

산소부화연소에서 CO₂ 첨가에 대한 연소 특성

김한석[†] · 김호근^{**} · 안국영^{*} · 김용모^{***}
(2003년 3월 18일 접수, 2003년 12월 4일 심사완료)

Characteristics for Effects of CO₂ Addition to Oxygen-Enriched Combustion

Han-Seok Kim, Ho-Keun Kim, Kook-Young Ahn and Yong-Mo Kim

Key Words: Oxygen-Enriched Combustion(산소부화연소), Blow-out(소염), Addition(첨가), Oxygen-Enriched Ratio(산소부화율)

Abstract

CO₂ is a well-known green house gas as well as the major source of global warming. Many researchers have studied to reduce CO₂ emission in combustion processes. Among the method for reducing CO₂ emission, oxygen-enriched combustion has been proposed. Because its adiabatic flame temperature is relatively too high, existing facilities must be changed or the flame temperature in the combustion zone should be reduced. The combustion characteristics, composition in the flame zone, temperature profile and emission gases were investigated experimentally for the various oxygen-enriched ratios(OER) by the addition of CO₂ under constant O₂ flow rate. Results showed that the reaction zone was quenched and broadened as the addition of CO₂ was increased. The emission of NO_x in flue gas was decreased as decreasing temperature in reaction zone. It was also shown that the reaction was delayed by the cooling effect. As the addition of CO₂ was increased, the composition of CO in the flame zone was increased due to the increase of reaction rate by increasing mixing effect of oxidant/fuel at OER=0%, but the composition of CO was decreased by quenching effect at OER=50% and 100%.

1. 서론

환경문제는 기후변화협약 등 국제적으로 주요 쟁점이 되고 있으며 특히 대표적 온실가스인 CO₂ 발생억제를 위한 연구가 각국에서 진행되고 있다.

탄화수소계 연료의 연소시 발생하는 CO₂의 배출을 억제하기 위해서는 배기가스 중의 CO₂를

분리·회수하여 재활용하거나 저장하는 방법이 있다. 공기를 산화제로 사용하는 경우 배기가스 중에는 10% 전후의 CO₂, 수분, 그리고 약 60% 정도의 질소 등이 포함되어 있으며 이 중 수분은 응축하여 제거가 용이하지만 기타 성분은 CO₂와의 분리가 어려워 고농도의 CO₂를 회수하는데 많은 설비가 필요하게 되며 고도의 기술이 요구된다. 따라서 CO₂의 회수를 용이하게 하기 위해서는 연소가스 중의 CO₂를 고농도로 하여야 하며 이를 위해서 산화제로 순산소를 이용하는 산소부화 연소 기술⁽¹⁾이 필요하다.

탄화수소계 연료의 산소부화 100% 연소인 경우 이론 당량비 조건에서 배기가스는 CO₂와 수분이 발생되며 수분을 응축하여 제거하는 경우 100% 고농도의 CO₂회수가 가능하게 된다. 또한 이 경우 공해성 가스인 NO_x의 발생이 없어 차세

† 책임저자, 회원, 한국기계연구원 대기환경그룹

E-mail : haskim@kimm.re.kr

TEL : (042)868-7368 FAX : (042)868-7284

* 회원, 한국기계연구원 대기환경그룹

** 회원, 한양대학교 대학원

*** 회원, 한양대학교 기계공학부

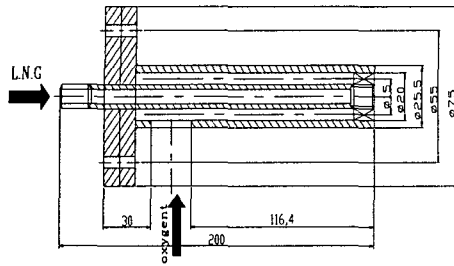


Fig. 1 Schematic diagram of the burner

대 청정 연소기술로 기대된다. 그러나 연소영역이 고온인 산소부화 연소를 기존의 연소시스템에 적용하는 경우 연소실 벽의 열손상이 우려되며 산화제의 유속 저하로 화염이 불안정하기 때문에 배기가스의 CO₂ 일부를 산화제에 첨가하여 화염 온도의 조절과 산화제 유속을 제어할 필요가 있다.

최근 산소부화 연소에 대하여 대항류 화염의 CO₂ 첨가에 따른 화염의 구조 및 NO 생성 특성에 대한 수치해석 연구⁽²⁾를 비롯하여 CH₄/O₂/CO₂ 예혼합화염에 있어 CO₂ 첨가에 대한 연소현상⁽³⁾ 연구 등이 수행되고 있다.

본 연구에서는 기존 산업현장에서 많이 이용되는 선회기형 연소기를 이용하여 산소부화연소상태에서 산화제에 CO₂를 첨가하는 경우에 대한 연소특성을 확인하였고 산소부화 연소기의 설계인자 도출을 목표로 연소실험을 수행하였다.

2. 실험장치

산소부화 연소실험에 사용한 연소기는 일반 산업용으로 많이 사용되는 형태의 연소기로 Fig. 1 과 같이 중심부에 연료가 분사되며 외부의 산화제, 출구부에는 화염 안정성을 도모하기 위하여 선회기(swirl number 0.77)가 설치된 구조로 되어 있으며 일반 상용화 LNG의 5,000 kcal/hr(연료 저위발열량 기준) 용량으로 설계하였다.

Fig. 2는 실험장치 계략도를 나타낸 것이다. 산화제의 혼합기체로 이용될 O₂, CO₂, Air의 정량공급을 위하여 질량유량 공급조절 장치(mass flow controller)를 이용하였으며 연소실은 화염 가시화

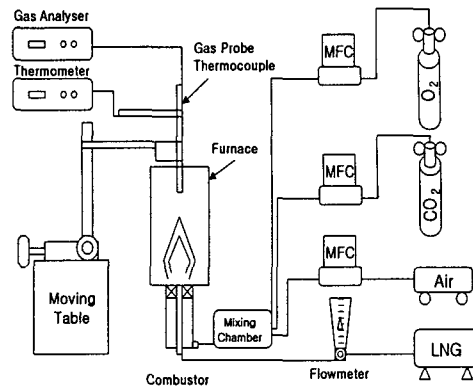


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

를 위하여 직경 100 mm, 길이 800 mm 석영관을 이용하였다.

연소실험에 사용된 연료는 산업용 LNG를 이용하였으며 적정유량의 공급은 보정된 유량계를 이용하였다.

배기가스 및 연소실 내부의 가스조성을 예상하기 위하여 수냉식 가스 포집장치와 가스 분석기(Green Line Mk2)를 이용하였다. 측정에 이용된 가스 분석기의 측정범위는 각각 CO 0~10%, NO 0~4000ppm, NO₂ 0~800ppm이며 표준가스를 이용하여 실험 전에 보정하여 이용하였다.

배기가스의 농도측정은 연소기 입구에서 약 750mm 떨어진 곳에 설치된 포집기를 이용하였고, 연소실 내부 가스 조성은 이송테이블을 이용하여 연소실 중심에서 연소기 선단으로부터 측방향으로 25 mm 간격으로 200 mm까지 포집하였다.

연소실 내부 온도분포는 미국 OMEGA사의 노출형 R-type 열전대 (Pt/Pt-13Ph, 직경 0.1 mm)를 이용하였으며 열전대의 정확한 위치제어를 위하여 가스 포집에 이용된 이송테이블을 이용하였다. 측정은 반경방향으로 5mm 간격으로 30mm 까지 측방향으로는 25mm 간격으로 300mm까지 계측하였으며 각 지점에서의 측정결과를 이용하여 온도분포를 내삽하여 나타내었다. 그리고 열전대의 복사 등에 의한 오차는 보정하지 않았다.

3. 결과와 고찰

3.1 산소부화에 대한 연소특성

산화제 조성은 기준 연료량에 있어 이론 공기

량의 1.3배인 경우 포함된 산소량을 기준으로 산소부화율에 대한 실험을 수행하였다.

여기서 산소부화율(OER)은

$$\text{산소부화율}(\%) = \frac{O_2 \text{ 유량}}{\text{공기중의 } O_2 \text{ 유량} + O_2 \text{ 유량}} * 100$$

로 정의하였으며

이산화탄소 첨가율은 이론 공기량의 1.3배인 경우 포함된 질소량을 기준으로

$$\text{이산화탄소첨가율}(\%) = \frac{\text{첨가한 } CO_2 \text{ 유량}}{\text{기준 공기중의 } N_2 \text{ 유량}} * 100$$

로 정의하였다.

Table 1은 기준 연료량(5,000 kcal/hr)에 있어 산소부화율에 대한 실험조건을 정리하였다.

Fig. 3은 산화제에 CO₂를 첨가하지 않은 경우 산소부화율에 대한 화염을 가시화 한 결과이다.

산화제로 산소만을 공급하는 산소부화 100% 조건인 Fig. 3의 결과로부터 산소부화율이 감소하게 되면 상대적으로 공기 첨가량이 증가하게 되

Table 1 Experimental conditions

| 산소부화율 | Air(Nm ³ /h) | O ₂ (Nm ³ /h) | CO ₂ (Nm ³ /h) |
|-------|-------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| 0 % | 7.18 | 0 | 0-5.68 |
| 50% | 3.59 | 0.75 | 0-5.68 |
| 100 % | 0 | 1.50 | 0-5.68 |

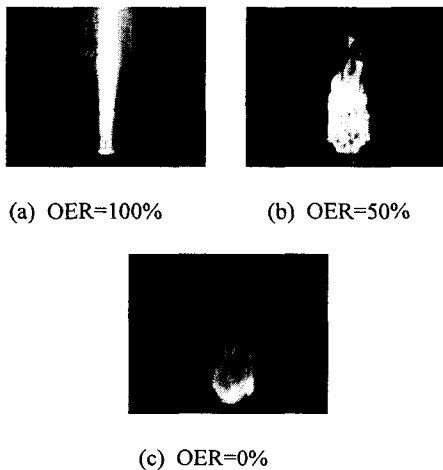


Fig. 3 The images of the oxygen-enriched flame

고 이에 따라 산화제의 질소유량의 증가로 산화제 유속이 증가되어 연료/산화제의 혼합특성 증대로 화염이 안정화되는 것을 알 수 있다.

3.2 산소부화율 100% 조건에서의 CO₂ 첨가

산화제로 산소(1.5 Nm³/hr)만을 공급하고, 3.1에서 언급하였듯이 CO₂ 유량 5.68 Nm³/hr을 기준으로 CO₂ 첨가율에 대하여 배기가스 농도를 Fig. 4에 나타내었다.

CO₂의 첨가율이 50% 미만인 경우 Fig. 3의 결과에서 언급하였듯이 연료/산화제의 혼합 특성이 감소되어 연료와 산화제가 충분히 혼합되지 않아 미연가스가 배출되었으며 CO 농도가 계측기의 한계를 벗어나 계측을 수행하지 못하였다. 측정된 CO₂의 첨가율이 50% 이상 범위에서 CO₂의 첨가율이 증가할수록 연소실의 온도가 저하될 것으로 예상되지만 이보다는 Fig. 3의 결과에서 언급하였듯이 산화제의 유속 증가에 의한 연료/산화제의 혼합효과가 크게 되기 때문에 CO의 배출은 오히려 감소됨을 예상할 수 있다.

Fig. 5는 Fig. 4의 실험 결과 중 CO₂ 첨가율을 50%, 70%로 한 경우 연소실 내부의 온도를 측정 한 결과이다. CO₂ 첨가율이 50%인 경우에 비하여 70%인 경우 산화제의 유속 증가로 연료 노즐 선단영역에 재순환영역이 발달되어 노즐 선단부에서 고온 영역이 형성됨을 알 수 있다. 그리고 CO₂에 의한 냉각으로 CO₂ 첨가율이 70%인 경우 50%인 경우에 비하여 1400℃ 이상의 극부적 고

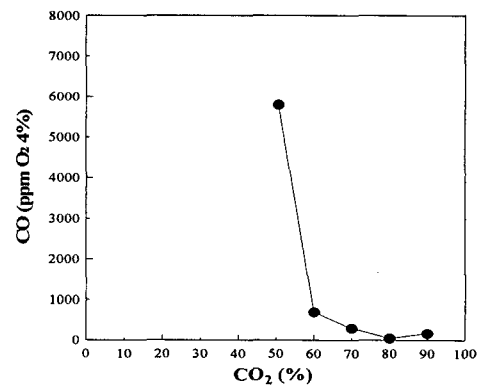
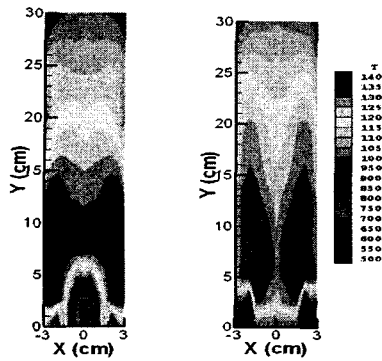


Fig. 4 The CO concentration emitted from flames with respect to an additional amount of CO₂ at OER=100%.



(a) CO₂=50% (b) CO₂=70%

Fig. 5 Temperature contour.
(OER=100%, Legend unit=°C)

온영역은 감소되지만 Fig.4의 결과에서 언급하였듯이 연료/산화제의 혼합특성의 증가로 연료가 미연가스로 배출되지 않고 연소반응이 하류까지 진행됨으로서 1200°C 이상의 고온영역이 하류까지 분포됨을 알 수 있다.

CO₂ 첨가율에 대한 연소실 내부의 CO 측정은 CO₂ 첨가율 50%인 경우는 노즐 선단부의 미연 연료 등으로 가스분석이 어려워 CO₂ 첨가율 70%, 90%에 대하여 수행하였다. 첨가율 70%, 90%의 조건에서 연소실 중심부의 축방향에 대한 CO의 측정결과를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6의 결과에서 CO의 최고 농도는 CO₂의 첨가율이 70%보다 90%조건에서 높게 측정되었다. Fig. 5의 CO₂ 첨가율을 증가시키는 경우 노즐 선단의 온도가 증가한다는 결과로부터 CO₂ 첨가율을 증가시키는 경우 연소기 선단에 재순환영역이 발달하여 연소반응이 활발해지고 그 결과로 중간반응생성물인 CO의 농도가 증가되는 것으로 예상할 수 있다.

3.3 산소부화율 50% 조건에서의 CO₂ 첨가

Fig. 7은 산소부화 50% 조건에서 CO₂ 첨가율에 대하여 배기가스 중 CO와 NO_x의 조성을 나타내었다. Fig. 7(a)의 결과로부터 CO₂ 첨가율이 15%~35%에서는 CO₂ 첨가율이 증가할수록 CO의 배출이 감소되는데 Fig. 5의 결과에서 언급하였듯이 연소실의 온도는 냉각되지만 이보다는 산화

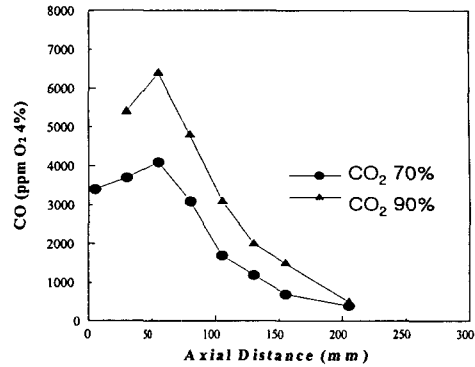
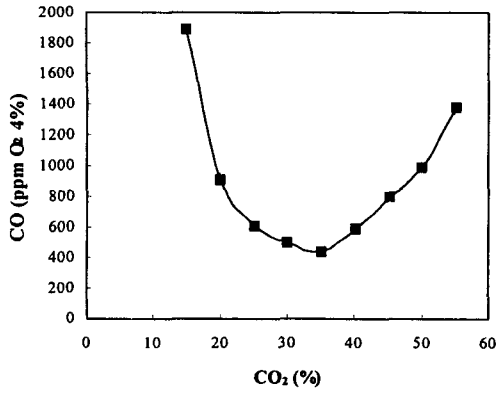


Fig. 6 The CO concentration emitted along the combustor axial at OER=100%

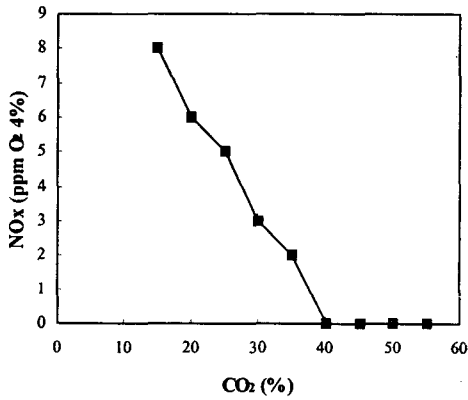
제의 유속증가에 의하여 연료와 산화제의 혼합특성의 증가에 의한 영향을 더 받기 때문이며 CO₂ 첨가율이 35% 이상에서는 CO₂ 첨가율 증가에 의한 산화제의 혼합특성의 증가보다는 연소실의 냉각에 의한 영향이 커져 화염이 불안정해지기 때문에 CO의 조성이 높게 되는 것임을 예상할 수 있다. 그리고 Fig. 7(b)의 결과로부터 CO₂ 첨가율이 증가함에 따라 연소영역의 냉각과 체류시간의 감소로 NO_x 발생은 감소됨을 알 수 있다.

Fig. 8은 Fig. 7의 실험조건 중 CO₂ 첨가율이 30%, 50%인 경우 연소실의 온도분포를 나타낸 결과이다. CO₂ 첨가율이 50%인 경우 30%에 비하여 연소실내의 온도분포가 균일해지고 고온영역이 작아지는 것을 알 수 있다. CO₂ 첨가율이 50%인 경우 산화제의 유속이 크게 되어 연료/산화제의 혼합이 증가하지만 연소영역의 냉각으로 연소반응이 억제되어 고온영역이 감소하게 되며 연소실내에서 균일한 온도분포를 갖게 된다.

Fig. 9는 Fig. 8과 동일한 조건에서 연소실 중심부의 CO와 NO_x의 농도를 나타낸 것이다. Fig. 9(a)의 결과로부터 CO의 최고농도는 첨가율이 큰 50% 조건이 상대적으로 낮게 되는 것을 알 수 있다. CO₂ 첨가율이 50%인 경우 연소기 선단에 재순환 영역의 발달로 중간반응생성물인 CO가 높게 나타날 것으로 생각되지만 이보다는 연소영역의 냉각으로 연소반응이 억제됨으로서 CO의 농도가 오히려 낮아지게 된다. Fig. 9(b)의 결과로부터 CO₂ 첨가율이 증가함에 따라 연소영역의 냉각으로 NO_x 발생이 감소됨을 알 수 있다.

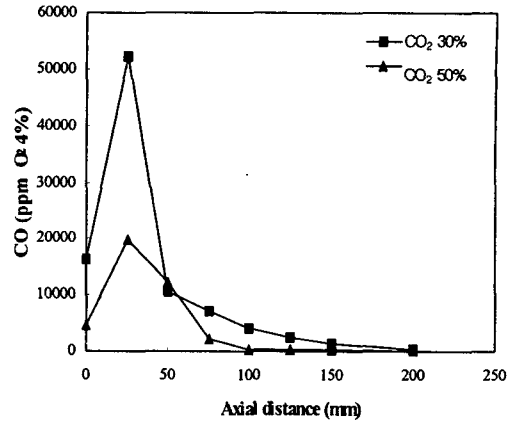


(a) CO

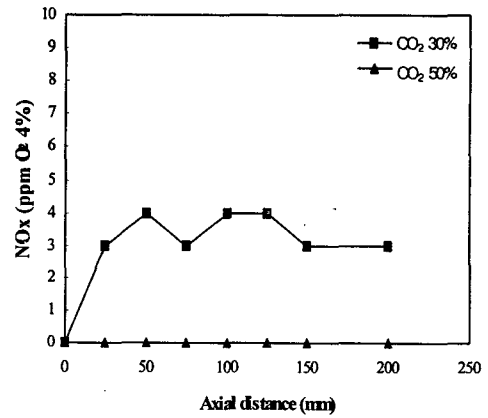


(b) NOx

Fig. 7 The CO and NOx concentration emitted from flames with respect to an additional amount of CO₂ at OER=50%

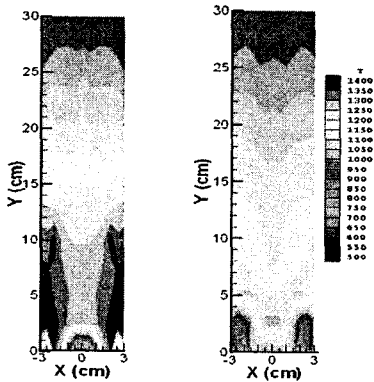


(a) CO



(b) NOx

Fig. 9 The CO and NOx concentration emitted along the combustor axial at OER=50%



(a) CO₂=30%

(b) CO₂=50%

Fig. 8 Temperature contour.(OER=50%, Legend unit=°C)

3.4 산소부화율 0%

공기를 산화제로 한 산소부화 0%인 경우 산소부화율 50%와 100%에 비하여 CO₂ 첨가율이 25% 이상인 경우 화염이 소멸 되었는데 이것은 산소부화율이 0%인 경우 산화제의 유량이 많기 때문에 작은 CO₂의 첨가로도 화염이 불안정해지는 것을 알 수 있었다.

Fig. 10은 각 CO₂ 첨가율에 대하여 출구부에서의 CO와 NOx의 농도를 측정 한 결과이다. CO₂의 첨가율이 증가할수록 연소영역이 냉각되어 연소반응이 억제되고 연소실 체류시간 감소로 CO의 농도는 증가되며, 이와 반대로 NOx의 농도는 감소됨을 알 수 있다.

Fig. 10의 실험 조건 중 CO₂ 첨가율 10%, 20% 조건에서의 연소실 내부의 온도분포를 Fig. 11에

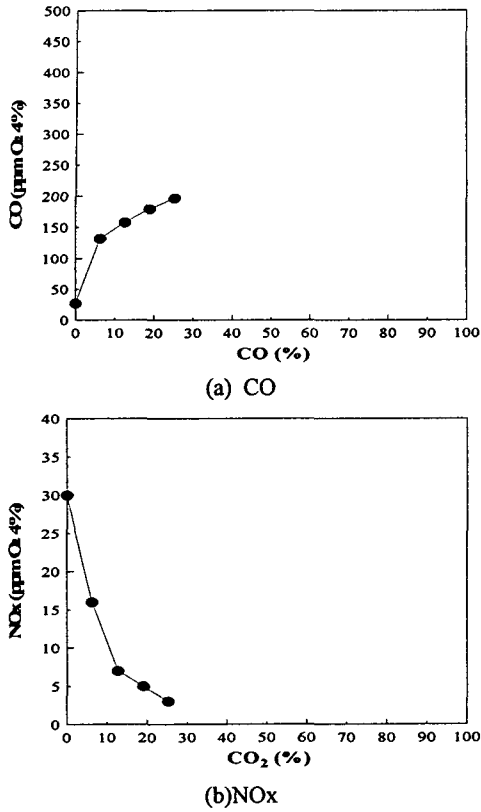
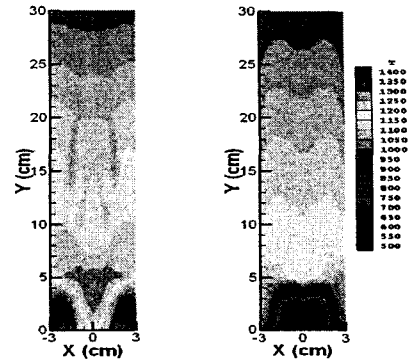


Fig. 10 The CO and NOx concentration emitted from flames with respect to an additional amount of CO₂ at OER=0%

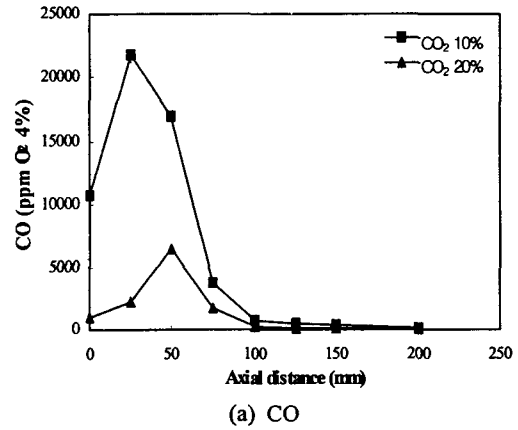
나타내었다. Fig. 11의 결과로부터 CO₂ 첨가율이 20%인 경우 10%의 경우보다 고온영역이 하류로 이동됨을 알 수 있다. CO₂ 첨가율이 20%로 큰 경우 연료/산화제의 혼합특성은 증가될 것으로 예상되지만 CO₂증가로 인한 냉각으로 연소반응이 지연되어 고온영역이 하류로 이동됨을 알 수 있다.

Fig. 11과 동일한 연소조건에서 연소실 내부의 축방향에 대한 CO와 NOx의 농도를 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 12 (a)의 CO 농도분포로부터 CO₂ 첨가율이 큰 20 %인 경우 CO의 최고농도 지점이 하류로 이동되고 CO의 최고농도도 적게 됨을 알 수 있다. 이것은 첨가율이 증가할수록 냉각에 의한 연소반응이 억제되어 결국 CO의 농도가 적게 된다. NOx의 경우 CO₂ 첨가율이 증가하면서 Fig. 10에서 언급한 결과와 동일한 원리로 CO₂ 첨가율이 증가함에 따라 연소영역의 냉각과 체류시간의 감소로 NOx 발생은 감소된다.

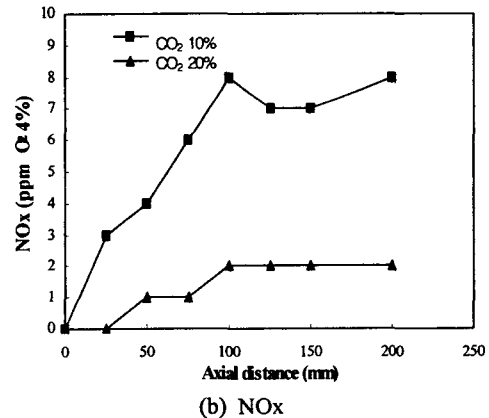


(a) CO₂=10% (b)CO₂=20%

Fig. 11 Temperature contour.(OER=0%, Legend unit=°C)



(a) CO



(b) NOx

Fig. 12 The CO and NOx concentration emitted along the combustor axial at OER=0%

후 기

4. 결 론

산소부화 연소기의 설계인자 도출을 목표로 기존 산업현장에서 많이 이용되는 형식의 연소기(LNG, 용량 5,000 kcal/hr)를 이용하여 산소부화율에서 CO₂ 첨가율에 대한 연소특성 실험을 수행하였으며 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 산소부화 100% 조건에서는 공기를 산화제로 하는 경우에 비하여 산화제의 유속이 적기 때문에 CO₂의 첨가율을 증가시키면 연소실의 온도는 저하되지만 이에 비하여 산화제의 유속 증가에 의한 연료/산화제의 혼합특성이 증대되어 연소반응이 증가한다.

(2) 산소부화 50% 조건에서는 CO₂ 첨가율이 15%~35%에서 CO₂ 첨가율이 증가할수록 연료와 산화제의 혼합특성의 영향을 많이 받기 때문에 CO의 배출이 감소되지만 35% 이상에서는 연소영역의 냉각에 의한 영향을 많이 받게 되어 연소반응이 지연되고 CO의 배출도 증가한다.

(3) 산소부화 0% 조건에서 CO₂첨가는 산화제/연료의 혼합특성 증가보다는 연소영역의 온도저하로 CO의 배출이 증가한다.

(4) 산소부화연소에서 CO₂ 첨가율이 커지게 되면 화염대의 온도 저하와 연소실내의 고온가스의 체류시간 감소로 NO_x의 발생이 감소된다.

본 연구는 과학기술부 지원으로 수행하는 21세기 프론티어 사업(이산화탄소 저감 및 처리 기술개발)의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Charles E. Baukal, 1998 "Oxygen-enhanced Combustion," CRC Press, Ph.D.
- (2) Han Ji-Woong, Lee Chang-Eon, 2001, "Numerical Study on Flame Structure and NO Formation Characteristics in Oxidizer-Controlled Diffusion Flames," *The Third Asia-Pacific Conference on Combustion*, June, pp. 607~610.
- (3) Jiongming Ruan, Hedeaki Kobayashi, Takashi Niioka, 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, pp. 191~194.
- (4) Hu, Y., Naito, S., Kobayashi, N. and Hasatani, M., 2000, "CO₂, NO_x and SO₂ Emissions from the Combustion of Coal with High Oxygen Concentration Gases," *Fuel*, 79, pp. 1925~1932.