

산화제 입구 속도에 따른 0.2MW 순산소 연소기의 NO 배출 특성

김 호 근* · 이 상 민** · 안 국 영** · 김 용 모*†

Effects of Oxidizer Inlet Velocity on NO Emission characteristics of 0.2MW Oxy-Fuel Combustor

Ho Keun Kim, Sang Min Lee, Kook Young Ahn and Yongmo Kim

ABSTRACT

Effects of oxidizer inlet velocity on NO emission characteristics of 0.2MW oxy-fuel combustor have been experimentally investigated. The NO formation process in the oxy-fuel combustion is extremely sensitive even for the small fraction of nitrogen in oxidizer. By increasing the oxidizer velocity, flame length is reduced due to the enhanced turbulent mixing. The increased oxidizer velocity also results in the decreased flame temperature through the elevated entrainment rate of the recirculated product and the corresponding NO emission is drastically decreased. Experimental results clearly indicate that the entrained product gases play a crucial role to decrease the temperature at the flame zone and the post flame zone where the thermal NO is mainly formed.

Key Words : Oxy-Fuel Combustion, Product Gas Entrainment, NO Emission, Flame Length

1. 서 론

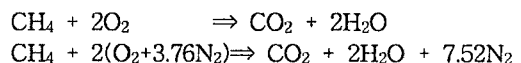
지구 온난화로 인하여 세계 각국에서는 기상 이변 및 해수면이 상승하는 등 여러 가지 자연재해에 직면하고 있다. 따라서 세계 각국은 1997년 교토의정서(Kyoto Protocol)를 채택하고 2008-2010년간 전체 배출 총량을 90년 수준보다 최소 5% 감축하기로 합의하였으며, 2005년 2월 발효되었다. 우리나라는 개발도상국으로 분류되어 2013년부터 규제를 받을 것으로 예측되므로 철강, 화학, 시멘트 등 에너지 다소비업종을 중심으로 본격적인 CO₂ 배출대책을 수립해야 한다.

지구 온난화의 주범인 CO₂ 가스의 경우 탄화수소 계열의 연료를 연소하게 되면 필수적으로

배출되므로 CO₂를 저감할 수 있는 저배출, 고효율의 연소시스템을 개발하기 위하여 많은 연구가 진행되고 있다.

Baukal은 산화제를 산소로만 연소시키는 순산소 연소(Oxy-Fuel Combustion)를 적용하게 되면 시스템의 열효율을 상승시킬 뿐만 아니라 이론적으로 NO_x 배출을 완전히 제어할 수 있고 온실가스인 CO₂ 가스 처리가 용이하다고 제안하였다.[1]

다음은 이론당량비로 반응할 때 순산소 연소인 경우와 공기연소인 경우의 반응식을 나타낸다.



위의 반응식을 통해서 알 수 있듯이 순산소 연소는 공기 중의 N₂ 성분이 공급되지 않고 산소만 공급되므로 질소의 불필요한 가열로 인한 열손실을 줄일 수 있어 그만큼 열효율 상승을 가

* 한양대학교 대학원

† 연락저자, ymkim@hanyang.ac.kr
Tel : 02-2220-0428

** 한국기계연구원, 청정환경기계연구센터

저오게 된다. 또한 N₂가 공급되지 않으므로 NO_x 발생을 미연에 방지하여 NO_x 배출을 제어할 수 있다. 순산소 연소인 경우 출구에서 배기가스 성분이 CO₂와 H₂O 로만 구성되기 때문에 냉각시스템을 이용하여 수분을 제거함으로써 쉽게 CO₂를 추출할 수 있게 되는 장점을 가지고 있다.[1~3]

최근들어 저비용산소제조기술의 발달로 산소제조단가가 떨어지면서 순산소 연소가 점차 경제성을 갖추어 가고 있다. 하지만 이러한 저비용 산소제조과정에서는 산소를 완전히 분리해내지 못해 소량의 N₂ (3~5%)가 포함되며, 또한 실제 연소시스템에서 대기 중의 공기가 연소로내로 침투하기 때문에 화염온도가 높은 순산소 연소에서는 소량의 N₂에도 다량의 NO_x가 발생하는 문제가 발생한다.[3] 따라서 최근에는 순산소 연소기의 개발에 있어 NO_x 저감이 가장 중요한 설계 인자가 되고 있다.

Kim[4] 등은 0.03MW 순산소 연소기에서 속도 변화에 대한 NO 배출 특성을 보였다. 그 결과로 연료 및 산화제 속도가 증가하면서 NO 배출이 저감된다고 하였다. 그러나 이 결과는 용량이 큰 실용 순산소 연소기에서도 같은 결과가 나타날지는 확인되지 않는다. 따라서 본 연구는 큰 용량의 0.2MW 순산소 연소기를 제작하여 고정된 연료속도에서 산화제 속도가 증가하는 경우 NO 배출 특성과 화염길이를 확인한다. 또한 연소로내의 화학종을 측정하여 연소로내에서의 연소현상을 보여준다.

2. 실험장치 및 방법

0.2MW 순산소 연소기에서 유속 변화에 대한 연소 특성을 알아보기 위하여 Fig. 1과 같이 동축류 형태의 순산소 연소기를 제작하였다. 제작된 0.2MW 순산소 연소기는 중앙에 있는 연료 노즐에 연료가 공급되고 그 주위로 산화제가 공급되는 구조이다. 연소기는 고정된 연료속도 ($V_f=60m/s$)에서 바깥쪽에 있는 노즐 직경을 변화시켜 산화제 속도를 변화시킬 수 있도록 했다. 초기 점화를 위하여 연소기 옆면에 점화용 연소기를 설치하였으며 점화된 후에는 점화용 연소기를 끄고 안정된 화염 조건에서 측정하였다. 제작된 0.2MW 순산소 연소기의 연료, 산화제직경 그리고 속도를 Table. 1에 자세히 보였다.

연료는 도시가스(Natural Gas)를 사용하였고 산화제로는 액체산소를 기화시켜 순산소가 공급되도록 하였다. 이때 산업용 산소 제조과정, 연료 그리고 연소로 내로 침투되는 질소로 인하여 NO 배출특성을 알아보기 위하여 공급되는 산소량의 3% 질소를 공급하였다. 공급되는 도시가스유량,

산소유량 그리고 질소유량은 각각 22Nm³/h, 44.88Nm³/h, 1.34Nm³/h로 모든 실험조건에서 일정하게 공급된다. 이때의 당량비는 0.98이다.

Fig. 2는 연소로의 계략도를 보인다. 연소로내의 온도를 일정하게 유지시키기 위하여 6개의 냉각관을 설치하였으며 냉각관의 직경과 두께는 77mm, 3mm이다. Fig. 2에 표시된 것처럼 연소로의 출구부에 온도가 1020℃ 유지되도록 공기송풍기를 이용하여 냉각관에 공기 800kg/h가 공급되도록 하였다. 온도측정은 R-Type 열전대를 사용하였으며 복사손실보상은 하지 않았다. 연소로의 길이는 3000mm 그리고 직경은 700mm이고 출구부의 직경은 300mm이다. 연소로의 옆면에는 100mm 간격으로 측정구를 설치하였다.

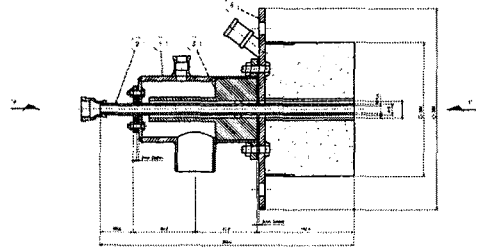


Fig. 1 The schematic of 0.2MW oxy-fuel combustor

Table. 1 Dimension and inlet conditions

	Diameter [mm]		Velocity [m/s]
	Inside	Outside	
Fuel		11.5	60
Oxidizer	17	25.5	45
Oxidizer	17	29	30
Oxidizer	17	34.6	18
Oxidizer	17	47.5	8.3

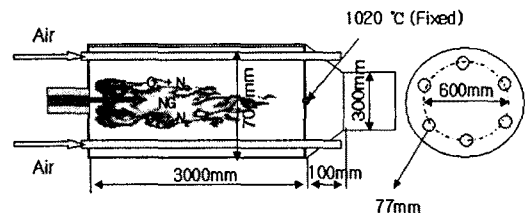


Fig. 2 The furnace schematic of 0.2MW oxy-fuel combustor

화염길이를 측정하는데 있어서 다양한 방법(최고온도측정, O_2 농도측정, CO 농도측정, 레이저 측정, 가시적 화염측정)이 있지만 순산소 연소인 경우 화염온도가 3000K 이상이기 때문에 직접 측정법으로 측정하기는 어렵다. 따라서 본 연구에서는 초기단계로 가시적 화염측정법을 사용하여 화염길이를 측정하였다.

출구부에 설치된 수냉식 프로브를 이용하여 배출가스를 추출하고 포집된 가스를 가스분석기(HORIBA, VA-3000) 통하여 CH_4 , CO , CO_2 , O_2 , NO 를 분석하였다. 또한 수냉식 프로브를 측정구에 삽입하여 연소로내의 화학종 역시 측정하였다. 측정된 위치는 반경방향으로 $R=0, 6, 12, 180, 24, 30$ cm 그리고 축방향으로 $Z=10, 50, 90, 150, 230$ cm 이다. 또한 같은 위치에서 R-Type 열전대를 이용하여 연소로내의 온도를 측정하였으며 이때 R-Type 열전대의 측정한계인 1400 °C 이상인 경우는 측정하지 않았다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 산화제의 질소율에 따른 NO 특성

산화제에 포함된 질소율 변화에 따른 NO 배출 특성을 알아보기 위하여 CHEMKIN을 이용하여 단일화염온도 그리고 NO 배출 특성을 Fig. 3에 보였다. Fig. 3에 보인 것처럼 산화제에 포함된 질소율이 증가하면서 약 30%까지 급격하게 NO가 증가한다. 산화제에 포함된 질소율 10%까지 NO가 급속하게 생성되고 10%에서 30%까지 서서히 발생하게 된다. 이 결과는 순산소 연소에서 소량의 질소에도 NO가 급격하게 증가한다는 것을 나타내며 이는 Fig. 3에 단일화염온도를 나타낸 것처럼 순산소 연소의 단일화염온도가 높기 때문이다. 더더욱 질소율이 증가하게 되면 NO는 다시 감소하게 된다. Fig. 3의 단일화염온도를 보게 되면 산화제에 포함된 질소율이 증가하면서 온도는 서서히 감소되었다가 60%에서 급격하게 온도가 떨어지고 있다. 그에 비하여 NO 발생 경향은 30%까지 급격하게 증가하였다가 더욱 질소율이 증가하면 NO가 저감되고 있다. 이는 질소율 30%까지 높은 온도에서 질소가 NO 발생화학반응에 크게 기여하게 되어 NO가 급격하게 증가되고 질소가 더더욱 증가하게 되면 NO 발생화학반응의 기여정도가 저감되어 NO가 감소되고 나머지 질소는 열손실을 가져오게 된다.[5]

3.2 화염길이 및 NO 배출 특성

산화제 입구 속도 변화에 따른 0.2MW 순산소 연소기에 대한 화염길이 및 NO를 측정하였다.

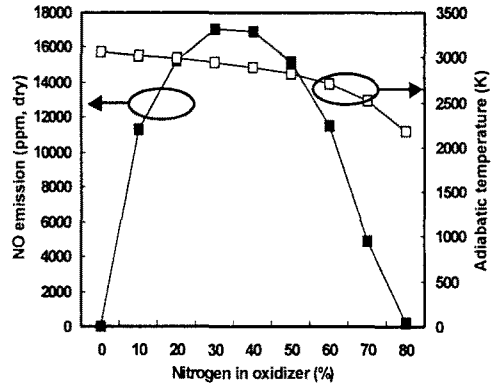


Fig. 3 NO and adiabatic temperature versus nitrogen-in-oxidizer

연료속도($V_f=60m/s$)를 고정하고 산화제 속도를 변화시킨다. 이때 공급되는 산소량의 3%질소를 공급하여 실제 산업용 연소로에서와 같이 모사하였다.

가시적 방법으로 화염길이를 측정하여 Fig. 4에 보였다. Fig. 4에 보인 것처럼 화염길이는 산화제 속도가 증가하면서 화염길이가 감소한다. Kim[4] 등은 0.03MW 순산소 연소기에 대하여 다양한 연료속도 및 산화제 속도를 변화시키면서 화염길이에 대하여 보였다. 그 결과로 연료속도가 고정된 조건에서 산화제 속도가 증가하면서 화염길이가 감소하고 마찬가지로 산화제 속도가 동일한 조건에서 연료속도가 증가하면서 화염길이가 감소하는 것을 보였다. 이는 본 연구 결과와도 일치하였으며 연료 및 산화제 속도가 증가하면서 난류강도가 증가되어 혼합특성이 향상되어 나타나는 결과이다.

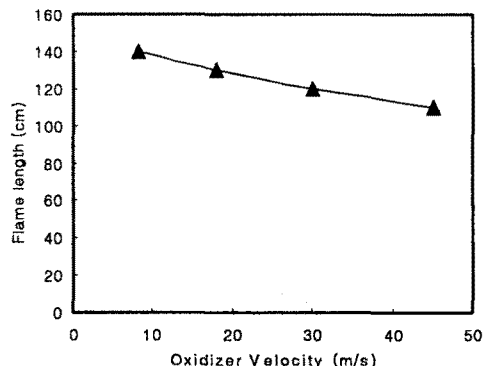


Fig. 4 Flame length versus oxidizer velocity for 4 oxidizer velocity

Fig. 5는 연료속도가 고정되고 산화제 속도가 증가될 때 출구에서 NO를 보인다. 산화제 속도가 증가하면서 NO가 저감되고 있다. 이는 산화제 속도가 증가하면서 모멘텀의 증가로 연소로내의 외부영역으로부터 화염면으로 유입(entrainment)되는 연소생성물의 양을 증가시켜 화염온도를 감소시키기 때문이다. 따라서 산화제 속도도 NO 생성에 크게 영향을 주는 파라미터이며 산화제 속도 조절로 NO 생성을 저감시킬 수 있다는 것을 보인다. 또한 이 결과는 Kim [4]의 결과와도 일치되며 실제 산업용 크기의 순산소 연소기에서도 적용이 가능함을 확인 할 수 있다.

3.3 연소로 내의 온도 및 화학종 분포

0.2MW 순산소 연소기의 산화제 속도 변화에 대한 연소로 내에서의 연소특성을 알아보기 위하여 연소로 내의 온도 및 화학종을 측정하였다.

Fig. 6은 연소로 내의 온도 분포를 보인다. 실험장치 및 방법에서도 언급 한처럼 순산소 연소의 단열화염온도가 3000K 이상이기 때문에 R-Type 열전대를 연소로 벽면에 가까운 쪽부터 화염장 중심부로 접근하면서 측정하였으며 R-Type 열전대의 한계온도인 1400°C 이상이 되면 측정을 하지 않았다. 따라서 Fig. 6에서 보면 1400°C 이상으로 측정하지 못한 영역은 1400°C 이하의 영역으로 표시하였다.

Fig. 6을 보면 산화제 속도가 증가하면서 고온 영역이 축소되고 있으며 특히 1400°C 이상의 영역이 크기가 감소되고 있다. 이는 산화제 속도가 증가하면서 모멘텀의 증가로 화염길이 감소되고 또한 화염면으로 유입되는 연소생성물의 양이 증가되어 화염온도를 감소시키기 때문이다. 연소로내의 온도분포를 통해서도 산화제 속도가 증가하면서 연소로 내의 온도가 감소된다는 것을 확인 할 수 있다.

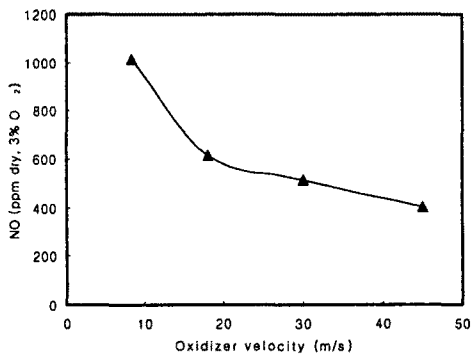


Fig. 5 NO emission versus oxidizer velocity for 4 oxidizer velocity

Fig. 7-10은 수냉식 프로부를 이용하여 연소로 내의 화학종을 측정 한 것이다. Fig. 7은 연소로내의 NO 분포를 나타낸다. Fig. 6의 결과로 예상되는 것처럼 산화제 속도 증가로 화염온도가 저감되어 NO 역시 낮게 분포되고 있다. 고온영역이 넓은 산화제 속도가 낮은 8.3m/s의 NO 분포를 보면 연소로 출구까지 급격하게 NO가 증가되고 있다. 이것으로도 산화제 속도가 연소로 내의 온도 및 NO에 크게 영향되는 것을 알 수 있다.

Fig. 8, 9는 연소로내의 O₂ 와 CO₂ 분포를 나타낸다. Fig. 8을 보면 산화제 속도가 증가하면서 재순환 영역 즉 연소기 입구부에서 벽면 쪽에 위치한 영역의 O₂ 농도가 감소되고 있다. 이는 산화제 속도가 증가하면서 모멘텀 증가가 재순환 영역을 발달시키게 되고 이로 인하여 재순환 영역에 공급되는 연소생성물의 양을 증가시키게 되어 O₂ 농도를 감소시키게 된다. Fig. 9의 CO₂ 분포를 보면 더욱 분명해진다. CO₂ 분포를 보게 되면 산화제 속도가 증가하면서 재순환 영역에 CO₂ 농도가 증가하고 있다. CO₂는 연소생성물로 재순환 영역에서의 CO₂ 농도를 통하여 재순환영역의 발달 정도를 예상할 수 있으며 또한 모멘텀 증가로 인하여 화염면으로 증가되는 유입(entrainment) 정도를 판단할 수 있다. 따라서 연소로내의 O₂ 그리고 CO₂ 분포를 통하여 산화제 속도 증가가 화염면에 유입(entrainment)되는 연소생성물의 양을 증가시키게 되고 이로 인하여 화염온도를 감소시켜 NO 생성을 억제하게 된다.

Fig. 9는 연소로내의 CO 분포를 나타낸다. CO 분포를 보면 산화제 속도가 증가되면서 높은 CO 농도 영역이 작아지고 있다. CO 농도를 통하여 화염길이 특성을 예상할 수 있는데 산화제 속도가 증가되면서 높은 CO 농도 영역이 작아지는 것으로 화염길이 짧아진다는 것을 예상할 있다. 산화제속도가 증가되면서 모멘텀 증가로 난류강도를 증가시키게 되고 따라서 혼합특성이 향상되어 화염길이 짧아지게 된다.

4. 결론

실제 산업용 순산소 연소기 크기인 0.2MW 순산소 연소기의 산화제 입구 속도 변화에 따른 연소 특성 및 내부 화학종을 측정하였다.

1. 산화제에 포함된 질소율이 증가하면서 약 30%까지 급격하게 NO가 증가한다. 산화제에 포함된 질소율 10%까지 NO가 급속하게 생성되고 10%에서 30%까지 서서히 발생하게 된다. 따라서 순산소 연소는 소량의 질소에도 NO가 급격하게 증가한다.
2. 화염길이는 산화제 속도가 증가하면서 화염

길이 감소한다. 이는 연소로내의 CO 분포를 통하여 확인할 수 있었으며 산화제 속도가 증가하면서 난류강도가 증가되어 혼합특성이 향상되어 나타나는 결과이다.

3. 산화제 속도가 증가하면서 NO 가 저감된다. 연소로내의 O₂, CO₂ 그리고 온도분포를 통하여 확인되어지며 산화제 속도가 증가하면서 모델링의 증가로 연소로내의 외부영역으로부터 화염면으로 유입(entrainment) 되는 연소생성물의 량을 증가시켜 화염온도를 감소시키기 때문이다.

참고문헌

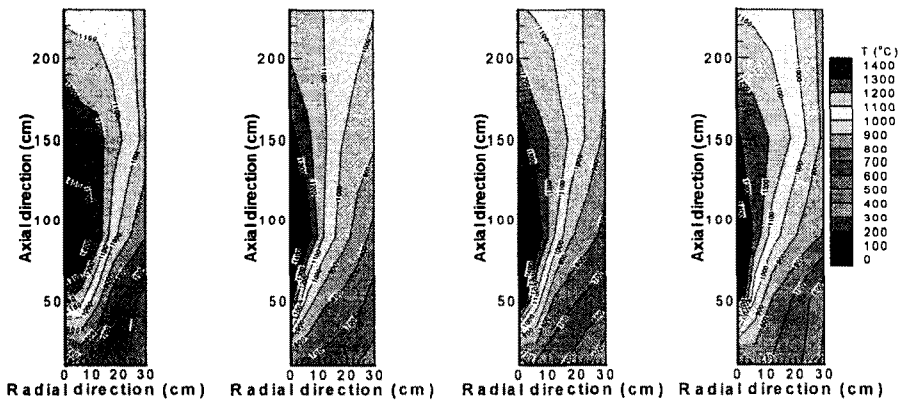
[1] C, E. Baukal, "Oxygen-Enhanced Combustion", CRC Press, Ph.D (1998).

[2] C, E. Baukal, "The John Zink Combustion Handbook", CRC Press, (2000)

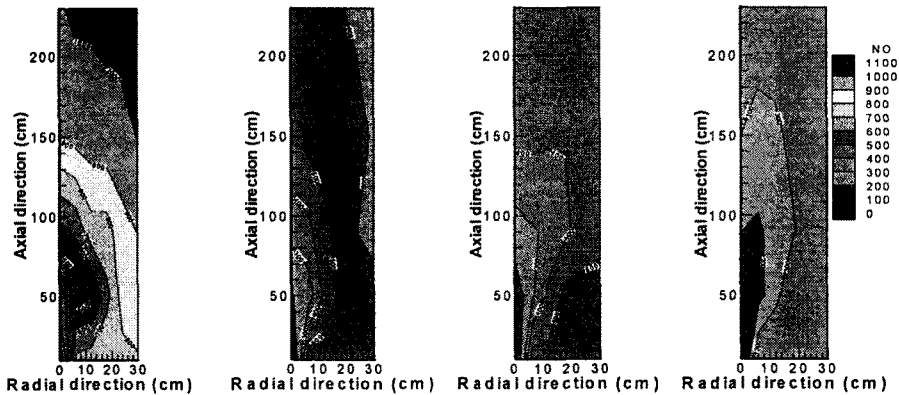
[3] C, E. Baukal, "Industrial Burners Handbook", CRC Press (2003)

[4] H. K. Kim, S. M. Lee, K. Y. Ahn and Y. M. Kim, KSME(B), 29, 11, 1277-1284, (2005)

[5] N. Lallemand, F. Breussin, R. Weber, T. Ekman, J. Dugue, J. M. Samaniego, O. Charon, A. J. Van. Den., J. Van. Der., W. Fujisaki, T. Imanari, T. Nakamura, and K. Iino, J. of the Institute of Energy, 73, pp. 169-182 (2000).



(a) $V_o = 8.3m/s$ (b) $V_o = 18m/s$ (c) $V_o = 30m/s$ (d) $V_o = 45m/s$
 Fig. 6 The Temperature contour for the 0.2MW oxy-fuel combustor (unit=°C)



(a) $V_o = 8.3m/s$ (b) $V_o = 18m/s$ (c) $V_o = 30m/s$ (d) $V_o = 45m/s$
 Fig. 7 The NO contour for the 0.2MW oxy-fuel combustor (unit=ppm)

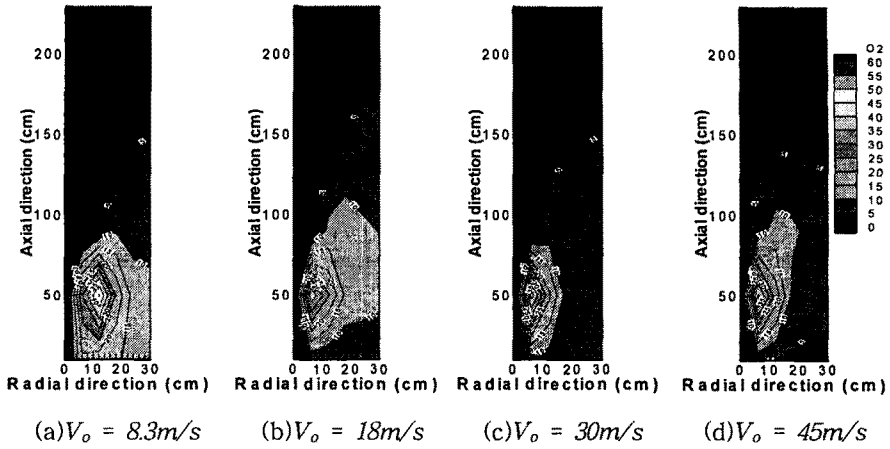


Fig. 8 The O_2 contour for the 0.2MW oxy-fuel combustor (unit=%)

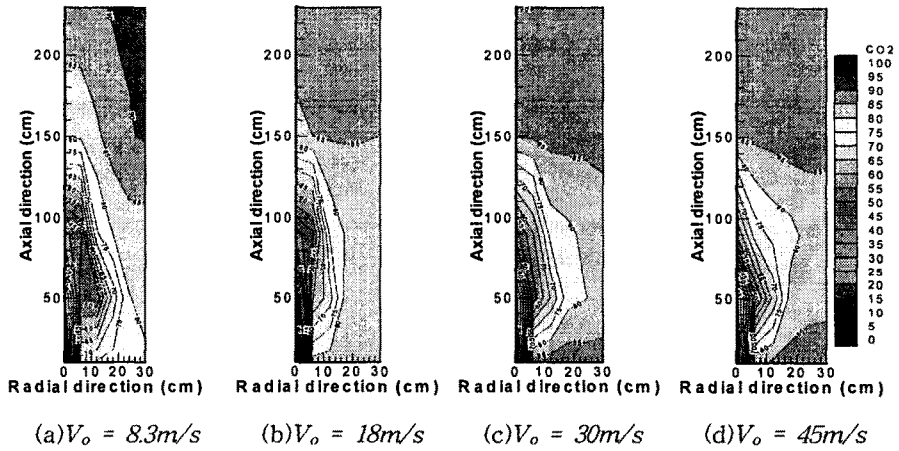


Fig. 9 The CO_2 contour for the 0.2MW oxy-fuel combustor (unit=%)

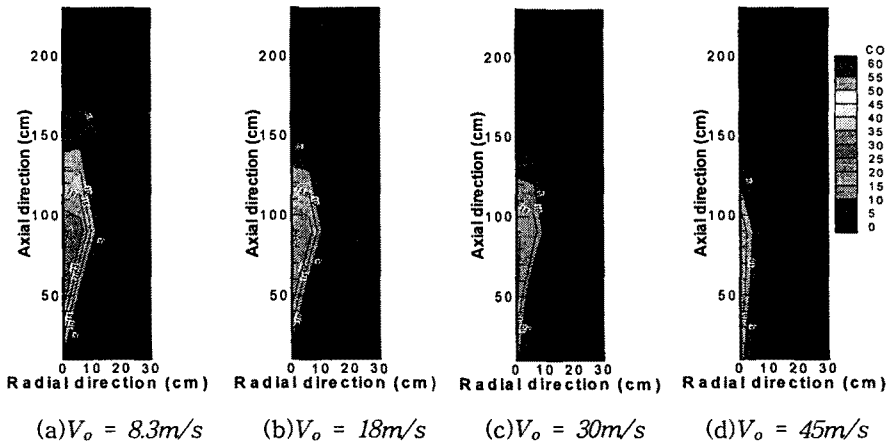


Fig. 10 The CO contour for the 0.2MW oxy-fuel combustor (unit=%)