

# 산소부화공기가 난류 확산 평면화염의 연소에 미치는 영향

곽지현\* · 진충환\*\* · 장영준\*\*\*

## Effect of Oxygen Enriched Air on the Combustion of a Turbulent Diffusion Flat Flame

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

### ABSTRACT

Combustion using oxygen enriched air is an energy saving technology that can increase thermal efficiency by the improvement of burning rate and by the high temperature flame. Flame figures, OH radical intensities, temperature distributions and emission concentrations were measured according to oxygen enriched concentration and swirl number in a turbulent diffusion flat flame. It appeared that flame figure became flat and NO concentration decreased with increase of swirl number, and that the flame temperature increased high with increase of oxygen enriched concentration. In particular, it was most significant between oxygen concentration 40~60 %.

**Key Words** : Oxygen enriched, Flat flame, Swirl number, Turbulent diffusion

### 기 호 설 명

A	Air flow rate (l/min)	r	Radial distance (mm)
O <sub>2, add</sub>	Oxygen flow rate (l/min)	x	Axial distance (mm)
S	Swirl number	r/R	Non-dimensional radial distance
T	Averaged flame temperature (°C)	x/R	Non-dimensional axial distance
R	Air throat radius (mm)		

## 1. 서 론

연소공학에 있어서 열효율의 향상과 유해 연소가스의 저감은 가장 궁극적이고 분명한 연구 목적이며 이를 위한 많은 연구가 이루어지고 있다. 특히 금속제품의 열처리나 용융을 위한 공업로는 연소에 의해 발생하는 열을 이용하는 대표적 장치로 여기에 사용되는 연소기의 특성에 따라 열효율과 연소가스의 조성이 지배를 받는다[1].

연소공기에 산소를 첨가하여 산화제의 산소 농도를 높여서 연소시키는 산소부화 연소는 연소속도의 향상과 화염온도의 상승으로 열전달이 증대

하여 열효율을 높여줄 수 있는 에너지 절약형 연소기술로 높은 화염온도를 얻을 수 있어 최근 산업현장에서 주물용 회전 용해로에 이용되는 등 생산원가를 절감하고 있다[2].

한편 연료 주변에 공급되는 산화제에 선회류를 가하여 연료와 공기의 혼합을 촉진시켜주고 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[3].

이러한 평면화염 연소기에 산소부화공기를 이용하여 연소하였을 때, 균일한 온도장을 형성하

\* 부산대학교 대학원 기계공학과

\*\* 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소

† 연락처자. changyj@pusan.ac.kr

면서 질소산화물의 생성도 억제할 수 있는지 살펴보기 위하여 본 연구를 행하였다. 따라서 나팔관 모양의 타일을 가지는 평면화염 버너에서 연소공기의 산소농도와 선회수가 연소특성에 미치는 영향을 화염의 형상, OH 라디칼 분포, 노 온도분포, 연소가스의 농도 측면에서 살펴보고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험 장치

본 연구에서 사용된 실험 장치는 Fig. 1과 같이 크게 버너와 연소로, 연료 및 산화제 공급장치, 온도 취득 장치, 연소가스 분석 장치로 구성되어 있다. 버너는 Fig. 2와 같이 목(throat) 부위에서 타일 쪽으로 갈수록 직경이 넓어지는 나팔관형 모양으로 타일부 직경 250mm, 목 직경 28mm, 목 직관부 길이 65mm, 곡률반경 56mm의 벤치스케일 버너이다. 연료는 프로판으로 직경 2mm인 12개의 노즐을 통해 반경 방향으로 분출되어 산화제와 수직으로 혼합된다. 연료 노즐 주위는 베인형 선회기가 감싸고 있는데 두께 10mm의 원형 스테인리스강에 1.5mm×5mm 크기의 슬릿상의 분출구 6개를 가지고 있어 슬릿의 각도에 따라 선회수(swirl number)가 결정되며, 이것이 커질수록 화염이 넓게 분포하여 타일을 따라 평면 화염을 형성하게 된다. Fig. 3에 선회기의 형상을 나타낸다. 선회수는 축방향 운동량에 대한 각 운동량의 비로 구해지는 무차원수로서 식 (1)과 같이 구하였다[4]. 실험에 적용한 선회수는 슬릿의 각도 0°, 20°, 40°, 60°에 해당하는 0, 0.26, 0.6, 1.24이다.

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

(단,  $\theta$ 는 슬릿의 각도,  $\sigma_r$ 은 선회기 내경과 외경의 직경비)

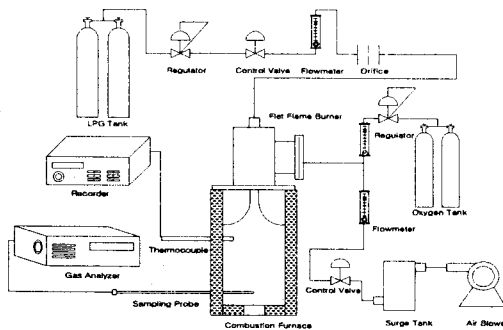


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

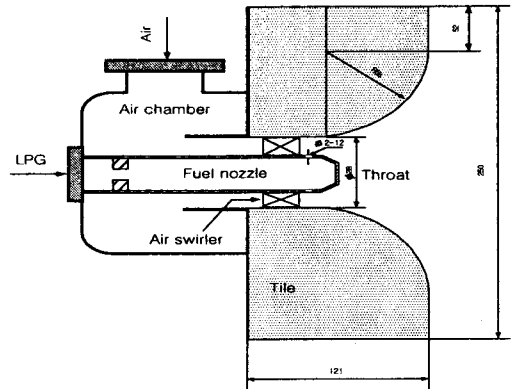


Fig. 2 Specification of the flat flame burner

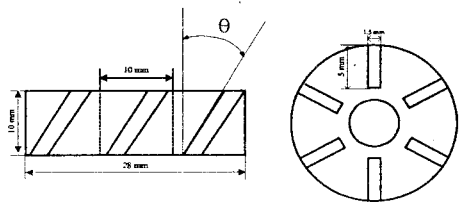


Fig. 3 Specification of the swirler

연소로는 내면이 250mm×250mm×500mm의 크기이고 두께 100mm의 내화제로 단열 되어 있다. 공기는 출력 0.75kW의 송풍기로부터 서지 탱크를 거쳐 연소기로 공급되는데, 산소부화를 위한 중간에 산소 탱크와 연결하여 직경 10cm의 관을 10m 가량 진행하게 해서 충분히 혼합되도록 하였다. 노 내의 온도 분포 측정은 Pt/Pt-Rh 13% R형 열전대를 버너 노즐에서 반경 방향으로 6개, 축방향으로 5개를 설치하여, 30채널 동시 측정이 가능한 온도 기록 장치로 각 지점에서 100회 측정하여 평균 온도를 구하였다. 단 복사와 전도에 의한 열손실은 무시하였다. 화염의 형상은 디지털 카메라(MX-2900Z)를 이용하여 촬영하였으며, 연소 가스의 농도 분석은 전기 화학 센서가 장착된 배가스 분석기(COSA-6000)로 하였다. 또한 파장 240nm의 광을 투과시키는 필터와 화상 강화 CCD 카메라를 이용하여 화염의 중간 생성물인 OH 라디칼의 자발광 강도를 계측하였다. 이 때 각 화염을 100회 촬영한 뒤 평균하여 강도를 비교하였다.

### 2.2 실험 방법

본 연구에서 사용된 버너는 난류 비에혼합 버너로서, 프로판 연료를 사용하여 연소 부하 4.5 kW의 조건에서 산소부화 농도와 산화제의 선회수에 따라 노 내 연소 특성을 조사하였다. 이론 공기비 조건에서 네 가지 선회수(0, 0.26, 0.6,

,1.24)와 다섯 가지의 산소농도(21, 40, 60, 80, 100% Vol.)에 따라 화염의 형상, OH 라디칼 강도, 온도 분포, 배가스 농도를 측정하였다. 실험 조건을 Table 1에 나타낸다.

실험에서 적용한 산소 부화 농도의 산출 방식은 다음과 같다. 연소 부하 4.5kW의 경우 공급되는 프로판의 유량은 3l/min이고, 이 때 이론공연비 연소 시 필요한 공기량은 71.4l/min이며, 이 때 포함된 산소의 양은 15l/min 이다. 산화제의 산소 농도를 높이기 위해 공기의 일부를 덜고 대신 순산소(99%)를 첨가해 준다. 이 때 공기 속의 산소량과 첨가되는 순산소량의 합은 항상 15l/min이 되도록 고정해 주어 이론 산소-연료비에서 연소가 되도록 한다. 공기량을 A, 첨가시키는 순산소의 양을  $O_{2,add}$ 로 표기 하면, 순산소의 첨가량과 산화제의 산소 부화 농도는

$$0.21A + O_{2,add} = 15 \quad (2)$$

Oxygen enriched concentration(%)

$$= \frac{0.21A + O_{2,add}}{A + O_{2,add}} \times 100 \quad (3)$$

식으로 결정된다. 위 식으로 결정된 산소부화 농도별 공기 및 첨가 산소의 양은 Table 2와 같다.

온도 분포 측정은 버너 노즐로부터 각각 축 방향과 반경 반향으로 측정하여 버너 목의 반경으로 나누어준 무차원 거리에 따라 나타내었으며 측정된 열전대의 위치는 Fig. 4와 같다.

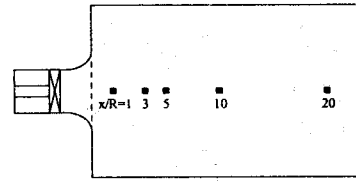
연소가스 농도측정은 단열로의 연소가스 배출구에 프로브를 삽입하여 배가스 분석기로 NO의 농도(ppm)를 측정하였다.

Table 1 Experimental condition

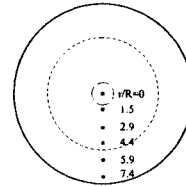
Item	Condition
Fuel	Propane
Combustion load[kW]	4.5
Oxygen enriched concentration[%]	21, 40, 60, 80, 100
Swirl number	0, 0.26, 0.6, 1.24

Table 2 Air and oxygen flow rate according to oxygen enriched concentration

Oxygen enriched concentration[%]	A [l/min]	$O_{2,add}$ [l/min]
21	71.4	0
40	28.5	9.0
60	12.7	12.3
80	4.8	14.0
100	0	15.0



(a) In the axial direction



(b) In the radial direction

Fig. 4 Position of thermocouples for the temperature measurement

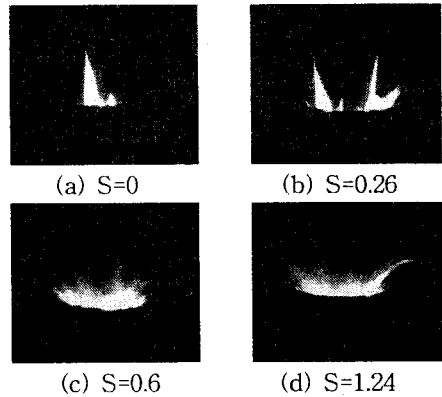


Fig. 5 Photos of flame according to swirl number (Oxygen concentration 40 %)

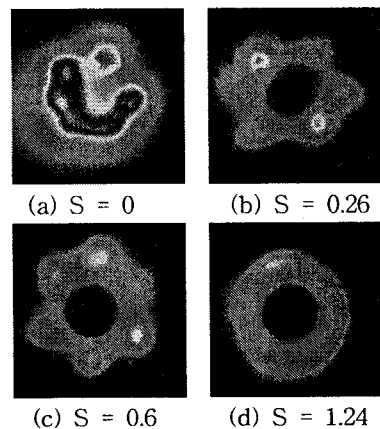


Fig. 6 OH radical luminous intensity(A.U.)

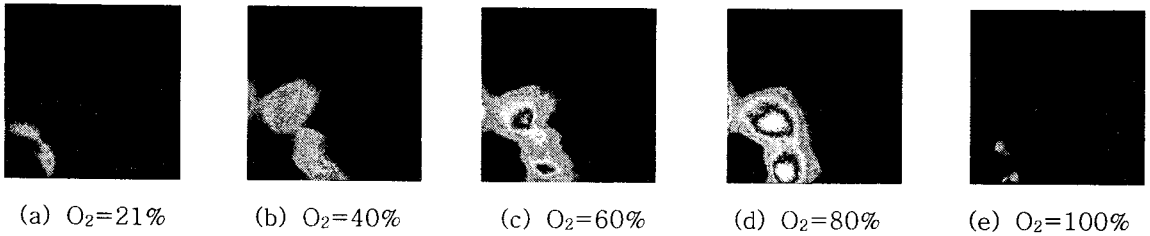


Fig. 7 OH radical luminous intensities according to oxygen enriched concentration(S=1.24)

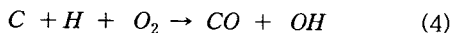
### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 화염의 형상

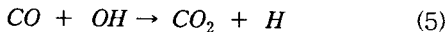
Fig. 5는 산소부화농도 40%일 때 선회수에 따른 화염의 순간 형상을 나타낸 사진이다. 선회수가 증가할수록 연료와 공기의 선화에 의해 화염이 나팔관을 따라 넓게 분포하며, 타일 위에서 평면화염이 형성된다. 이에 따라 노즐 중심부에서 부압이 생겨 연소가스와 주위공기의 유입이 일어나게 된다. 이 때 연료와 공기의 주유동과 재순환되어 들어오는 후류와의 접촉이 생기며, 화염온도를 낮추게 되고 NO 농도를 저감시킬 수 있게 된다[3].

#### 3.2 라디칼 분포

연소과정에서 생성되는 중간생성물 중 반응 영역대의 지표가 되는 주요한 라디칼로서 OH 라디칼이 있다. Dyer 와 Crosely[5,6]의 연구에 의하면 여러 소반용 중



의 반응에서 발생한 OH 라디칼이  $A^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Pi$ 로 천이할 때 발하는 (0,0), (1,0), (1,1) 밴드의 발광이 대부분이며, 또한 프로판 연료의 핵심 산화반응 과정인 [7]의 반응물로서



연소반응 영역의 중심에 나타난다. Fig. 6은 산소농도 21%인 일반 공기 사용 시 선회수에 따른 OH 라디칼의 자발광 상대 강도를 화상 처리하여 나타낸 그림이다. 공기가 분출되는 선회기 슬릿 부분에서 반응이 가장 활발히 일어나고 있으며, 선회수 0인 직화염의 강도가 가장 크고 선회수가 증가할수록 약해진다. 이는 일차적으로 반경 방향 운동량 증가에 따른 축방향의 유동 속도가 감소하여 연소 반응율이 낮아지기 때문이다. 또한 노즐 중심에서의 후류의 형성으로 연소가스의 재순환이 이루어져 화염면과 접촉하게 되면서  $O_2$

분자의 공격 경로가 위축되어 OH의 생성 반응이 억제되기 때문이다. 높은 선회수에서 국소적으로 강한 OH 라디칼의 분포가 없어지므로 국소 고온 영역이 사라지고, NO의 발생도 감소할 것으로 예상된다.

Fig. 7은 선회수 1.24일 때 연소 공기의 산소부화 농도에 따른 OH 라디칼의 상대 강도를 나타낸 것으로 타일의 1/4을 나타낸 그림이다. 산소농도 증가에 따라 OH 라디칼의 강도는 더욱 강해지며 더욱 넓게 분포한다. 따라서 고온의 온도 분포가 예상되고, NO의 발생 농도도 높아질 것으로 추측된다. 그러나 산소 농도 100%인 (e)에서 강도가 약해지는 이유는 유량이 너무 감소하여 연료와 효과적인 반응을 하지 못하기 때문이다. 즉 산화제의 산소 농도가 아무리 높아도 유량이 충분하지 못하면 반응이 약화되는 것을 알 수 있다.

#### 3.3 화염의 온도 분포

측정된 화염의 순간 온도를 Reynolds 분해를 이용하여 평균 성분과 변동 성분으로 나누어 화염의 평균 온도를 구하였다[8].

##### 3.3.1 축방향 온도 분포

Fig. 8은 연소부하 4.5 kW일 때 각 선회수에서 산소부화농도 별로, 축방향으로의 화염의 노내 온도분포를 나타낸 그림이다. 전반적으로 산소농도가 높을수록 화염온도도 높아진다. 높은 산소 농도에 의해 연소 반응이 활발해지고 반응열도 급격히 상승된다. (a)에서 S=0인 경우 산소농도 60%까지는 무차원 거리  $x/R=5$ 인 지점에서 최고 온도가 나타나지만 80% 이상에선 최고 온도 지점이 화염 상류쪽으로 옮겨 간다. 연소 속도 증가에 의해 화염 길이가 감소하기 때문이다. 일반 공기에 비해 100% 산소 연소시 최고 800℃ 이상 온도가 높아서 열효율이 증가하고, 고온의 화염이 형성 된다. S=0.26인 (b)에서 축방향 거리  $x/R=1$ 에서 산소 농도에 따른 최대 화염 온도의 차이는 약 400℃이며,  $x/R=5$  이상에서 거의 차이가 없다. 산소농도에 따른 차이가 선회수 0일 때

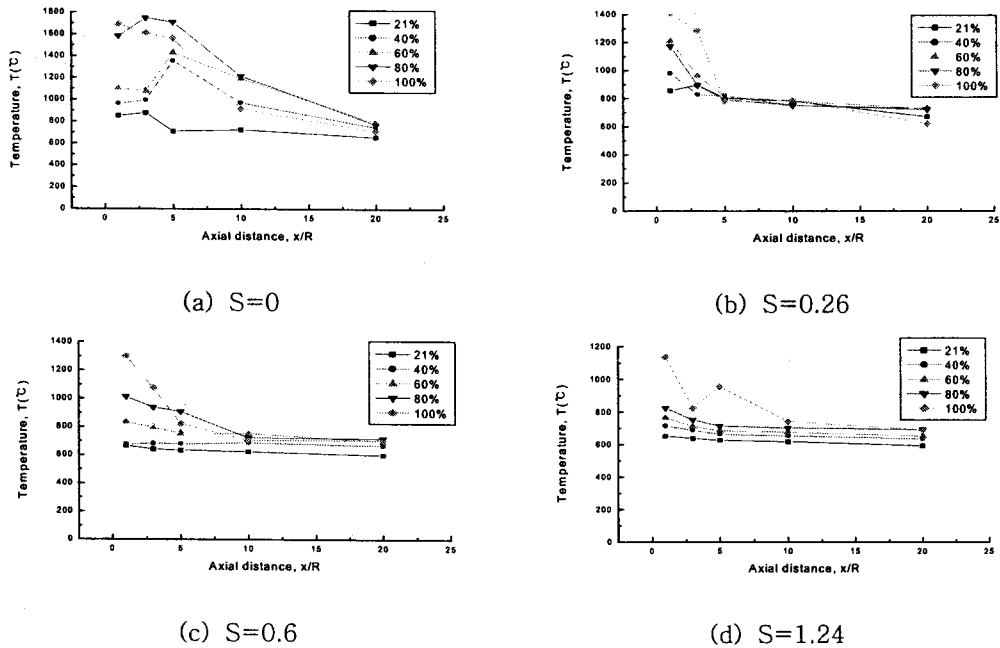


Fig. 8 Axial temperature distribution with oxygen enriched concentration

보다 줄어들며 축방향 거리에 따른 온도 구배도 작다. S=0.6인 (c)에서 보듯이 산소 농도 60% 이하에선 축방향 거리에 따라 거의 일정한 온도 분포를 보인다. 이는 선회수 0.6 이상에서 버너 타일을 따라 평면 화염이 형성되기 시작하므로, 균일한 복사 열전달에 의해 나타나는 현상이다. 그러나 산소 농도 80% 이상에서 온도 분포가 균일하지 못한 것은 산화제의 유량이 많이 줄어들어 버너 타일을 따라 선회하는 유동의 운동량이 감소하여 제대로 된 평면화염이 형성되지 못하기 때문이다. (d)는 선회수 1.24로 이 버너에 대한 유동특성 연구에서 평면화염이 가장 잘 만들어지는 조건에 해당한다[3]. 산소농도 80%까지 끌고 온 온도분포를 보이고 있으며, 100%에서는 (c)에서처럼 산화제의 운동량 감소로 인해 화염상류에서 온도 구배를 가지고 있다.

### 3.3.2 반경 방향 온도 분포

Fig. 9는 연소부하 4.5kW일 때 산소부화 별로 각 선회수에서 버너 타일 위 x/R=1 높이에서 반경 방향으로의 화염의 온도 분포를 나타낸 그림이다. (a)에서 S=0일 때 축방향으로 화염이 형성되어 타일 중심과 외부와의 온도차가 몹시 크며, 산소 농도가 높을수록 온도는 높으나 반경 방향으로 온도 구배도 크다. S=0.26인 (b)에서도 경향은 (a)와 비슷하나 온도 구배가 약간 작으며, (c)에서처럼 S = 0.6일 때 선회수의 증가에 의해 산

소농도 60% 이하의 산소 농도에서는 r/R=2.9에서 최고 온도가 나타나는데, 이는 평면 화염이 버너 타일을 따라 성장하기 시작하여 타일면 위에서 화염이 발달하기 때문이다. S=1.24인 (d)에서도 산화제의 유량이 작은 산소 농도 100% 경우는 평면 화염이 제대로 형성되지 못하여 반경 방향 온도 구배가 크지만 산소 농도 40%의 경우 r/R=4.4 까지 중심부 온도가 유지되고 있다.

### 3.4 배가스 농도 분포

Fig. 10(a), (b)는 각각 산소부화 농도와 선회수에 따른 노출구의 NO의 농도를 나타낸 그림이다. (a)에서 산화제의 산소부화 농도가 증가하면서 NO의 발생량은 급격히 증가하여 80%일 때 최고에 달한다. 이는 젤도비치 기구에 의한 열적 NO의 발생이 활발해지기 때문이다. 또한 산화제의 유량이 75l/min에서 15l/min으로 감소함에 따라 연소가스가 연소로 내에서 체류하는 시간이 길어지는 것도 NO의 발생이 증가하는 이유로 생각된다. 그러나 100% 순산소 연소시 질소가 배제되어 NO의 발생이 원천적으로 봉쇄되므로, NO의 발생 농도는 일반공기 연소 시의 농도 이하로 낮아진다. 하지만 순산소 연소시에도 미량의 NO가 검출되는 이유는 산소 내의 불순물 중 질소 성분이 1% 미만의 소량만 있어도 고온의 분위기에선 반응하여 NO가 되기 때문이다.

또한 (b)에서 보듯이 일정 산소부화 농도에서

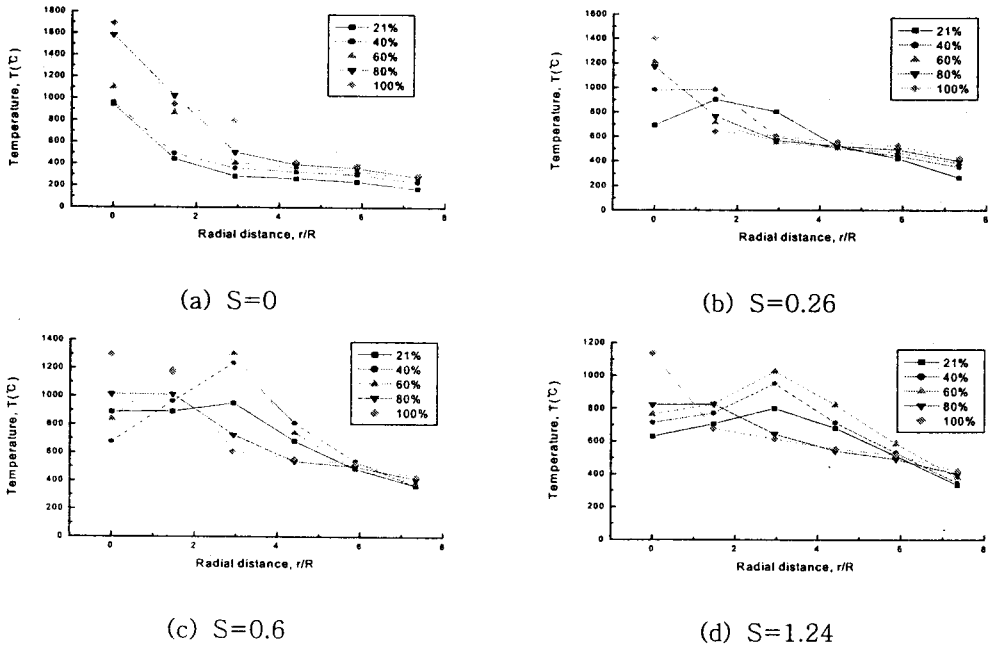


Fig. 9 Radial temperature distribution with oxygen enriched concentration

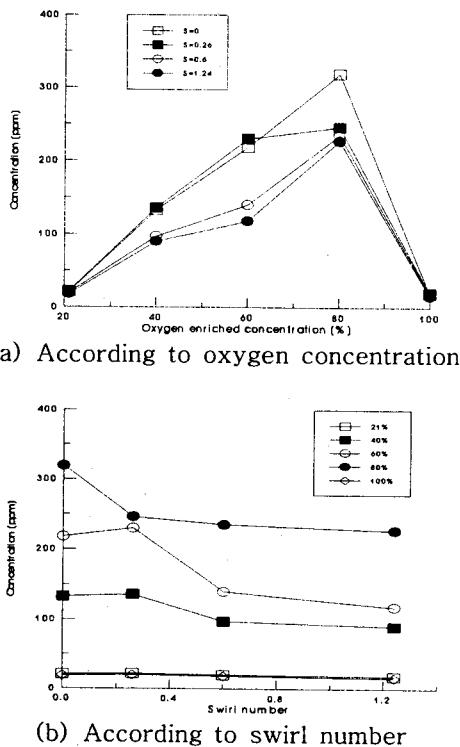


Fig. 10 NO concentration distributions

선회수가 커질수록 NO의 농도가 낮아진다. 화염면의 연소가스 재순환에 의해 열적 NO 메커니즘이 억제되기 때문이다.

#### 4. 결론

- 1) 화염 내 OH 라디칼의 강도는 같은 산소부화농도에서 선회수가 증가할수록 감소하며 더욱 균일한 분포를 나타낸다. 그러나 동일한 선회수에서 산소부화농도의 증가에 따라 강한 분포를 나타내어 연소반응이 활발해진다.
- 2) 선회수 0인 직화염에서 산소부화 농도가 60% 이하에서는 화염의 축방향 최고 온도가 화염의 중류 쪽에 있으나, 80%이상의 높은 산소부화 농도에서는 화염의 상류 쪽에서 최고 온도가 나타난다. 그러나 선회수가 증가하면 모든 산소 농도의 화염에서 화염 상류 쪽의 온도가 가장 높아진다.
- 3) 화염의 반경 방향 온도 분포는 선회수 0일 때 산소부화 농도가 클수록 높다. 그러나 선회수가 증가하면 평면화염이 형성되어 타일 바깥쪽으로 최고 온도지점이 옮겨가며, 특히 산소농도 40~60%에서 가장 효과가 크다.
- 4) 산소 부화 농도가 증가할수록 NO의 발생 농도는 증가하여 산소 부화 농도 80%에서 최대가 되고, 100% 산소 연소 시 급격히 줄어든다. 또한

같은 산소부화 농도에서 선회수 증가에 따라 NO의 발생농도는 최대 2배 정도 저감되는데, 특히 선회수 0.26과 0.6 사이에서 저감 효과가 크다.

### 참고문헌

- [1] Turns, S. R., "An Introduction to Combustion : Concepts and Applications," McGRAW-HILL, Singapore, 2000.
- [2] Han, J. S. and Lee, Y. H., "New Melting Technology of Oxy-Combustion Rotary Furnace for Cast Iron," *Journal of the Korean Foundrymen's Society*, Vol. 14, No. 6, 1994, pp. 489-494.
- [3] Kwark, J. H., Jeong, Y. K., Jeon, C. H. and Chang, Y. J., "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, 2003, pp. 447-457.
- [4] Schmidt, S. E. and Hedman, P. O., "CARS Temperature and LDA Velocity Measurements in a Turbulent, Swirling, Premixed Propane/Air Fueled Model Gas Turbine Combustor," *Transactions of ASME*, 95-GT-64, 1995.
- [5] Crosely, D. R. and Dyer, W. J., "Two-Dimensional Imaging of LIF of OH in a Flame," *Int. Conf. Laser*, 1983, pp. 752-760.
- [6] Dyer, W. J. and Crosely, D. R., "Fluorescence Imaging for Flame Chemistry," *Int. Conf. Laser*, 1985, pp. 211.
- [7] Glassman, I., "Combustion," 2nd ed., Academic Press, Orlando, 1987.
- [8] Reynolds, O., "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," *Phil. Trans. Royal Society of London*, Vol. 174, 1883, pp. 935-982.
- [9] Sautet, J. C., "Large Scale Turbulent Structures in Non-Premixed, Oxygen Enriched Flames," *Int. Conf. Heat Mass Transfer*, Vol. 28, No. 2, 2001, pp. 277-287.
- [10] Jachimowski, C. J., "Chemical Kinetic Reaction Mechanism for the Combustion of Propane," *Combust. Flame*, Vol. 55, 1984, pp. 213-224.
- [11] Choi, B. R., Chang, I. G. and Choi, G. M., "An Experimental Study on Flame Structure and Combustion Characteristics of Turbulent Diffusion Flame(I)," *Transactions of Korean Society of Mechanical Engineers (B)*, Vol. 20, No. 3, 1996, pp. 1028-1039.
- [12] Belframe, A., "Soot and NO Formation in Methane-Oxygen Enriched Diffusion Flame," *Combust. Flame*, Vol. 124, 2001, pp. 295-310.
- [13] Lambert, J. and Sorin, M., "Analysis of Oxygen-Enriched Combustion for SMR," *Energy*, Vol. 22, No. 8, 1997, pp. 817-825.
- [14] Bae, J. R. and Lee, B. J., "Effect of Diluents and Oxygen-Enrichment on the Stability of Nonpremixed Flame," *Transactions of Korean Society of Mechanical Engineers (B)*, Vol. 26, No. 10, 2002, pp. 1458-1464.