

# 역확산 다공 연소기에서 CO<sub>2</sub> 첨가에 따른 순산소 연소 특성에 관한 실험적 연구

서정일\* · 광영태\* · 배수호\* · 홍정구\* · 이은도\* · 신현동\*\*†

## Experimental Study on the Effect of CO<sub>2</sub> Feeding on the Oxygen Combustion Characteristics by using Inverse Type Multi-hole Burner

Jeong Il Seo, Young Tae Guahk, Soo Ho Bae,  
Jung Goo Hong, Uen Do Lee, and Hyun Dong Shin

### ABSTRACT

The performance of oxygen combustion with CO<sub>2</sub> feeding was investigated in a pyrex tube furnace. The inverse type multi-hole burner was used for improving mixing and wide operating range. It introduced oxygen, fuel, and oxygen, respectively, from center tube to outer tubes. Oxygen combustion characteristics with excess oxygen ratio, oxygen feeding ratio, and CO<sub>2</sub> feeding flow rate were studied to optimize the operating condition and to apply the oxygen combustion with recirculation of flue gas to a real furnace. This paper presents results on the effect of CO<sub>2</sub> feeding flow rate on the structure of the flames and concentrations of NO and CO emissions. The visible flame length was shortest due to well mixing between fuel and oxygen when the oxygen feeding ratio was 0.25. The NO emission was reduced drastically regardless of excess oxygen ratio when the CO<sub>2</sub> feeding flow rate was larger than 15 lpm. The CO emission is varied by changing the CO<sub>2</sub> feeding flow rate but the CO emission characteristics is highly affected by excess oxygen ratio. When the excess oxygen ratio is below  $\lambda=1.1$ , the CO emission increased as the CO<sub>2</sub> feeding flow rate increased.

**Key Words** : Oxygen Combustion(순산소 연소), CO<sub>2</sub> Feeding(CO<sub>2</sub> 첨가), NO<sub>x</sub>, Inverse Type Multi-hole Burner(역확산 다공 연소기)

### 기 호 설 명

$\lambda$  Excess oxygen ratio

$\gamma$  Oxygen feeding ratio

### 1. 서 론

최근 들어 환경규제의 강화로 인해 연소시스템에서 질소산화물의 발생을 억제하며 이를 저감시키려는 연구를 지속적으로 해 오고 있다. 질소산

화물을 저감시키는 기술 중 순산소 연소는 산화제로서 공기 대신 산소를 사용하여 고효율 연소와 함께 NO<sub>x</sub>를 근원적으로 차단할 수 있다는 큰 장점이 있다[1]. 또한 이론적인 연소생성물로 CO<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>O만 발생하므로 이들의 분리가 용이하고, 회수하여 재활용하는 방법에 쉽게 접목할 수 있어 국제적으로 주요 쟁점이 되고 있는 CO<sub>2</sub>의 배출 규제에 능동적으로 대처할 수 있다. 그러나 산소를 산화제로 사용할 경우 고온의 화염대가 형성되지만 이로 인해 노벽 등의 열손상이

\* 한국과학기술원 기계공학과 대학원

\*\* 한국과학기술원 기계공학과

† 연락저자, hdshin@kaist.ac.kr

나 출력이 부족할 수 있다. 또한 연소시스템으로 주위 공기의 유입(또는 침투)이나 연료 내에 미량의  $N_2$ 가 있는 경우 고온연소에 의한  $NO_x$  발생의 우려가 있다는 단점이 있다. 이러한 단점들은 순산소 연소 시 배기가스 중 대부분을 차지하는  $CO_2$ 를 재순환하는 방식을 사용하면 화염의 온도뿐만 아니라 화염의 배출가스 특성을 제어할 수 있고, 또한 화염 온도의 제어를 통해 기존의 열교환기를 최소의 보완만으로도 사용할 수 있을 것이다.

Kim 등[2]은 산업현장에서 이용되는 동축류 타입의 연소기를 이용하여 연소용 공기 중의  $N_2$ 를  $CO_2$ 로 대체하는 경우 화염의 안정성, 연소실 내부의 온도 및 배기가스 특성 변화 등 연소특성 변화를 연구하였다. Lee 등[3]은 삼중관 산소부화 역확산 버너를 사용하여 연료와 산소의 노즐 공급방식의 변화 및 산소와 공기의 공급비(P), 그리고 산화제인 공기와 순산소의 혼합정도(MIX)에 따라 화염 구조와 열전달 특성을 LII(Laser Induced Incandescence) 방법과 복사열전달미터(radiation heat flux meter)를 이용해 매연(soot)의 정성적인 분포 및 복사열전달을 측정하여 관찰하였다. 한편 산소부화 연소에 대하여 대항류 화염의  $CO_2$  첨가에 따른 화염의 구조 및  $NO$  생성 특성에 대한 수치해석 연구[4]를 비롯하여 랩 스케일(lab-scale) 연소로에서 실제 배기가스의 재순환율에 따른 배기가스의 배출 특성 등이 연구되어 왔다[5-10]. 하지만 산소 연소로에서 배기가스 재순환시 연소특성 및 배출가스의 특성 변화에 대한 폭 넓은 기초 연구결과들이 부족한 편이다.

본 연구에서는 배기가스 재순환을 통해 화염의 온도뿐만 아니라 화염의 배기가스 특성을 조절할 수 있고, 실제 연소로에 적용할 수 있는 역확산 다공 연소기(inverse type multi-hole burner)를 새롭게 설계하였다. 역확산 다공 연소기를 이용해 산소 연소로와 형상(직경, 길이)이 유사한 파이렉스관(pyrex tube) 연소로에서 산소공급비( $\gamma$ : oxygen feeding ratio), 산소과잉율( $\lambda$ : excess oxygen ratio)과  $CO_2$  첨가량( $CO_2$  feeding flow rate)에 따른 연소특성 및 배기가스의 특성을 파악하였으며 다양한 연소조건 중 실제 연소로에 적용 가능한 조건들을 살펴보았다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

Fig. 1은 역확산 다공 연소기의 개략도이다. 직경  $D = 6$  mm 중심 산소노즐(inner oxygen nozzle) 및 직경 11 mm의 원주 상에 직경  $D = 2.5$  mm의 연료 분사구 8개가 배치된 연료노즐과

직경 21 mm의 원주 상에 직경  $D = 2.5$  mm의 산소 분사구 8개가 배치된 외곽 산소노즐(outer oxygen nozzle)로 이루어져 있고, 그 주위로 이중노즐로 이뤄진 워터자켓(water jacket)이 있어 버너의 온도 상승을 방지해 준다. 특히, 연료노즐과 외곽 산소노즐의 직경  $D=2.5$ mm의 분사구의 8각형 배치는 Lee 등[11]의 다수 노즐 배치에 대한 연구를 참조하였고, 연료 및 산화제의 분사구의 직경은 Park[12]의 실험 결과로부터 버너 설계조건을 결정하였다.

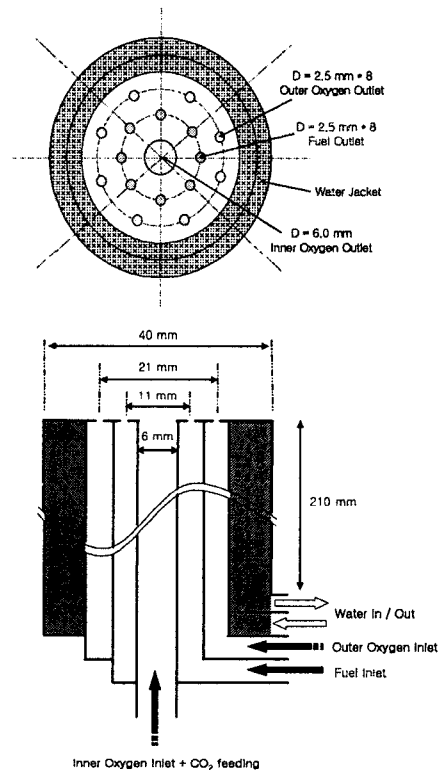


Fig. 1 Schematic diagram of inverse type multi-hole burner

이 버너는 고부하 연소를 위한 전체 유량의 증가에도 불구하고 중심노즐에 공급되는 산화제의 유속이 상대적으로 낮기 때문에 넓은 운전조건 하에서 화염의 부상이나 날림 없이 안정적으로 존재하지만 일부 실험조건에서 부상영역도 존재하였다. 또한 선회기(swirler)를 버너에 별도로 설치하지 않고도 넓은 유량 범위에서 안정적으로 순산소 연소가 가능하였다.

Fig. 2는 실험장치의 개략도로서 역확산 다공 버너, MFC(mass flow controller), 배출 가스 포집을 위한 샘플링 브루브(sampling probe) 및 가스 분석기로 구성되어 있다. 여러 실험조건에 대한 화염 가시화와 주위 공기의 유입(entrain)을

막기 위해 연소실 벽은 파이렉스관으로 이뤄져있고, 배기가스의 조성을 확인하기 위하여 파이렉스관 연소로 후단에 샘플링 프로브를 설치하여 NO, CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> 가스 분석기(HORIBA PG-250A)에 연결하였으며 CO<sub>2</sub> 농도를 100% 범위까지 측정 가능한 별도의 CO<sub>2</sub> 가스 분석기(BEA-715 NDIR Gas analyser)를 추가로 설치하였다. 각각의 농도 데이터는 모두 A/D board(DBK15 universal current/voltage input card)를 사용하여 획득하여 평균값을 얻었다.

화염의 직접 사진은 노출시간 1/250 sec, 초점거리 1.0m, F2.9로 모든 실험조건에서 일정하게 설정하여 이미지를 획득하였다.

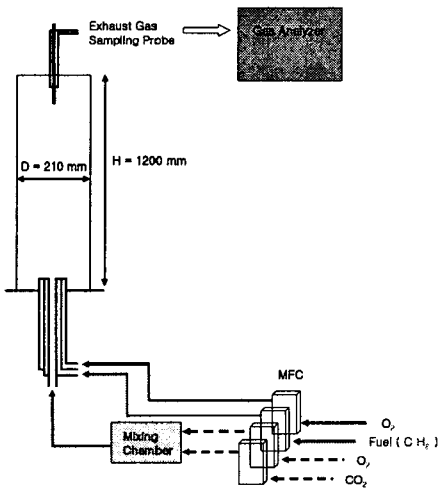


Fig. 2 Experimental apparatus(pyrex tube combustor)

2.2 실험조건

본 연구에서는 중심노즐과 전체 산소노즐(중심노즐 및 외곽노즐)의 산화제 공급 유량 비율인 산소공급비( $\gamma$  : oxygen feeding ratio), 전체 연료 유량에 대한 산소과잉율( $\lambda$  : excess oxygen ratio) 및 CO<sub>2</sub> 첨가량(CO<sub>2</sub> feeding flow rate)만을 실험 파라미터로 사용하였다. 연료로 사용한 프로판의 유량은 모든 조건에서 15 lpm으로 고정하여 실험하였고, 산소과잉율( $\lambda$ )과 산소공급비( $\gamma$ )의 정의는 다음과 같다.

$$\lambda = \frac{\text{total oxygen flow rate}}{\text{oxygen flow rate for stoichiometry}}$$

$$\gamma = \frac{\text{inner oxygen flow rate}}{\text{total oxygen flow rate}}$$

Table 1 Oxygen flow rate condition

[Unit : lpm, Fuel flow rate : 15 lpm]

|                 | $\lambda = 1.0$<br>(total oxygen flow rate : 75lpm) |              | $\lambda = 1.1$<br>(total oxygen flow rate : 82.5lpm) |              | $\lambda = 1.2$<br>(total oxygen flow rate : 90lpm) |              |
|-----------------|---|--------------|---|--------------|---|--------------|
|                 | Inner nozzle  | Outer nozzle | Inner nozzle  | Outer nozzle | Inner nozzle  | Outer nozzle |
| $\gamma = 0.0$  | 0   | 75           | 0   | 82.5         | 0   | 90           |
| $\gamma = 0.25$ | 18.75   | 56.25        | 20.625  | 61.875       | 22.5  | 67.5         |
| $\gamma = 0.5$  | 37.5  | 37.5         | 41.25   | 41.25        | 45  | 45           |
| $\gamma = 0.75$ | 56.25   | 18.75        | 61.875  | 20.625       | 67.5  | 22.5         |
| $\gamma = 1.0$  | 75  | 0            | 82.5  | 0            | 90  | 0            |

본 연구에서는 (1) 순수 산소연소와 (2) CO<sub>2</sub> 혼합 산소연소에 대하여 각각의 산소과잉율과 산소공급비에 따라 실험을 행하였다. 먼저 순수 산소연소에서는 화염길이, 화염의 부상 및 화염날림 등 실험조건 변화에 따른 화염의 거시적 변화를 관찰하였다. CO<sub>2</sub> 혼합 산소연소의 경우 CO<sub>2</sub>의 첨가에 따른 출구 유속변화의 효과를 상대적으로 작게 하기위해 단면적이 상대적으로 매우 큰 중심 산소노즐에만 CO<sub>2</sub>를 첨가하여 실험을 행했다. 외곽 산소노즐에 비해 중심노즐의 압력손실이 작으므로 중심노즐에 CO<sub>2</sub>를 공급하는 것은 실제 배기가스 재순환을 통해 CO<sub>2</sub> 혼합 산소연소를 구현할 때 전체 재순환 시스템의 압력손실을 줄여 주는 효과가 있다. 본 연구에서는 배기가스 재순환을 통해 화염의 온도 및 배출 가스 특성을 제어하는 것이 최종 목표이므로 CO<sub>2</sub> 혼합 산소연소에서는 중심 산소노즐에 CO<sub>2</sub> 첨가에 따른 화염의 변화 및 배기 특성을 관찰하는 실험을 행하였다. Table 1의 각 조건에서 중심 산소노즐에 CO<sub>2</sub>를 각각 8.6 lpm, 12.8 lpm, 16.7 lpm, 20.6 lpm, 24.3 lpm를 산소와 혼합하여 공급할 때 거시적 화염의 특성을 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 화염의 특징 및 길이, 안정화 영역

연소로에 적용하기 위해서는 산소연소 시 과도한 매연이 발생하지 않아야 하고 화염의 부상, 날림 및 화염과 음향과의 과도한 상호작용 또한 피해야 한다. 실험변수에 따라 위와 같은 화염의 거시적 특성 변화와 중심 산소노즐에 CO<sub>2</sub> 혼합에 따른 화염의 안정성을 살펴보았다.

3.1.1 순수 산소연소

Fig. 3(a)는 산소과잉율에 대해 산소공급비를 변화시킬 때 화염의 모양 변화를 관찰하기 위한 직접사진이다. 산소과잉율이  $\lambda=1.0$ 에서는  $\lambda=1.1, 1.2$ 에서와는 달리 산소공급비에 상관없이 매연이 발생되지만, 산소과잉율을 증가시키면 매연의 발생량이 눈에 띄게 감소함을 알 수 있었다. 각 조

건의 연소과정을 살펴보면 연소기 중심노즐에서 공급된 산소와 연료에 의해 과농조건의 화염이 형성되고, 미연의 연료는 하류로 이동하면서 외곽노즐에서 공급된 산소에 의해 희박조건에서 완전연소를 하게 된다. 이러한 화염구조에 의해 실험을 행한 대부분의 산소과잉율 및 산소공급비 조건에서 화염이 전반적으로 안정적으로 존재할 수 있었다.

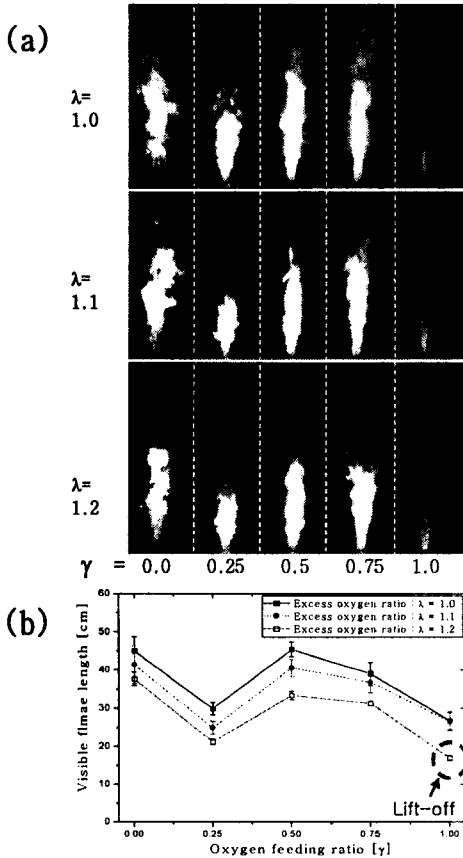


Fig. 3 Direct photographs (a) and visible flame length (b) with excess oxygen ratio and oxygen feeding ratio

산소공급비가  $\gamma=0.0$ 일 때는 중심노즐에서 산소가 공급되지 않는 일반적인 확산화염(normal diffusion flame) 형태로 상류에서는 산소와의 혼합이 잘 이뤄지지 않고, 하류 쪽에서 강한 휘염(yellow flame zone)이 생성되었다. 하지만 산소공급비가  $\gamma=0.25, 0.5, 0.75$ 일 때는 중심노즐에서 산소공급으로 상류에서부터 연료와의 혼합이 활발하게 이뤄져 강한 휘염을 생성하였으며, 특히  $\gamma=0.25$ 일 때 중심 및 외곽노즐에서 공급된 산소와 연료가 가장 잘 혼합되어 화염의 길이가 가장 짧았다. Fig. 3(a)의  $\lambda=1.2, \gamma=1.0$ 인 조건에서는 화염이 부상(lift-off)되어 음향과 고주파수 영역

에서 상호작용하여 고음의 소리를 내며 불안정하게 존재하였고, 부상높이는 5cm 미만으로 작았다. 이는 산소가 중심노즐에서만 공급되기 때문에 전형적인 역확산화염(inverse diffusion flame)을 형성하게 된다. 이러한 화염구조에서는 산소의 노즐 출구 속도가 빨라지게 되면서 다량의 산소가 연소반응에 참여하지 않고 그대로 하류로 이동하게 된다. 이 경우 화염의 부상이 부분적이라도 일어나면 공간적인 연소율이 달라지며, 이는 연소기내 음향과 상호작용을 일으켜 연소 소음을 발생시킨다. 이 조건은 화염의 안정화 특성이 나쁘고, 고주파의 연소소음이 발생하는 것이 외에도 불안전연소에 의한 연소생성물의 특성이 안 좋아지는 영역으로 실험대상에서 제외하였다.

Fig. 3(b)는 산소과잉율, 산소공급비에 따른 화염의 가시적 길이 변화를 나타내며 산소과잉율이 커질수록 산소가 충분히 공급되어 화염길이가 짧아짐을 알 수 있다. 각 산소과잉율에서 산소공급비가  $\gamma=0.25$ 일 때 화염길이가 가장 짧은 것으로 보아 이 조건에서 산소와 연료의 혼합이 가장 활발하여 반응이 강하게 일어나는 것으로 생각된다. 산소공급비에 따른 연료와 산화제의 혼합강도 차이는 배기가스 중 CO의 배출 특성을 통해 다시 확인할 수 있으며 이는 이후에 논의토록 하겠다. 이와 같이 여러 연소조건 중 산소과잉율이  $\lambda=1.0$ 인 경우에는 배연이 상대적으로 많이 발생하였고, 산소공급비가  $\gamma=1.0$ 일 때 산소과잉율에 무관하게 혼합기구의 약화로 연소가 활발하게 일어나지 않으므로 실제 연소기에 적용하기에는 적절치 않다고 생각된다.

### 3.1.2 CO<sub>2</sub> 혼합 산소연소

앞서 산소과잉율과 산소공급비의 변화에 따른 화염의 거시적 변화를 살펴보면 산소과잉율에 관계없이 산소공급비가  $\gamma=0.0$ 인 조건에서는 상류에서 불충분한 혼합에 의해 하류에서 강한 휘염이 나타나며 전반적으로 화염의 길이가 길고,  $\gamma=1.0$ 인 조건에서는 중심 산소와 외곽 연료의 혼합 특성이 좋지 않아 화염이 부상되었다. 이러한 조건은 제외하고, 산소과잉율이  $\lambda=1.0, 1.1, 1.2$ 일 때 산소공급비가  $\gamma=0.25, 0.5, 0.75$ 인 조건에서 CO<sub>2</sub> 혼합에 따른 화염의 변화를 관찰하였다.

Fig. 4(a)는 산소공급비가  $\gamma=0.25$ 일 때 산소과잉율 및 CO<sub>2</sub> 혼합에 따른 화염의 모양 변화를 나타낸다. CO<sub>2</sub> 혼합량이 증가함에 따라 화염이 길어지며 산소과잉율이  $\lambda=1.0$ 에서는 CO<sub>2</sub> 혼합량이 12.8 lpm,  $\lambda=1.1$ 과  $\lambda=1.2$ 에서는 CO<sub>2</sub> 혼합량이 16.7 lpm 이상에서는 화염의 하단부에서부터 화염의 강도가 약해지기 시작하여 CO<sub>2</sub> 혼합량이 24.3 lpm에서는 화염의 강도가 전체적으로 약해졌다. 이러한 경향은 CO<sub>2</sub> 혼합량의 증가에 의해 가장

활발한 혼합특성을 보이는 화염 선단에서의 반응율이 감소하며 반응에 참여하지 않는 CO<sub>2</sub>에 의한 열손실 증가로 인해 화염온도가 감소하였기 때문이다.

산소공급비가  $\gamma=0.25$ 에서는 대부분 화염이 CO<sub>2</sub> 혼합량에 관계없이 안정적으로 존재하였다. 단지 산소과잉율이  $\lambda=1.2$ 일 때 CO<sub>2</sub> 혼합량이 16.7 lpm 이상이면 저주파 영역에서 화염과 음향이 상호작용하여 연소소음이 발생하지만 화염이 부상되지 않았고 화염의 길이만 소폭 변동하였다. Fig. 4(b)는 산소공급비가  $\gamma=0.25$ 일 때 산소과잉율 및 CO<sub>2</sub> 혼합에 따른 화염길이의 변화를 나타낸다. 각 산소과잉율에 대해 CO<sub>2</sub>유량이 증가함에 따라 화염길이가 증가함을 볼 수 있다.

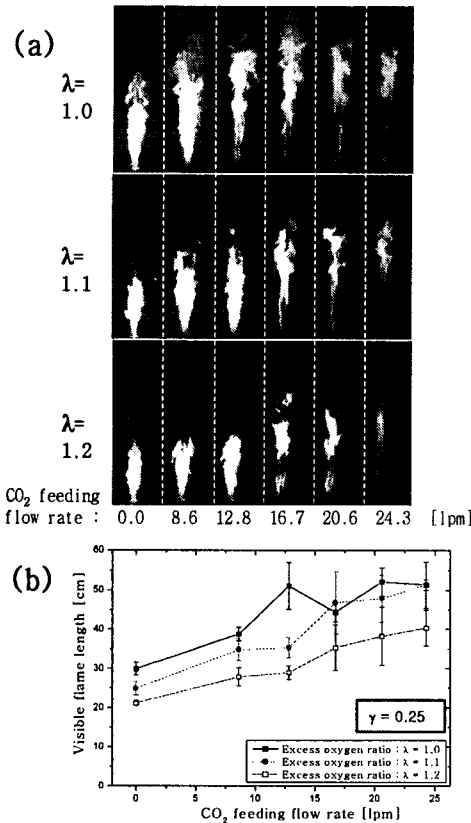


Fig. 4 Direct photographs (a) and visible flame length (b) with excess oxygen ratio and CO<sub>2</sub> feeding flow rate at  $\gamma = 0.25$

Fig. 5(a)는 산소공급비가  $\gamma=0.5$ 일 때 산소과잉율과 CO<sub>2</sub> 혼합에 따른 화염의 모양 변화를 나타낸다. 산소공급비  $\gamma=0.5$ 에서는  $\gamma=0.25$ 일 때와는 달리 모든 산소과잉율에서 CO<sub>2</sub> 혼합량이 16.7 lpm 이상이면 화염이 저주파 영역에서 화염과 음향이 상호작용하여 연소소음이 발생하지만 화염이 부상되지 않았고 화염의 길이만 소폭 변동하

였다. Fig. 5(b)는 산소공급비가  $\gamma=0.5$ 일 때 산소과잉율 및 CO<sub>2</sub> 혼합에 따른 화염길이 변화를 나타낸다. CO<sub>2</sub>유량이 증가함에 따라 화염길이의 변화가 비슷하게 유지되다가 16.7 lpm 이상에서 화염길이의 편차가 커짐을 알 수 있다. 또한 CO<sub>2</sub> 혼합량이 24.3 lpm일 때 화염의 하단부에서부터 청염이 형성되거나 화염 강도의 약화로 인해 강한 휘음이 존재하는 영역이 급격하게 감소함을 직접사진을 통해 확인할 수 있다.

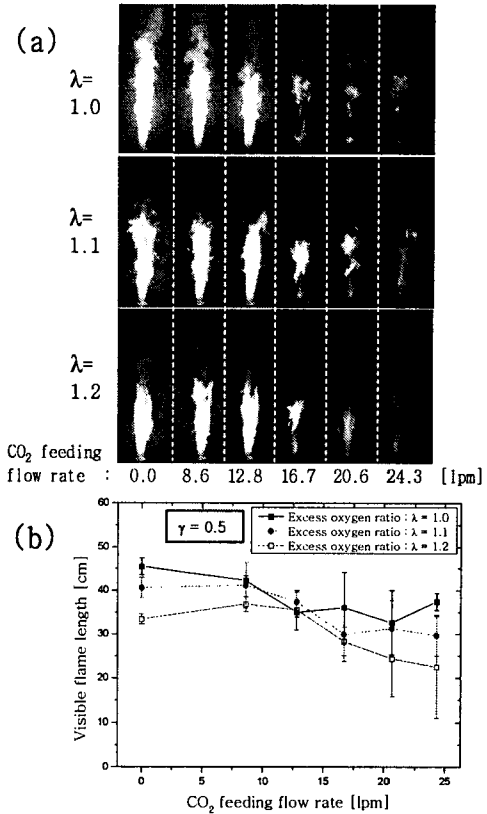


Fig. 5 Direct photographs (a) and visible flame length (b) with excess oxygen ratio and CO<sub>2</sub> feeding flow rate at  $\gamma = 0.5$

산소공급비가  $\gamma=0.25, 0.5$ 인 경우에는 특정 CO<sub>2</sub> 혼합유량 이상에서 화염이 저주파수로 음향과 상호작용하지만 화염이 부상하지 않고 안정적으로 존재하는 반면, 산소공급비가  $\gamma=0.75$ 일 때는 특정 CO<sub>2</sub> 혼합유량 이상에서 화염이 부상되어 고주파수로 음향과 반응하며 불안정하게 존재하는 스크리칭 화염(screaching flame)이 되었다. 연소기의 중심노즐의 산소와 인접한 연료노즐의 연료가 과농조건에서 혼합되어 형성된 화염은 전체 화염을 고정시키는 파일럿 화염(pilot flame)과 같은 역할을 해준다고 생각할 수 있다. 따라서 각 산소과잉율에서 특정 CO<sub>2</sub> 혼합유량 이상

으로 CO<sub>2</sub>를 공급하게 되면 과농조건에서의 화염이 점점 하류로 밀리면서 결국엔 이 화염이 불안정해져 더 이상 전체 화염을 고정시켜주는 안정화 기구를 상실하게 되어 화염이 부상하여 변동하게 된다.

산소공급비가  $\Upsilon=0.75$ 의 경우 중심 산소노즐에서의 산소 및 CO<sub>2</sub> 혼합기의 유속이 산소과잉율이  $\lambda=1.0, 1.1, 1.2$ 일 때는 43.0m/s, 46.3m/s, 49.7m/s 이상에서 각각 화염이 부상하여 고주파의 연소소음을 내며 불안정하였다. 한편 Fig. 3(a)에서도 볼 수 있듯이 산소과잉율이  $\lambda=1.2$ , 산소공급비가  $\Upsilon=1.0$ 의 경우에도 화염이 부상하여 스크리칭 화염을 형성하였다. 이 조건에서의 부상화염과  $\Upsilon=0.75$ 일 때 CO<sub>2</sub> 혼합에 의해 야기된 부상화염은 고주파의 연소소음을 내며 불안정하게 존재하며 화염구조가 매우 유사하였다. 이것으로부터 중심 산소노즐로 공급되는 산소유량이나 산소와 CO<sub>2</sub> 혼합기의 공급유량과 화염의 불안정성이 서로 상관관계가 있음을 알 수 있고, 이는 다음 장에 언급하였다.

### 3.1.3 순산소 연소기의 안정화 선도

화염의 불안정성은 중심 산소노즐에서의 산소 및 CO<sub>2</sub> 혼합기의 유속과 이 혼합기의 유량에 대한 CO<sub>2</sub>의 물분율에 의해 결정된다. Fig. 6은 화염이 안정하게 존재하는 영역과 화염이 부상하여 불안정하게 존재하는 영역을 나타낸다. 그리고 안정적으로 화염이 존재하는 영역은 다시 저주파수로 음향과 상호작용하지만 안정하게 존재하는 영역과 음향과 상호작용 없이 절대적으로 안정하게 존재하는 영역으로 세분화할 수 있다. 그러나 화염이 부상하여 불안정하게 존재하는 영역은 고주파수로 음향과 상호작용하여 귀에 거슬리는 연소소음을 내며 화염이 심하게 떨었다.

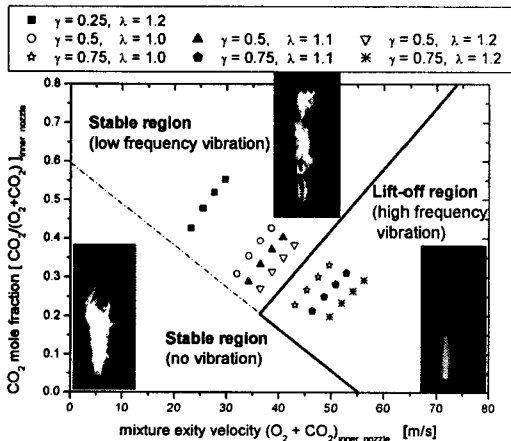


Fig. 6 Stability diagram with oxygen and CO<sub>2</sub> feeding flow rate at the inner nozzle

중심 산소노즐에서의 유속이 상대적으로 낮으면 화염이 절대적으로 안정하게 존재하거나 저주파수의 연소소음이 발생하지만, CO<sub>2</sub> 혼합량을 증가시키면 중심노즐의 유속이 증가하여 화염의 부상이 나타나고 고주파수의 연소소음을 내며 불안정한 화염이 나타났다. 또한 화염이 안정적으로 존재하는 영역은 Fig. 6의 일점쇄선을 기준으로 산화제 측의 CO<sub>2</sub> 농도가 적으면 연소소음이 없다가 산화제 측의 CO<sub>2</sub> 농도가 크면 저주파수의 연소소음이 발생하였다. 특히, 고주파수 불안정이 나타나는 화염의 부상영역에서 CO<sub>2</sub>의 농도를 보다 증가시켜도 실험 범위 내(전체 산화제 유속 ~ 65 m/s)에서 화염날림은 관찰되지 않았다.

### 3.2 배출 가스 특성 분석

파이렉스관 연소로에서 역확산 다공 연소기의 최적 운전 영역 선택을 위해 산소과잉율과 산소공급비에 따른 배출 가스의 특성을 분석하였다. 이론적으로 CO<sub>2</sub> 재순환 산소 연소의 경우 NO<sub>x</sub>가 생성되지 않아야 하지만, 실험 결과를 살펴보면 경우에 따라 많은 양의 NO가 배출되고 있음을 알 수 있다. 본 연구에서는 액화 산소와 액화 CO<sub>2</sub>를 사용했으므로 상용 LPG에 함유되어 있는 미량의 N<sub>2</sub>(약 3%)에 의해 NO가 발생하게 된다. 실제 기존 CO<sub>2</sub> 재순환 산소연소시스템 연구에서 배기가스의 재순환과정에서 시스템 내로 유입되는 N<sub>2</sub>에 의한 NO<sub>x</sub> 발생 특성이나 석탄등 연료 내에 N성분을 포함한 경우 발생하는 fuel NO<sub>x</sub>의 생성과 관련된 연구가 보고된 바 있다[6,13].

#### 3.2.1 순수 산소연소

Fig. 7은 산소과잉율과 산소공급비의 변화에 따른 NO와 CO의 배출 특성을 나타낸다. 먼저 NO를 살펴보면 일반적인 공기연소에 비해 그 배출량이 매우 큼을 알 수 있다. 이는 산소연소에서 고온의 화염온도로 인해 thermal NO<sub>x</sub>가 큰 폭으로 증가했기 때문이다. 또한 각 조건에서 산소과잉율이 증가함에 따라 NO 배출이 증가하게 되는데 이는 앞서 Fig. 3에서 산소과잉율이 증가함에 따라 화염길이 감소하며 연소 특성이 향상되어 화염온도가 현저히 증가했기 때문이다. 산소공급비가  $\Upsilon=0.0, 1.0$ 인 경우 NO가 적게 발생하는데 이는 연료와 산소가 잘 반응하지 않아 화염온도가 낮아지기 때문이다. 한편 CO배출량을 보면 산소과잉율이  $\lambda=1.0$ 인 경우 CO가 매우 많이 발생하게 되어 가스 분석기의 계측 범위(5000ppm)를 벗어났음을 알 수 있다. CO의 농도는 산소과잉율이  $\lambda=1.0$ 보다 높게 되면 급격하게 감소함을 확인할 수 있었다. 그리고 산소공급비에 따른 CO의 농도는  $\Upsilon=0.0, 0.25$ 인 경우에서  $\Upsilon=0.5, 0.75, 1.0$ 보다 상대적으로 적게 나타났다.

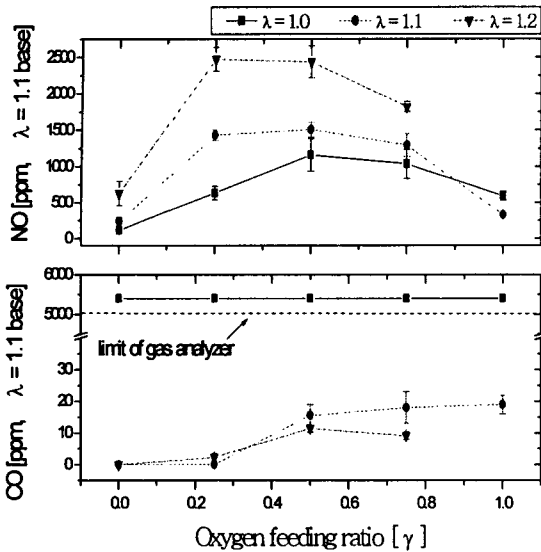


Fig. 7 NO and CO emissions with excess oxygen ratio and oxygen feeding ratio

3.2.2 CO<sub>2</sub> 혼합 산소연소

산소연소 시 연료에 포함된 미량의 N<sub>2</sub>나 혹은 배기가스 재순환의 경우 재순환 시스템 체결부에서 미량의 N<sub>2</sub>가 유입되는 경우에는 산소연소 시 고온으로 인해 아주 많은 양의 NO가 발생함을 Fig. 7에서 확인하였다. 이는 기존 산소연소 시스템이 가진 가장 대표적인 문제점으로 CO<sub>2</sub> 재순환 산소연소 시스템에서도 피할 수 없는 문제로 생각된다. 따라서 적절한 수준의 NO<sub>x</sub> 발생을 위해서는 CO<sub>2</sub>를 이용해 연소장을 컨트롤하여 NO<sub>x</sub>와 CO의 발생량을 제어할 필요가 있다.

Fig. 8은 산소과잉율 및 CO<sub>2</sub>의 혼합에 따른 NO의 배출 변화를 나타낸다. 두 가지 서로 다른 산소공급비( $\gamma=0.25, 0.5$ )에서 CO<sub>2</sub> 혼합량을 증가시키기에 따라 NO의 배출이 점진적으로 감소하는 경향을 보이며 CO<sub>2</sub> 혼합량이 16.7 lpm 이상에서는 매우 적은 양이 검출되었다. NO가 거의 검출되지 않는 특정 CO<sub>2</sub> 혼합량(16.7 lpm) 이상에서는 저주파의 연소소음이 발생함에도 불구하고, 화염이 안정적으로 존재하며 배기가스 중 CO도 거의 발생하지 않거나 소량 발생하고 있음을 알 수 있다. 특히, 산소공급비가  $\gamma=0.25$ 와  $0.5$ 일 때 산소과잉율이  $\lambda=1.2$ 가 되면 CO<sub>2</sub> 혼합량에 무관하게 CO가 거의 배출되지 않았다.

Fig. 9는 산소과잉율과 CO<sub>2</sub> 혼합에 따른 CO 배출 변화를 나타낸다. NO의 배출 특성과 유사하게 CO<sub>2</sub> 혼합량을 증가함에 따라 CO는 전반적으로 거의 배출되지 않거나 소량 발생하는 경향을 보이고 있다. 하지만 산소과잉율이  $\lambda=1.1$ 미만일 경우 CO<sub>2</sub> 혼합량을 증가시키면 CO의 배출이

급격히 증가하였다. Fig. 8과 9에서 보는 바와 같이 산소과잉율과 CO<sub>2</sub>의 혼합정도를 적절히 조절하면 화염이 안정적으로 존재하는 영역에서 NO와 CO를 함께 저감할 수 있는 운전 조건을 찾을 수 있다. 하지만 CO<sub>2</sub>를 통한 배출 가스를 제어하기 위해서는 CO<sub>2</sub>의 공급 위치(중심 또는 외곽 산소노즐)뿐만 아니라 중심 산소노즐과 외곽 산소노즐에 CO<sub>2</sub>의 공급비율 또한 중요한 변수이므로 CO<sub>2</sub>의 공급 위치나 비율의 영향에 대한 계속적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

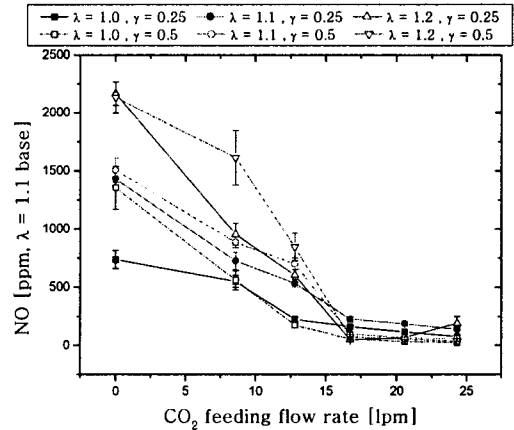


Fig. 8 NO emission with excess oxygen ratio and CO<sub>2</sub> feeding flow rate

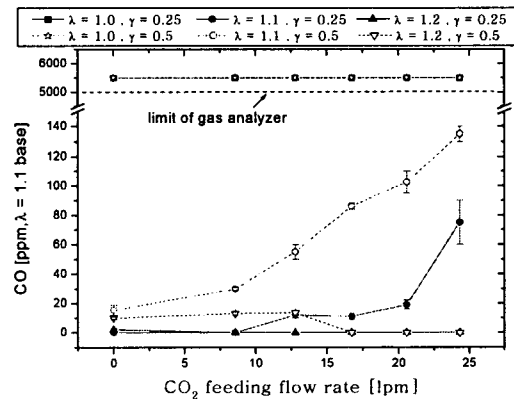


Fig. 9 CO emission with excess oxygen ratio and CO<sub>2</sub> feeding flow rate

4. 결론

본 연구에서는 중심 산소노즐과 외곽 산소노즐 사이에 연료노즐이 존재하여 산소와 연료의 혼합 특성이 향상된 역확산 다공 연소기를 디자인하여 실험을 수행하였다. 연료와 산소의 유량뿐만 아

나라 중심 및 외곽 산소노즐로의 산소 공급비를 조절하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째 산소과잉율이  $\lambda=1.0$ 인 조건은 연료와 산소의 혼합이 충분히 이뤄지지 않아 화염의 길이가 길어지며 매연이 다량 발생하였고, 산소공급비가  $\gamma=0.0, 1.0$ 일 때는 역확산 다공 연소기의 장점을 잃어버리고 전형적인 확산화염과 역확산 화염을 형성하게 되어 화염의 하단부부터 화염의 강도가 약화되거나 화염이 부상하였다.

둘째 산소연소 시 실험된 대부분의 영역에서 화염이 안정하게 존재하였으나, 산소과잉율  $\lambda=1.2$ , 산소공급비  $\gamma=1.0$ 에서 화염이 부상하였다. 이 조건의 부상화염은 음향과 고주파수 영역에서 상호작용하여 고음의 연소소음을 내며 불안정하였다.  $\text{CO}_2$  혼합 산소연소 시 산소공급비가  $\gamma=0.5$ 일 때  $\text{CO}_2$  혼합량이 16.7 lpm 이상이면 화염이 저주파 영역에서 음향과 상호작용하지만 화염이 안정적으로 존재하였다. 비록 저음의 연소소음을 수반하고 있지만  $\text{NO}$ 와  $\text{CO}$ 의 배출 특성을 살펴보면 여전히 거의 검출되지 않거나 소폭 상승하였다. 그러나 산소공급비가  $\gamma=0.75$ 일 때 특정  $\text{CO}_2$  혼합량(12.8 lpm 또는 16.7 lpm)보다 더 많이 혼합하면 화염이 부상하여 고주파 영역에서 음향과 상호작용하여 불안정하였다. 이때 고음의 연소소음과 함께 배출가스 특성이 나빠졌다.

셋째 산소공급비가  $\gamma=0.25$ 이고 산소과잉율이  $\lambda=1.1$ 과 1.2일 때 다른 조건들에 비해 화염이 안정적으로 존재하면서 상대적으로  $\text{NO}$ 나  $\text{CO}$ 의 배출 특성이 좋았다. 그리고  $\text{CO}_2$  혼합 산소연소 조건에서  $\text{CO}_2$ 를 혼합하였을 때  $\text{NO}$ 의 배출 특성이 점진적으로 개선되는 경향을 보이며,  $\text{CO}$ 는 거의 발생하지 않았다. 나아가 산소과잉율이  $\lambda=1.1$ , 산소공급비가  $\gamma=0.25$ 인 조건은  $\text{CO}_2$  재순환 산소연소 방식을 연소로 시스템에 적용하기에 가장 적당한 조건이라 볼 수 있다.

## 후 기

본 연구는 연소기술연구센터(CERC)의 도움으로 진행되었으며 이에 감사의 뜻을 전합니다.

## 참고문헌

[1] Charles, E. B. "Oxygen-enhanced Combustion," Ph. D, CRC Press, 1998  
 [2] H. S. Kim, et al. "A Study on the Characteristics of Combustion for Substituting  $\text{CO}_2$  for  $\text{N}_2$  in Combustion Air," *Journal of the Korea Society of Combustion*, Vol. 7, 2002, pp. 29-35

[3] S. H. Lee, et al. "A Study on Radiation Heat Transfer and Characteristics of Oxygen Enriched Double Inversed Diffusion Flame," *Journal of the Korea Society of Combustion*, Vol. 6, 2001, pp. 50-64

[4] J. W. Han, et al. "Numerical Study on Flame Structure and  $\text{NO}$  Formation Characteristics in Oxidizer-Controlled Diffusion Flames," *The 3rd Asia-Pacific Conference on Combustion*, 2001, pp. 607-610

[5] J. Baltasar, et al. "Flue gas recirculation in a gas-fired laboratory furnace: measurements and modelling", *Fuel*, Vol. 76, 1997, pp. 919-929

[6] Y. Tan, et al. " $\text{CO}_2$  capture using oxygen enhanced combustion strategies for natural gas power plants", *Fuel*, Vol. 81, 2002, pp. 1007-1016

[7] N. Lallemand, et al. "Flame structure, heat transfer and pollutant emission characteristics of oxy-natural gas flames in the 0.7-1 MW thermal input range", *Journal of the Institute of Energy*, Vol. 73, 2000, pp. 169-182

[8] K. Okazaki, et al. " $\text{NO}_x$  reduction mechanism in coal combustion with recycled  $\text{CO}_2$ ", *Energy*, Vol. 22, 1997, pp. 207-215

[9] Tomohiro N., et al. "Analysis of the flame formed during oxidation of pulverized coal by an  $\text{O}_2/\text{CO}_2$  mixture", *Energy*, Vol.22, 1997, pp. 199-205

[10] H. K. Kim, et al. "Application of Flue Gas Recirculation(FGR) to Oxyfuel Combustion", *30th KOSCO Symposium*, 2005, pp. 289-294

[11] B. J. Lee, et al. "Enhancement Of Blowout Limit By The Interaction Of Multiple Nonpremixed Jet Flames", *Combust. Sci. and Tech.*, Vol. 176, 2004, pp. 481-497

[12] J. K. Park, "Stability and Hysteresis Phenomenon of Jet Diffusion Flame with Preheated Coflowing Air", Master thesis, Dept. of Mech. Eng., KAIST, 2003

[13] H. Liu, et al. "Simultaneous easy  $\text{CO}_2$  recovery and drastic reduction of  $\text{SO}_x$  and  $\text{NO}_x$  in  $\text{O}_2/\text{CO}_2$  coal combustion with heat recirculation", *Fuel*, Vol. 82, 2003, pp. 1427-1436