

# 연소공기의 산소부화농도에 따른 난류확산 평면화염의 연소특성

곽지현\* · 전충환\*\* · 장영준†

(2003년 6월 28일 접수, 2004년 2월 5일 심사완료)

## Combustion Characteristics of a Turbulent Diffusion Flat Flame According to Oxygen Enriched Concentration of Combustion Air

Ji-Hyun Kwark, Chung-Hwan Jeon and Young-June Chang

**Key Words:** Oxygen Enriched Concentration(산소부화농도), Flat Flame(평면화염), Turbulent Diffusion(난류확산)

### Abstract

Combustion using oxygen enriched air is an energy saving technology that can increase thermal efficiency by improving the burning rate and by increasing the flame temperature. Flame figures, OH radical intensities, temperature distributions and emissions concentration were examined according to oxygen enriched concentration(OEC) in a turbulent diffusion flat flame. As long as the oxygen enriched concentration was increased, the length and volume of the flat flame was decreased while OH radical intensity was raised and the flame temperature was increased. However, RMS of the fluctuating temperature was decreased, and more homogeneous temperature field was formed. Thermal NO also was increased with increase of oxygen enriched concentration, but CO was decreased due to the increase of chemical reaction rate.

### 기호설명

- A : 공기 유량(l/min)
- D : 공기 노즐 직경(mm)
- $O_{2,add}$  : 산소부화 유량(l/min)
- OEC : 산소부화농도(%)
- T : 화염의 순간온도(K)
- $\bar{T}$  : 화염의 평균온도(K)
- $T'$  : 화염의 변동온도(K)
- $T_{rms}$  : 화염온도의 제곱평균제곱근(K)
- R/D : 반경방향 무차원 거리
- X/D : 축방향 무차원 거리
- $\theta$  : 선회기 슬릿의 각도
- $\sigma_r$  : 선회기 직경비

### 1. 서론

연소에 의한 열에너지를 얻는데 있어서 높은 효율과 유해 연소가스의 저감을 위한 많은 연구가 이루어지고 있다. 특히 금속 제품의 열처리나 용융을 위한 공업로는 연소에 의해 발생하는 열을 이용하는 대표적 장치로 여기에 사용되는 연소기의 특성에 따라 열효율과 연소가스의 조성이 지배를 받는다.<sup>(1)</sup>

연소공기에 산소를 첨가하여 산화제의 산소농도를 높여서 연소시키는 산소부화 연소는 연소속도의 향상과 화염온도의 상승으로 열전달이 증대하여 열효율을 높여줄 수 있는 에너지 절약형 연소기술로<sup>(2~4)</sup> 높은 화염온도를 얻을 수 있어 최근 산업 현장에서 주물용 회전 용해로에 이용되는 등 생산원가를 절감하고 있다.<sup>(5)</sup> 한편 Kwark 등<sup>(6)</sup>은 연료 주변에 공급되는 산화제에 선회류를 가하여 연료와 공기의 혼합을 촉진시켜

† 책임저자, 회원, 부산대학교 공과대학 기계공학부  
E-mail : changyj@pusan.ac.kr

TEL : (051)510-2332 FAX : (051)582-9818

\* 회원, 한국화재보험협회 방재시험연구원

\*\* 회원, 부산대학교 공과대학 기계기술연구소

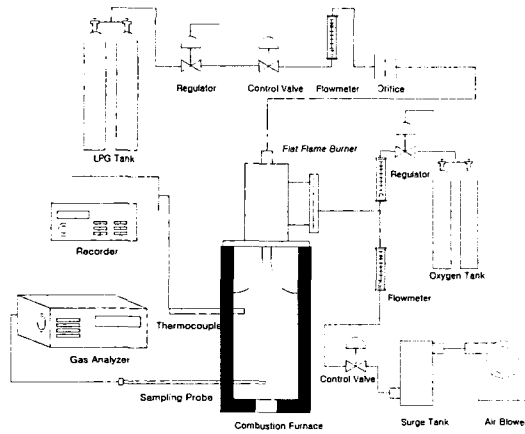


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

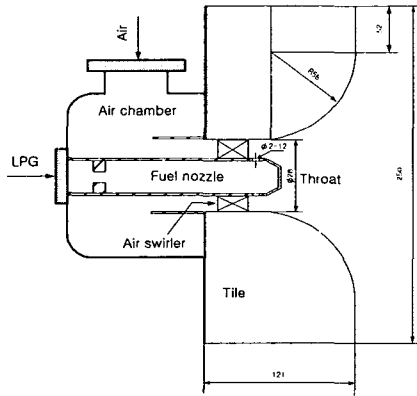


Fig. 2 Specification of the flat flame burner

주고 연소기의 기하학적인 설계에 의해 화염의 형상을 평면화염으로 만들어주면, 보다 균일한 온도분포를 형성하여 화염장내 균일한 열전달이 가능하고 변동온도의 편차가 작은 안정된 화염을 공급하여 줄 수 있으며, 화염 중심부에 강한 연소가스의 재순환이 생겨나 화염면과 접촉하게 됨으로써 연소반응에 영향을 주어 질소산화물의 생성을 줄일 수 있다고 하였다.

저자들은 이러한 평면화염 연소기에 산소부화 공기를 이용하여 연소하였을 때에도 균일한 온도장을 형성하면서 보다 증대된 열전달이 일어날 수 있으며 질소산화물의 생성도 억제할 수 있는지 살펴보기 위하여 본 연구를 행하였다. 따라서 나팔관 모양의 타일을 가지는 평면화염 연소기에서 연소공기의 산소부화농도에 따른 연소특성을

화염의 형상, OH 라디칼 분포, 화염온도와 RMS 분포, 연소가스의 농도 측면에서 살펴보고자 한다.

## 2. 실험 장치 및 방법

본 연구에서 사용된 실험 장치는 Fig. 1과 같이 크게 연소기, 연료 및 산화제 공급장치, 온도 측정장치, 연소가스농도 측정장치로 구성되어 있다. 연소기는 Fig. 2와 같이 공기가 분출되는 노즐 부위에서 타일 쪽으로 갈수록 직경이 넓어지는 나팔관형 모양으로 타일부 직경 250 mm, 노즐 직경 28 mm, 노즐 직관부 길이 65 mm, 타일의 곡률반경 56 mm의 벤치스케일 버너이다. 연료는 저위발열량  $93.6 \text{ MJ/Nm}^3$ , 이론공기량  $23.8 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3$ 의 프로판이며, 직경 2 mm인 12개의 노즐을 통해 반경 방향으로 분출되어 산화제와 수직으로 혼합되는 난류확산화염이다. 연료 노즐 주위에는 두께 10 mm의 원형 스테인리스강에  $1.5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$  크기의 슬릿상의 분출구 6개를 가지고 있는 베인형 선회기가 장착되어 있는데, 축방향에 대해 기울어진 슬릿의 각도에 따라 선회수가 결정되며 이것이 커질수록 화염이 넓게 분포하며 타일을 따라 평면화염을 형성하게 된다.<sup>(6)</sup> 선회수는 축방향 운동량에 대한 각 운동량의 비로 구해지는 무차원수로 식 (1)과 같이 구하였다.<sup>(7)</sup> 실험에 적용한 선회수는 슬릿 각도  $60^\circ$ 에 해당하는 1.24이다.

$$\text{선회수}(S) = \left( \frac{2 \tan \theta}{3} \right) \frac{(1 - \sigma_r^3)}{(1 - \sigma_o^3)} \quad (1)$$

단,  $\theta$ 는 슬릿의 각도,  $\sigma_r$ 은 선회기 내경과 외경의 직경비이다. 연소로의 크기는 가로, 세로, 높이가 각각  $250 \text{ mm} \times 250 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$  이고 가시창이 있으며, 공기는 출력 0.75 kW의 송풍기로부터 서지탱크를 거쳐 연소기로 공급되는데, 산소부화를 위해 관중간에 산소탱크와 연결한 뒤 10 m 가량 진행하게 하여 충분히 혼합되도록 하였다. 화염의 형상은 디지털 카메라를 이용하여 순간화염을 직접 촬영하였으며, 또한 중심파장 310nm, 반치폭 14.9nm의 밴드패스필터와 화상강화 CCD 카메라를 이용하여 화염의 중간생성물인

Table 1 Experimental condition

Item		Combustion
Flow rate (l/min)	Fuel	5
	Oxidizer	119
OEC(%)		21, 25, 30, 35
Radicals(AU)		OH
Emissions(ppm)		NO, CO
Swirl number		1.24

Table 2 Flow rates of air and oxygen

Oxygen enriched concentration(%)	A(l/min)	O <sub>2,add</sub> (l/min)
21	119	0
25	95	5
30	74	9.5
35	59	12.5

OH 라디칼의 자발광 강도를 측정하였다. 이 때 각 화염을 100회 촬영한 뒤 평균값을 얻어 비교하였다. 연소장의 온도 측정은 외경 2.5 mm, 길이 250 mm의 Pt/Pt-Rh 13% R형 열전대와, 디지털 온도기록장치를 이용해 각 측정 지점에서 100회씩 측정하여 평균온도와 RMS 분포를 구하였다. 단 복사와 전도에 의한 열손실은 고려하지 않았으므로 실제 온도보다 약간 낮을 수 있다. 연소가스의 농도 측정은 외경 2.5 mm의 샘플링 프로브를 이용하여 전기화학센서가 장착된 배가스 측정기로 하였다. 샘플링 프로브에는 수냉식 냉각장치를 설치하여 프로브 내에서 흡입된 연소가스의 화학 반응을 억제할 수 있게 하였다.

연료와 공기의 선회유동에 의해 나팔관 타일을 따라 평면화염이 형성되면 연소기 중심부의 기압이 떨어져 부압이 생기게 되고, 이로 인해 연소가스와 주위공기의 유입이 일어나게 된다. 이 때 연소기 타일을 따라 움직이는 연료와 공기의 주유동과 재순환되어 들어오는 후류(연소가스)와의 접촉이 생기며 화염면 부근에서 재순환 경계를 형성하게 된다.

실험은 일정한 연료 유량에 대해 연소공기의 산소농도를 4가지로 바꾸어가며 화염의 형상, OH 라디칼 강도, 연소장의 온도분포와 연소가스 농도분포를 측정하였다. 연료 유량은 5 l/min으로

고정하였으며, 산소농도 21%인 일반공기는 이론 공기비 연소에 필요한 공기량 119 l/min을 공급하였는데, 산소부화농도 증가 시 당량비를 일정하게 하기 위하여 공기량을 감소시켰다. 연소공기의 산소부화농도는 21%에서 35%까지 변화시켰으며, 산소농도 21%인 공기의 레이놀즈수는 6488로 난류화염을 형성한다. Table 1에 자세한 실험조건을 나타낸다.

실험에서 적용한 산소부화농도에 따른 각 유량의 산출 방법은 다음과 같다. 산화제의 산소농도를 높여주기 위해 공기의 일부를 덜고 순산소(99.99%)를 첨가해 준다. 이 때 당량비를 일정하게 유지하기 위하여( $\Phi=1$ ) 산화제에 포함된 산소의 총 유량을 일정하게 유지하며 산소농도를 달리 하였다. 즉 모든 산소부화농도에 대해 공기 중에 포함된 산소와 첨가된 산소의 유량은 항상 25 l/min이 되도록 하였다. 공기 유량을 A, 첨가시키는 순산소의 유량을 O<sub>2,add</sub>으로 표기하면, 산소부화농도에 따른 순산소의 첨가량과 공기량은

$$0.21A + O_{2,add} = 25 \quad (2)$$

$$OEC(\%) = \frac{25}{A + O_{2,add}} \times 100 \quad (3)$$

식으로 결정된다. 위 식으로부터 결정된 공기와 산소의 유량은 Table 2와 같다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 화염의 형상

Fig. 3은 디지털 카메라로 찍은 산소부화농도에 따른 화염의 순간사진이다. 그림 (a)에서 보듯이 산소농도 21%의 일반공기 연소 시 화염은 타일면을 따라 넓게 퍼져 뻗어나가는 평면화염이 형성되며 청염이다. 그러나 연소공기의 산소농도가 증가할수록 soot의 증가로 휘도가 점점 증가하며, 화염길이는 짧아지게 된다. 연소반응율의 상승으로 연소속도가 빨라지고 화염의 체적이 작아져 화염길이가 짧아지는 것으로 사료된다. 이에 따라 화염의 온도분포나 화학종의 농도도 영향을 받을 것으로 예상된다.

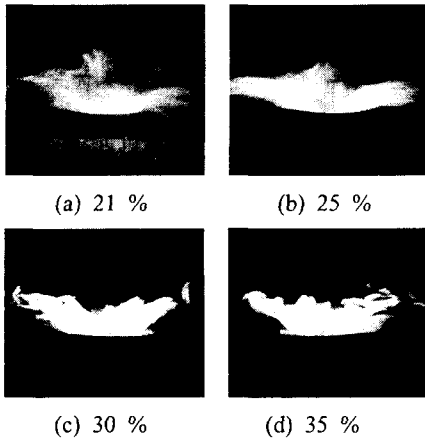
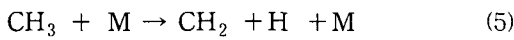
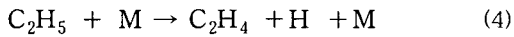


Fig. 3 Flame photos for various OECs

3.2 OH 라디칼 강도분포

Fig. 4는 화염면의 수직방향 위에서 취득한 타일의 1/4에 해당하는 화염내부의 OH 라디칼의 상대적인 자발광 강도를 나타낸 그림이다. 프로판 연료의 산화과정에서 연료분자의 탄소-탄소 결합이 쪼개어지며 식 (4), (5)와 같이 올레핀족과 수소원자를 생성하는 수소원자추출<sup>(8)</sup>이 일어난다.



여기서 생긴 수소원자가 식 (6)과 같이 산소와 반응하여 대부분의 OH 라디칼이 발생하게 되는데,<sup>(9)</sup> 이는 또한 프로판 연료의 핵심 산화과정<sup>(8)</sup>인 식 (7)의 반응물로서 연소반응 영역의 중심에 나타나는 반응대의 지표가 된다.



그림에서 연소공기의 산소농도가 증가함에 따라 화염 내 OH 라디칼 강도도 높아진다. 연소속도가 증가하면서 식 (6)의 반응이 촉진되기 때문이다.<sup>(10)</sup> 특히 연료와 공기가 혼합되어 연소반응이 시작되는 선회기 슬릿을 중심으로 강한 OH 라디칼이 검출되고 있으며, 평면타일 위 화염중류까지 형성되고 있으나 화염하류에서는 미약한 분포를 보인다. Fig. 5는 노즐 중심에서 반경방향으로

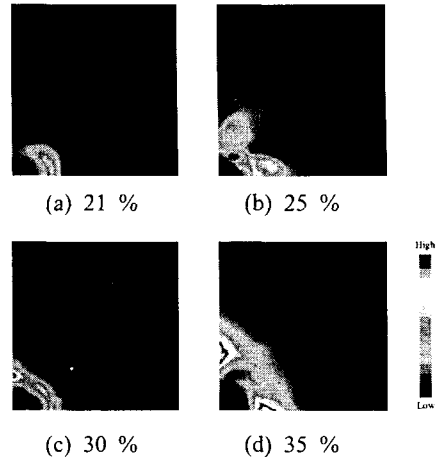


Fig. 4 OH radical luminous intensity of a quarter of the burner tile for various OECs (AU)

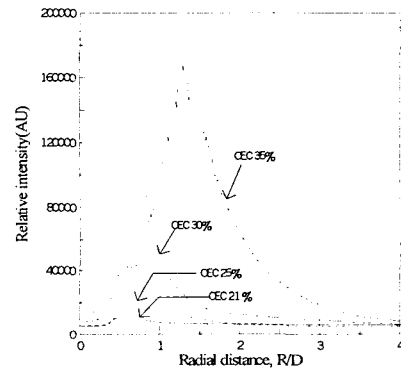


Fig. 5 OH radical luminous intensity along the radial axis for various OECs (AU)

중심축을 따라 상대강도를 나타낸 그래프로 산소농도가 30% 이상이 될 때 OH 라디칼의 강도는 크게 증가하며, 화염 내 분포하는 영역도 넓게 나타난다. 화염내의 단면촬영이 아니라 중첩된 자발광 사진이므로 정량적인 비교는 곤란하지만 정성적인 반응의 정도는 분석 가능하다. 따라서 빛과 열을 방출하는 식 (7)도 촉진되어 휘도가 크고 고온의 화염이 생성될 것으로 예측된다.

3.3 연소장의 온도 분포

$$T(t) = \bar{T} + T'(t) \quad (8)$$

난류화염의 순간온도는 난류화염의 온도 특성을 나타내는데 유용한 방법인 Reynolds 분해<sup>(11)</sup>

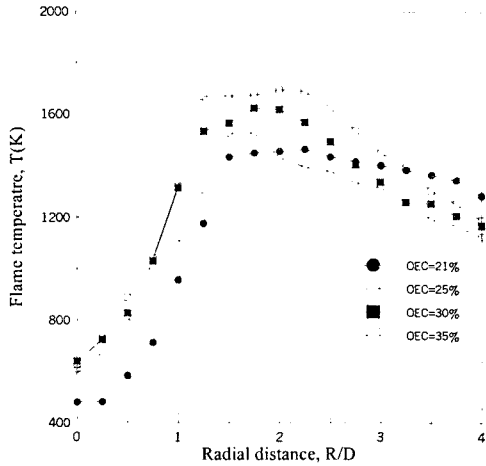


Fig. 6 Averaged flame temperature along the radial axis of the burner surface ( $X/D=0$ )

를 이용하여 식 (8)과 같이 평균성분과 변동성분으로 나누어 나타낼 수 있는데, 반복 측정된 순간온도로부터 평균온도를 계산하여 타일면 ( $X/D=0$ )을 지나는 축상의 반경방향 거리에 따른 화염의 국소 온도분포를 Fig. 6에 나타내었다. 산소농도가 높아질수록 화염 상류와 중류의 온도분포도 높아진다. 연소반응이 활발해지고 실제 반응열도 상승되기 때문이다. 그러나 화염하류인 평면타일의 끝부분에서는 화염길이가 축소되어 일반공기 연소 시의 화염온도 보다 낮은 분포를 나타낸다. 따라서 반경방향 무차원거리  $R/D=1.5$  이후인 평면 타일면 위의 온도구배는 산소부화농도의 증가와 함께 다소 커지게 된다. 한편  $R/D=1.5$  이내의 온도분포는 화염 내부의 국소 온도가 아니라 연소기 중심부로 유입되는 연소가스의 온도가 지배적이므로, 고온의 활성화된 연소가스가 화염에 접촉하게 되면 연소안정성에도 큰 영향을 미칠 것으로 생각된다.

Fig. 7은 순간온도의 편차를 나타내는 화염온도의 제곱평균제곱근인 RMS 분포를 나타낸 그림이다. 화염내부의 RMS가 크다는 것은 순간온도의 편차가 크다는 것이므로, 난류강도가 크거나 연소반응이 불규칙적으로 일어나고 있음을 의미한다. 이는 확산화염의 특징이기도 하며, 연소의 안정성을 나타내는 척도라 할 수 있다. RMS는 식 (9)와 같이 구하였다.

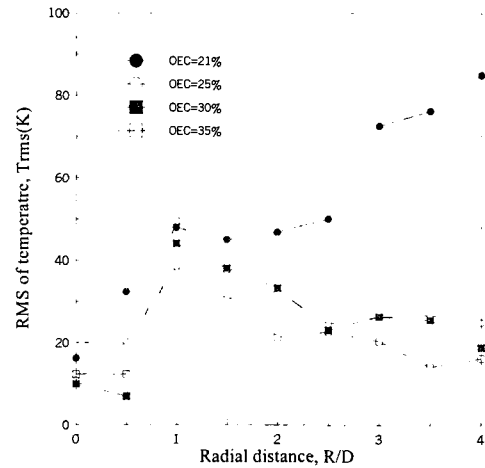


Fig. 7 RMS of flame temperature along the radial axis of the burner surface for various OECs

$$T_{rms} = \sqrt{T'^2} \quad (9)$$

Fig. 7에서 RMS는 일반공기 연소 시 가장 큰 값을 가진다. 특히 화염하류에서 크게 나타나 화염 끝자락의 온도편차가 큼을 알 수 있다. 그러나 산소부화농도 증가 시 화염의 중류와 하류에서의 온도편차가 크게 줄어드는데, 이는 연소공기의 유량감소로 유속이 감소되면서 난류강도가 다소 약해지기 때문이기도 하며, 연소반응의 촉진으로 화염하류에서도 안정된 연소반응이 유지되고 있음을 의미한다. 한편  $R/D=1$  지점의 RMS는 연소기 중심부로 유입되는 후류(Backward flow)인 연소가스의 온도 편차인데 산소부화농도가 높을수록 크다. 고온의 화염이 형성될수록 복사는 물론 대류에 의한 열전달이 촉진되어 후류의 유속이 빨라지고 난류강도도 커지게 되므로 온도편차도 크게 나타나는 것으로 사료된다. 연소공기의 산소부화농도가 증가함에 따라 RMS는 더욱 줄어들므로, 화염의 온도는 더욱 고온이 되지만 순간온도의 편차는 더 작은 안정된 화염이 된다. 연소반응물의 촉진이 화염의 안정성을 키워주게 되어 보다 고온이면서도 균일한 온도분포를 가지는 평면화염을 만들어 주고 있다.

이러한 특성을 가지는 연소기의 산소부화농도에 따른 로 내 온도분포는 Fig. 8과 같이 나타난다. 그림 (a)에서 일반공기 연소 시 평면 타일 위

에 형성된 화염면 위로 고온의 복사열이 전달되며, 동시에 노즐 중심부 쪽으로 후류가 생성되면서 로의 중심축을 따라 상대적으로 낮은 온도분포를 보인다. 로 내 전체에 대류에 의한 열전달이 일어나 로 하단(연소기에서 먼쪽)으로 갈수록 중심축 부근의 온도분포가 낮아지게 된다. 그러나 산소부화농도가 증가할수록 로 하단 쪽의 반경방향 온도구배는 점점 줄어들어 거의 균일한 온도장을 형성하게 된다. 이러한 특성으로 피열체는 균일한 열처리가 가능하게 되고 동시에 열효율도 높일 수 있을 것으로 생각된다.

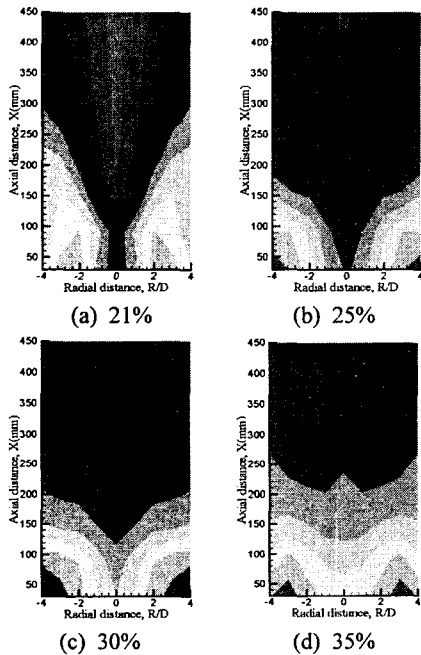


Fig. 8 2-D temperature distribution in the furnace for various OECs(K)

연소기 노즐에서 축방향으로 측정 한 로 내 온도 분포를 각 산소부화농도에 따라 Fig. 9와 같이 나타내었다. 축방향거리 100~200mm 사이에서 온도가 크게 떨어지는 일반공기 연소에 비해, 산소농도 25% 이상의 연소공기를 사용한 화염은 완만한 구배의 온도분포를 가진다.

로 내의 임의의 위치에서 반경방향으로의 온도분포를 살펴보기 위해 Fig. 10과 같이 로의 상단, 중단, 하단에 해당하는 세 위치에서 산소부화농도에 따른 온도분포를 나타내었다. 상단인 그림 (a)의 경우는 화염면과 가까운 거리에 있어 로의 벽면을 타고 상승하는 연소가스의 영향으로 노즐 중심쪽보다 바깥쪽의 온도가 높다. 그러나 그림 (b)에서 보듯이 로의 중단부에선 일반공기 연소를 제외하고 모두 반경방향으로 일정한 온도분포를 가지게 되며, 특히 산소부화농도가 높을수록 더욱 일정하게 된다. 로 하단인 (c)의 경우도 전체적인 온도만 낮고 비슷한 경향을 가진다.

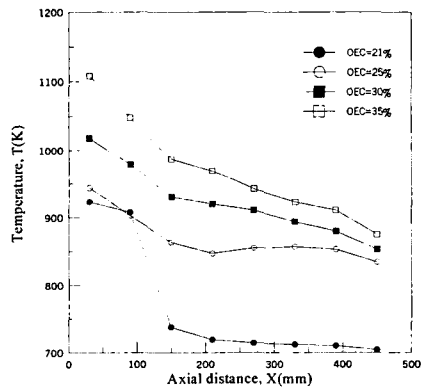


Fig. 9 Axial temperature distribution along the central axis in the furnace for various OECs

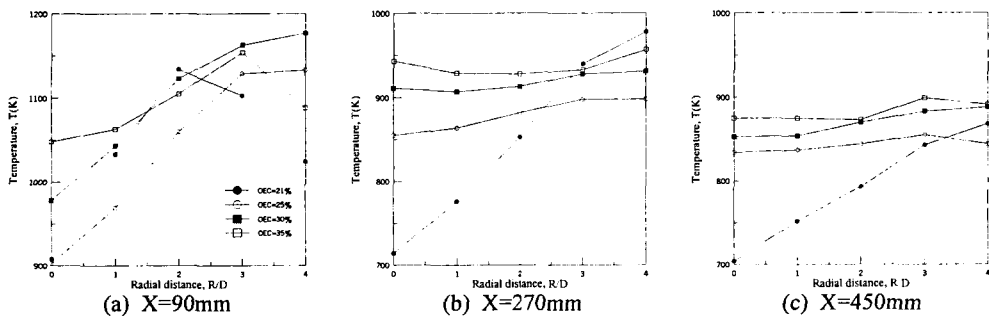


Fig. 10 Radial temperature distribution at each axial distance in the furnace for various OECs

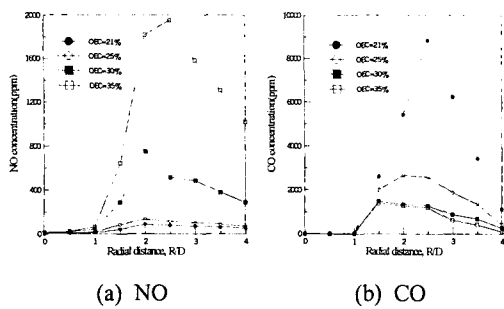


Fig. 11 Emissions concentration along the radial axis of the burner surface ( $X/D=0$ )

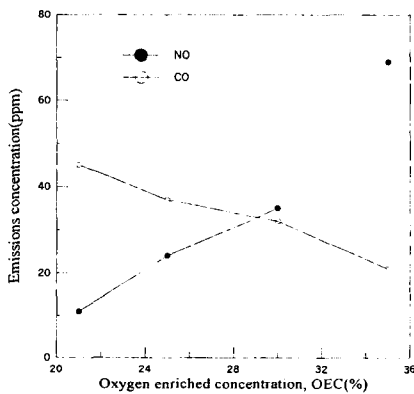


Fig. 12 Emissions concentration according to OEC at furnace exit

### 3.4 연소가스 농도 분포

Fig. 11은 연소기 타일면( $X/D=0$ )을 따라 여러 가지 산소부화농도에 대해 측정된 화염 내부의 반경방향 거리에 따른 국소 NO와 CO의 농도분포이다. 온도분포의 결과와 비교해볼 때, NO는 화염의 온도에 의해 좌우되는 열적 NO의 발생이 가장 두드러져 보인다. 산소부화농도의 증가에 따른 화염의 온도상승이 NO의 배출에 직접적인 영향을 주고 있다.<sup>(12)</sup> 산출급수적으로 증가하는 산소부화농도에 비해 국소 NO 농도는 기하급수적으로 증가하고 있지만, 화염하류로 갈수록 감소하는 경향을 보인다. NO의 농도는 화염 종류에서 가장 높게 나타나며 연소반응이 진행되어 가면서  $NO_2$  등으로 산화하여 국소 농도가 변화하게 된다.

반면, 화염 내 국소 CO 농도는 그림 (b)와 같이 산소부화농도가 증가할수록 크게 저감된다.

화염 종류의 CO 농도는 불완전연소에서 나오는 배출물이 아니라 소반응의 중간과정에서 생기는 중간생성물로 판단된다. 연소속도가 빨라지면서 식(7)의 산화반응이 촉진되므로 화염 내의 국소 CO 농도는 줄어드는 것으로 판단된다.

Fig. 12는 로 출구에서의 NO와 CO의 배출 농도를 나타낸 그림이다. 국소 농도분포에서 예측되었던 것처럼 NO는 산소부화농도의 증가와 함께 증가한다. 본 연구의 평면화염은 선행연구<sup>(6)</sup>에서 동축류 화염과 같은 직화염에 비해 로 출구 배출농도가 최대 1/4로 저감되는 저  $NO_x$ 형 연소기 입에도 불구하고 산소부화농도의 증가에 따라 NO의 발생량은 급증하고 있다. 같은 산소부화농도일 때의 선회수 0인 화염에 비해 상당히 저감된 것이지만, 산소부화 연소 시 NO의 저감을 위해서는 더 효과적인 방법이 필요해 보인다. 산소 농도 100%의 순산소를 연소공기로 사용해 NO의 생성을 원천적으로 차단하는 방법도 있지만, 확산화염 형태의 산업용 연소로에서 주위 공기의 유입이 조금만 있어도 미량의 질소는 고온의 분위기에서 산소와 반응하여 다량의 NO를 발생하므로 NO의 저감은 쉽지 않은 일이다. 반면 CO는 산소부화농도 증가 시 감소한다. 로 출구의 CO는 불완전 연소에서 생성되는 것이므로, 산소 농도 증가에 의한 연소반응의 촉진과 함께 완전 연소하는 경향이 강해지기 때문이다. 산소부화농도 35%가 되면 일반공기 화염에 비해 약 1/2로 저감된다.

## 4. 결론

난류확산 평면화염에서 연소공기의 산소부화농도에 따른 연소특성을 조사해보고 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 산소부화농도가 높아질수록 화염내의 OH 라디칼 농도도 증가하고 연소반응이 촉진된다.
- (2) 화염의 온도는 산소부화농도가 증가함에 따라 높아지지만, RMS는 오히려 줄어들어 더욱 안정된 연소장을 형성하게 된다.
- (3) 산소부화농도가 증가할수록 로 내 하단부의 반경방향 온도구배가 줄어들어 균일한 열전달

이 가능하게 된다.

(4) 산소부화연소 시 화염온도의 상승으로 NO의 농도는 증가하지만, 연소반응의 촉진으로 불완전연소에서 발생하는 CO의 농도는 저감된다.

#### 참고문헌

- (1) Turns, S. R., 2000, An Introduction to Combustion : Concepts and Applications, McGRAW-HILL.
- (2) Sautet, J. C., 2001, "Large Scale Turbulent Structures in Non-Premixed, Oxygen Enriched Flames," *International Conference of Heat and Mass Transfer*, Vol. 28, No. 2, pp. 277~287.
- (3) Lambert, J. and Sorin, M., 1997, "Analysis of Oxygen-Enriched Combustion for SMR," *Energy*, Vol. 22, No. 8, pp. 817~825.
- (4) Bae, J. R. and Lee, B. J., 2002, "Effect of Diluents and Oxygen-Enrichment on The Stability of Nonpremixed Flame," *Transactions of Korean Society of Mechanical Engineers (B)*, Vol. 26, No. 10, pp. 1458~1464.
- (5) Han, J. S. and Lee, Y. H., 1994, "New Melting Technology of Oxy-Combustion Rotary Furnace for Cast Iron," *Journal of the Korean Foundrymen's Society*, Vol. 14, No. 6, pp. 489~494.
- (6) Kwark, J. H., Jeong, Y. K., Jeon, C. H. and Chang, Y. J., 2003, "The Characteristics of the Flow and Combustion in a Turbulent Non-Premixed Flat Flame," *Transactions of Korean Society of Mechanical Engineers (B)*, Vol. 27, No. 4, pp. 447~457.
- (7) Schmidt, S. E. and Hedman, P. O., 1995, "CARS Temperature and LDA Velocity Measurements in a Turbulent, Swirling, Premixed Propane/Air Fueled Model Gas Turbine Combustor," *Transactions of American Society of Mechanical Engineers*, 95-GT-64.
- (8) Glassman, I., 1987, Combustion, 2nd Ed., Academic Press, Orlando.
- (9) Gaydon, 1957, The Spectroscopy of flames, Chapman and Hall.
- (10) Jachimowski, C. J., 1984, "Chemical Kinetic Reaction Mechanism for The Combustion of Propane," *Combustion and Flame*, Vol. 55, pp. 213~224.
- (11) Reynolds, O., 1983, "An Experimental Investigation of The Circumstances Which Determine Whether The Motion of Water Shall be Direct or Sinuous, and of The Law of Resistance in Parallel Channels," *Transactions of Royal Society of London*, Vol. 174, pp. 935~982.
- (12) Belframe, A., 2001, "Soot and NO Formation in Methane-Oxygen Enriched Diffusion Flame," *Combustion and Flame*, Vol. 124, pp. 295~310.
- (13) Kwark, J. H., Jeon, C. H. and Chang, Y. J., 2003, "Effect of Oxygen Enriched Air on the Combustion of a Turbulent Diffusion Flat Flame," *Journal of Korean Society of Combustion Engineers*, Vol. 8, No. 3.