

# 선회연소기를 이용한 산소부화연소화염의 연소 특성 연구

이윤원\* · 안국영\*\* · 김한석\*\* · 이창언\*\*\*

## Characteristics of Oxygen-Enhanced Flame in Swirl Burner

Yun-Won Lee, Kook-Young Ahn, Han-Seok Kim and Chang-Eon Lee

**Key Words:** Oxygen-Enhanced Combustion (산소부화연소), Swirl Combustor (선회연소기), CO<sub>2</sub> Effect (CO<sub>2</sub> 영향), Flame Stability (화염 안정성)

### Abstract

The emission characteristics, flame stability, the composition of the flame zone and temperature profile were studied experimentally. The compositions of oxydant were varied by substituting N<sub>2</sub> with CO<sub>2</sub> at the constant O<sub>2</sub> concentration. Results showed that flame became unstable due to the high heat capacity, low transport rate and strong radiation effect of CO<sub>2</sub> in comparison with those of N<sub>2</sub>. The reaction zone was cooled, broadened, as the conversion ratio of CO<sub>2</sub> to N<sub>2</sub> was increased. Temperature has a large effect on the NO<sub>x</sub> emission. The concentration of NO<sub>x</sub> in flue gas decreased due to the decreased temperature of reaction zone. It was also shown that the reaction was delayed by the cooling effect. As the conversion ratio of CO<sub>2</sub> to N<sub>2</sub> was increased, the emission of CO and the higher temperature zone increased due to the decrease of reaction rate by the cooling effect.

### 1. 서 론

지구 온난화의 주원인인 CO<sub>2</sub> 발생량의 증가로 기상 이변이 우려되고 이에 따라 생태계의 파괴가 예상되고 있다. 1997년의 국제 협약에서 1990년 수준과 비교해 2008-2012년의 기간에 CO<sub>2</sub> 배출량을 5%까지 감소시키는데 동의함에 따라 국내 산업의 위축이 예상되므로 CO<sub>2</sub>의 발생 억제에 대한 연구가 시급한 실정이다.

탄화수소계 연료의 연소시 발생하는 CO<sub>2</sub>의 배출을 억제하기 위해서는 배기가스 중의 CO<sub>2</sub>를 분리·회수하여 재활용하거나 고정하여 저장하는 방법이 있다. 공기를 산화제로 사용하는 경우 배기가스 중에는 10% 전후의 CO<sub>2</sub> 수분, 그리고 약 60% 정도의 질소 등이 포함되어 있으며 이 중 수분은 응축하여 제거가 용이하지만 기타 성분은 CO<sub>2</sub>와의 분리가 어려워 고농도의 CO<sub>2</sub>를 회수하

는데 많은 설비가 필요하게 되며 고도의 기술이 요구된다. 따라서 CO<sub>2</sub>의 회수를 용이하게 하기 위해서는 연소가스의 CO<sub>2</sub>를 가능한 고농도로 하여야 하며 이를 위해서 산화제로 순산소를 이용하는 산소부화 연소 기술<sup>(1)</sup>이 필요하다.

산소부화 100% 연소의 경우 이론 당량비 조건에서 탄화수소계 연료의 연소시 배기가스는 CO<sub>2</sub>와 수분만 발생되며 수분을 응축하여 제거하는 경우 이론상 100% 고순도의 CO<sub>2</sub>회수가 가능하게 되며 또한 공해성 가스인 NO<sub>x</sub>의 발생이 없어 공해문제에 있어서도 산소부화 연소는 차세대 청정 연소기술로 기대된다.

순산소를 산화제로 이용하는 경우 공기를 산화제로 이용하는 경우에 비해 동일 열원에 대한 연소시 발생하는 생성가스의 발생량이 적고 화염대가 고온이기 때문에 연소효율과 열회수율이 증가되는 장점이 있지만 기존의 보일러 등의 열회수 장치를 보완 없이 이용하는 경우 노벽이나 열교환기 등의 손상이 우려된다. 이러한 관점에서 화염온도를 제어할 수 있는 배기가스 재순환방식과 산소부화 연소를 병용한 방식은 기존 열회수 장치의 보완을 최소한으로 할 수 있어 실용화 측면

\* 인하대학교 기계공학과 대학원

\*\* 한국기계연구원 열유체환경부

\*\*\* 인하대학교 기계공학과

에서 유리할 것으로 생각된다. 최근의 이러한 산소부화 연소에 대한 연구로는 대항류 화염에서 동일 Strain rate에 대해서 CO<sub>2</sub> 첨가에 따른 화염의 구조 및 NO 생성 특성에 대하여 수치해석적인 연구<sup>(2)</sup>를 비롯하여 CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 예혼합화염의 CO<sub>2</sub>첨가에 따른 층류 연소에 대한 연소 속도 등 기초 연소현상<sup>(3)</sup>에 대한 연구, 부상된 분류 확산 화염에서 O<sub>2</sub>에 N<sub>2</sub>와 CO<sub>2</sub>의 희석효과에 따른 화염의 구조 및 안정성에 대한 연구<sup>(4)</sup> 등이 수행되고 있다.

본 연구에서는 이러한 산소부화 연소의 온도를 제어하기 위한 CO<sub>2</sub>의 첨가 효과를 실제 연소기 설계 시 적용하기 위하여 산화제 중에서 N<sub>2</sub>를 동일 용적의 CO<sub>2</sub>로 대체하였을 경우 대체 비율에 따른 배기 특성 및 화염 안정성 등의 연소 특성에 대한 연구를 수행하였다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 실험 장치의 구성

Fig. 1은 연소기를 나타내며 출구부에 스윌러(Swirl number 0.77)를 장착하였고 연료는 일반 상용화 LNG로 하여 5,000 kcal/hr 용량으로 Fig. 2와 같이 실험장치를 구성하였다. O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, Air 그리고 LNG의 정량 공급을 위하여 각각을 조절할 수 있는 니들밸브와 질량유량 공급조절 장치(Mass flow controller)를 사용하였다. 화염 가시화를 위

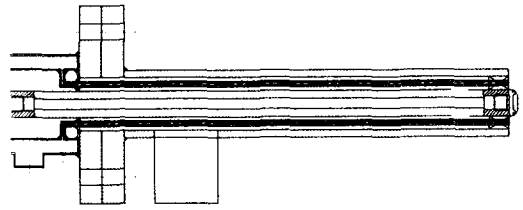


Fig. 1 Details of burner

하여 연소실 벽은 가시화용 내열유리로 구성하였다. 연소실의 측정 지점의 열전대 및 가스포집기의 정확한 이송을 위하여 x-y 좌표계가 설치되어 있는 이송장치를 이용하였다.

연소실 내부의 가스 조성측정을 위하여 연소실 상부를 통하여 가스 포집장치를 삽입한 후 연소실 각 지점에서 포집된 가스를 분석함으로써 연소실 각 지점의 가스 조성을 예상하는 방법을 취하였다. 수냉식 포집장치는 3중관으로 구성되어 있으며 관 내부를 냉각용 물을 이용하여 포집기의 과열과 포집기내의 반응을 최소화하였다. 포집된 가스는 Water trap을 통하여 수분을 제거한 후 Electro chemical 형의 가스 분석기(Green Line Mk2)를 사용하여 NO, NO<sub>2</sub>, CO, O<sub>2</sub>에 대하여 측정하였으며 NO<sub>x</sub>는 NO와 NO<sub>2</sub>의 합으로 나타내었다.

화염대 내부의 온도를 측정하기 위하여 노출형 R-type(Pt/Pt-13%Rh) 열전대를 이용하였다. 화염대의 가스농도의 측정과 마찬가지로 방법으로 연소실 윗면으로부터 열전대를 이송시켜 가면서 측방향

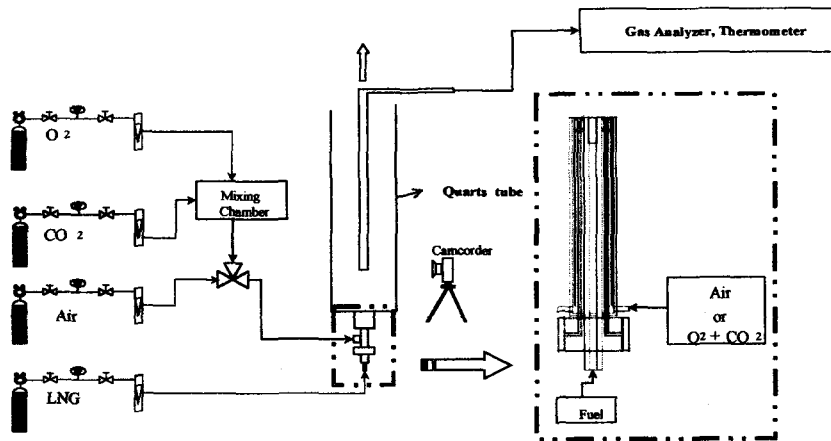


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus.

과 반경방향의 온도를 측정하였으며 복사와 전도에 의한 오차는 보정하지 않았다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 화염 안정성

과잉 공기비(Excess Air Ratio) 1.3을 기준으로 공기 중의  $N_2$ 를 동일 용적의  $CO_2$ 로 대체한 경우 대체 비율과 산화제의 유속에 대한 화염 안정성 실험을 수행한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3의 각 지점은 연료를 일정하게 공급하고  $CO_2$  대체비에 대해 산화제의 유속을 증가시켜 가면서 화염이 Blow-out되는 유속을 나타낸 것이며 선 아래영역은 화염이 존재하는 한계영역을 나타내고 있다.  $CO_2$ 의 대체비에 따라 화염은 불안정해짐을 알 수 있다.

Fig. 4는 각 대체비에 대한 화염을 가시화한 결과이다.  $CO_2$  공급량의 증가로 인한 화염내부의 불안정하여지고 발광도는 감소되는 것을 볼 수 있다.

Fig. 3과 Fig. 4의 결과에서 보면 연소용 공기 중  $N_2$ 에 대한  $CO_2$ 의 대체비가 증가할수록 전반적으로 화염의 안정성이 감소됨을 알 수 있다. 이것은  $N_2$ 보다  $CO_2$ 의 비열이 크고 전달 비율(Transport rate)이 작기 때문으로 생각된다.

#### 3.2 배기가스

##### 3.2.1 $CO_2/N_2$ 대체비 변화에 대한 배기가스 특성

3.1절과 동일한 조건에서의 배기가스 특성을 Fig. 5 (a)와 (b)에 나타내었다.  $CO_2$ 의 비열이 공

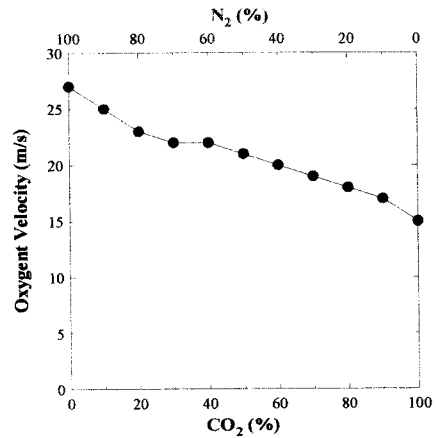


Fig. 3 Flame stability for  $CO_2$  conversion ratio.

기중의  $N_2$  보다 높기 때문에  $CO_2$  대체비율이 증가할수록 연소실이 냉각되며 이에 따라 연소 반응이 지연됨으로서 Thermal  $NO_x$ 의 발생이 감소된다. 그리고  $CO$ 의 경우는 냉각 효과로 연소 반응이 감소되어 완전 연소가 이루어지지 않음을 알 수 있다.

##### 3.2.2 과잉 공기비 변화에 대한 배기가스 특성

Fig. 6의 (a)와 (b)는 과잉 공기비를 변수로  $CO$ 와  $NO_x$ 의 조성을 배기가스 중의  $O_2$  4%로 환산한 결과를 나타내었다. 과잉공기비가 1.2~1.4인 경우 배기가스 중  $CO$ 가 비교적 적게 발생됨을 알 수 있는데 이것은 과잉공기비가 1.2 보다 적은 경우 연료로의 충분한 공기의 공급이 어렵기 때문이며, 과잉공기비가 1.4 이상인 조건에서는

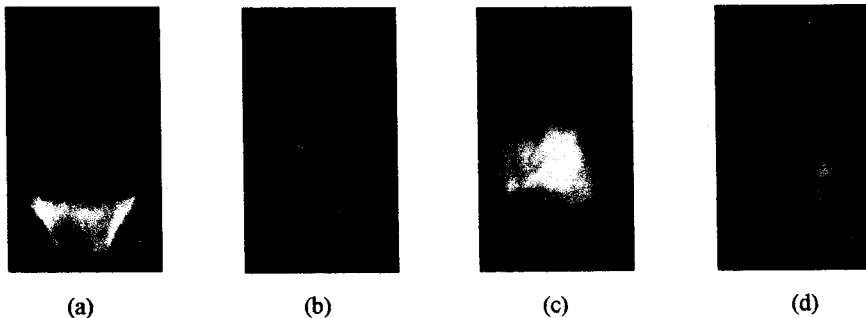
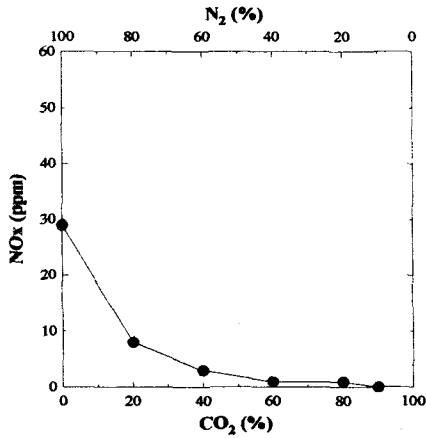
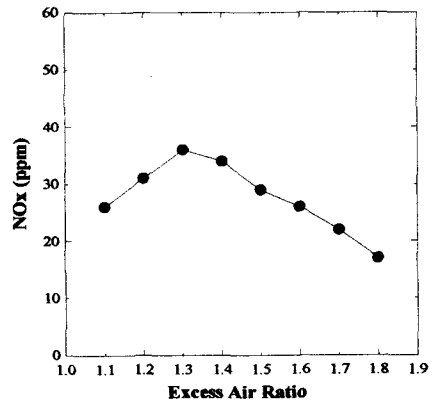


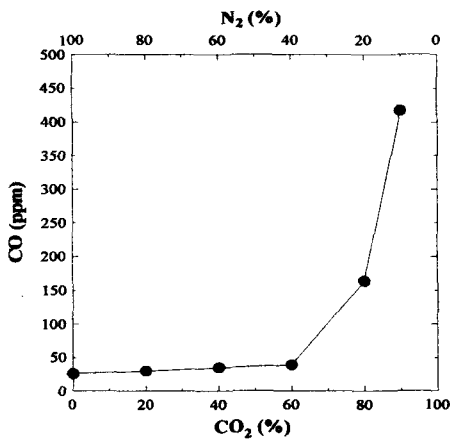
Fig. 4 Flame structure for  $CO_2$  conversion ratios. (a)=0%, (b)=40%, (c)=60%, (d)=80%



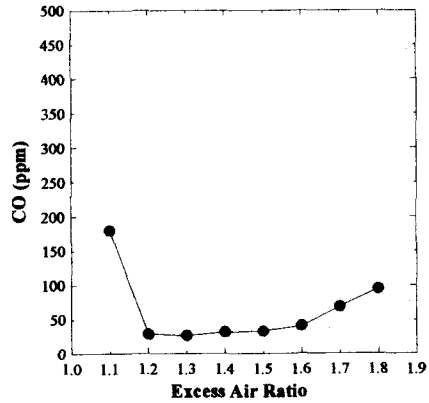
(a) NO<sub>x</sub>



(a) NO<sub>x</sub>



(b) CO



(b) CO

Fig. 5 Emission for CO<sub>2</sub> conversion ratio.

공기의 과잉공급에 의한 냉각효과 그리고 유속증대에 의한 Strain rate 상승 등으로 인해 화염이 불안정해져서 연소효율이 저하됨으로 CO의 발생이 증가하는 것을 알 수 있다. NO<sub>x</sub>의 경우 과잉공기비가 1.1~1.3에서는 공기의 공급량이 증가하는 경우 NO<sub>x</sub>화되는 O<sub>2</sub>의 농도가 화염대에서 증가하기 때문으로 생각되며 과잉공기비가 1.3이상에서는 O<sub>2</sub>의 농도 증가효과보다는 화염대의 냉각과 연료 과농 영역의 감소효과로 NO<sub>x</sub>의 농도는 감소하게 된다. 그리고 CO의 경우는 CO<sub>2</sub>의 공급비율을 증가시킬수록 3.2.1절에서 언급하였듯이 연소 영역의 냉각 효과로 연소반응율이 감소됨으로

Fig. 6 Emission for excess air ratio.

로서 연소실내에서 완전 연소가 이루어지지 않음을 알 수 있다.

### 3.3 온도 특성

Fig. 7은 공기중 N<sub>2</sub>에 대한 CO<sub>2</sub>의 대체율이 0, 50, 90% 인 경우에 대한 연소실 내부의 화염 온도분포를 측정된 결과이다. CO<sub>2</sub>의 대체율이 증가될수록 연소실 내부의 화염 온도가 낮게 분포됨을 알 수 있다. 동일 용적의 산화제를 공급하는 경우 산화제/연료의 혼합특성의 차이보다는 N<sub>2</sub>에 비하여 CO<sub>2</sub>의 열방사 특성 및 비열이 크기 때문에 연소영역이 냉각되는 것으로 생각된다. 그리고 CO<sub>2</sub>의 대체율이 90%인 경우 치환하지 않은

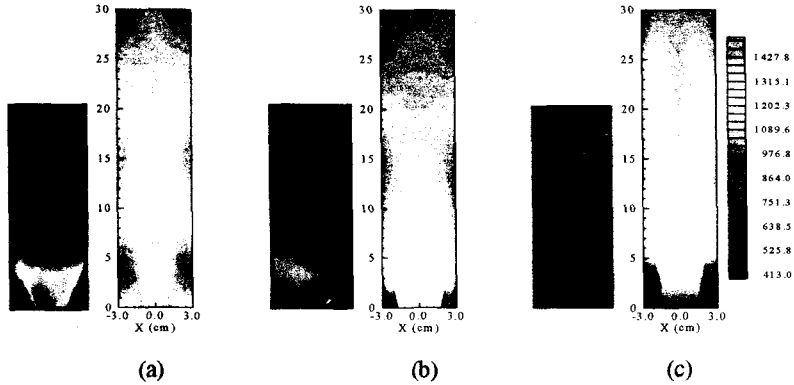


Fig. 7 Temperature contour for CO<sub>2</sub> conversion ratios. (a)=0%, (b)=50%, (c)=90%

경우에 비하여 하류부에 높은 온도분포를 보이는 것을 알 수 있는데 이것은 연소 영역의 냉각에 의하여 연소반응이 지연되는 것을 확인할 수 있다.

CO<sub>2</sub> 공급에 의한 온도저하로 반응이 지연되기 때문임을 알 수 있다.

### 3.4 연소실 내부의 가스조성

Fig. 8과 Fig. 9는 공기중 N<sub>2</sub>에 대한 CO<sub>2</sub>의 대체율에 대하여 연소실 중심부에서 축방향으로 NO<sub>x</sub>와 CO를 측정된 결과이다.

CO<sub>2</sub> 대체율이 0%인 경우 NO<sub>x</sub>의 조성을 보면 연료가 분사되는 노즐부에서 비교적 높은 값을 나타내는데 이것 역시 연소영역에서 발생된 NO<sub>x</sub>가 재순환 gas와 함께 연료 분사구에 공급되기 때문으로 생각된다. 그리고 화염이 하류로 갈수록 NO<sub>x</sub>의 조성이 증가되는 것은 체류시간 증대에 의한 Thermal NO<sub>x</sub>의 발생에 의한 것으로 생각된다. 그리고 CO<sub>2</sub>의 대체율에 대하여 NO<sub>x</sub>는 비교적 많은 영향을 받는 것으로 예상되는 데 이것은 3.3절에서 언급하였듯이 연소영역의 냉각에 의한 것임을 확인할 수 있다.

Fig. 9의 결과에서 보면 노즐 출구에서 약 60mm 떨어진 곳에서 CO의 농도가 가장 높은 것을 알 수 있는데 이것은 연료의 반응율이 최고인 지점으로 생각되며 CO가 이후 감소되는 것은 재순환에 의한 공기중의 산소공급으로 완전 연소가 이루어져서 CO가 CO<sub>2</sub>화되는 것을 알 수 있다.

CO<sub>2</sub> 대체율이 0%인 경우에 비하여 대체율이 50%인 경우 연소실 CO의 농도가 높은 것은

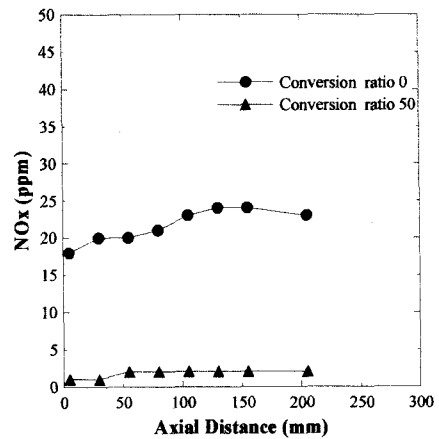


Fig. 8 NO<sub>x</sub> concentration of various axial distance.

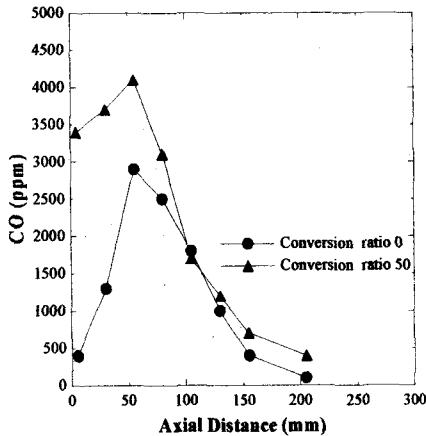


Fig. 9 CO emission with axial distance.

#### 4. 결론

본 연구에서 연소용 공기중의  $N_2$ 를 동일 용적의  $CO_2$ 로 대체한 경우 연소특성에 대한 결과를 다음과 같이 요약할 수 있다.

(1)  $CO_2$ 의 대체비가 증가할수록  $N_2$ 보다  $CO_2$ 의 높은 비열과 낮은 전달 비율 등으로 인해 화염이 불안정해진다.

(2)  $CO_2$ 와  $N_2$ 의 비열과 열방사 특성의 차이 등에 의해  $CO_2$ 의 대체비가 증가할수록 연소실의 냉각으로 완전 연소가 이루어지지 않아 배기가스 중  $CO$ 의 농도가 증가하였다.

(3)  $CO_2$ 의 대체비가 증가할수록 연소실의 냉각으로  $NO_x$ 의 농도는 감소하였다.

(4) 연소실 내부의 온도는  $CO_2$ 의 대체비가 증가할수록 고온부가 하류부로 이동되는데 이것은 연소 영역의 냉각에 의해 연소반응이 지연되는 것으로 예상할 수 있다.

#### 후기

이 연구는 과학기술부에서 지원하는 연소기술 센터(CERC)의 연구사업으로 연구가 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- (1) Charles E. Baukal, Jr., Ph.D., 1998 "Oxygen-enhanced Combustion", CRC Press
- (2) Ji-Woong Han, Chang-Eon Lee, 2001, "Numerical Study on Flame Structure and NO Formation Characteristics in Oxidizer-Controlled Diffusion Flames", The Third Asia-Pacific Conference on Combustion June 607-610
- (3) 炯明, 新岡 嵩, 小林 秀昭, 1997, "CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 豫混合 火炎의 基礎特性에 關する 研究", 제 35회 일본 연소학회 심포지움
- (4) Jiongming Ruan, Hedeaki Kobayashi, Takashi Niioaka, Abudula Abuliti and Fumio Iida, 2001, "Effects of diluents on structure and stability of axisymmetric lifted laminar diffusion flames", The Third Asia-Pacific Conference on Combustion June 191-194
- (5) Y. Hu, S. Naito, N. Kobayashi, M. Hasatani, 2000, "CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> and SO<sub>2</sub> emissions from the combustion of coal with high oxygen concentration gases", Fuel, 79, 1925-1932
- (6) Serphen R. Turns, 2000, "Introduction to Combustion", McGraw-Hill