

산소부화와 선회수에 따른 평면화염버너의 로 내 연소특성

곽지현* · 전충환** · 장영준**

Combustion characteristics inside the furnace with a flat flame burner by oxygen enriched and swirled air

Ji-hyun Kwark, Chung-hwan Jeon and Young-june Chang

Key Words: Oxygen enriched(산소부화), Swirl number(선회수), Flat flame burner(평면화염버너)

Abstract

Combustion using oxygen enriched air is an energy saving technology that can increase thermal efficiency by the improvement of burning rate and high temperature flame. But information about it is not so enough yet. Flame figure, temperature distribution and emission concentration were measured with oxygen enriched concentration and swirl number in a turbulent diffusion flame to investigate the combustion characteristics. The results showed that flame figure became different as long as oxygen enriched concentration varied and that concentration of NO increased suddenly around O₂ 60%.

기호설명

- A : 공기량
- R : 버너스로트 반경
- S : 선회수
- x/R : 축방향 무차원 거리
- r/R : 반경방향 무차원 거리
- O_{add} : 첨가산소량

1. 서론

170개 이상의 나라에서 기후 변화 협약에 따른 에너지 사용 규제에 대응하기 위한 노력이 더욱 가속화되고 있는 요즘에 연소에 의한 열에너지를 얻는데 있어서도 높은 효율과 유해 연소가스의 저감을 위한 많은 연구가 이루어지고 있다. 특히 금속 제품의 열처리나 용융을 위한 공업로는 연

소에 의해 발생하는 열을 이용하는 대표적 장치로 여기에 사용되는 연소기의 특성에 따라 열효율과 연소가스의 조성이 지배를 받는다.

연소용 공기에 산소를 첨가하여 산화제의 산소 농도를 높여서 연소시키는 산소 부화 연소는 연소 속도의 향상과 화염 온도의 상승으로 열전달이 증대하여 열효율을 높여줄 수 있는 에너지 절약형 연소 기술로 높은 화염 온도를 얻을 수 있어 최근 산업 현장에서 주물용 회전 용해로에 이용되어 생산 원가를 절감하고 있다. 또한 연료 주변에 공급되는 산화제에 선회류를 가하여 연료와 공기의 혼합을 촉진시켜주고 화염의 형상을 평면화염으로 만들어주면 화염 중심부에 강한 연소가스의 재순환이 생겨나 질소산화물의 생성을 줄일 수 있다.

본 연구에서는 나팔관 모양의 타일을 가지는 평면 화염 버너에서 연소용 공기의 산소 농도와 공기 노즐의 선회수가 연소 특성에 미치는 영향을 화염의 형상, 로 내 온도분포, 연소가스의 농도 측면에서 살펴보고자 한다.

* 부산대학교 대학원 기계공학과

** 부산대학교 공과대학 기계공학부, 기계기술연구소

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

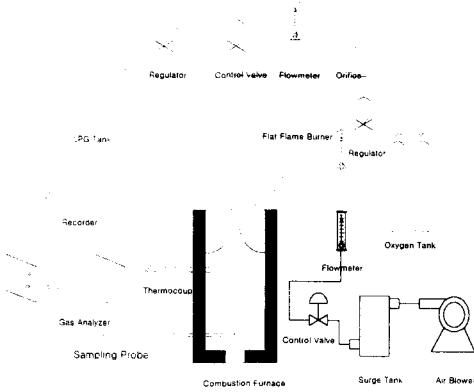


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

본 연구에서 사용된 실험 장치는 Fig. 1과 같이 크게 버너와 연소로, 연료 및 산화제 공급장치, 온도 취득 장치, 화염 사진 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 34mm, 목 직관부 길이 65mm, 곡률반경 56mm의 벤치스케일 버너이다. 연료는 직경 2mm인 12개의 노즐을 통해 반경 방향으로 분출되어 산화제와 수직으로 혼합된다. 연료 노즐 주위는 선회기가 감싸고 있으며 두께 15mm의 원형 스테인리스 강에 2mm×3.5mm 크기의 슬릿상의 분출구 6개를 가지고 있어 산화제는 축방향으로 각 선회수에 따라 선회 유동을 하며 공급된다. 실험에서 사용한 선회기는 4가지로 각각 축방향에 대해 0, 0.26, 0.6, 1.24의 선회수를 가진다. 연소로는 내면이 250mm×250mm×500mm의 크기이고 두께 100mm의 내화제로 단열 되어 있다. 공기는 풍압 2500mmHg, 풍량 5m³/min의 송풍기로부터 공급되며, 산소 부화를 위해 관 중간에 산소 탱크와 연결되어 있어 산화제의 산소 농도를 조절할 수 있다. 노 내의 온도 분포 측정을 위해 버너 타일 위에 반경 방향으로 R-type 열전대 6개, 축방향으로 3개를 설치하고 K-type 도 노 하단 쪽에 2개 설치하여, 30채널 동시 측정이 가능한 온도 기록 장치로 측정하였다. 화염의 형상과 가시적 길이 측정을 위해 디지털 카메라

(MX-2900Z)를 이용하여 화염을 촬영하였으며, 연소가스의 농도 분석은 전기 화학 센서가 장착된 배가스 분석기(COSA-6000)로 하였다.

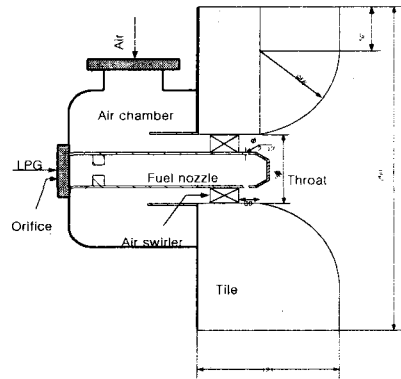


Fig. 2 Specification of the flat flame burner

2.2 실험 방법

본 연구에서 사용된 버너는 난류 비예혼합 버너로서, 프로판 연료를 사용하여 각각 연소 부하 3.03kW, 4.5kW의 조건에서 산소 부화 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 형상과 크기, 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 3lpm이고, 이 때 이론공연비 연소 시 필요한 공기량은 71.58lpm이나 확산 연소이므로 연료와의 완전 혼합을 위해 공기비 1.1로 하여 78.74lpm의 공기를 공급해 주며 이 때 포함된 산소의 양은 16.52lpm이다. 산화제의 산소 농도를 높이기 위해 공기의 일부를 덜고 대신 순산소(99%)를 첨가해준다. 이 때 공기 속의 산소량과 첨가되는 순산소량의 합은 항상 16.52lpm이 되도록 고정해주어 이론 산소-연료비에서 연소가 되도록 한다. 공기량을 A, 첨가시키는 순산소의 양을 O_{add}로 표기하면, 순산소의 첨가량과 산화제의 산소 부화 농도는

$$0.21A + O_{add} = 16.52 \quad - \text{①}$$

Oxygen enriched concentration(%)

$$= \frac{0.21A + O_{add}}{A + O_{add}} \times 100 \quad - \textcircled{2}$$

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

Table 1 Experimental condition

Item	Condition
Fuel	Propane
Combustion load	3.03, 4.5 kW
Oxygen enriched concentration	21, 40, 60, 80, 100 %
Swirl number	0, 0.26, 0.6, 1.24

Table 2 Oxygen flow rate with concentration
(Combustion load 4.5 kW)

Oxygen enriched concentration(%)	A(lpm)	O _{add} (lpm)
21	78.74	0
40	31.17	9.96
60	14	13.57
80	5	15.46
100	0	16.52

2.2.1 화염 형상 및 크기 측정

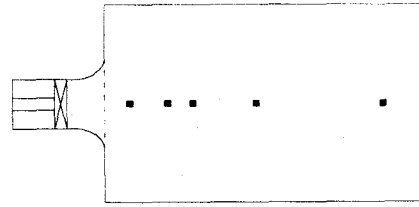
230만 화소를 갖는 디지털 카메라를 이용하여 촬영하였으며, 화염 길이는 각 조건에서 30장의 화염을 촬영한 뒤 평균하여 측정하였다.

2.2.2 온도 분포 측정

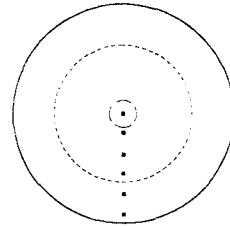
버너 노즐로부터 각각 축 방향과 반경 반향으로 측정하여 버너 목의 반경으로 나누어준 무차원 거리에 따라 나타내었으며 측정된 열전대의 위치는 Fig. 3과 같다.

2.2.3 연소 가스 농도 측정

단열로의 연소가스 배출구에 프로브를 삽입하여 배가스 분석기로 NO의 농도(ppm) 및 O₂의 농도(%)를 측정하였다.



(a) In the furnace



(b) On the burner tile

Fig. 3 Position of thermocouple for the temperature measuring

3. 실험결과 및 고찰

3.1 산소 부화에 따른 결과

3.1.1 화염 형상 및 크기

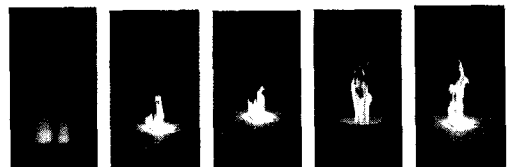


Fig. 4 Photos of flame with oxygen concentration (S=0, 4.5kW)

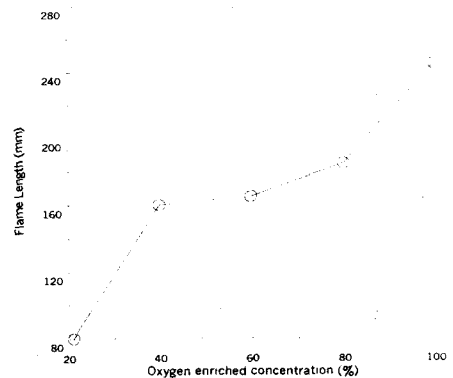
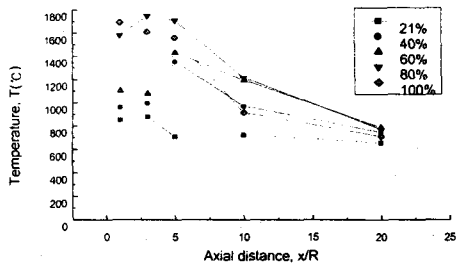
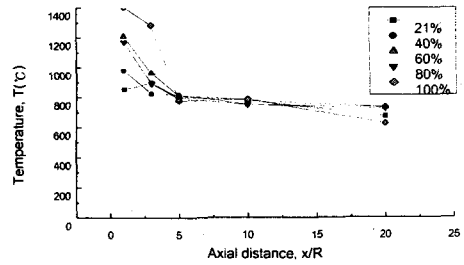


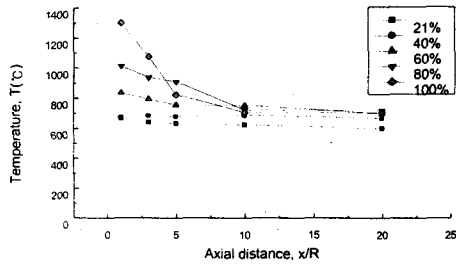
Fig. 5 Flame length with oxygen concentration (S=0, 4.5kW)



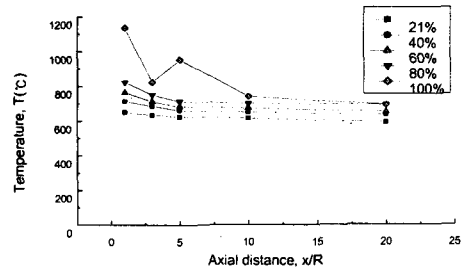
(a) S=0



(b) S=0.26



(c) S=0.6



(d) S=1.24

Fig. 6 Axial temperature distribution with oxygen enriched concentration

Fig. 4와 5는 선회수 0, 연소부하 4.5kW일 때 산소부화농도에 따른 화염의 형상 및 길이이다. 그림에서 보듯이 산소부화농도가 높아질수록 화염의 폭은 가늘어지고 길이는 늘어난다. 이는 확산연소가 더욱 활발히 보다 넓은 영역에서 이루어지고 있기 때문이다.

3.1.2 로내 화염의 온도 분포

3.1.2.1 축방향 온도 분포

Fig. 6는 연소부하 4.5kW일 때 각 선회수에서 산소 부화 농도 별로 축방향으로의 화염의 온도 분포를 나타낸 그림이다. 전반적으로 산소 농도가 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 화염 하류쪽에서 최고 온도가 나타나지만 80% 이상에선 최고 온도 지점이 화염 상류에서 나타난다. 일반공기에 비해 100% 산소 연소 시 최고 800°C 이상 온도가 높다. 그러나 축방향 무차원거리 $x/R=10$ 이상의 화염 하류에서는 다른 산소 농도의 화염보다 온도가 떨어지고 있다. (b)에서 축방

향 거리 $x/R=1$ 에서 산소농도에 따른 최대 화염 온도의 차이는 약 400°C이며 $x/R=5$ 이상에서 거의 차이가 없다. 산소농도에 따른 차이가 선회수 0일 때 보다 줄어들며 축방향 거리에 따른 온도 구배도 작다. (c)에서 보듯이 산소 농도 60% 이하에선 축방향 거리에 따라 거의 일정한 온도 분포를 보인다. 이는 선회수 0.6 이상에서 버너 타일을 따라 평면 화염을 형성하기 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 유동 특성 연구에서 평면화염이 가장 잘 만들어지는 조건에 해당한다. 산소 농도 80%까지 끌고 온 온도 분포를 보이고 있으며, 100%에서는 (c)에서처럼 산화제의 운동량 감소로 인해 화염 상류에서 온도 구배를 가지고 있다.

3.1.2.2 반경 방향 온도 분포

Fig. 7은 연소부하 4.5kW일 때 산소부화 별로 각 선회수에서 버너 타일 위 $x/R=1$ 지점의 반경

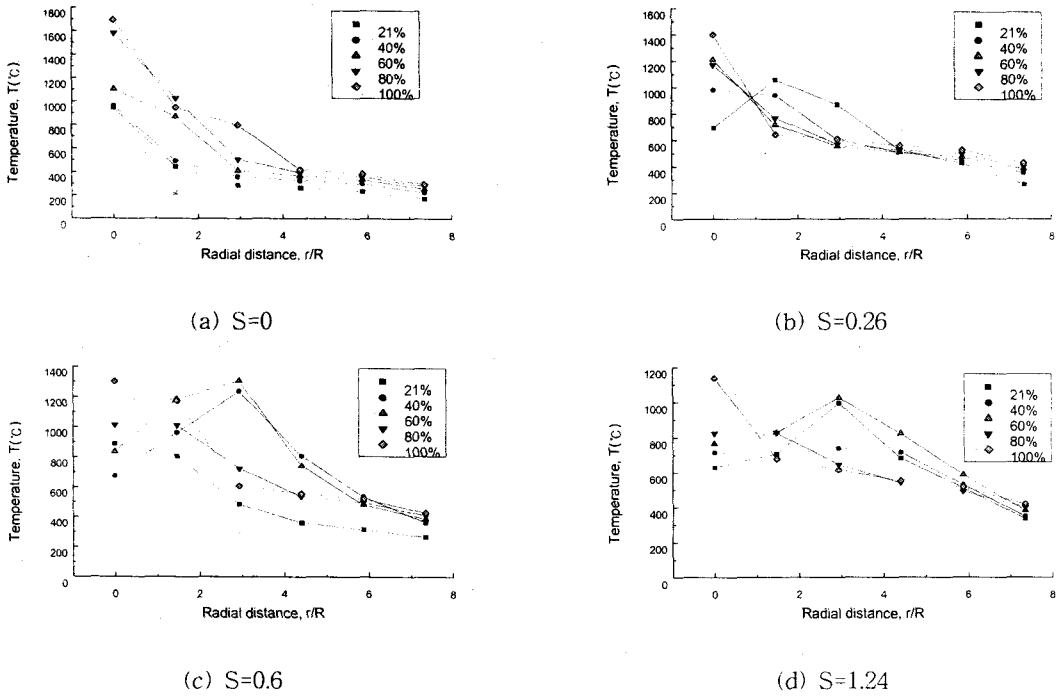


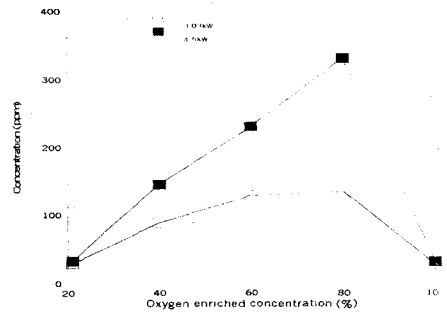
Fig. 7 Radial temperature distribution with oxygen enriched concentration

방향으로의 화염의 온도 분포를 나타낸 그림이다. (a)에서 $S=0$ 일 때 축방향으로 화염이 형성되어 타일 중심과 바깥과의 온도차가 몹시 크며, 산소 농도가 높을수록 온도는 높으나 반경 방향으로 온도 구배도 크다. (b)에서도 경향은 (a)와 비슷하나 온도 구배가 약간 작으며 (c)에서 처럼 $S=0.26$ 일 때 선회수의 증가에 의해 산소 농도 60% 이하의 산소 농도에서는 $r/R=2.94$ 에서 최고 온도가 나타나는데 이는 평면 화염이 버너 타일을 따라 성장하기 시작하여 타일면 위에서 화염이 발달하기 때문이다. (d)에서도 산화제의 유량이 작은 산소 농도 100% 경우는 평면 화염이 제대로 형성되지 못하여 반경 방향 온도 구배가 크지만 산소 농도 60% 이하에선 $r/R=4.41$ 까지 중심부 온도가 유지되고 있다.

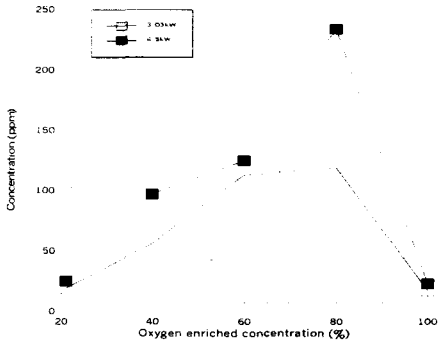
3.1.3 배가스 농도 분포

Fig. 8 (a), (b)는 선회수 0과 1.24일 때 NO의 농도를 연소부하 별로 나타낸 그림이다. 산화제의 산소 부하 농도가 증가하면서 NO의 발생량은 급격히 증가하여 80%일 때 최고에 달한다. 이는 켈도비치 기구에 의한 열적 NO의 발생이 활발해

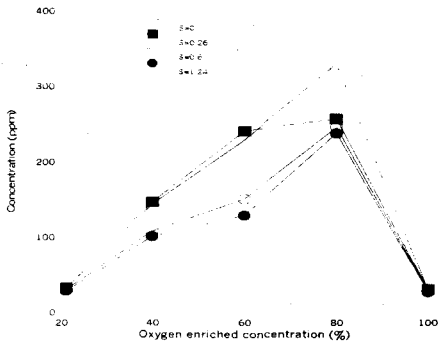
지기 때문이다. 산소 농도가 80%를 넘어서면서 질소 농도의 감소로 인해 발생하는 NO의 농도는 줄어든다. 그리고 100% 순산소 연소 시 NO의 농도는 일반공기 연소 시의 농도보다 낮게 나타나고 있다. 순산소 연소 시에도 미량의 NO가 검출되는 이유는 불순물의 영향으로 생각된다. 연소 부하에 따른 발생 농도 차이는 산소 농도 60% 이상에서 뚜렷해진다. 또한 (c)에서 보듯이 선회수에 의한 영향은 선회수가 클수록 NO가 적게 발생하고 있는데, 화염면의 연소가스 재순환에 의한 것으로 판단된다.



(a) $S=0$



(b) S=1.24



(c) Combustion load 4.5kW

Fig. 8 NO concentration with oxygen enriched concentration

3.2 선회수에 따른 결과

3.2.1 화염 형상 및 크기

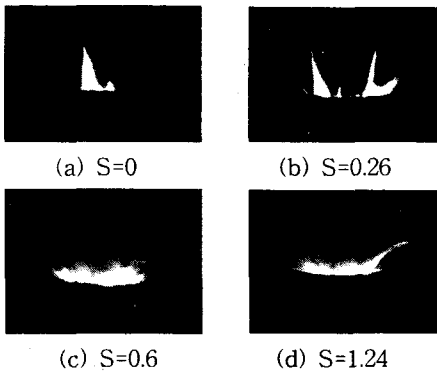
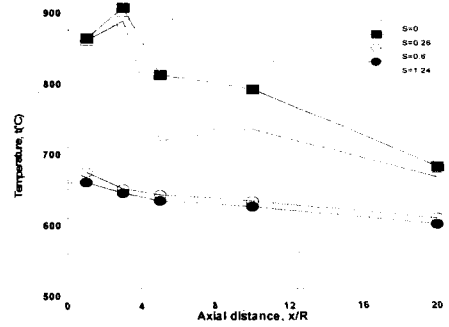


Fig. 9 Photos of flame with swirl number (4.5 kW, oxygen concentration 21%)

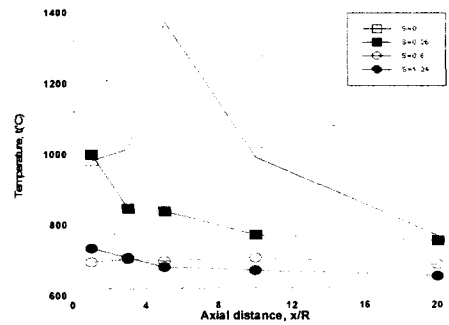
Fig. 9는 연소부하 4.5kW, 산소부화농도 21%인 일반공기의 선회수에 따른 화염사진을 보여주고 있다. 선회수가 증가하면서 버너타일을 따라 화염이 넓게 분포하게 된다.

3.2.2 로내 화염의 온도 분포

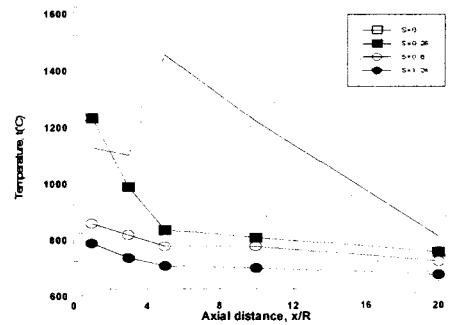
3.2.2.1 축방향 온도 분포



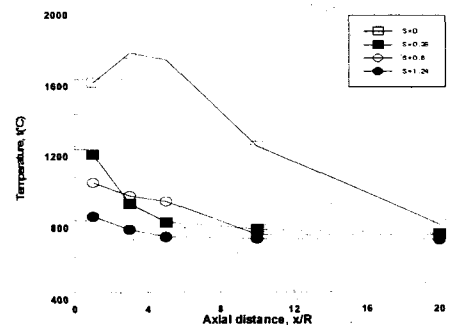
(a) Oxygen concentration 21%



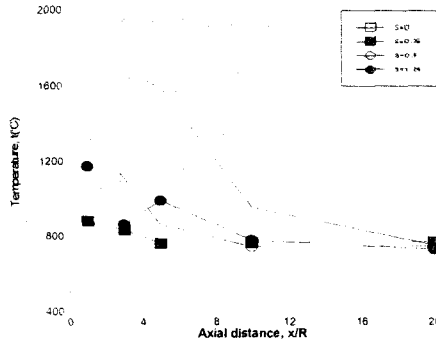
(b) Oxygen concentration 40%



(c) Oxygen concentration 60%



(d) Oxygen concentration 80%



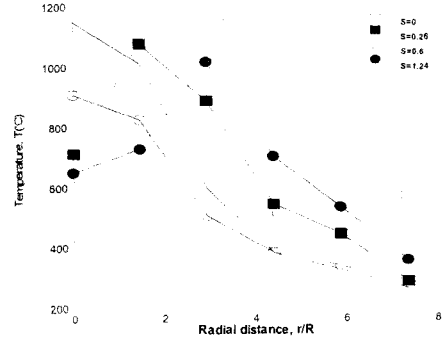
(e) Oxygen concentration 100%

Fig. 10 Axial temperature distribution with swirl number (4.5kW)

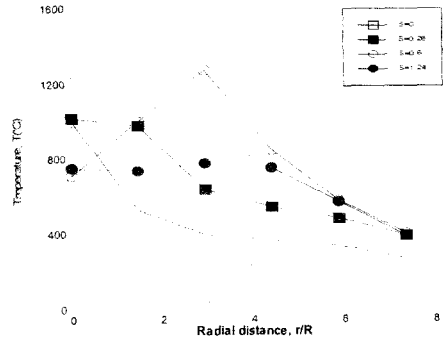
Fig. 10은 연소 부하 4.5kW일 때 화염의 축방향 온도 분포를 각 산소 부화 농도에서 선회수 별로 나타낸 그림이다. 선회수가 증가할수록 화염이 반경 방향으로 형성되어 축방향 온도는 떨어지고 있음을 알 수 있다. 선회수 0.6 이상에서 축방향 온도 분포는 거의 일정해진다. 산소 농도 40% 이상에서는 선회수가 0.26만 되어도 축방향 최대 온도는 급격히 떨어지며 0.6 이상에서는 균일한 온도 분포를 보인다.

3.2.2.2 반경 반향 온도 분포

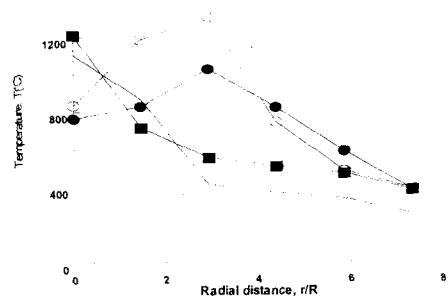
Fig. 11은 연소 부하 4.5kW일 때 화염의 반경 방향 온도 분포를 각 산소 부화 농도에서 선회수 별로 나타낸 그림이다. 전반적으로 선회수가 증가할수록 온도 구배가 작아지며 최대 온도가 나타나는 지점이 타일 중심 방향으로 옮겨가는 것을 알 수 있다. (a)와 (b)에서 선회수 1.24의 경우 반경방향 무차원거리 3이상에서 모두 최고 온도 분포를 나타내고 있다. 그러나 산소 농도 80% 이에서는 산화제의 유동 모멘텀이 감소하여 선회수에 따른 온도 구배 차이가 비교적 작게 나타난다. 본 실험에서는 산소 부화 농도 60%이고 선회수 0.6일 때 노 내의 열전달 효율이 가장 좋아 보이는데 연소부하를 더 늘리게 되면 더 높은 산소부화농도에서도 훌륭한 평면화염이 형성되어질 것으로 생각된다.



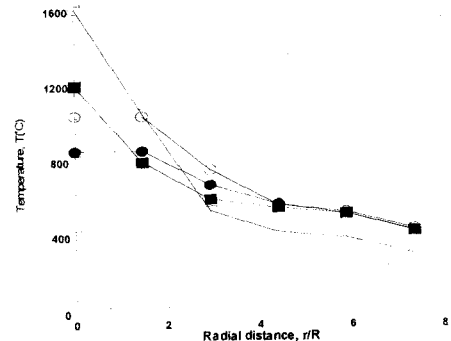
(a) Oxygen concentration 21%



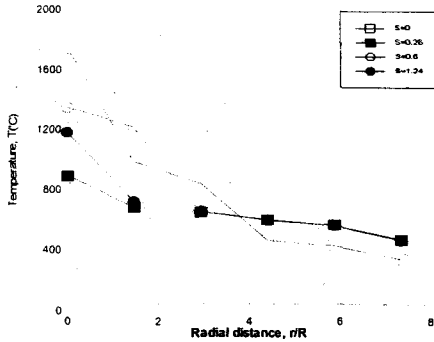
(b) Oxygen concentration 40%



(c) Oxygen concentration 60%



(d) Oxygen concentration 80%



(e) Oxygen concentration 100%

Fig. 11 Radial temperature distribution with swirl number (4.5kW)

3.2.3 배가스 농도 분포

Fig. 12는 연소 부하 4.5kW일 때 연소 가스 중 NO의 농도를 선회수에 따라 나타낸 그림이다. 그림에서 NO의 농도는 산소부화농도 40~60% 사이일 때 선회수 0.26에서 약간 증가했다가 선회수가 커질수록 농도가 낮아진다. 그리고 이는 선회수 0.26과 0.6 사이에서 효과가 가장 크다. 일반공기나 산소 농도 100% 연소 시에는 상대적으로 선회수에 의한 영향이 작으나 그 외에서는 선회수에 따라 최대 2배 이상의 NO 농도 차이를 보인다. 산소부화농도 80%일 때 NO의 농도가 가장 높고 100%가 되면 거의 발생하지 않는다.

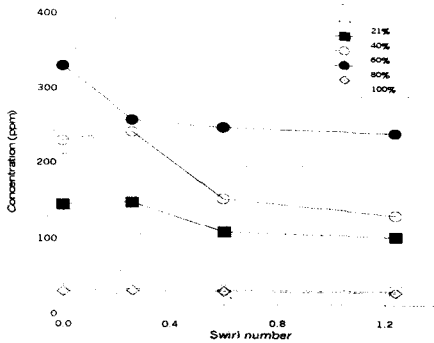


Fig. 12 NO concentration with swirl number

4. 결론

(1) 같은 선회수에서 화염의 형상은 산소부화농도가 커질수록 폭은 줄어들고 길이는 늘어난다.

(2) 선회수 0인 일반 화염에서 산소 부화 농도가 60% 이하에서는 화염의 최고 온도가 하류 쪽에 있으나 80% 이상의 높은 산소 부화에서는 화염의 상류 쪽에서 최고 온도가 나타난다. 그러나 선회수가 증가하면 모든 산소 농도에서 화염 상류 쪽이 온도가 가장 높다.

(3) 화염의 반경 방향 온도 분포는 선회수 0에서 산소 부화 농도가 클수록 높다. 그러나 선회수가 증가하면 평면 화염이 형성되어 타일 중심 쪽으로 최고 온도 지점이 옮겨가며 산소 농도 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 산소부화농도에서 선회수에 따라 NO의 발생농도는 최대 2배정도 차이가 나는데, 특히 선회수 0.26과 0.6 사이에서 두드러진다.

참고문헌

- (1) JC. Sautet, 2001, "Large scale turbulent structures in non-premixed, oxygen enriched flames", Int. Comm. Heat Mass Transfer, Vol.28, No.2, pp277-287
- (2) Casimir J. Jachimowski, "Chemical kinetic reaction mechanism for the combustion of propane", Combust. flame 55:213-224(1984)
- (3) 최병륜, 장인갑, 최경민, 1996, "난류확산화염의 화염구조와 연소특성에 관한 실험적 연구", 대한기계학회 논문집, 제20권, 제3호, pp.1028-1039
- (4) A. Belframe et. al., "Soot and NO formation in methane-oxygen enriched diffusion flame", Combust. flame 124:295-310(2001)
- (5) Jean Lambert, Mikhail Sorin, 1997, "Analysis of oxygen-enriched combustion for SMR", Energy, Vol. 22, No. 8, pp.817-825