

연소용 공기중 N₂의 CO₂대체에 대한 연소특성 해석

김한석* · 안국영* · 김호근** · 이윤원*** · 이창언****

A Study on the Characteristics of Combustion for Substituting CO₂ for N₂ in Combustion Air

Han Seok Kim, Kook Young Ahn, Ho Keun Kim, Yun Won Lee, Chang Eon Lee

ABSTRACT

CO₂ is a well-known greenhouse gas, which is the major source of global warming. Many researchers have studied to reduce CO₂ emission in combustion processes. The central method of low CO₂ emission is Oxygen/CxHy combustion. Theoretically Oxygen/CxHy combustion only produces CO₂ and H₂O and allows convenient recovery of CO₂. The combustion characteristics, flame stability, composition in the flame zone and temperature profile were studied experimentally for various compositions of oxidant by substituting CO₂ for N₂ with the constant O₂ concentration. Results showed that flame became unstable due to the high heat capacity, low transport rate and strong radiation effect of CO₂ in comparison with those of N₂. The reaction zone was quenched and broadened, as the ratio of CO₂ to N₂ was increased. The emission of NO_x in flue gas decreased due to the decreased temperature of the reaction zone. As the conversion ratio of CO₂ to N₂ was increased, the emission of CO and the higher temperature zone increased due to decrease of reaction rate by the a quenching effect.

Key Words : NO_x, Flame stability(화염안정성), Conversion ratio(대체비)

1. 서 론

탄화수소계열의 연소시 발생하는 CO₂는 지구 온난화의 주원인으로 알려져 있으며, 배출량의 증가로 기상 이변과 생태계 파괴가 예상되고 있다.

탄화수소계 연료의 연소시 발생하는 CO₂의 배출을 억제하기 위해서는 배기가스 중의 CO₂를 분리·회수하여 재활용하거나 저장하는 방법이 있다. 공기를 산화제로 사용하는 경우 배가스 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 연소가스의 CO₂를 고농도로 하여야 하며 이를 위해서 산화제로 순산소를 이용하는 산소부화 연소 기술[1]이 필요하다.

산소부화 100% 연소의 경우 이론 당량비 조건에서 탄화수소계 연료의 연소시 배기가스는 CO₂와 수분만 발생되며 수분을 응축하여 제거하는 경우 이론상 100% 고순도의 CO₂회수가 가능하게 되며 또한 공해성 가스인 NO_x의 발생이 없어 차세대 청정 연소기술로 기대된다.

순산소를 산화제로 이용하는 경우 공기를 산화제로 이용하는 경우에 비하여 동일 열량에 대한 연소시 발생하는 생성가스량이 적고 화염대가 고온이기 때문에 열 회수율이 증가되는 장점이 있지만 기존의 보일러 등의 열 회수 장치를 보완 없이 이용하는 경우 노벽이나 열교환기 등에 열 손상이 발생될 우려가 있다. 따라서 산소부화 연소에 배기가스를 재순환하는 방식을 병용하면 화

* 한국기계연구원 환경기계연구부

† 연락처, haskim@kimm.re.kr

** 한양대학교 대학원

*** 인하대학교 대학원

**** 인하대학교 기계공학과

염온도를 제어할 수 있어 기존 열회수 장치의 보완을 최소한으로 할 수 있는 장점이 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 연소현상연구[3], 부상 확산화염에서 O₂에 N₂와 CO₂의 첨가에 대한 연구[4] 등이 수행되고 있다.

본 연구에서는 산업현장에서 많이 이용되는 연소기(LNG, 용량 5,000kcal/hr)를 이용하여 연소용 공기중의 N₂를 CO₂로 대체하는 경우 연소특성 변화를 알아보기 위하여 대체비(c.r.)에 따른 화염 안정성과 연소실 내부의 온도 및 가스 조성 분포와 배가스 특성 변화를 연구하였다.

대체비(conversion.ratio)는 다음과 같이 정의된다.

$$\text{대체비}(c.r.) = \frac{N_2 \text{ 대신공급되는 } CO_2 \text{ 유량}}{\text{연소용공기중의 } N_2 \text{ 유량}}$$

2. 실험장치

산소부화 연소 특성 실험에 사용한 연소기는 일반 산업용으로 많이 사용되는 연소기로 Fig. 1과 같이 중심부에 연료가 분사되며 외부의 산화제 출구부에는 화염 안정성을 도모하기 위하여 선회기(swirl number 0.77)가 설치된 구조로 되

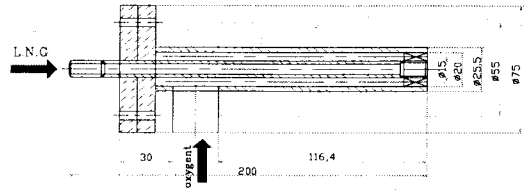


Fig. 1 Details of burner

어 있으며 연소실의 길이는 50cm으로 설계하였다. 실험에 사용된 연료는 일반 상용화 LNG로 5,000kcal/hr 용량으로 설계하였다.

Fig. 2와 같이 O₂, CO₂, Air 그리고 LNG의 정량 공급을 위하여 각각의 유량을 조절할 수 있는 질량유량 공급조절 장치(mass flow controller)를 이용하였으며 화염 가시화를 위하여 연소실 벽을 내열유리로 구성하였다.

연소실 내부 각 지점의 가스 조성을 예상하기 위하여 수냉식 가스 포집장치를 연소실 상부에 삽입하여 연소실 각 지점에서 포집된 가스를 water trap을 통하여 수분을 제거한 후 electro chemical 형의 가스 분석기(Green Line Mk2)를 사용하여 NO, NO₂, CO, O₂에 대하여 측정하였으며 NO_x는 NO와 NO₂의 합으로 나타내었다.

연소실 내부 온도를 측정하기 위하여 사용된

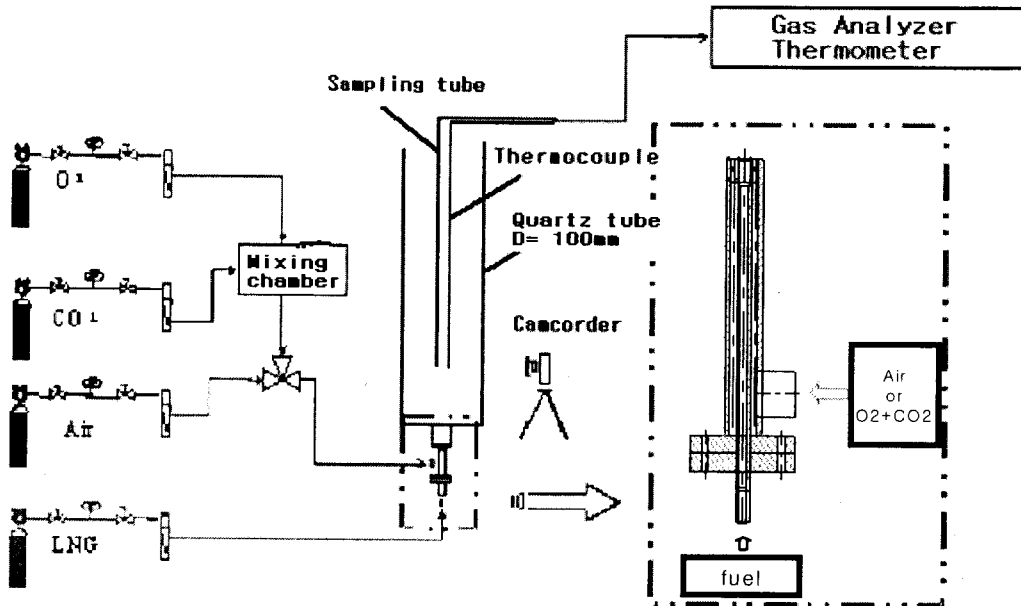


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

열전대는 미국 OMEGA사의 노출형 R-type 열전대 (Pt/Pt-13Ph, 직경 0.1mm)를 사용하였으며 각 지점에서 측정된 신호는 data acquisition system을 이용하여 0.1초마다 10초간 측정 평균하여 각 지점의 평균 온도로 예상하였다. 그리고 복사 열전달 등에 의한 계측오차는 보상하지 않았다.

연소실의 측정 지점의 열전대 및 가스포집기의 정확한 이송을 위하여 x-y 좌표계가 설치되어 있는 이송장치를 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 CO₂ 대체에 대한 연소특성

3.1.1 화염안정성

Fig. 3은 연소용 공기 중의 N₂를 CO₂로 대체한 경우 화염안정성의 변화를 알아보기 위하여 LNG 유량을 0.53Nm³/hr로 일정하게 하고 공기 중의 N₂를 CO₂로 동일용적으로 대체하여 산화제 유속을 증가시켜가면서 blow-out되는 부분의 산화제 유속을 각 CO₂ 대체비에 대하여 나타낸 결과이다. Fig. 3의 결과에서 보면 산화제의 CO₂대체비가 증가할수록 blow-out되는 영역이 증가됨을 알 수 있는데 CO₂의 경우 N₂에 비하여 용적

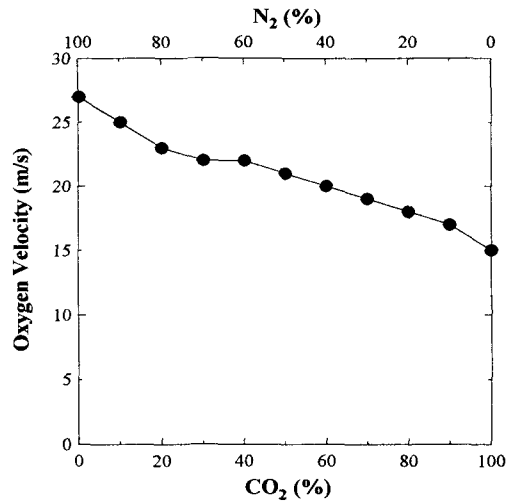


Fig. 3 Flame stability with various CO₂ conversion ratios.

당의 비열이 25% 크고 복사 효과가 크기 때문에 CO₂의 대체비가 증가할수록 연소영역의 온도가 저하되기 때문으로 생각된다.

3.1.2 화염온도

Fig. 4는 LNG 유량을 0.53Nm³/hr로 일정하게 하고 과잉 공기비 1.3인 조건(7.18Nm³/hr)을 기준으로 연소용 공기중의 N₂ 대신에 CO₂를 동일

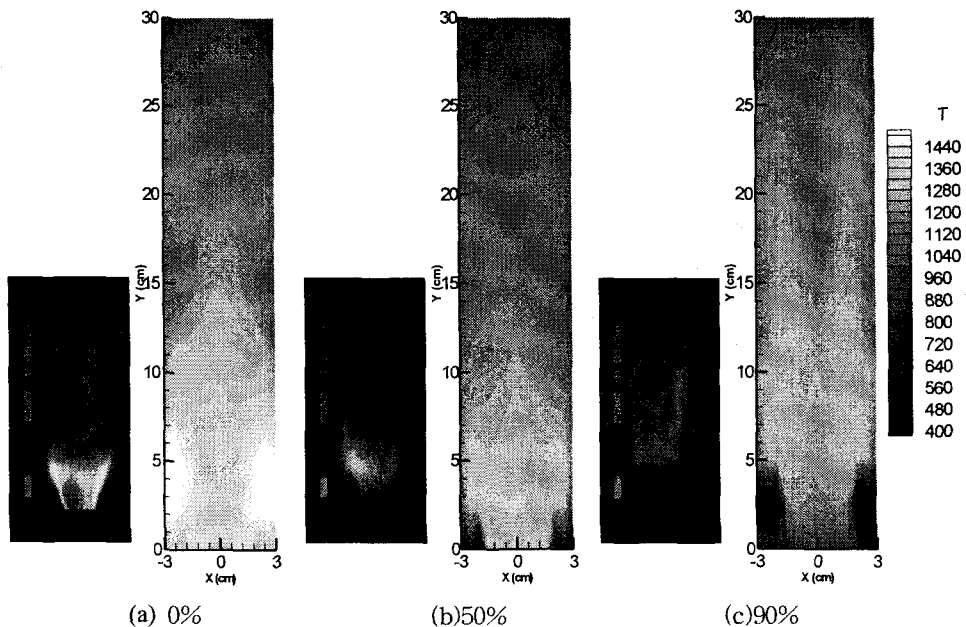


Fig. 4 Photographs and temperature contour of flame with various CO₂ conversion ratios(T in °C)

용적으로 공급하여 각각의 CO₂ 대체비에 대한 연소실 내부의 화염 온도분포를 R-type 열전대를 이용하여 반경방향으로 0.5cm, 축방향으로 2cm 간격으로 측정된 결과이다. Fig. 4의 결과로부터 CO₂의 대체비가 증가할수록 노즐 선단부인 주연소 영역의 화염 온도가 낮게 분포됨을 알 수 있다. 각 조건에서 산화제의 유속이 동일한 것을 고려하면 CO₂의 대체비가 증가할수록 주 연소 영역인 노즐 선단부의 화염 온도가 낮게 분포되는 것은 산화제/연료의 혼합특성 영향보다는 3.1.1에서 언급한 것과 같이 연소 반응에 참여하지 않는 CO₂의 용적당 비열이 공기중의 N₂보다 높고 복사 효과가 크기 때문에 CO₂의 대체비가 증가할수록 연소영역이 냉각되어 온도에 영향을 받는 반응물이 감소되기 때문으로 생각된다. 그러나 하류부근에서의 온도 분포를 보면 CO₂의 대체비가 높을수록 전반적으로 높은 온도분포를 보이는 것을 알 수 있는데 이것은 주 연소 영역에서 연소영역의 냉각에 의한 연소반응이 지연되어 연소영역이 확대되기 때문임을 예상할 수 있다.

3.1.3 화염형상

Fig. 5는 Fig. 4의 연소 조건에서의 화염 형상을 나타내었다. Fig. 5의 결과로부터 CO₂ 대체비가 커질수록 연소영역이 증가되며 화염이 불안정해짐을 알 수 있으며 대체비 100% 조건에서는 화염이 존재하지 않았다. 3.1.2에서 언급하였듯이 CO₂는 N₂에 비하여 용적당 비열이 크고 복사 효과가 크기 때문에 CO₂ 대체비가 커질수록 연소영역이 냉각되기 때문에 온도에 영향을 받는 반응물이 감소되어 연소영역이 증가되는 것을 확인할 수 있다.

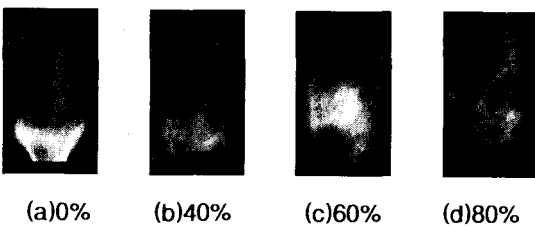


Fig. 5 Photograph of Flame with various CO₂ conversion ratios.

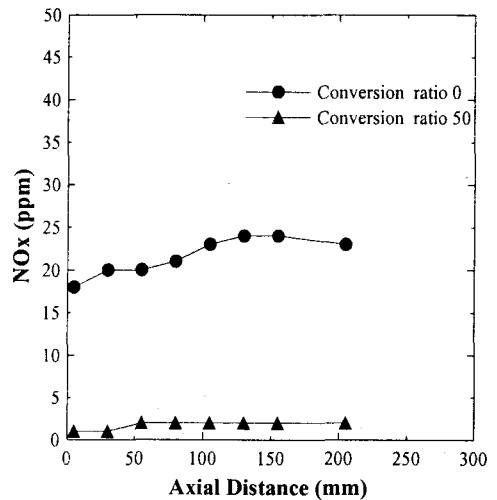
3.1.4 연소실 내부 가스 조성

Fig. 6은 산화제중의 CO₂ 대체비가 0과 50%에 대하여 노즐 선단에서 연소실 중심의 축방향으로 CO와 NOx의 조성을 측정된 결과이다.

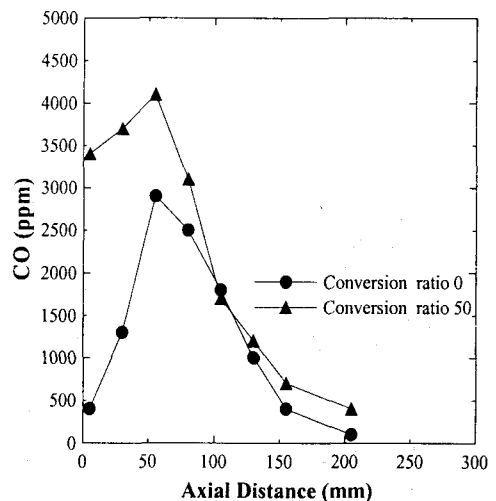
Fig. 6의 (a)에서 CO₂로 대체하지 않은 산화제의 경우 NOx의 조성을 보면 연료가 분사되는

노즐부에서 비교적 높은 값을 나타내는데 이것은 연소영역에서 발생된 NOx가 재순환 가스와 함께 중심부로 공급되기 때문이며 주연소 영역 이후에 하류로 갈수록 NOx의 조성이 증가되는 것은 Thermal NOx의 발생에 의한 것으로 생각된다[7]. 그리고 CO₂의 대체비가 50%인 경우 대체하지 않은 경우에 비하여 NOx는 비교적 적게 발생하는 것을 알 수 있는데 이것은 3.1.2에서 언급하였듯이 연소영역의 냉각과 N성분의 감소에 의한 것임을 예상할 수 있다.

연소반응물이 증가되면 연소 영역내에서 중간 생성물인 CO의 농도가 증가하는 연소특성을 고



(a) NOx



(b) CO

Fig. 6 Concentration of emission gases with various CO₂ conversion ratios

려하여 볼 때 Fig. 6(b)의 노즐 출구에서 약 75mm 떨어진 곳이 연료의 반응율이 최고인 지점으로 생각되며 이후 하류로 갈수록 연소가 진행되어 CO가 CO₂로 완전연소 되는 것을 알 수 있다. 연소 반응률이 낮을 것으로 예상되는 CO₂ 대체비가 50%인 산화제의 경우 주 연소 영역에서 CO의 농도가 높게 발생되는 것은 산화제에 포함되어 있는 CO₂가 CO로 해리된 것으로 예상된다.

3.1.5 배가스 특성

Fig. 7은 연소실 출구에 설치된 가스 포집기로부터 측정된 CO₂ 대체비에 대한 배가스 특성을 나타내었다.

Fig. 7(a)의 NO_x 배출 특성을 보면 3.1.4에서 언급하였듯이 CO₂ 대체비율이 증가할수록 연소실의 냉각과 N성분의 감소로 NO_x의 발생이 감소되는 것을 확인할 수 있다.

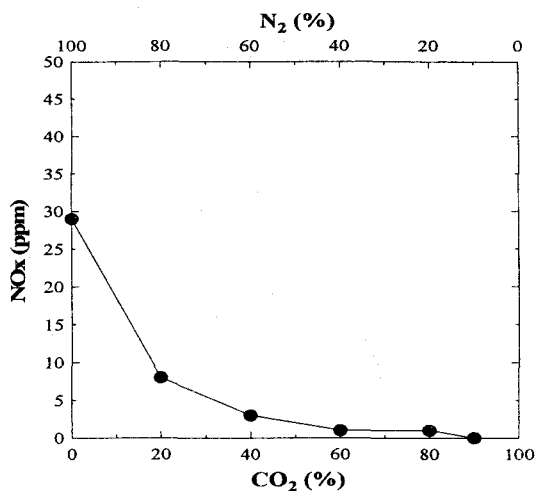
Fig. 7(b)의 CO 배출 특성을 보면 CO₂ 대체비가 증가할수록 3.1.2에서 언급하였듯이 주 연소 영역에서의 냉각 효과로 연소 반응이 지연되어 연소실 출구에서도 완전 연소가 이루어지지 않을 수 있다.

3.2 동일단열화염 온도 조건에 있어 N₂에 대한 CO₂ 대체 특성

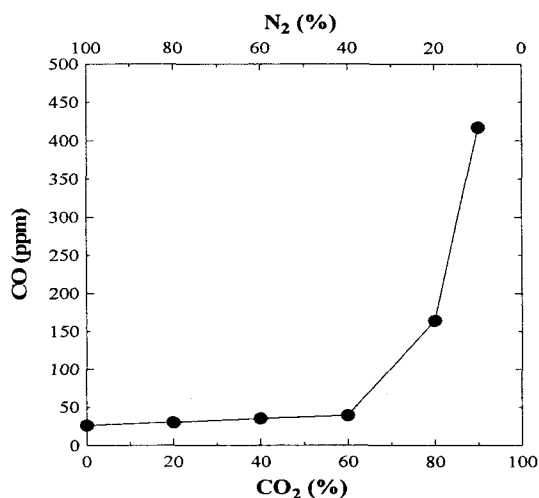
Fig. 8은 3.1에서의 온도영향을 최소한으로 하기 위하여 산화제중의 CO₂ 대체비가 0%, 50%, 100%인 경우 단열화염온도와 산화제 유속을 동일하게 하여 제작한 세개의 연소기를 이용하여 화염 형상과 연소실 내부의 화염 온도분포를 측정된 결과이다.

화염 형상은 각 CO₂ 대체비 조건에 대하여 비교적 동일한 화염 형상을 나타냄을 알 수 있다. 이것은 각 연소기에 있어 연료와 산화제의 유속을 동일하게 설계하였기 때문으로 생각된다.

연소실 내부온도분포는 CO₂ 대체비가 0인 (a)의 경우 고온부 영역이 넓게 형성되지만 CO₂ 대체비가 높아 CO₂의 공급이 많은 경우 고온부 영역이 감소됨을 확인할 수 있다. 단열화염온도와 연료 및 공기의 유속을 동일하게 설계한 조건을 참고로 하면 CO₂ 공급비 증가에 의한 연소영역의 온도 저하는 크게 두 가지 원인으로 예상할 수 있다. 첫째는 산화제에 혼합된 CO₂가 국부적으로 고온부에서 해리되어 연소 영역의 온도가 저하되고 이에 따라 주변온도에 영향을 받는 반응률이 저하되었기 때문으로 예상할 수 있다. 둘째로는 산화제의 CO₂ 농도가 증가됨에 따라 연소 영역의 N₂의 농도가 저하되어 상대적으로 복사열전달에 많은 영향을 미치는 CO₂와 H₂O의 농도가 고온인 연소 영역에서 증가하기 때문에



(a) NO_x



(b) CO

Fig. 7 Concentration of emission gases with various CO₂ conversion ratios

복사열손실에 의하여 고온 영역의 온도가 저하되는 것으로 예상할 수 있다.

Fig. 9는 Fig. 8 조건에서 노즐 선단으로부터 50cm에 위치한 연소실 출구부의 온도 분포를 나타낸 것이다. 대체비가 클수록 온도는 낮아지는 것을 알 수 있는데 연료의 발열량, 단열화염 온도와 산화제의 유속조건이 동일하다는 것을 고려하면 대체비가 클수록 온도가 낮아지는 것은 Fig. 8에서 언급하였듯이 복사에 기여하는 CO₂와 H₂O의 농도가 커지게 되기 때문에 복사열손실에 의하여 연소 영역이 냉각되었기 때문임을 예상할 수 있다.

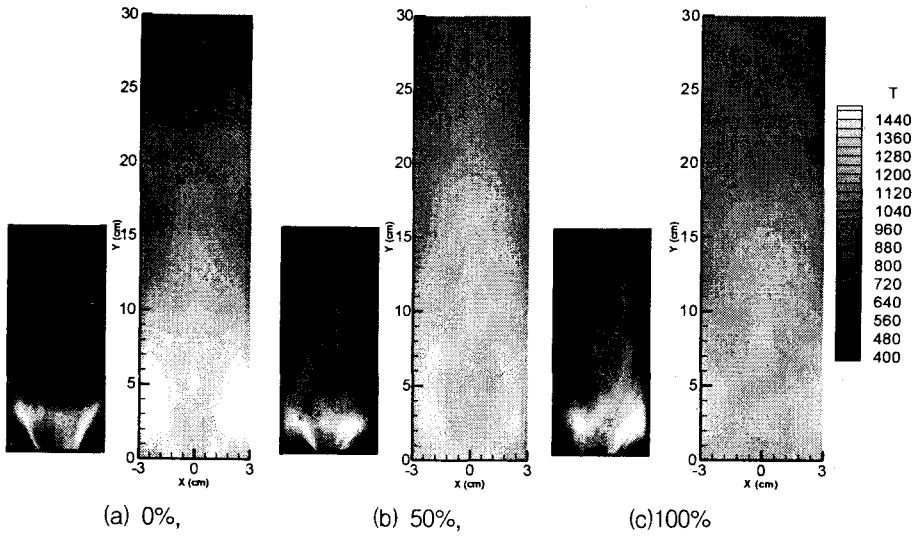


Fig. 8 Photographs and Temperature contour of Flame with various CO₂ conversion ratios (T in °C)

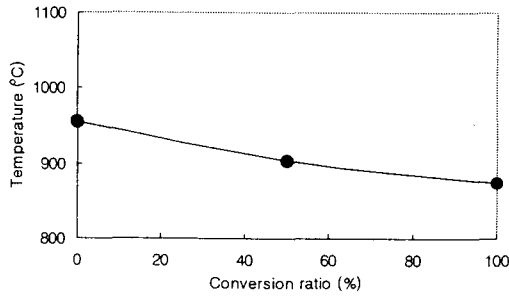


Fig. 9 Exit temperature of the combustor with various CO₂ conversion ratios

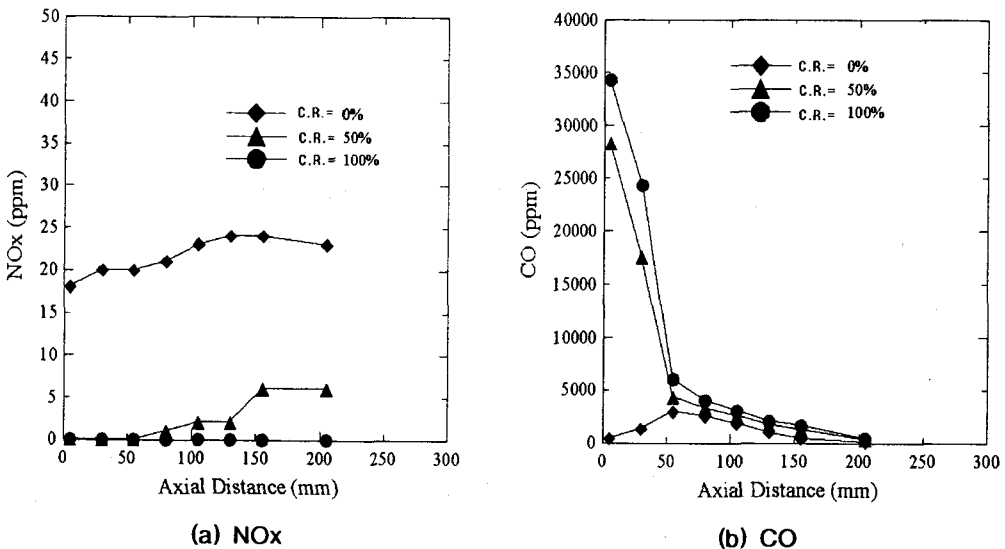


Fig. 10 Concentration of emission gases with various CO₂ conversion ratios

Fig. 10은 Fig. 8의 조건에서 연소실 중심의 NO_x와 CO의 조성을 측정한 결과이다. Fig. 10은 NO_x, CO농도분포를 나타내고 있는데 CO₂의 대체비가 증가할수록 연소영역의 온도가 저하될 뿐만 아니라 연소영역에서의 N성분의 저하로 NO_x의 발생은 현저히 감소되며 CO₂의 대체비가 100%인 경우 NO_x가 발생되지 않는 것을 확인할 수 있다. CO₂의 대체비가 증가할수록 연소실 상류 중심부의 CO의 농도가 높게 되는 것을 알 수 있다. Fig. 8에서 언급하였듯이 동일 산화제 유속, 단열화염 온도 조건을 고려하여 불 때 산화제에 혼합된 CO₂의 해리 때문에 CO₂의 대체비가 증가할수록 온도가 높은 연소실 상류부의 CO의 농도가 높게 되는 것으로 생각된다.

4. 결론

산업현장에서 많이 이용되는 연소기(LNG, 용량 5,000kcal/hr)를 이용하여 연소용 공기중의 N₂를 CO₂로 대체하는 경우 연소특성 변화를 알아 보았으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) N₂에 대한 CO₂대체비가 증가할수록 N₂보다 CO₂가 단위 용적당 비열과 복사 열전달 효과가 크기 때문에 주 연소영역의 냉각으로 인하여 화염이 불안정해진다.

(2) 연소실 내부의 온도는 CO₂의 대체비가 증가할수록 고온부가 하류부로 이동되는데 이것은 연소 영역의 냉각에 의해 연소반응이 지연되는 것으로 예상할 수 있다.

(3) 산화제의 CO₂의 대체비가 증가할수록 연소 영역의 반응물의 저하로 주 연소 영역에서 완전 연소가 이루어지지 않아 CO의 배출은 증대되지만 NO_x는 연소실의 냉각과 N성분의 감소로 적게 배출된다.

(4) 단열화염온도와 연료 및 공기의 유속을 동일하게 한 경우 N₂에 대한 CO₂대체비가 증가할수록 복사열전달에 많은 영향을 미치는 CO₂와 H₂O의 농도가 고온인 연소 영역에서 증가하고 CO의 해리에 의하여 온도가 저하됨을 알 수 있었다.

후 기

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

참고문헌

[1] Charles, E. B., "Oxygen-enhanced

Combustion," Ph.D, *CRC Press*, 1998.

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

[3] 炯明, 新岡 嵩, 小林 秀昭, "CH₄/O₂/CO₂ 豫混合 火炎의 基礎特性에 關する 研究", *제35회 일본 연소학회 심포지움*, pp. 1997.

[4] Ruan, J., Kobayashi, H., Niioka, T., Abuliti, A. and Iida, F., "Effects of Diluents on Structure and Stability of Axisymmetric Lifted Laminar Diffusion Flames," *The Third Asia-Pacific Conference on Combustion*, 2001, pp. 191-194.

[5] Hu, Y., Naito, S., Kobayashi, N. and Hasatani, M., "CO₂, NO_x and SO₂ Emissions from the Combustion of Coal with High Oxygen Concentration Gases," *Fuel*, Vol. 79, 2000, pp. 1925-1932.

[6] Serphen, R. T., "Introduction to Combustion," *McGraw-Hill*, 2000.

[7] 김한석, "공기 다단 연소기의 NO_x 발생특성에 관한 연구," Ph.D, 한국과학기술원, 2002.