

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2010.34.4.409

다공 동축 버너를 이용한 순산소 연소에서 CO₂ 첨가가 화염에 미치는 영향에 관한 실험적 연구

김승환* · 박장희* · 이대근** · 신현동*†
* 한국과학기술원 기계공학과, ** 한국에너지기술연구원

Experimental Study of Effect of CO₂ Addition on Oxy-Fuel Combustion in Triple Concentric Multi-Jet Burner

Seung Hwan Kim*, Jang Hee Park*, Dae Keun Lee** and Hyun Dong Shin*†

* Dept of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology

** Membership, Korea Institute of Energy Research

(Received October 14, 2009 ; Revised February 1, 2010 ; Accepted February 23, 2010)

Key Words : Oxy-Fuel Combustion(순산소 연소), CO₂ Addition(이산화탄소 첨가), LIF(레이저유도 형광법)

초록: 순산소 연소와 배가스 재순환(FGR : Flue Gas Recirculation) 기술은 CO₂ 저감 목적으로 많은 연구자들의 관심을 받아왔다. 본 연구는 다공 동축 버너를 이용하여 산소 공급비(OFR : Oxygen Feeding Ratio)에 따른 순산소 연소 특성과 동일 조건에서 FGR 시스템을 모사하기 위하여 공급 위치에 따른 CO₂ 첨가 효과의 특성을 비교하는 데에 초점을 맞추었다. 순산소 연소는 당량비 0.93에 해당하는 연료 유량 15 lpm 일 때 OFR 전 영역에서 안정적이었고, 화염 구조와 길이는 OFR에 따라 변동하였다. 순산소 연소에 CO₂를 첨가할 때, 안정, 진이, 준평형, 불안정 그리고 날림 등의 다양한 안정화 모드가 관찰되었으며, 연소로 내의 전반적인 온도분포가 감소하였고, 특히 case 4에서 1800 K 이하로 떨어져 최대 감소 효과를 보였다. 노즐 끝단으로부터 높이에 따른 CO₂ 농도는 첨가된 CO₂의 체적 비율에 따라 변동하였다.

Abstract: The use of oxy-fuel combustion and flue gas recirculation (FGR) for CO₂ reduction has been studied by many researchers. This study focused on the characteristics of oxy-fuel combustion and the effects of CO₂ addition from the point of view of oxygen feeding ratio (OFR) and the position of CO₂ addition in order to reproduce an FGR system with a triple concentric multi-jet burner. Oxy-fuel combustion was stable at all OFRs at a fuel flow-rate of 15 lpm, which corresponds to an equivalence ratio of 0.93; however, the structure and length of the flame varied at different OFRs. When CO₂ was added in oxy-fuel combustion, various stability modes such as stable, transient, quasi-stable, unstable, and blow-out were observed. The temperature in the combustion chamber decreased upon CO₂ addition in all conditions, and the maximum reduction in temperature was below 1800 K. CO₂ concentration with respect to height varied with the volume percent of CO₂ at the nozzle tip.

1. 서론

순산소 연소^(1~10)는 이론적으로 탄화 수소계 연료의 연소 생성물로 H₂O와 CO₂만을 생성하기 때문에, NO_x를 근원적으로 차단시킬 수 있고 고농도의 CO₂를 분리 포집할 수 있는 장점이 있다. 하지만 순산소 연소의 매우 높은 화염 온도는 기존

공기 연소기의 재설계 문제를 발생시키고, 시스템 내로의 불가피한 공기 유입에 따른 다량의 열적 NO_x를 발생시킬 수 있는 부정적 요소를 포함하고 있다.^(3,4) 이에, 배가스 재순환 (FGR: Flue Gas Recirculation) 기술^(4,11,12)은 공기 연소 뿐만 아니라 순산소 연소의 화염 온도 저감이라는 관점에서 현실적인 대안으로 매우 각광받고 있다. 이러한 FGR 기술이 활용되는 순산소 연소는 공기 연소와 비교해 산화제의 조성이 다르기 때문에, 새로운 버너 제작이 선행되어야 하며 FGR 기술에 대한

† Corresponding Author. hdshin@kaist.ac.kr

자세한 연구와 여러 연소 조건에 대한 폭넓은 기초 연구를 필요로 한다.

Baltasar 등⁽¹¹⁾은 스윙 버너를 장착한 연소기에서 공기 연소 시 FGR의 효과에 대한 실험을 수행하였다. 그들은 배가스 재순환율을 R로 정의를 하였고, R에 대한 연소로 내 온도분포 및 배가스 분석을 하였다. 그 결과, FGR이 화염 온도 저감 및 NO_x 저감에 매우 효과적인 기술임을 확인하였다.

김⁽⁶⁾ 등은 다양한 버너를 이용해 순산소 연소에서 CO₂ 첨가가 화염에 미치는 영향에 대해 살펴보았다. 그들은 2개의 분리된 산화제 노즐이 버너 중심부의 연료 노즐을 감싸고 있는 3중 동축 버너가 가장 넓은 CO₂ 첨가 범위에서 화염이 안정적으로 존재하는 것을 관찰하였다. 또한, 전체 산화제의 3%에 해당하는 질소를 첨가시킴으로써 연소기에서 발생할 수 있는 공기의 유입을 모사했으며, CO₂ 첨가와 FGR이 각각 전체 NO_x 발생량의 93%와 85%가 저감되는 것을 확인하였다. 안⁽⁵⁾ 등은 노즐 출구 속도의 제어를 위해 노즐 위치를 바꿀 수 있는 동축 버너를 고안하였으며, 공기 연소와 순산소 연소를 공동으로 사용할 수 버너 제작에 노력을 기울였다. Boushaki 등^(8,9)은 중심에 연료 노즐과 두 개의 산화제 노즐이 양쪽으로 분리된 형태의 버너를 제작하였으며, 분리된 노즐을 가진 버너가 반응물의 혼합 및 화염 안정성 특성에 있어서 우수한 것을 관찰하였다. 서⁽⁶⁾ 등은 연소 영역을 확장할 수 있고 난류강도를 증가시킬 수 있는 3중 다공 동축 버너를 제작하여, 연료를 15 lpm으로 고정했을 때 넓은 범위에서 안정한 순산소 화염을 얻을 수 있었다. 그들은 순산소 화염의 길이 특성 및 배가스 분석을 하였으며, CO₂ 혼합 순산소 화염을 통해 NO_x 발생량을 저감시킬 수 있음을 확인하였다.

본 연구에서는 서 등이 제작한 3중 다공 동축 버너를 이용하여 산소 공급비(OFR : Oxygen Feeding Ratio)에 따른 순산소 화염의 구조 및 온도 특성을 관찰하였다. 또한, FGR을 모사하기 위해 순산소 연소에 CO₂ 첨가를 했으며 CO₂ 첨가 유량과 공급 위치가 순산소 화염 안정성 미치는 영향에 대해 자세한 고찰을 하였다. 마지막으로 비 반응 유동장에서 첨가된 CO₂의 거동 특성을 파악함으로써 조건에 따른 화염 온도 저감 특성을 살펴봤으며, 합리적인 배가스 재순환 기술을 확보하고자 하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 실험 장치의 개략도를 나타낸다. 연소로는 높이 1200 mm, 내경 210

mm인 원통형 구조를 띄고 있으며 내화 시멘트로 둘러싸여 있다. 화염 가시화를 위해 연소로 전면에 2개의 가시창을 설치하였고, 연소로 내 온도 측정을 위해 버너 끝을 기준으로 50 mm 간격에 열전대 연결을 위한 측정 포트 22개를 측면 배치하였다. 배가스 재순환(FGR : Flue Gas Recirculation)을 모사하기 위하여 산화제 노즐에 CO₂를 첨가하였으며, 충분한 크기의 혼합 용기를 두어 CO₂와 산화제의 혼합을 극대화 하였다.

사용된 다공 동축 버너는 연소로 하단에 설치하였으며, Fig. 2에서와 같이 IN(inner nozzle), FN(fuel nozzle) 그리고 ON(outer nozzle)의 삼중 동심관 구조를 가지고 있다. 또한, IN에 직경 6 mm인 하나의 홀(hole)과 FN과 ON에 직경 2.5 mm인 8개 홀이 원주상에 등 간격으로 이루어져 있다. 특히, IN과 ON으로는 산화제가 공급되고 그 사이인 FN에 연료가

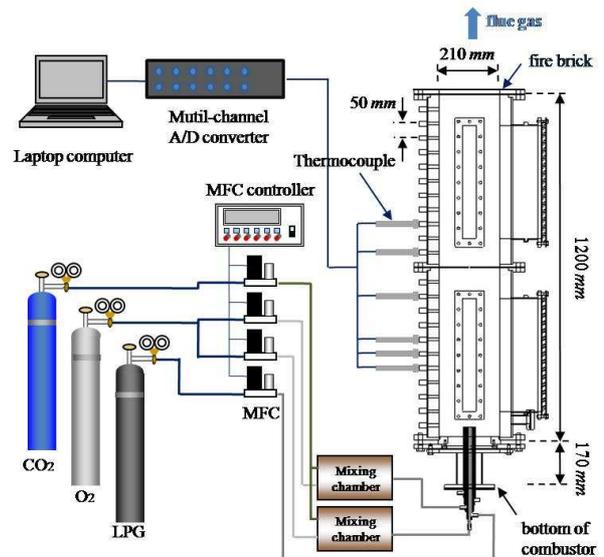


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental set-up

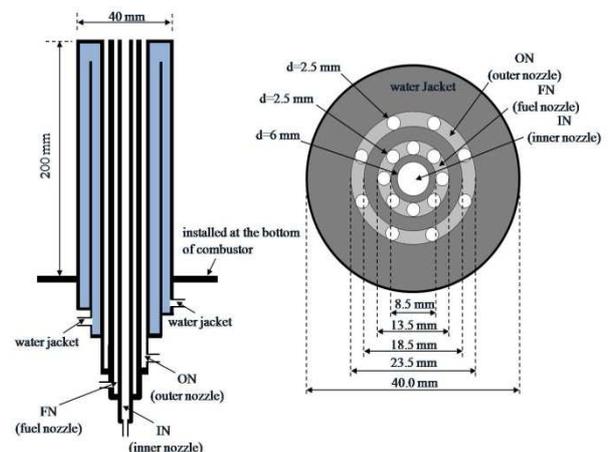


Fig. 2 Schematic diagram of the triple concentric multi-jet burner

Table 1 Experimental conditions

cases	LPG (lpm)		O ₂ (lpm)		CO ₂ (lpm)		EOR	OFR	CAR	
	FN	IN	ON	IN	ON	IN			ON	
oxy-fuel combustion	15.00	19.69	59.06				1.05	0.25		
	15.00	59.06	19.69				1.05	0.75		
oxy-fuel combustion adding CO ₂	1	15.00	19.69	59.06	25.00	0.00	1.05	0.25	0.55	0.00
	2	15.00	19.69	59.06	0.00	25.00	1.05	0.25	0.00	0.55
	3	15.00	59.06	19.69	25.00	0.00	1.05	0.75	0.55	0.00
	4	15.00	59.06	19.69	0.00	25.00	1.05	0.75	0.00	0.55

공급되어 산화제가 연료를 둘러싸는 확산화염과 연료가 산화제를 둘러싸는 역 확산 화염이 동시에 존재하는 특성이 있다. 일반적으로 순산소 연소는 공기연소와 비교해 산화제의 유량이 약 21 % 정도밖에 되지 않기 때문에 출구 유속이 감소하여 그 혼합 특성이 떨어진다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 버너 끝을 다공 형태로 가공하였으며, 그로 인해 출구 단면적 감소로 인한 유속 증가를 유도하였고, 난류 혼합 특성을 개선하였다.^(8,13)

또한, 버너의 특성을 보다 면밀히 관찰하기 위하여 파이프스 관을 사용하여 앞서 설명한 연소로와 동일한 형태와 크기를 가지는 연소로를 따로 제작하여 실험을 수행하였다.

2.2 실험 방법

본 연구에서는 3 중 다공 동축 버너를 이용한 순산소 화염의 특성 및 CO₂ 첨가가 순산소 화염에 미치는 영향에 관하여 살펴보기 위하여 실험 변수로 OFR (산소공급비 ; Oxygen Feeding Ratio), EOR (초과 산소율 : Excess oxygen ratio), 그리고 CAR (CO₂ 첨가율 : carbon-dioxide adding Ratio)을 선정하였으며, 식 (1)~(3) 와 같이 정의하였다.

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

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

$$CAR = \frac{\text{flow - rate of CO}_2 \text{ addition in oxy - fuel combustion}}{\text{total flow - rate of CO}_2 \text{ generated in oxy - fuel combustion}} \quad (3)$$

모든 실험은 연료 유량 15 lpm 으로 EOR 1.05, OFR 0.5 조건에서 약 2 시간을 예열한 후, 벽면 온도 조건이 정상 상태에 도달했을 때 수행되었다.

Table 1 은 본 연구에서 사용된 실험 조건을 나타낸다. 연료로는 액화 석유 가스(LPG)를 사용 하였고 산화제로는 순수 산소를 사용하였다. 순산소 화염에서 Soot 의 발생을 미연에 방지하기 위하여, 전체 당량비

0.93 에 해당하는 EOR 1.05 의 산소 과잉 조건에서 실험을 수행하였다. OFR 과 연료 유량 0.0 에서 20 lpm 까지 바뀌가며 순산소 화염의 안정화 선도를 도출하였다. 화염의 자세한 관찰을 위해 연료 유량 15 lpm 으로 고정하였으며, OFR 0.25 와 0.75 를 대표 실험 조건으로 선택하였다. 선택된 OFR 은 두 개의 산화제 노즐 중에서 하나의 노즐에 산화제가 많이 공급되는 조건을 나타낸다. 또한, 배가스 재순환을 모사하기 위하여 CO₂ 를 산화제 노즐 (IN 또는 ON) 에 첨가하여 CO₂ 가 순산소 화염에 미치는 영향에 대해 살펴보았다. 첨가된 CO₂ 유량은 연료 15 lpm 이 이론적으로 만들수 있는 CO₂ 총량의 55% (CAR 0.55) 에 해당하는 25 lpm 에 고정되었다.

연소로 내의 온도 특성을 살펴보기 위하여 연소로 중심에서 벽면까지 5 등분 된 지점에서의 측정 한계가 2000 K 인 보정된 R-type 열전대를 이용하여 높이에 따른 온도 분포를 측정하였다.

화염대 예측을 위해 ICCD (Intensified Charge-coupled Device, Princeton Instrument) 카메라와 간섭 필터(interference filter)를 이용하여 CH* 및 OH* 자발광을 측정하였으며, 사용된 간섭 필터는 각각 430.0±10 nm 와 307.1±10 nm 이다. 본 연구에서는 강한 난류가 동반된 순산소 화염이므로 평균적인 반응영역을 살펴보기 위해서 순간 자발광 이미지를 200 장을 중첩하여 관찰하였다.

첨가된 CO₂ 의 높이에 따른 농도 및 CO₂ 의 반경 방향으로의 분포 특성을 관찰하기 위해서 비 반응 유동장에서 Acetone-PLIF 를 시행하였으며, 광원으로는 forth harmonic Nd:YAG laser (Continuum, 266 nm)를 사용하였다. 또한, 버너 출구 단면과 평행한 면을 만들어 높이 별로 조사한 후 ICCD 카메라로 200 장 중첩하여 그 신호 강도 이미지를 얻었다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 순산소 연소

Fig. 3 은 순산소 화염의 OFR 과 연료 유량에 따

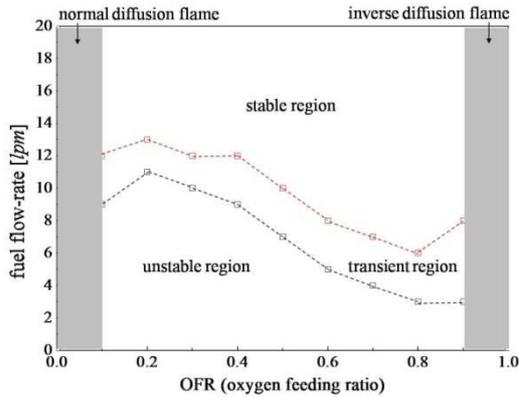
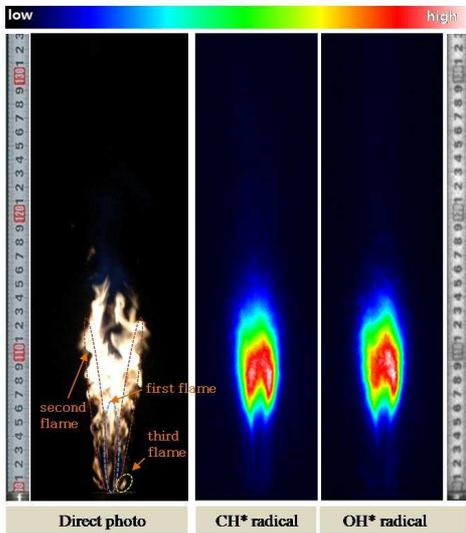
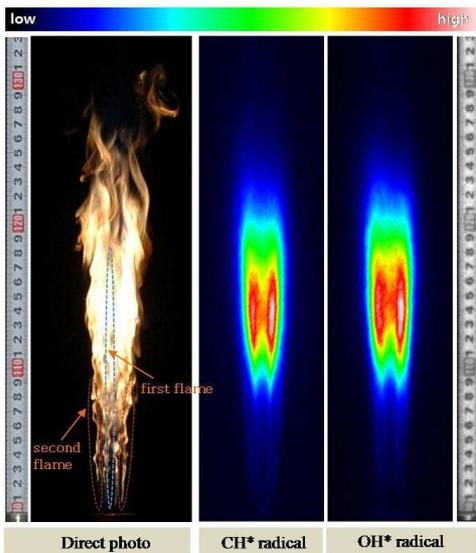


Fig. 3 Stability map of oxy-fuel combustion



(a) OFR 0.25



(b) OFR 0.75

Fig. 4 CH* & OH* chemiluminescence images of oxy-fuel combustion according to OFRs

른 안정화 선도를 나타낸다. OFR 0.0 과 1.0 은 모든 산화제가 바깥 노즐 또는 안쪽 노즐로 공급되는 조건이

므로 각각 확산화염과 역 확산화염의 특성을 가짐을 예상할 수 있다. 또한, Fig. 3 에서 회색 음영으로 표시된 OFR 0.0 에서 0.1 구간과 0.9 에서 1.0 구간에서도 3 중관 버너의 화염 특성이 나타나지 않아 본 연구의 고찰 대상에서 제외하였다. 그림에서 알 수 있듯이, 순산소 화염의 경우에는 연료 유량과 OFR 에 따라 안정 영역, 천이 영역, 그리고 불안정 영역으로 나누어졌다. 먼저, 불안정 영역은 연료 유량이 상대적으로 작을 때 나타나며, 화염이 요동치듯 번뜩거리며 존재했다. 이는 연료 및 산화제의 낮은 출구 유속으로 인해 연료 및 산화제의 혼합 특성이 떨어지기 때문이라 사료 된다. 연료 유량이 점점 증가하면 순산소 화염은 천이 영역을 거쳐 안정 영역으로 이동했다. 천이 영역에서는 화염의 번뜩임이 미약하게나마 잔존해 있으며, 안정 영역에서는 화염의 번뜩임은 전혀 발생되지 않고, 고휘도의 백색 화염만이 존재했다. 특히, 연료 유량이 14 lpm 이상에서는 OFR 전 영역에서 안정적인 연소가 일어났다.

Fig. 4 는 순산소 연소에서 OFR 0.25 와 0.75 일 때의 CH* 및 OH* 자발광과 화염 사진을 함께 나타낸 것이다. 화염의 직접 사진에서, OFR 0.25 의 화염은 전체 3 가지의 화염으로 구성되었다. 먼저, IN 주변으로 25 %의 산화제와 연료가 반응하여 생성되는 첫 번째 화염, FN 과 ON 사이에서 약 75%의 산소와 연료가 반응하여 발생하는 두 번째 화염, 그리고 주 반응에 참여를 하지 못한 산소와 연료가 만나 ON 주위 부분에서 생성되는 매우 작은 크기의 세 번째 화염이다. 반면에 OFR 0.75 의 경우는 IN 주위에서 75% 산소와 연료가 반응하여 화염 길이가 긴 첫 번째 화염이 생성되고, 25% 의 산소와 연료가 반응하여 FN 과 ON 사이에서 첫 번째 화염 주변으로 구불구불한 두 번째 화염이 발생했다. CH* 및 OH* 자발광 이미지에서는 두 이미지의 자발광 강도 및 형태가 유사하게 나타남을 확인할 수 있다. 이는 반응에서 발생하는 중간 생성물 (radical)의 생성 위치를 생각함으로써 이해할 수 있다. 일반적으로 CH* 는 연료로부터, OH* 는 산화제로부터 발생하는 중간 생성물이므로 산화제가 연료를 양쪽에서 감싸는 특수한 형태의 3 중 다공 동축 버너의 경우는 그 구분이 모호해지며 OH* 및 CH* 자발광 이미지가 유사하게 나타날 것으로 예상할 수 있다. 또한, 자발광 이미지를 통해 화염에서의 주반응 영역과 화염 길이를 예상할 수 있으며, OFR 0.25 일 때가 OFR 0.75 일 때에 비해 화염이 짧고 강렬하며 휘도가 더 높게 나타났다. 이것은 OFR 0.25 일 경우 외측 산화제 유량이 증가하면서 활발한 난류가 형성되어 산소와 연료의 혼합 특성이 좋아지기 때문이다.⁽¹⁰⁾

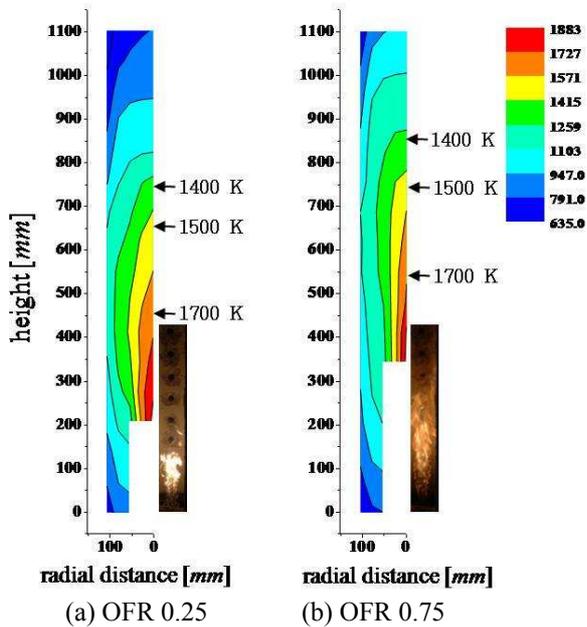


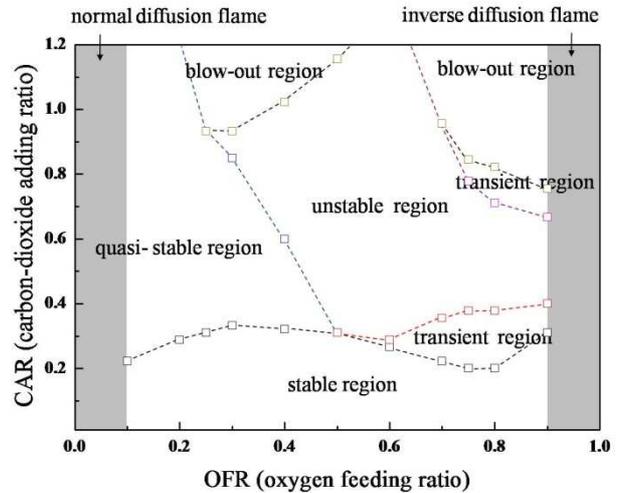
Fig. 5 Temperature distribution in the combustion chamber of oxy-fuel combustion according to OFRs

Fig. 5 는 순산소 연소에서 OFR 0.25 와 OFR 0.75 일 때의 연소로 내의 온도 분포를 동일 크기의 화염 사진과 함께 도시한 것이다. R-type 열전대의 측정 한계인 2000K 을 초과하는 곳은 공란으로 처리하였다. 조건에 따라 화염 길이가 서로 다르므로 버너 출구를 기준으로 OFR 0.25 인 경우는 약 210 mm 부터, OFR 0.75 의 경우는 약 350 mm 부터 온도 측정이 가능하였다. OFR 0.25 에서는 1700 K (주황색 영역) 이상의 영역이 반경 방향으로 넓게 분포하고, OFR 0.75 에서는 높이 방향으로 다소 길게 분포함을 알 수 있다. 따라서, OFR 0.25 일 경우가 화염 길이는 짧지만 더 높은 휘도를 가지는 것으로 보아, 연소로 상류에서 강력하게 연소가 일어나며 연소로 내 온도 분포를 비교했을 경우 OFR 0.75 보다 더 높은 화염 온도를 가짐을 유추할 수 있다.

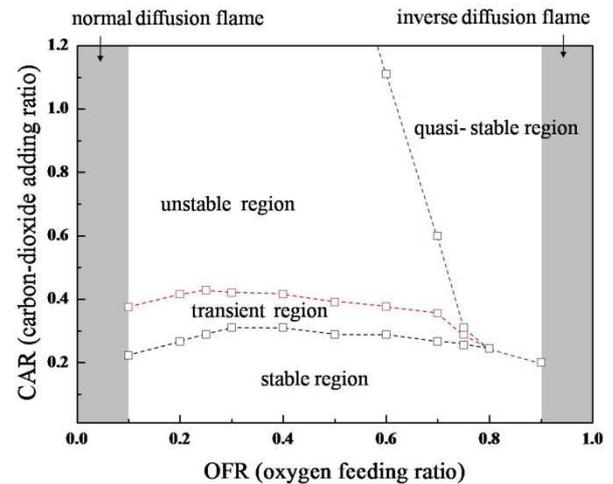
3.2 CO₂ 첨가 순산소 연소

본 연구에 사용된 다공 동축 버너는 연료 노즐의 내측과 외측에 산화제가 공급되는 특수한 구조이기 때문에 배가스 재순환 모사를 위하여 CO₂ 를 IN 또는 ON 에 첨가 시킴으로써 발생하는 화염의 특성을 살펴보는 것은 매우 중요한 의미가 있다. Fig. 6 은 연료 유량을 15 lpm 으로 고정하고, OFR 과 CAR 따른 화염 안정화 선도를 나타낸다.

먼저, IN 에 CO₂ 를 첨가할 경우, 화염은 CAR 에 민감하게 반응하며 안정 영역, 천이 영역, 준 안정 영역, 불안정 영역, 그리고 날림 영역의 5 가지 영역으로 나뉘었다. 즉, CAR 이 작을 때는 (약 0.0 ~ 0.2), IN 의 유속 증가로 인하여 화염 길이가 약간 신장되지만 높은



(a) CO₂ addition in IN

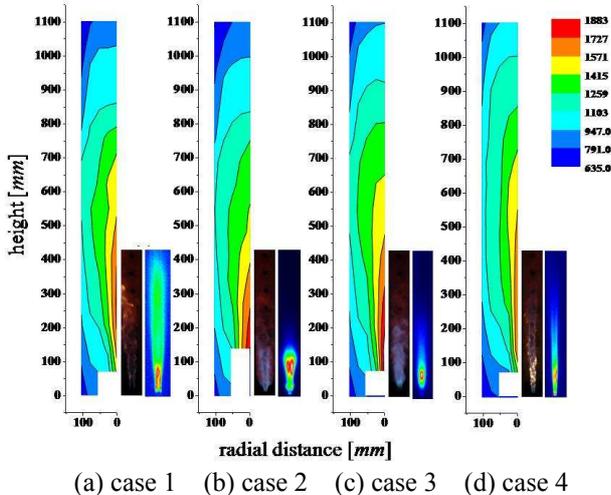


(b) CO₂ addition in ON

Fig. 6 Stability map of oxy-fuel combustion according to a position of CO₂ addition (fuel : 15 lpm)

휘도의 안정적인 화염이 존재하였다 (안정 영역). CAR 점점 증가하면서 OFR 이 0.5 보다 낮을 때에는, 청염과 황염이 혼재된 긴 화염 이 발생되었다. 또한, 매우 낮은 진폭의 저주파수가 계측되지만 대체적으로 안정적인 화염이 존재하였다 (준안정 영역). 반면에 OFR 이 0.5 보다 클 때에는 고휘도의 안전한 화염과 음향을 동반한 청염 불안정 화염이 반복되어 나타나는 천이영역을 거쳐, 그리고 CAR 0.4 이상에서는 고주파의 음향과 진동을 동반한 불안정한 영역이 나타난다. 최종적으로 CAR 1.0 이상에서는 화염 날림이 발생하였다 (날림 영역).

반면 ON 에 CO₂ 를 첨가시켰을 경우에는 IN 에 CO₂ 를 첨가 시켰을 경우와 비교해 확연히 다른 특성을 보였으며 비교적 단순한 형태의 안정화 선도가 도출되었다. CAR 이 작을 때에는 (0.0 ~ 0.2) 고휘도의 안전한 형태의 화염이 존재하였으며,



(a) case 1 (b) case 2 (c) case 3 (d) case 4
Fig. 7 Temperature distributions according to cases

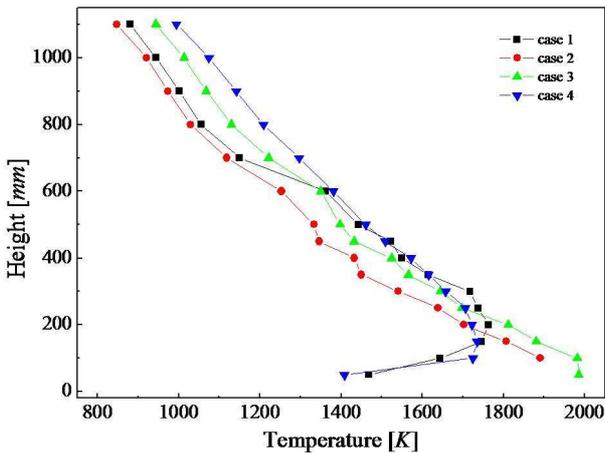


Fig. 8 Temperature distribution according to height in the center of combustion chamber

화염의 길이 변화 없이 휘도가 조금씩 감소하였다 (안정 영역). CAR 이 증가하면서 OFR 이 작을 때에는 고휘도의 화염과 고주파의 음향을 동반한 청음이 반복적으로 나타나는 천이 영역이 두껍게 나타났다으며, 그 이상에서는 불안정한 영역이 넓게 분포하였다. 또한, OFR 이 증가하면서 첨가된 CAR 에 관계없이 화염 길이가 길고 휘도가 낮은 역 확산 화염 형태의 비교적 안정한 화염이 존재하였다 (준안정 영역).

Fig. 7 은 CO₂ 첨가시 연소로 내의 온도 분포를 각 조건 별로 나타낸 것이다. CO₂ 첨가로 인한 화염 온도 저감은 CO₂ 의 화학적 효과⁽¹⁴⁾ 뿐만 아니라, 화염에서 발생된 열이 높은 열용량을 갖는 CO₂ 의 온도를 높이는 데 사용되기 때문에 발생한다. 네 가지 경우 모두 순산소 연소의 경우보다 연소로 내의 온도가 저감되었으며, case 2 를 제외한 나머지 경우에서 유동의 교란이 과도하게 발생하는 버너 출구 부분을 제외하고 전

영역에서 온도 측정이 가능하였다. Case 2 는 산화제의 25%가 IN 으로, 75%가 ON 으로 공급되는 조건에서 CO₂ 를 ON 으로 첨가 하는 경우이다. 따라서, 25%의 산화제로 인해 형성된 첫 번째 화염은 CO₂ 첨가로 인해 직접적인 영향을 받지 않고, 희석된 75%의 산화제로 인해 형성된 화염을 부착 (anchoring) 하는 역할을 한다. 따라서, 전체 화염의 주 반응 영역은 나머지 경우보다 하류로 이동 하고, 온도 측정 가능한 높이가 나머지 경우보다 높아졌다. 모든 경우에서 1800 K (빨간색 영역) 이상의 온도가 잘 나타나지 않고, 특히 case 1 과 case 4 에서 1600 K (주황색) 이상의 온도가 반경 방향으로 매우 좁게, 축 방향으로 길게 분포하며 온도 저감 특성이 두드러졌다.

Fig. 8 은 CO₂를 첨가했을 때 각 조건 별 연소로 중심선상의 높이에 따른 온도 분포를 나타낸다. 앞서 fig. 7 에서 살펴본 바와 같이 case 1 과 case 4 에서 화염 중심부 온도가 1800 K 이하로 측정됨을 알 수 있다. 이 두 조건 모두 산소 공급 유량이 적은 쪽으로 CO₂ 를 첨가시킨 경우로 공급된 CO₂ 의 출구 유속이 상대적으로 낮아 주 반응 영역에 체류하는 CO₂ 의 양이 증가하고, 이로 인해 화염온도가 저감되기 때문이라 사료된다.

3.3 높이에 따른 CO₂의 농도 및 분포

일반적으로 아세톤(Acetone)은 관찰하고자 하는 대상의 농도를 추정하는데 매우 우수한 추적자(tracer)이다. 또한, 아세톤의 형광신호는 여기 레이저의 파장 및 광자 수, 아세톤의 수밀도 (또는 분압) 등의 함수로 알려져 있다.⁽¹⁵⁾ 따라서, 본 연구에서는 아세톤 여기 레이저의 파장 및 세기는 모든 경우에서 일정함으로, 아세톤 형광 신호의 차이는 아세톤의 분압, 즉 각 높이에서의 아세톤의 농도에 의한 차이라고 할 수 있다. 또한, 아세톤 공급 (seeding) 은 일정한 유량을 갖는 CO₂ 만을 모든 경우에서 같은 아세톤 양이 채워진 삼각플라스크에 바이패스 (by-pass) 시켜 이루어졌기 때문에, 공급되는 아세톤 양은 일정하다고 판단 할 수 있다. 하지만, 노즐에 공급되는 CO₂ 는 최종적으로 산화제와 혼합되어 공급 되기 때문에, 노즐 출구에서의 아세톤의 분압은 경우에 따라 다르게 나타난다. 즉, 산화제의 유량 또는 유속에 의해서 측정하고자 하는 단위 면적당 아세톤의 분압이 달라지고, 아세톤의 형광 신호가 다르게 나타난다.

Fig. 9 와 fig. 10 은 IN 과 ON 으로 CO₂ 를 공급할 경우, Acetone-PLIF 의 이미지를 나타낸다. 그림에서 보는 것처럼 case 1 과 case 4 는 각각 case 3

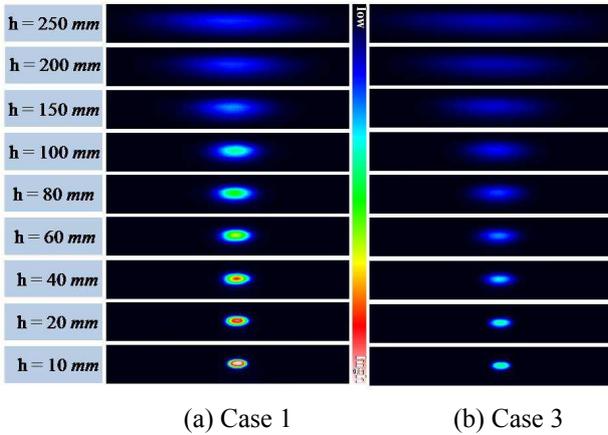


Fig. 9 Acetone-PLIF images in the cases of CO₂ addition in IN

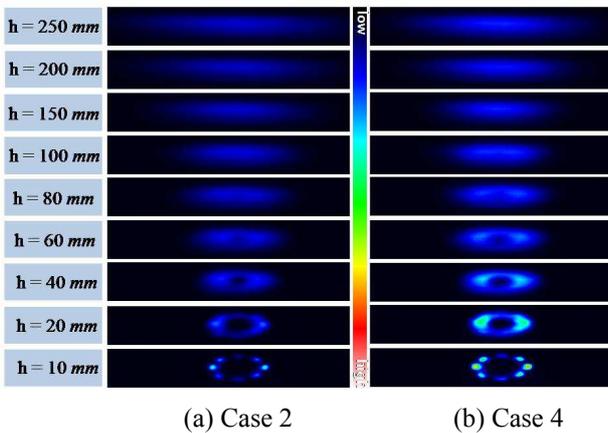
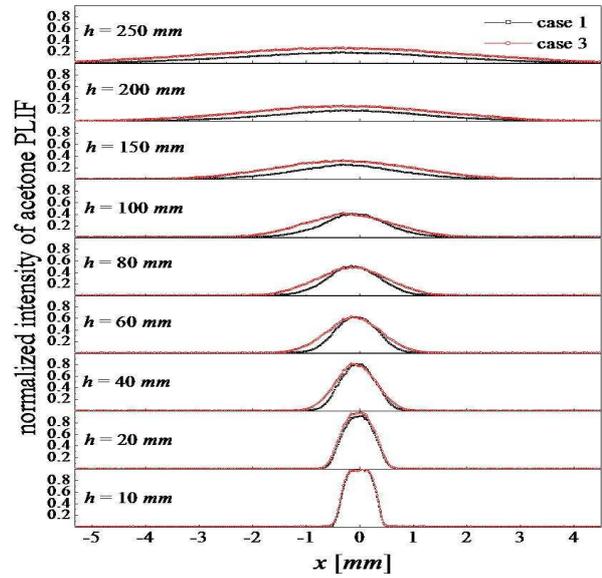


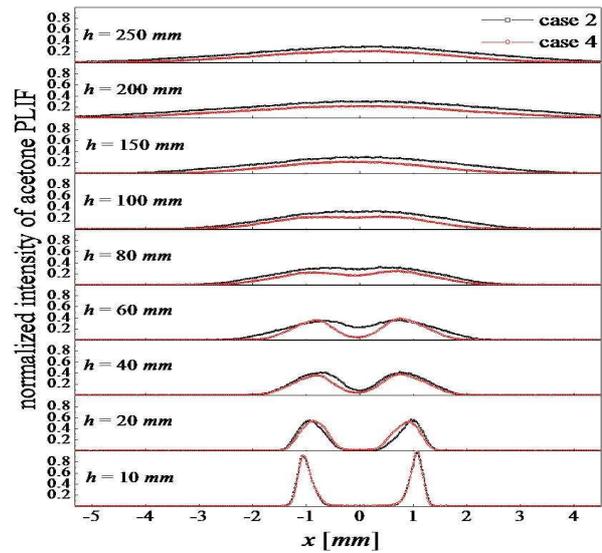
Fig. 10 Acetone-PLIF images in the cases of CO₂ addition in ON

과 case 2 보다 아세톤 형광 신호가 상대적으로 강하게 계속되었다. 이것은 case 1 과 case 4 의 CO₂ 가 공급되는 노즐에서 case 3 과 case 2 보다 산화제의 유량이 적어 상대적으로 CO₂ 농도가 높기 때문이다. 즉, case 1 의 IN 과 case 4 의 ON 으로 공급되는 총 유량에 대해 CO₂ 가 차지하는 비율은 약 56 % 이고, 마찬가지로 case 2 의 ON 과 case 3 의 IN 에서는 약 30 % 임을 알 수 있다. 따라서, 본 연구에서 사용된 3 중 다공 동축 버너에서의 CO₂ 첨가는 산화제의 공급 조건, 즉 OFR 에 의해서 노즐 출구에서 CO₂ 의 농도의 차이를 발생 시키며, 순산소 화염의 온도 저감에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 결과적으로 이러한 CO₂ 의 농도 차이가 Fig. 7 에서 살펴 봤듯이 case 1 과 case 4 에서 온도 저감 효과가 보다 뛰어난 것으로 사료된다.

Fig. 11 은 CO₂ 의 반경 방향으로의 분포를 관찰하기 위해, 각각의 높이에 따른 아세톤 형광 신호를 초기 신호에 대해 정규화를 한 그래프이다. CO₂ 가 IN 으로 공급 될 경우, CO₂ 의 반경 방향으로의 분포는 높이에 따라 일정하게 증가함을 알 수 있고, CO₂ 가 ON 으로



(a) CO₂ addition in IN



(a) CO₂ addition in ON

Fig. 11 Normalized acetone PLIF signals according to cases

공급될 경우, h = 80 mm 이상에서 연소로 중심부까지 균일하게 분포함을 알 수 있다. 특히, CO₂ 가 공급되는 노즐 출구 속도가 낮은 case 1 과 case 4 보다 case 2 와 case 3 에서 반경 방향으로의 분포 특성이 우수하였으며, CO₂ 가 공급되는 노즐 출구 유속이 약 2 배의 차이로 인해 발생하는 강한 난류 혼합에 의한 것으로 사료된다.

일반적으로 산화제가 연료를 감싸는 다공 동축 버너에서 CO₂ 의 열용량을 이용하여 화염 온도를 감소시키는 방법으로 연소대에 직접적으로 영향을 줄 수 있는 IN 에 CO₂ 를 첨가하는 방법을 선택하기 쉽다. 하지만 본 연구에서 살펴봤듯이, 화염 온

도 저감은 CO₂의 단순 공급 위치보다 OFR 과 화염 공급 위치에 따른 CO₂의 농도가 중요한 변수임을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 연소 영역을 확장하고 혼합 특성을 개선할 수 있는 3 중 다공 동축 버너를 이용하여 순산소 화염의 특성 및 CO₂ 첨가가 순산소 화염에 미치는 영향에 관하여 살펴 보았다. 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 순산소 화염은 고휘도의 백열광을 가지는 고온의 화염으로 화염 근처에서는 R-type 열전대의 측정 한계를 초과하였다. OFR 0.25 일 때가 OFR 0.75 에서 보다 화염이 짧고 휘도가 높으며 화염 부근의 고온 영역이 넓게 분포하였다.

(2) CO₂를 IN 으로 공급할 경우, CO₂의 유량과 OFR 에 따라 화염이 민감하게 반응하여 안정 영역, 천이 영역, 준 안정 영역, 불안정 영역, 그리고 날림 영역의 5 가지 영역으로 나뉘었다. 또한, CO₂를 ON 으로 공급할 경우는 날림 영역을 제외한 4 가지 영역으로 나뉘었다.

(3) 순산소 연소에서 CO₂ 첨가는 4 가지 경우 모두 연소로 내부의 온도를 감소시켰고, 특히 산화제 공급 유량이 적은 노즐에 CO₂를 첨가하였을 경우, 즉 case 1 과 case 4 에서 화염 온도 저감 특성이 두드러졌다.

(4) 낮은 출구 유속의 노즐로 CO₂ 공급하였을 경우는 높이에 따른 높은 CO₂의 농도가 예측되었지만, 높은 출구 유속의 노즐로 CO₂의 공급하였을 경우는 반경 방향으로의 CO₂ 분포 특성이 우수하였다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 21 세기 프론티어 연구 개발사업인 이산화탄소 저감 및 처리 기술개발 사업단의 연구비 지원(CF3-101-1-0-1)으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Kim, H. J., Choi, W., Bae, S. H. and Shin, H. D., 2008, "Oxy-Fuel and Flue Gas Recirculation Combustion Technology: A Review," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 32, No. 10, pp. 729~753.
- (2) Ahn, K. Y., Lee, D. K. and Park, J. H., 2009, "Oxy-fuel Combustion Technology," *News & Information for Chemical Engineers*, Vol. 27, No. 2, pp. 155~159.
- (3) Kim, H. K., Kim, Y., Lee, S. M. and Ahn, K. Y., 2006, "Emission Characteristics of the 0.03 MW Oxy-

- Fuel Combustor," *Energy and Fuels*, Vol. 26, pp. 2125~2130.
- (4) Kim, H. K., Kim, Y., Lee, S. M. and Ahn, K. Y., 2007, "NO Reduction in 0.03-0.2MW Oxy-fuel Combustor Using Flue Gas Recirculation Technology," *Proceeding of the Combustion Institute*, Vol. 31, pp. 3377~3384.
- (5) Ahn, J., Kim, H. J. and Choi, K. S., 2009, "Combustion Characteristics of Oxy-fuel Burners for CO₂ Capturing Boilers," *Journal of Thermal Science and Technology*, Vol. 4, No. 3, pp. 408~413.
- (6) Seo, J. I., Guahk, Y. T., Bae, S. H., Hong, J. G., Lee, U. D. and Shin, H. D., 2005, "Experimental Study on the Oxygen Combustion Characteristics with CO₂ Feeding," *Journal of Korean Society of Combustion*, Vol. 10, pp. 26~34.
- (7) Kim, H. K. and Kim, Y. M., 2005, "Flame Length Characteristic for Varying Nozzle Diameter to Develop Oxy-fuel Combustor," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 29, No. 7, pp. 861~867.
- (8) Sautet, J. C., Boushaki, T., Salentey, L. and Labegorre, B., 2006, "OXY-COMBUSTION PROPERTIES OF INTERACTING SEPERATED JETS," *Combustion Science and Technology*, Vol. 178, pp. 2075~ 2096.
- (9) Boushaki, T., Sautet, J. C., Salentey, L., Labegorre, B., 2007, "The behavior of lifted oxy-fuels in burners with separated jets," *International Communications in Heat and mass Transfer*, Vol. 34, pp. 8~18.
- (10) Kim, H. J., Choi, W., Bae, S. H. and Shin, H. D., 2009, "Characteristics of a Multi-jet Burner in Oxy-Liquefied Petroleum Gas (LPG) Flames," *Energy and fuels*, Vol. 23, pp. 1456~1463.
- (11) Baltasar, J., Carvalho, M., Coelho, P. and Costa, M., 1997, "Flue Gas Recirculation in a Gas-fired Laboratory Furnace: Measurements and modeling," *Fuel*, Vol. 76, No. 10, pp. 919~929.
- (12) Bae, M. W., Jung, K. J. and Cho, Y. S., 2007, "A study on the Effect of Recirculated Exhaust Gas upon Exhaust Emissions of Boiler with a FGR system," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 31, No.57, pp. 405~415.
- (13) Lee, B. J., Kim, J. S. and Lee, S., 2004, "Enhancement of Blowout Limit by the Interaction of Multiple Non-premixed Jet Flames," *Combustion Science and Technology*, Vol. 176, pp. 481~497.
- (14) Park, J., Park, J. S., Kim, H. P., Kim, J. S., Kim, S. C., Choi, J. G., Cho, H. C., Cho, K. W. and Park, H. S., 2007, "NO Emission Behavior in Oxy-fuel Combustion Recirculated with Carbon Dioxide," *Energy and Fuels*, Vol. 21, pp. 121~129.
- (15) Lozano, A., Yip, B. and Hanson, R. K., 1992, "Acetone : a Tracer for Concentration Measurements in Gaseous Flows by Planar Laser-Induced Fluorescence," *Experiments in Fluids*, Vol. 13, pp. 369~376.