

## 예열공기온도와 희석비율에 따른 동축 확산 화염의 연소 특성

김진식\* · 곽지현\* · 전충환\*\* · 장영준\*\*

### Combustion characteristics of coaxial diffusion flame with preheated air temperature and dilution level

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

**Key Words:** Preheated air(고온공기), Dilution level(희석률)

#### Abstract

An experiment using preheated air in the coaxial diffusion flame burner was carried out in order to decrease NOx emission and improve the thermal efficiency. Preheated air combustion generally produces high NOx emissions but it was known very well to reduce NOx emission by diluting the combustion air with inert gas in preheated air combustion. In our study, N<sub>2</sub> gas was used for diluent and propane was utilized for fuel. We set the combustion air temperature on 300K, 500K, 700K, 900K and dilution level from 21% to 10% in terms of oxygen concentration. NOx emission increased along increment of combustion air temperature and decreased along increment of dilution level(lowering of oxygen concentration in combustion air). Flame-off limit with dilution level enhanced, flame length became longer and the location of maximum flame temperature became lower with increasing of combustion air temperature.

기호설명

#### 1. 서론

산업혁명 이후 지구 대기 오염 정도는 기하급수적으로 심각해져 왔으며 1900년대 중·후반에 들어서는 그 정도가 더욱 심각해져 CO<sub>2</sub>에 의한 지구 온난화와 이로 인한 많은 관련 피해와 오존층 파괴 등 인류의 생존과 쾌적한 생활권이 위협

---

\* 부산대학교 대학원 기계공학과

\*\* 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소

받게 되었고 이의 보장을 위해 대기오염 제어법안을 제정하게 되었다. 오늘날 이 규제 강화에 의해 각 산업 현장에서는 강화된 규제법안을 만족하기 위해 많은 노력을 하고 있으며, 이는 곧 국가 경쟁력과도 직결되는 중요한 문제이다.

현재 많은 대기오염물질 중 주된 관심의 대상이 되고 있는 물질 중의 하나인 NOx는 산업용 연소로에서 우선 제어해야 할 대상으로 여겨지고 있으며, 이의 저감을 위해 많은 연구자들이 새로운 연소 기술을 개발하고 있다. 현재까지 이러한 NOx를 저감하기 위해 개발된 새로운 연소 기술 중의 하나로 고온공기연소 (highly preheated air combustion) 방식이 있다. 이는 대기로 버려지는 연소 가스 (flue gas)의 폐열을 이용하여 연소 버너로 들어가는 연소용 공기(fresh air)를 예열·회색시켜 시스템의 열효율(thermal efficiency)를 높임과 동시에 NOx emission의 배출을 저감할 수 있다. 이 고온공기연소 방식에서 NOx를 저감시키는 원리는 고온의 연소용 공기를 이용함에 의해 연소 안정성이 증대되어 저산소농도에서도 안정된 연소가 가능하여 최대 연소 온도가 감소하게 되고, 노 내에 균일한 온도 분포가 이루어져 국소 고온 지역 생성을 억제하여 주요 NOx 생성 mechanism 중의 하나인 thermal NOx를 줄이는 것이다.

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.

회색제(diluent)로는 연소 가스뿐만 아니라, 질소(N<sub>2</sub>), 이산화탄소(CO<sub>2</sub>), 아르곤(Ar), 헬륨(He) 등의 불활성 가스등도 사

용되고 있으며, 회색제의 종류에 따라 NOx의 배출 특성도 달라진다. GABRIEL 등은 수소(H<sub>2</sub>) 난류 확산 화염에서 아르곤과 헬륨을 회색제로 사용하여 회색제의 종류가 NOx emission에 미치는 영향을 연구하였다. 뿐만 아니라 연료의 종류에 따라서도 NOx emission 배출 정도가 달라진다고 알려져 있다.

본 실험에서는 예열된 공기의 온도와 회색율에 따른 화염의 온도 분포 및 NO emission의 배출 특성을 고찰하여 고온공기를 이용한 연소의 기초적인 특성을 살펴보고자 한다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1. 실험장치

본 연구에서 사용된 실험장치는 Fig.1과 같이 크게 1차 버너와 연소로, 2차 버너와 연소로, 열교환기, 공기 및 회색제 공급 장치, 온도 취득 장치, 연소 가스 분석 장치로 구성되어 있다. 1차 버너와 연소로에서 발생한 고온의 연소 가스는 열교환기로 들어가게 되고, 열교환기에서 2차 버너로 들어가는 연소 공기와의 열교환을 통해 연소 공기를 고온으

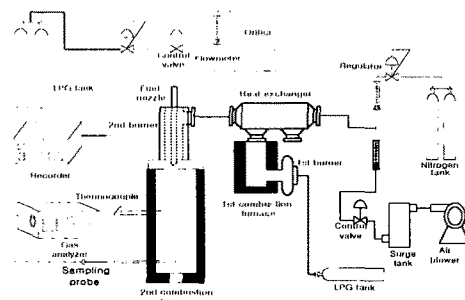


Fig.1 Schematic of experimental apparatus

로 예열하게 된다. 열교환기는 내부가 연소 가스와 연소 공기의 통로는 서로 주름상의 판이 여러 겹으로 들어 있고, 단절되어 있다. 2차 버너는 목(throat) 직경 27mm, 연료 노즐 직경 10mm의 동축 확산 버너이다. 또한 연료 노즐 주위에 2mm×3.5mm 크기의 슬릿상의 분출구 6개를 가지고 있는 공기 노즐이 있어 연료와 공기의 혼합 작용을 강화시켰다. 연소로는 내면이 250mm×250mm×500mm의 크기를 가지고 있고, 공기는 정격출력 0.73kW의 3상 ring blower를 사용하여 공급된다. 회석제는 공업용 질소(순도99%)를 사용하였고, 노 내 온도는 R-type 열전대를 사용하여 화염 중심에서 측방향으로 측정하였다. 연소 가스 농도 분석은 전기 화학센서가 장착된 연소 가스 분석기 COSA-6000을 이용하여 측정하였다.

## 2.2. 실험방법

연소부하 3.03kW,  $\Phi = 1.0$  조건에서 연소 공기 내의 산소 농도와 연소 공기 온도에 따른 NO 배출특성과 화염 중심에서의 온도를 측방향으로 30mm 간격으로 측정하였다. 연료노즐은 버너 타일부에서 25mm 안쪽에 위치하고 있으며, 공기 노즐은 연료노즐 팁과 같이 위치하도록 하였다. 연소 공기 온도는 300K, 500K, 700K, 900K가 되도록 하였는데, 연소 공기 온도는 1차 버너의 연소 부하를 변화시켜 제어하였다. 연소 가스 농도 측정에는 노 내 온도를 700K에서 800K 사이로 유지하면서 측정하였으며 연소로 내로 외부 공기가 유입되는 것을 차단하기 위해 연소 가스 농도 측정 프로브를 삽입

하는 부분 외에는 모두 차단하고 실험하였다. 화염온도는 R-type 열전대를 이용하여 화염의 중심에서 측방향으로 30mm씩 이동하면서 Thermo-Dac을 통해 2초 간격으로 1분 동안 취득하여 PC로 저장하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 온도특성

Fig.2는 각각의 연소 공기 예열 온도에서 측방향에 따른 화염 중심에서의 화염 온도를 보여주고 있다. 연소 공기 온도가 300K에서는 최고 화염 온도가 150mm 지점에서 발생하지만 연소 공기 온도가 500K, 700K, 900K으로 증가함에 따라 화염 상류로 이동하는 것을 볼 수 있고 화염 길이가 짧아지는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 연소 공기 온도가 증가하면서 연료가 화학적으로 활성화되어 연소속도가 빨라지고 화염체적이 줄어들어 화염 상류부에서 연소가 활발히 이루어져 연료가 짧은 시간에 완전 연소가 가능하기 때문인 것으로 생각된다. Fig.3은 각 연소 공기 온도에서의 최고 화염 온도를 나타낸 것으로 연소 공기 온도가 증가할수록 화염 온도도 증가한다는 것을 알 수 있다. 이 역시 연소 공기 온도 상승에 따른 엔탈피 증가가 화염 온도에 반영된 것으로 생각된다.

Fig.4는 각 연소 공기 온도에서 (a)는 측방향 30mm지점, (b)는 최고온도지점, (c)는 측방향 210mm지점에서의 온도 변동을 보여주고 있다. 각 그래프에서 x축과 평행한 선은 각 지점에서의 평균 온

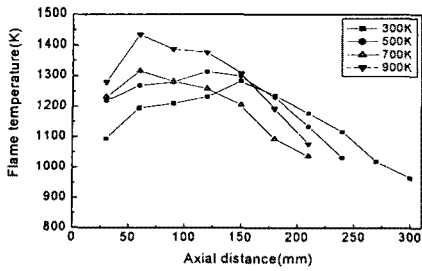


Fig.2 Flame temperature distribution along axial distance

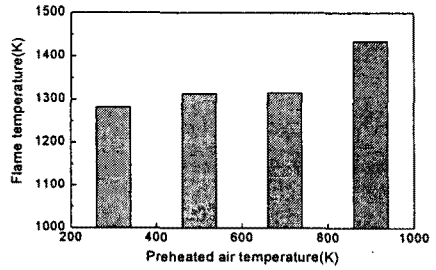


Fig.3 Maximum flame temperature with preheated air temperature

도를 나타낸다. (a)를 보면, 화염 상류 지역에서 연소 공기 온도가 증가할수록 화염 온도 변동이 적어지는 것을 볼 수 있다. 이는 연소 공기 온도가 상승함에 따

라, 연료와 연소 공기의 산화작용이 활발해져 보다 안정된 연소가 가능해지기 때문인 것으로 생각된다. (b)에서는 연소 공기 온도에 상관없이 최고 온도 지역에

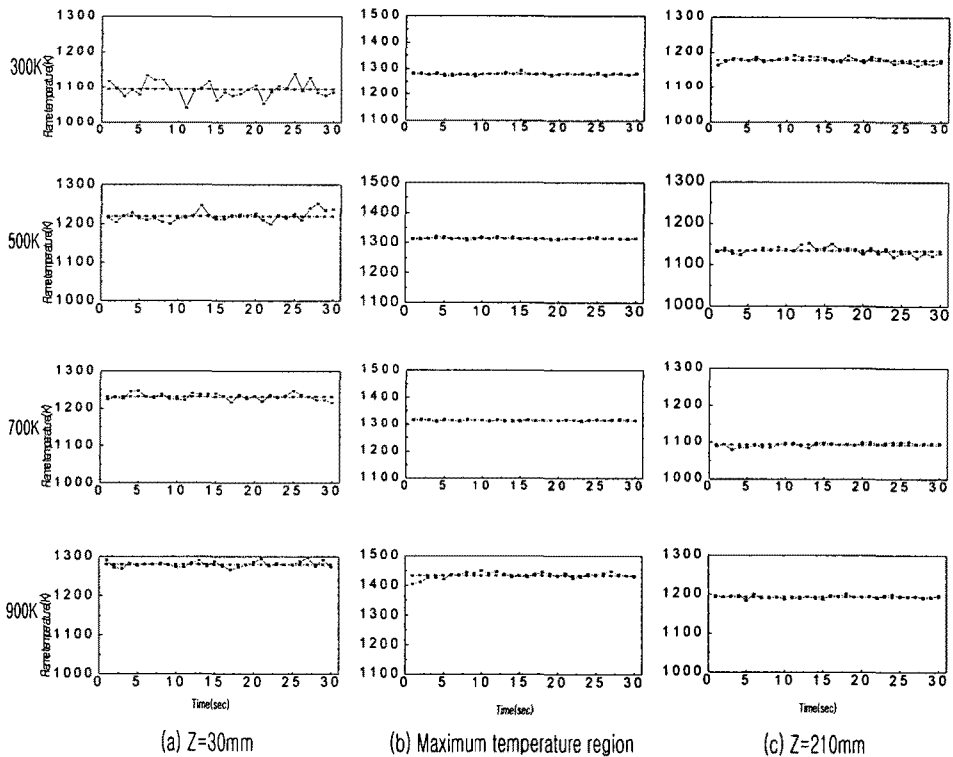


Fig.4 Flame temperature fluctuation with preheated air temperature

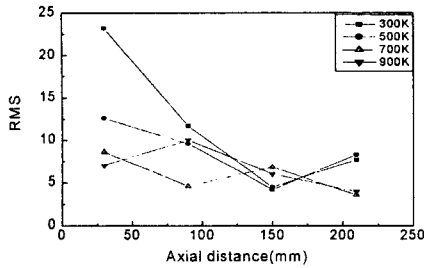


Fig.5 RMS of flame temperature

서는 연료와 연소 공기의 활발한 산화작용에 의해 연소가 보다 안정되어 온도 변동이 적어지는 것을 볼 수 있다. (c)에서는 (a)와 비슷하게 연소 공기 온도가 증가할수록 온도 변동이 적은 경향이 나타났지만 그 차이가 (a)에 비해 적은 것을 볼 수 있다.

Fig.5는 연소 공기 온도에 따른 화염 온도의 RMS값을 보여주고 있다. 연료 노즐에서 분사된 연료가 화염 상류지역에서는 연소 공기와 아직 원활히 혼합되지 않아 불안정한 연소가 일어나게 되고, 그 결과 온도 변동량이 커져 RMS가 큰 값을 가지는 것을 볼 수 있고, 안정된 연소가 일어나는 최고 화염 온도부근에서 가장 작은 값을 가지는 것을 알 수 있다. 또한 화염 하류 영역에서는 대체로 RMS 값이 작은 것을 알 수 있고, 이러한 결과는 Fig.4와 비슷한 경향을 보여주고 있다. 또한 연소 공기 온도가 증가할수록 RMS값이 작은 것을 볼 수 있는데, 이를 통해 연소 공기 온도가 증가함에 따라 연료와 연소 공기의 활발한 연소 작용으로 보다 안정된 연소를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

### 3.2. NO 배출 특성

Fig.6과 Fig.7은 연소 공기 온도와 연소 공기 내의 산소 농도에 따른 NO 배출 특성을 보여주고 있다. Fig.6을 보면, 각 연소 공기 내의 산소 농도에서 연소 공기 온도가 증가함에 따라 NO 배출량도 증가하는 것을 볼 수 있는데, 화염 온도 분포와 일치하는 것으로 보아, 이는 연소 공기 온도가 증가함에 따라 화염 온도가 증가하게 되어 화염 온도에 절대적으로 의존하는 열적 NO(thermal NO) 생성이 활성화되어 NO 배출량이 증가하는 것으로 사료된다. Fig.7에서는 각 연소 공기 온도에서 산소 농도에 따른 NO 배출 특성을 보여주고 있다. NO 배출량이 산소 농도가 감소함에 따라 감소하는 것을 알 수 있다. 연료 노즐에서 분출되는 연료가 고온의 주변 연소 공기로부터의 열전달로 인해 화학적으로 활성화되고,

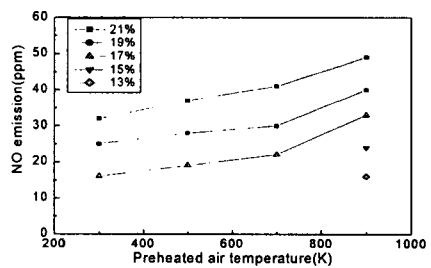


Fig.6 NO emission with preheated air temperature

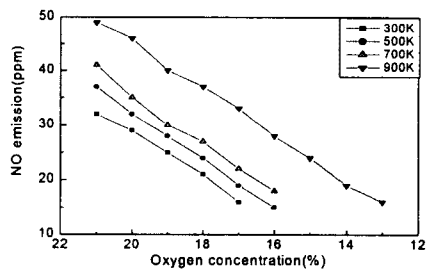


Fig.7 NO emission with oxygen concentration in combustion air

이로 인해 보다 낮은 산소 농도에서도 안정 연소가 가능해지게 된다. 연소 공기 내의 산소 농도가 낮은 분위기에서 연소가 일어나게 되면, 공기 중의 질소와 반응하여 NO를 발생시키는 산소가 적어지게 되므로 NO 발생량이 감소하게 되는 것으로 생각된다. 이는 또한 연소 공기 내의 산소 농도가 감소함에 따라 NO 배출량이 거의 선형적으로 감소하는 경향을 보면 더욱 잘 알 수 있다.

#### 4. 결론

동축 확산 화염에서 예열 공기를 이용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 예열 공기 온도가 증가함에 따라 화염 온도가 증가하였고, 또한 화염 길이 또한 짧아지는 것을 볼 수 있었다. 이는 연료와 연소 공기의 반응속도가 고온의 분위기로 인해 빨라져 화염 상류 영역에서 활발한 연소가 이루어지기 때문이다.

(2) 예열 공기 온도가 증가함에 따라 화염 온도의 변동이 현저히 감소하였고, 최고 화염 온도 영역에서는 예열 공기의 온도에 상관없이 화염 온도의 변동량이 적었다.

(3) NO 배출량은 예열 공기 온도가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보여주었으나, 연소 공기 내의 산소 농도가 낮아짐에 따라 감소하는 경향을 보여주었다. 이는 예열 공기 온도가 증가함에 따라 화염 온도가 증가하게 되어 열적 NO 생성이 활성화되지만, 산소 농도가 감소함에 따라 공기 중의 질소와 반응할 수 있는 열적 NO 생성 기구가 약화되기 때문이다.

(4) 예열 공기 온도가 증가함에 따라 더 낮은 산소 농도에서 안정 연소가 가능하였다.

#### 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, Ruey-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