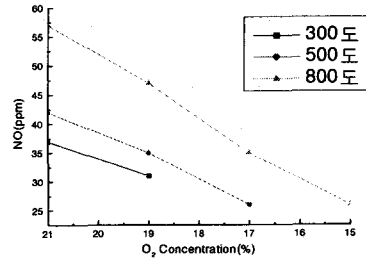
연소로는 내면이 250mm×250mm×500mm의 크기이고 두께 100mm의 내화제로 단열되어 있다. 공기는 정격출력 0.73kW의 3상 ring blower로부터 공급되며 희석제는 공업용 질소(순도 99%)를 사용하였다. 공기와 질소는 혼합조(mixing box)에서 혼합되어 예열기(heater)로 들어가 가열된 후 버너로 공급된다. 노 내의 온도는 K-type 열전대를 이용하여 버너의 축방향에 따른 온도를 측정하였고, 배가스 농도 분석은 전기 화학센서가 장착된 배가스 분석기 COSA-6000을 이용하여 측정하였다.

2.2 실험 방법

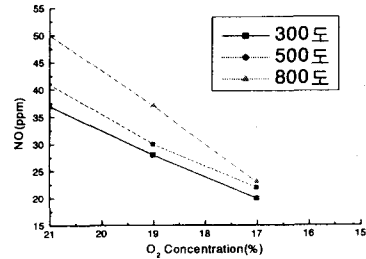
연소부하 3.03kw, 4.5kw 조건에서 $\lambda = 1.0$ 으로 고정하여 공기와 희석제의 혼합기를 버너로 공급하였다. 연료 노즐은 버너 타일부에서 25mm 정도 안쪽에 위치하고 있으며, 선회 공기 노즐은 연료 노즐 출구에서 밑으로 5mm 정도에 위치하도록 하였다. 고온 예열된 공기의 온도는 예열기를 이용하여 300℃, 500℃, 800℃가 되도록 하였다. 배가스 농도 측정시 노 내의 온도는 550℃에서 600℃사이를 유지하도록 하였고, 노 출구에서 측정하였다. 노 내의 온도 분포는 K-type 열전대를 이용하여 노 벽면의 일정거리의 5 지점을 지정하여 온도를 측정하였다. 화염 형상은 디지털 카메라(MX-2900Z)를 이용하여 연소용 혼합기의 예열 온도와 희석율, 선회수에 따른 화염 형상을 촬영하였다. 다음의 Fig. 3은 노 내의 온도 분포를 측정하기 위한 측정 위치를 나타낸다.

3. 실험 결과 및 고찰

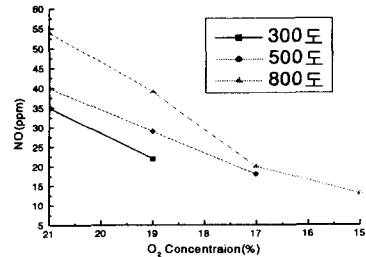
3.1 NO 배출 특성



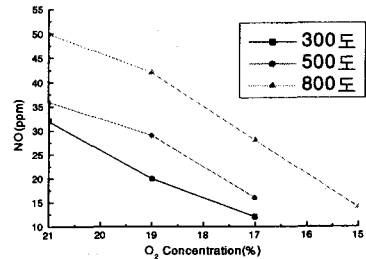
(a) S=0



(b) S=0.26



(c) S=0.6

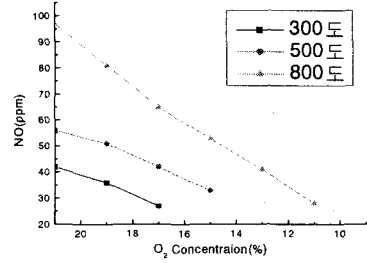


(d) S=1.24

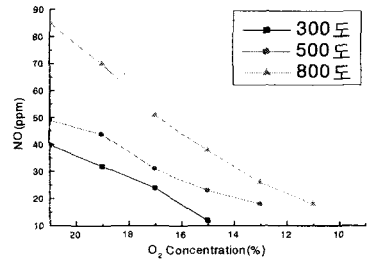
Fig. 3 NO concentration with O₂ concentration

Fig. 3는 연소부하 3.03kw, $\lambda = 1.0$ 일 때의 회석된 산화제의 산소 농도에 따른 NO 배출 특성을 각 선회수 별로 나타낸 그림이다. 일정한 선회수에서 NO emission은 회석율이 일정할 때 예열 공기 온도가 높을수록 증가함을 알 수 있으며, 같은 온도에서는 회석율이 높을수록(산소농도가 낮을수록) NO emission이 감소하고 있음을 볼 수 있다. 그 이유는 회석율이 일정할 때 예열 공기 온도가 증가함에 의해 노 내에서의 연소가 더욱 활발해짐에 따라 단열 화염 온도가 증가하여 thermal NO의 생성이 활발해지게 되고, 같은 온도에서 회석율이 증가하게 되면 산화제 속의 연료와 반응하는 산소의 농도가 줄어들게 되어 결국 단열 화염 온도가 낮아질 뿐만 아니라 국소 고온 영역 발생이 억제되어 thermal NO의 생성이 감소하기 때문이다. 또한 선회수가 증가함에 따라 NO emission의 배출량이 감소하는 것을 볼 수 있는데, 이는 선회수가 증가함에 따라 산화제와 연료의 혼합이 더욱 잘 이루어져 연소 영역에서 연료가 균일하게 분포하게 되어 더욱 균일한 연소가 이루어질 뿐 아니라, 선회 유동에 의한 배가스 재순환 영역이 존재하여 실제 회석율이 더욱 높아지기 때문인 것으로 생각된다.

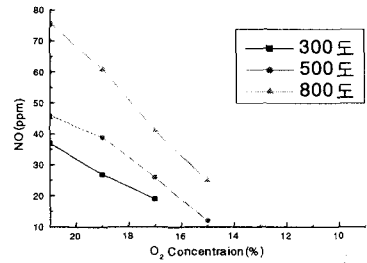
여기서 주목할 점은 예열 공기 온도가 300도에서 500도로 증가할 때보다 500도에서 800도로 증가할 때, NO emission의 배출량이 훨씬 증가한다는 것이다. 또한 예열 공기 온도가 증가할수록 회석율이 높아짐을 알 수 있다. 이는 예열 공기 온도가 증가할수록 연소 안정성이 더욱 증대되어 더 낮은 산소 농도에서도 연소가 가능하기 때문인 것으로 생각된다.



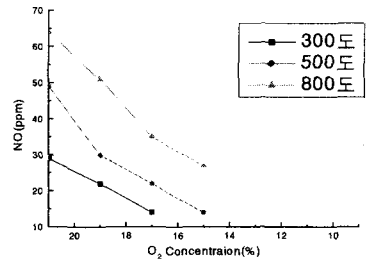
(a) S=0



(b) S=0.26



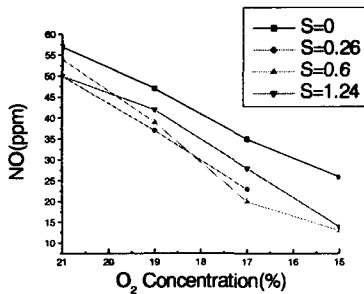
(c) S=0.6



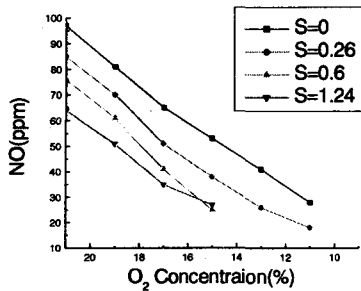
(d) S=1.24

Fig. 4 NO concentration with O₂ concentration

Fig. 4는 Fig. 3에서와 같이 연소부하 4.5kW, $\lambda = 1.0$ 일 때, 회석된 산화제의 산소 농도에 따른 NO 배출 특성을 각 선회수 별로 나타낸 그림이다. 연소부하 3.03kW일 때와 거의 비슷한 경향을 보여주고 있으나, 전체적으로 NO emission 배출량이 증가하고 있음을 볼 수 있다. 이는 연소 부하의 증가로 인한 단일 화염 온도의 증가로 thermal NOx가 증가하게 되기 때문인 것으로 생각된다. 또한 더욱 낮은 산소 농도에서 연소가 가능한 것을 볼 수가 있다.



(a) Combustion load of 3.03kW



(b) Combustion load of 4.5kW

Fig. 5 NO concentration with swirl number at 800°C

Fig. 5는 고온 공기 연소시 NO 배출물 농도에 대한 연료와 산화제의 혼합 특성의 영향을 좀 더 정확히 보기 위해 예열 공기 온도 800도일 때, 선회수에 따른 NO emission 농도를 나타내고 있다. 각 산소 농도에서 선회수가 증가할수록 NO 농도도 감소하고 있음을 볼 수 있다. 그러나 회석한계는 오히려 낮아져 산소 농도를 낮출 수가 없다.

3.2 화염 형상

화염은 선회 공기 노즐의 선회수가 증가함에 따라 화염 끝단이 더 넓게 퍼지는 것을 볼 수 있었고, 이로 인해 버너 중심축에서 배가스 재순환 영역이 존재할 것이라는 것을 예측할 수 있으며, 공기의 회석율이 증가함에 따라 황염에서 청록염으로 바뀌는 것을 볼 수 있었다. 이는 NO가 감소하고 CH 라디칼이 증가함에 의한 것으로 생각된다.

4. 결론

고온 공기와 스윙 공기 노즐을 이용하여 동축 분류 화염을 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 예열 공기 온도가 증가함에 따라 thermal NOx의 생성이 활발해져 NO emission 배출량이 증가되었다. 또한 높은 회석율(낮은 산소 농도)에서도 안정 연소가 가능하여 전체적으로 각 온도에서의 최저 NO emission 배출량은 거의 비슷함을 볼 수 있다. 따라서 열효율 측면에서 본다면 연소용 공기를 고온으로 예열·회석시키는 방법이 좋다고 하겠다.

2. 스윙 공기 노즐의 선회수가 증가함에 따라 NO emission 배출량이 감소하였다. 이는 선회수 증가에 따라 산화제 및 회석율의 혼합기와 연료의 혼합이 균일하게 이루어져 안정한 연소 및 균일한 온도장을 얻을 수 있기 때문으로 생각된다. 뿐만 아니라 선회수가 증가함에 따라 더 낮은 회석율까지 안정 연소가 가능함을 볼 수 있었다.

3. 단위 시간당 연소 부하가 클수록 NO emission 배출량이 많아지고, 높은 회석율에서도 안정 연소가 가능하다.

참고문헌

(1) Gyung-Min Choi, Masashi Katsuki, 2001, "Advanced Low NOx Combustion Using Highly Preheated Air", Energy Conversion and

- Management, Vol 42, pp. 639~652
- (2) Yutaka Suzukawa, Shunichi Sugiyama, Yoshimichi Hino, 1997, "Heat Transfer Improvement and NOx Reduction by Highly Preheated Air Combustion", Energy Conversion and Management, Vol 38, No. 10-13, pp.1061~1071
 - (3) Toshiaki Hasegawa, Ryoichi Tanaka, 1994, "High Temperature Excess-enthalpy Combustion for Efficiency Improvement and NOx Abatement", AFRC & JFRC, Section 9, NO. 9E
 - (4) M. Nishimura, T. Suzuki, R. Nakanishi, R. Kitamura, 1997, "Low-NOx Combustion under High Preheated Air Temperature Condition in An Industrial Furnace", Energy Conversion and Management, Vol 38, NO. 10-13, pp. 1353~1363
 - (5) Raymond Gabriel, Hose E. Navedo, Rucy-Hung Chen, 2000, "Effects of Fuel Lewis Number on Nitric Oxide Emission of Diluted H₂ Turbulent Jet Diffusion Flames", Combustion and Flame, Vol 121, pp. 525~534
 - (6) 김철민, 최수진, 전충환, 장영준, 2000, "평면 화염 버너의 선회유동 및 연소특성에 관한 실험적 연구", 대한기계학회 추계학술대회는 문집, Vol B, pp. 686~691
 - (7) 정용기, 전충환, 장영준, "단일 프레임 이중 노출법을 이요한 Flat Flame Burner의 유동장 특성에 관한 연구", 대한기계학회 추계학술대회논문집, Vol B, pp. 692~697