

CO₂ 첨가에 따른 순산소 연소기의 연소특성에 관한 실험적 연구

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

Experimental Study on the Oxygen Combustion Characteristics with CO₂ Feeding

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 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ feeding flow rate was larger than 15 lpm. The CO emission is varied by changing the CO₂ 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 CO₂ feeding flow rate increased.

Key Words : Oxygen Combustion(산소연소), CO₂ Feeding(CO₂ 첨가), NO_x, Inverse Type Multi-hole Burner(역확산 다공 연소기)

기 호 설 명

λ Excess oxygen ratio

γ Oxygen feeding ratio

1. 서 론

공기와 탄화수소계열의 연소시 발생하는 CO₂ 와 NO_x는 지구 온난화 및 광화학반응으로 환경 문제를 유발시키는 대표적인 배출 가스이다. 국제적 배출 가스 규제를 반영하듯 최근에는 효율적인 측면뿐만 아니라 환경에 영향을 최소화할 수 있는 연소기 개발이 매우 중요한 테마로서 활

발히 연구되고 있다.

순산소 연소기는 산화제로서 공기 대신 산소를 사용하여 고효율 연소와 함께 NO_x를 근원적으로 차단할 수 있다는 큰 장점이 있다[1]. 또한 이론적인 연소생성물로 CO₂와 H₂O만 발생하므로 이들의 분리가 용이하고, 회수하여 재활용하는 방법에 쉽게 접목할 수 있어 국제적으로 주요 쟁점이 되고 있는 CO₂의 배출 규제에 능동적으로 대처할 수 있다. 그러나 산소를 산화제로 사용할 경우 화염대가 고온이므로 이로 인해 노벽 등의 열손상 때문에 기존의 파워플랜트나 보일러에 접목할 수 없다는 단점이 있다. 또한 출

* 한국과학기술원 기계공학과 대학원

** 한국과학기술원 기계공학과

† 연락저자, hdshin@kaist.ac.kr

력의 부족이나 주위 공기의 유입(leakage) 및 연료 내 N₂가 있는 경우 고온연소에 의한 NOx 발생의 우려가 있다. 이러한 단점은 순산소 연소 시 배기가스 중 대부분을 차지하는 CO₂를 재순환하는 방식을 사용하면 화염의 온도뿐만 아니라 화염의 배출가스 특성을 제어할 수 있고, 또한 화염 온도의 제어를 통해 기존의 열회수 장치를 최소의 보완만으로도 사용할 수 있을 것이다.

최근에는 Kim등[2]이 산업현장에서 이용되는 동축류 타입의 연소기를 이용하여 연소용 공기 중의 N₂를 CO₂로 대체하는 경우 화염의 안정성, 연소실 내부의 온도 및 배기가스 특성 변화 등 연소특성 변화를 연구하였다. Lee등[3]은 삼중관 산소분사 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 복사 열전달미터(radiation heat flux meter)를 이용해 매연(soot)의 정성적인 분포 및 복사열전달을 측정하여 관찰하였다. 한편, 산소분사 연소에 대하여 대향류 화염의 CO₂ 첨가에 따른 화염의 구조 및 NO 생성 특성에 대한 수치해석 연구[4]를 비롯하여 랩스케일(lab-scale) 연소로에서 실제 배기가스의 재순환에 따른 배기가스의 배출 특성 등이 연구되어 왔다[5-9]. 그럼에도 불구하고 산소 연소로에서 배기가스 재순환시 연소특성 및 배출 가스의 특성 변화에 대한 폭 넓은 기초 연구결과들이 부족한 편이다.

본 연구에서는 배기가스 재순환을 통해 화염의 온도뿐만 아니라 화염의 배출 가스 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(Υ : excess oxygen ratio)과 CO₂ 첨가량(CO₂ 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

그림 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 된 워터자켓(water jacket)이 있어 버너의 온도 상승을 방지해 준다. 특히, 연료노즐과 외곽 산소노즐의 직경 D=2.5mm의 분사구의 8각형 배치는 Lee 등[11]의 다수 노즐 배치에 대한 연구를 참조하였다. 또한 '동축류 분류 확산 화염의 안정성'에 대한 Park[12]의 연구 결과로부터 CO₂의 첨가량에 관계없이 화염의 부상(lift-off)이나 날림(blow-out)이 발생하지 않는 연료 유속이 되도록 분사구 직경(D=2.5mm)을 결정하였다.

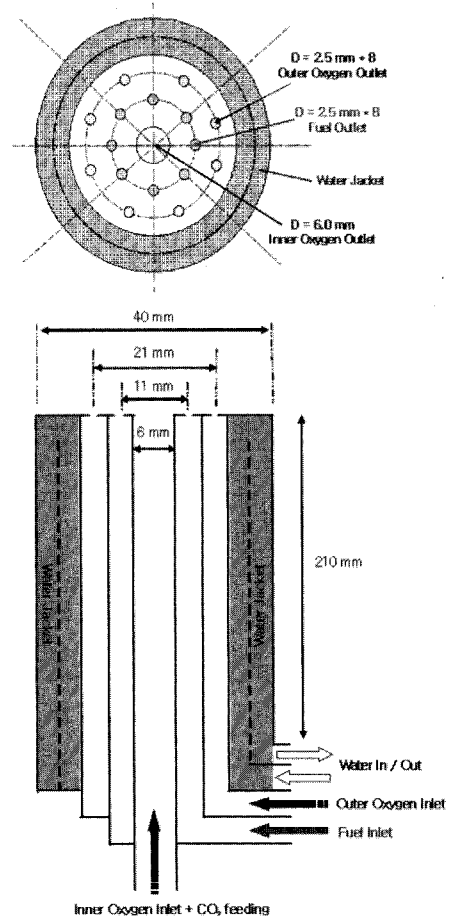


Fig. 1 Schematic diagram of inverse type multi-hole burner

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 조건에서 부상영역도 존재하였다. 또한 중심노즐과 외곽노즐의 산소공급비, 전

체 연료에 대한 산소과잉율 및 CO₂ 첨가량과 CO₂ 첨가 노즐위치 등 화염의 구조나 배출 가스의 특성을 제어할 수 있는 파라미터를 자유롭게 바꿀 수 있는 장점이 있다. 더욱이 선회기(swirler)를 연소기에 별도로 설치하지 않고도 넓

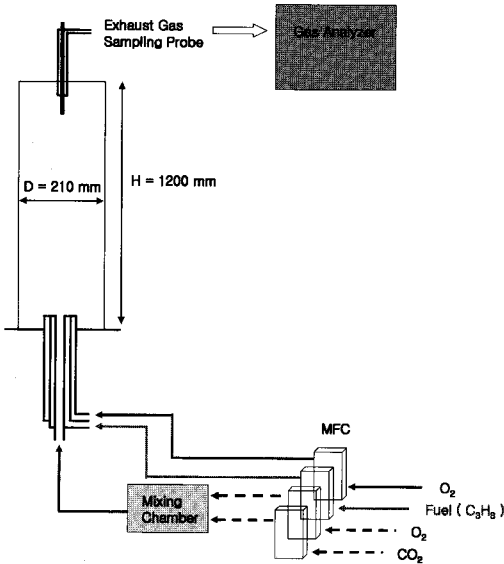


Fig. 2 Experimental setup

은 범위에서 안정한 순수산소 연소가 가능하였다. 그림 2는 실험장치의 개략도로서 역확산 다공버너, 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, CO₂, O₂ 가스 분석기(HORIBA PG-250A)에 연결하였으며 CO₂ 농도를 100% 범위까지 측정 가능한 별도의 CO₂ 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, 초점 거리 1.0m, F2.9로 모든 실험조건에서 일정하게 설정하여 이미지를 획득하였다.

2.2 실험조건

본 연구에서는 중심노즐과 전체 산소노즐(중심노즐 및 외곽노즐)의 산화제 공급 유량 비율인 산소공급비(γ : oxygen feeding ratio), 전체 연료 유량에 대한 산소과잉율(λ : excess oxygen

Table 1. Oxygen flow rate condition

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

	$\lambda = 1.0$ (total oxygen flow rate : 75lpm)		$\lambda = 1.1$ (total oxygen flow rate : 82.5lpm)		$\lambda = 1.2$ (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

ratio) 및 CO₂ 첨가량(CO₂ feeding flow rate)만을 실험 파라미터로 사용하였다. 연료로 사용한 프로판의 유량은 모든 조건에서 15 lpm으로 고정하여 실험하였고, 산소과잉율(λ)과 산소공급비(γ)의 정의는 다음과 같다.

$$\lambda = \frac{\text{total oxygen flow rate}}{\text{oxygen flow rate for stoichiometry}} \quad (1)$$

$$\gamma = \frac{\text{inner oxygen flow rate}}{\text{total oxygen flow rate}} \quad (2)$$

본 연구에서는 (1) 순수 산소연소와 (2) CO₂ 혼합 산소연소에 대하여 각각의 산소과잉율과 산소공급비에 따라 실험을 행하였다. 먼저 순수 산소연소에서는 화염길이, 화염의 부상 및 화염날림 등 실험조건에 따른 화염의 거시적 변화를 관찰하였다. CO₂ 혼합 산소연소의 경우 CO₂의 첨가에 따른 출구 유속변화의 효과를 상대적으로 작게 하기위해 단면적이 상대적으로 매우 큰 중심 산소노즐에만 CO₂를 첨가하여 실험을 행했다. 외곽 산소노즐에 비해 중심노즐의 압력손실이 작으므로 중심노즐에 CO₂를 공급하는 것은 실제 배기가스 재순환을 통해 CO₂ 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 CO₂ 혼합 산소연소에서는 중심 산소노즐에 CO₂ 첨가에 따른 화염의 변화 및 배기 특성을 관찰하는 실험을 행하였다. 표 1의 각 조건에서 중심 산소노즐에 CO₂를 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

연소소에 적용하기 위해서는 산소연소 시 과도

한 매연(soot)이 발생하지 않아야 하고 화염의 부상(lift-off), 날림(blow-out) 및 화염과 음향과의 과도한 상호작용 또한 피해야 한다. 실험변수에 따라 위와 같은 화염의 거시적 특성 변화와 중심 산소노즐에 CO₂ 혼합에 따른 화염의 안정성을 살펴보았다.

3.1.1 순수 산소연소

그림 3는 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 조건의 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.

산소공급비가 $\Upsilon=0.0$ 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 $\Upsilon=0.25, 0.5, 0.75$ 일 때는 중심노즐에서 산소공급으로 상류에서부터 연료와의 혼합이 활발하게 이뤄져 강한 휘염을 생성하였으며, 특히 $\Upsilon=0.25$ 일 때 중심 및 외곽노즐에서 공급된 산소와 연료가 가장 잘 혼합되어 화염의 길이가 가장 짧았다. 그림 3(c)의 $\lambda=1.2, \Upsilon=1.0$ 인 조건에서는 화염이 부상(lift-off)되어 음향과 고주파수 영역에서 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, 큰 연소소음이 발생하는 것 이외에도 불안전연소에 의한 연소생성물의 특성이 안 좋아지는 영역으로 실험대상에서 제외하였다.

그림 4는 산소과잉율, 산소공급비에 따른 화염의 거시적 길이 변화를 나타내며 산소과잉율이 커질수록 산소가 충분히 공급되어 화염길이가 짧

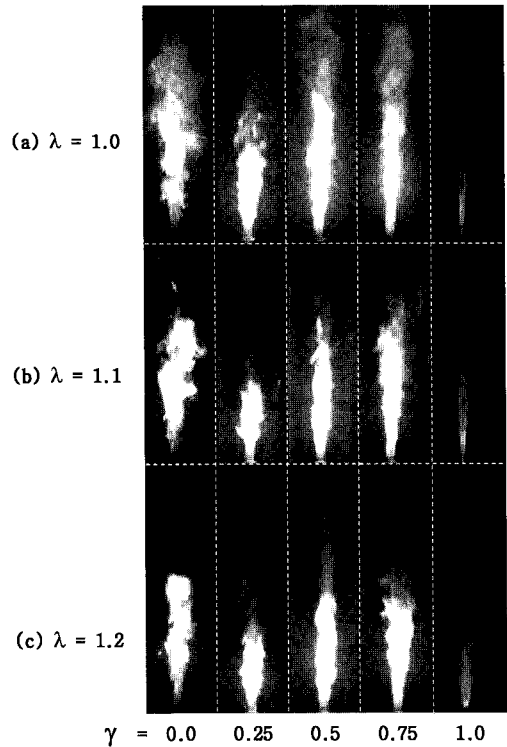


Fig. 3 Direct photographs according to excess oxygen ratio and oxygen feeding ratio

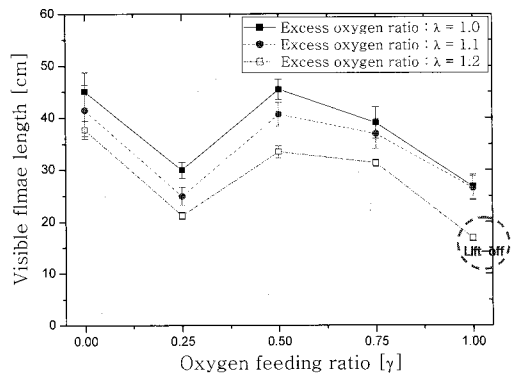


Fig. 4 Visible flame length according to excess oxygen ratio and oxygen feeding ratio

아짐을 알 수 있다.

각 산소과잉율에서 산소공급비가 $\Upsilon=0.25$ 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 CO₂의 배출 특성을 통해 다시 확인할 수 있으며 이는 이후에 논의토록 하겠다. 이와 같이 여러 연소조건 중 산소과잉율이 $\lambda=1.0$ 인 경우에는 매연이 상대적으로 많이 발생하였고, 산소공급비가 $Y=1.0$ 일 때 산소과잉율에 무관하게 혼합기구의 약화로 연소가 활발하게 일어나지 않으므로 실제 연소기에 적용하기에는 적절치 않다고 생각된다.

3.1.2 CO₂ 혼합 산소연소

앞서 산소과잉율과 산소공급비의 변화에 따른 화염의 거시적 변화를 살펴보면 산소과잉율에 관계없이 산소공급비가 $Y=0.0$ 인 조건에서는 상류에서 불충분한 혼합에 의해 하류에서 강한 휘염이 나타나며 전반적으로 화염의 길이가 길고, $Y=1.0$ 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 $Y=0.25, 0.5, 0.75$ 인 조건에서 CO₂ 혼합에 따른 화염의 변화를 관찰하였다.

그림 5는 산소공급비가 $Y=0.25$ 일 때 산소과잉율 및 CO₂ 혼합에 따른 화염의 모양 변화를 나타낸다.

CO₂ 혼합량이 많아짐에 따라 화염이 길어지며 산소과잉율이 $\lambda=1.0$ 에서는 CO₂ 혼합량이 12.8 lpm, $\lambda=1.1$ 과 $\lambda=1.2$ 에서는 CO₂ 혼합량이 16.7

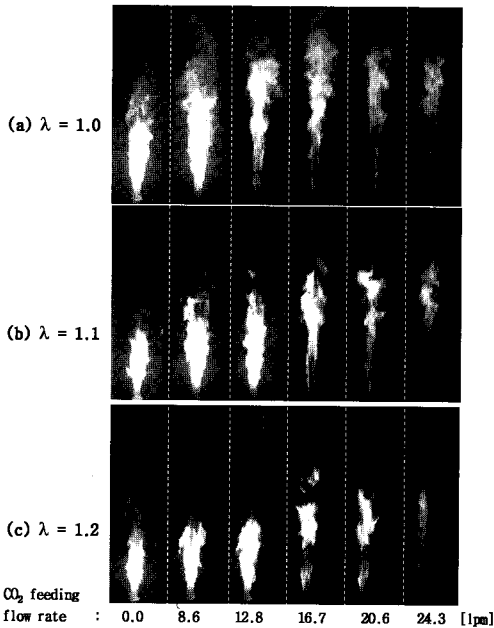


Fig. 5 Direct photographs according to excess oxygen ratio and CO₂ feeding flow rate at $Y=0.25$

lpm 이상에서는 화염의 하단부분에서부터 화염의 강도가 약해지기 시작하여 CO₂ 혼합량이 24.3 lpm에서는 화염의 강도가 전체적으로 약해졌다. 이러한 경향은 CO₂ 혼합량의 증가에 의해 가장 활발한 혼합특성을 보이는 화염 선단에서의 반응율이 감소하며 반응에 참여하지 않는 CO₂에 의한 열손실 증가로 인해 화염온도가 감소하였기 때문이다.

산소공급비가 $Y=0.25$ 에서는 대부분 화염이 CO₂ 혼합량에 관계없이 안정적으로 존재하였다. 단지 산소과잉율이 $\lambda=1.2$ 일 때 CO₂ 혼합량이 16.7 lpm 이상이면 저주파 영역에서 화염과 음향이 상호작용하여 연소소음이 발생하지만 화염이 부상되지 않았고 화염의 길이만 소폭 변동하였다. 그림 6은 산소공급비가 $Y=0.25$ 일 때 산소과잉율 및 CO₂ 혼합에 따른 화염 길이 변화를 나타낸다. 각 산소과잉율에 대해 CO₂유량이 증가함에 따라 화염길이가 증가함을 볼 수 있다.

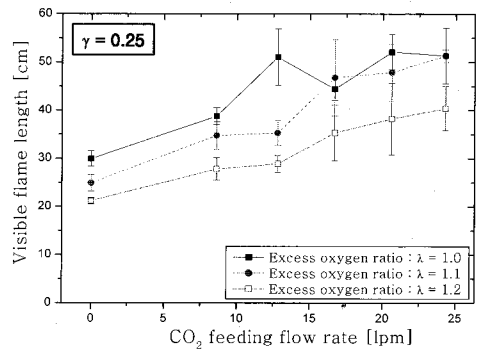


Fig. 6 Visible flame length according to excess oxygen ratio and CO₂ feeding flow rate at $Y=0.25$

그림 7은 산소공급비가 $Y=0.5$ 일 때 산소과잉율과 CO₂ 혼합에 따른 화염 모양 변화를 나타낸다. 산소공급비 $Y=0.5$ 에서는 $Y=0.25$ 일 때와는 달리 모든 산소과잉율에서 CO₂ 혼합량이 16.7 lpm 이상이면 화염이 저주파 영역에서 화염과 음향이 상호작용하여 연소소음이 발생하지만 화염이 부상되지 않았고 화염의 길이만 변동하였다.

그림 8은 산소공급비가 $Y=0.5$ 일 때 산소과잉율 및 CO₂ 혼합에 따른 화염 길이 변화를 나타낸다. CO₂유량이 증가함에 따라 화염 길이의 변화가 비슷하게 유지되다가 16.7 lpm 이상에서 화염길이의 편차가 커짐을 알 수 있다. 또한 CO₂ 혼합량이 24.3 lpm일 때 화염의 하단부분에서부터 청염이 형성되거나 화염 강도의 약화로 인해 강한 휘염이 존재하는 영역이 급격하게 감소함을 직접사진을 통해 확인할 수 있다.

산소공급비가 $Y=0.25, 0.5$ 인 경우에는 특정

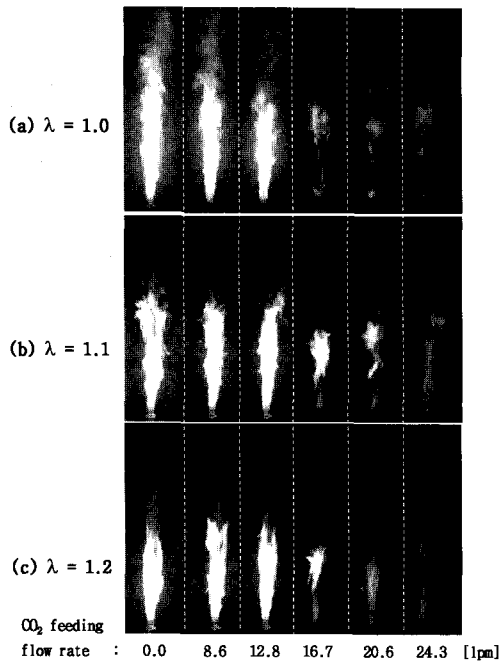


Fig. 7 Direct photographs according to excess oxygen ratio and CO₂ feeding flow rate at $\bar{\gamma} = 0.5$

CO₂ 혼합유량 이상에서 화염이 저주파수로 음향과 상호작용하지만 화염이 부상하지 않고 안정적으로 존재하는 반면, 산소공급비가 $\bar{\gamma} = 0.75$ 일 때는 특정 CO₂ 혼합유량 이상에서 화염이 부상하여 고주파수로 음향과 반응하며 불안정하게 존재하는 스크리칭 화염(screaching flame)이 되었다.

실험에 사용된 역화산 다공 연소기는 중심노즐에서 공급된 산소는 인접한 연료와 혼합되어 과농조건에서 화염이 존재하게 되고, 이후 미연의 연료는 외곽 산소노즐에서 공급된 산소로 인해 희박조건에서 완전연소하게 되는 화염 구조를 가진다. 여기서 과농조건에서의 화염은 전체 화염을 고정시키는 파일럿 화염(pilot flame)과 같은 역할을 해준다고 생각할 수 있다. 따라서 각 산소과잉율에서 특정 CO₂ 혼합유량 이상으로 CO₂를 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 $\bar{\gamma} = 0.75$ 의 경우 중심 산소노즐에서의 산소 및 CO₂ 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, 그림 3(c)에서 알 수 있듯이 산소과잉율이 $\lambda = 1.2$, 산소

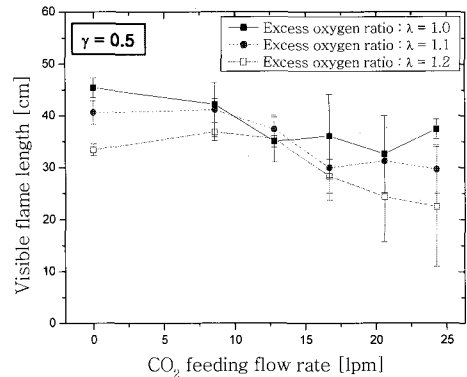


Fig. 8 Visible flame length according to excess oxygen ratio and CO₂ feeding flow rate at $\bar{\gamma} = 0.5$

공급비가 $\bar{\gamma} = 1.0$ 의 경우에도 화염이 부상하여 스크리칭 화염을 형성하였다. 이 조건에서의 부상 화염과 $\bar{\gamma} = 0.75$ 일 때 CO₂ 혼합에 의해 야기된 부상 화염은 고주파의 연소소음을 내며 불안정하게 존재하며 화염구조가 매우 유사하였다. 이것으로부터 중심 산소노즐로 공급되는 산소유량이나 산소와 CO₂ 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 CO₂ 혼합기의 유속과 이 혼합기의 유량에 대한 CO₂의 물분율에 의해 결정된다. 그림 9는 화염이 안정하게 존재하는 영역과 화염이 부상하여 불안정하게 존재하는 영역을 나타낸다. 안정적으로 화염이 존재하는 영역은 다시 저주파수로 음향과 상호작용하지만 안정하게 존재하는 영역과 음향과 상호작용 없이 절대적으로 안정하게 존재하는 영역으로 세분화 할 수 있다. 그러나 화염이 부상하여 불안정하게 존재하는 영역은 고주파수로 음향과 상호작용하여 귀에 거슬리는 연소소음을 내며 화염이 심하게 떨었다.

중심 산소노즐에서의 유속이 상대적으로 낮으면 화염이 절대적으로 안정하게 존재하거나 저주파수의 연소소음이 발생하지만, CO₂ 혼합량을 증가시키면 중심노즐의 유속이 증가하여 화염의 부상이 나타나고 고주파수의 연소소음을 내며 불안정한 화염이 나타났다. 또한 화염이 안정적으로 존재하는 영역은 그림 9의 일점쇄선을 기준으로 산화제 측 CO₂ 농도가 적으면 연소소음이 없다가 산화제 측 CO₂ 농도가 크면 저주파수의 연소소음이 발생하였다. 특히, 고주파수 불안정이 나타나는 화염 부상영역에서 CO₂의 농도를 보다

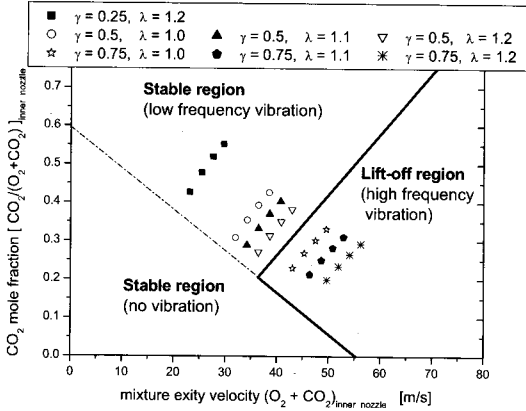


Fig. 9 Stability diagram according to oxygen and CO₂ feeding flow rate at the inner nozzle

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 CO₂ 재순환 산소 연소의 경우 NOx가 생성되지 않아야 하지만 실험 결과를 살펴보면 경우에 따라 많은 양의 NO가 배출되고 있음을 알 수 있다. 본 연구에서는 액화 산소와 액화 CO₂를 사용했으므로 상용 LPG에 함유되어 있는 미량의 N₂(약 3%)에 의해 NO가 발생하게 된다. 실제 기존 CO₂ 재순환 산소 연소시스템 연구에서 배기가스의 재순환과정에서 유입되는 N₂에 의한 NOx 발생 특성이나 석탄 등 연료 내에 N 성분을 포함한 경우 발생하는 fuel NOx의 생성과 관련된 연구가 보고된 바 있다[6,13].

3.2.1 순수 산소연소

그림 10은 산소과잉율과 산소공급비의 변화에 따른 NO와 CO의 배출 특성을 나타낸다. 먼저 NO를 살펴보면 일반적인 공기 연소에 비해 그 배출량이 매우 큼을 알 수 있다. 이는 산소연소에서 매우 높은 화염온도로 인해 thermal NO_x가 큰 폭으로 증가하였기 때문이다. 또한 각 조건에서 산소과잉율이 증가함에 따라 NO 배출이 증가하게 되는데 이는 앞서 그림 3과 4에서 산소과잉율이 증가함에 따라 화염의 길이가 감소하며 연소 특성이 향상되어 화염 온도가 현저히 증가하게 되기 때문이다. 산소공급비가 Y=0.0, 1.0인 경우 NO가 적게 발생하는데 이는 연료와 산소가 잘 반응하지 않아 화염의 온도가 낮아지기 때문

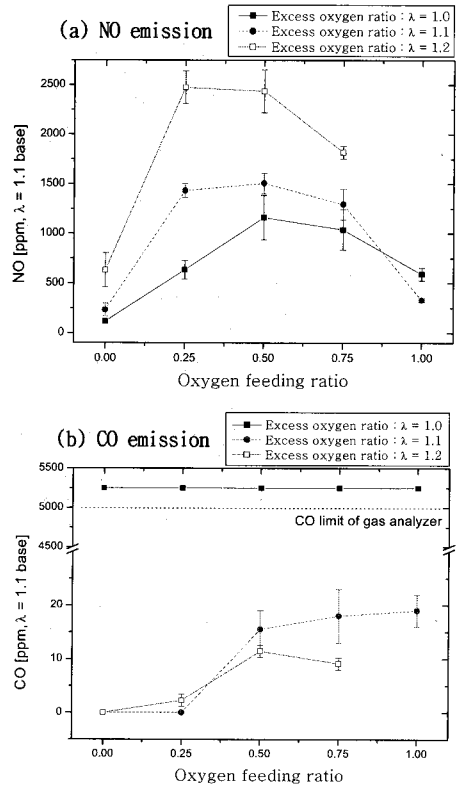


Fig. 10 NO and CO emission according to excess oxygen ratio and oxygen feeding ratio

이다. 한편 CO배출량을 보면 산소과잉율이 lambda=1.0인 경우 CO가 매우 많이 발생하게 되어 가스 분석기의 측정 범위(5000ppm)를 벗어나고 있음을 알 수 있다. CO의 농도는 산소과잉율이 lambda=1.0보다 높게 되면 급격하게 감소함을 확인할 수 있었다. 그리고 산소공급비에 따른 CO의 농도는 Y=0.0, 0.25인 경우에서 Y=0.5, 0.75, 1.0보다 상대적으로 적게 나타났다.

3.2.2 CO₂ 혼합 산소연소

산소연소 시 연료에 포함된 미량의 N₂나 혹은 배기가스 재순환의 경우 재순환시스템 체결부에서 미량의 N₂가 들어가는 경우에는 산소연소 시 고온으로 인해 매우 많은 양의 NO가 발생함을 그림 10에서 확인하였다. 이는 기존 산소연소 시스템이 가진 가장 대표적인 문제점으로 CO₂ 재순환 산소연소 시스템에서도 피할 수 없는 문제로 생각된다. 따라서 적절한 수준의 NOx 발생을 위해서는 CO₂를 이용해 연소장을 컨트롤하여 NOx와 CO의 발생량을 제어할 필요가 있다.

그림 11은 산소과잉율 및 CO₂의 혼합에 따른

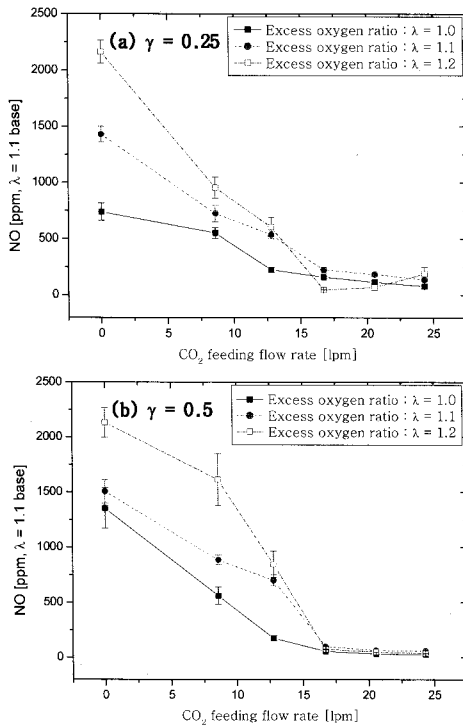


Fig. 11 NO emission according to excess oxygen ratio and CO₂ feeding flow rate

NO의 배출 변화를 나타낸다. 두 가지 서로 다른 산소공급비에서 CO₂ 혼합량이 증가함에 따라 NO의 배출이 점진적으로 감소하는 경향을 보이며 CO₂ 혼합량이 16.7 lpm 이상에서는 매우 적은 양이 검출되었다. NO가 거의 검출되지 않는 특정 CO₂ 혼합량(16.7 lpm) 이상에서는 저주파의 연소소음이 발생함에도 불구하고 화염이 안정적으로 존재하며 배기가스 중 CO도 현저히 줄어듦을 알 수 있다. 특히, 산소공급비가 $\gamma=0.25$ 와 0.5일 때 산소과잉율이 $\lambda=1.2$ 가 되면 CO₂ 혼합량에 무관하게 CO가 거의 배출되지 않았다. 그림 12는 산소과잉율과 CO₂ 혼합에 따른 CO 배출 변화를 나타낸다. NO의 배출 특성과 유사하게 CO₂ 혼합량을 증가함에 따라 CO는 전반적으로 거의 배출되지 않거나 소량 발생하는 경향을 보이고 있다. 하지만 산소과잉율이 $\lambda=1.1$ 미만일 경우 CO₂ 혼합량을 증가시키면 CO의 배출이 급격히 증가하였다. 그림 11과 12에서 보는 바와 같이 산소과잉율과 CO₂의 혼합 정도를 적절히 조절하면 화염이 안정히 존재하는 영역에서 NO와 CO를 함께 저감할 수 있는 운전 조건을 찾을 수 있다. 하지만 CO₂를 통한 배출 가스를 제어하기 위해서는 CO₂의 공급 위치(중심 또는 외곽 산소노즐)뿐만 아니라 중심 산소노즐과 외곽 산소노즐에 CO₂의 공급비율 또한 중요한 변수이므로

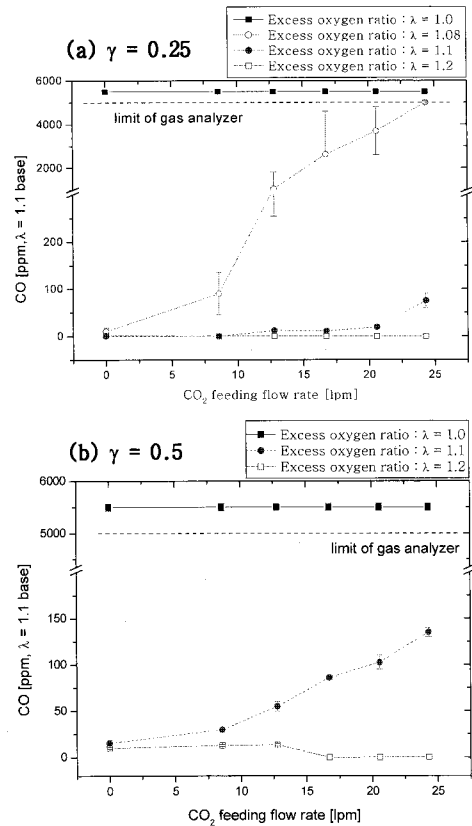


Fig. 12 CO emission according to excess oxygen ratio and CO₂ feeding flow rate

CO₂의 공급 위치나 비율의 영향에 대한 지속적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 중심 산소노즐과 외곽 산소노즐 사이에 연료 노즐이 존재하여 산소와 연료의 혼합 특성이 향상된 역확산 다공 연소기를 디자인하여 실험을 수행하였다. 연료와 산소의 유량뿐만 아니라 중심 산소노즐과 외곽 산소노즐로의 산소의 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 하단부터 소멸되거나 화염이 부상되었다.

둘째 산소연소 시 실험된 대부분의 영역에서 화염이 안정하게 존재하였으나, 산소과잉율 λ

=1.2, 산소공급비 $Y=1.0$ 에서 화염이 부상하였다. 이 조건의 부상화염은 음향과 고주파수 영역에서 상호작용하여 고음의 연소소음을 내며 불안정적으로 존재하였다. CO_2 혼합 산소연소 시 산소공급비가 $Y=0.5$ 일 때 CO_2 혼합량이 16.7 lpm 이상이면 화염이 저주파 영역에서 음향과 상호작용하지만 화염이 안정적으로 존재하였다. 비록 저음의 연소소음을 수반하고 있지만 NO와 CO의 배출 특성은 여전히 거의 검출되지 않거나 소폭 상승하였다. 그러나 산소공급비가 $Y=0.75$ 일 때 특정 CO_2 혼합량(12.8 lpm 또는 16.7 lpm)보다 더 많이 혼합하면 화염이 부상하여 고주파 영역에서 음향과 상호작용하여 불안정하게 존재하였다. 이때 연소소음과 함께 배출가스 특성이 나빠졌다.

셋째 산소공급비가 $Y=0.25$ 이고 산소과잉율이 $\lambda=1.1$ 과 1.2일 때 다른 조건들에 비해 화염이 안정적으로 존재하면서 상대적으로 NO나 CO의 배출 특성이 좋았다. 그리고 CO_2 혼합 산소연소 조건에서 CO_2 를 혼합하였을 때 NO의 배출 특성이 점진적으로 개선되는 경향을 보이며 CO는 거의 발생하지 않았다. 나아가 산소과잉율이 $\lambda=1.1$, 산소공급비가 $Y=0.25$ 인 조건은 CO_2 재순환 산소연소 방식을 연소로 시스템에 적용하기에 가장 적당한 조건이라 볼 수 있다.

후 기

저자들은 연소로 제작 및 시스템 운용과 토의에 대해 김남일, 오광철의 도움을 받았으며 이에 감사합니다. 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] Kim, H. S., Ahn, K. Y., Kim, H. K., Lee, Y. W., Lee, C. E., "A Study on the Characteristics of Combustion for Substituting CO_2 for N_2 in Combustion Air," Journal of the Korea Society of Combustion, Vol. 7, 2002, pp. 29-35
 [3] Lee, S. H., Hwang, S. S., "A Study on Radiation Heat Transfer and Characteristics of Oxygen Enriched Double Inversed Diffusion

Flame," Journal of the Korea Society of Combustion, 2001, Vol. 6, pp. 50-64.

[4] Han, J. W. and Lee, C. E., "Numerical Study on Flame Structure and NO Formation Characteristics in Oxidizer-Controlled Diffusion Flames," The 3rd Asia-Pacific Conference on Combustion, 2001, pp. 607-610.

[5] Joao Baltasar, Maria G. Carvalho, Pedro Coelho and Mario Costa "Flue gas recirculation in a gas-fired laboratory furnace: measurements and modelling," *Fuel*, Vol. 76.

[6] Yewen Tan, Mark A. Douglas, Kelly V. Thambimuthu "CO₂ 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. "NO_x reduction mechanism in coal combustion with recycled CO₂," *Energy*, Vol. 22, 1997, pp. 207-215

[9] Tomohiro N., et al. "Analysis of the flame formed during oxidation of pulverized coal by an O₂/CO₂ mixture," *Energy*, Vol.22, 1997, pp. 199-205.

[10] David A. E., Douglas A. F., James F. D., "Image of the strained flammable layer used to study the liftoff of turbulent jet flame," *Twenty-sixth symposium (international) on combustion/the combustion institute*, 1996, pp. 129-136.

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

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

[13] Hao Liu and Ken Okazaki "Simultaneous easy CO₂ recovery and drastic reduction of SO_x and NO_x in O₂/CO₂ coal combustion with heat recirculation," *Fuel*, Vol. 82, 2003, pp. 1427-1436.