

고효율 순산소 버너의 연소 특성에 관한 실험적 연구

김세원* · 안재현** · 김민수**

Experimental study on combustion characteristics of high efficiency oxy-fuel burner

Se-Won Kim*, Jae Hyun Ahn**, Min-Soo Kim**

ABSTRACT

This paper describes the results of a series of experiments executed by using two pilot-scale oxy-fuel burners are designed for maximum capacity of 50,000 kcal/hr, 300,000 kcal/hr and installed in the test furnace. The effects of turn-down ratio, excess oxygen ratio, nozzle exit velocity, injection angle, swirl vane angle and inlet oxygen temperature on the combustion characteristic are investigated. Temperature distributions are measured using R-type and Molybdenum sheathed C-type thermocouple.

The results showed that maximum temperature and mean temperature increase with the increase of turn-down ratio and inlet oxygen temperature. The maximum flame temperature was increased about 35% compared to the case of equivalent air operated condition. In addition, Optimum excess oxygen ratio and nozzle characteristics are obtained for this oxy-fuel glass melting furnace.

Key Words : Oxy-fuel burner, Excess oxygen ratio, Turn-down ratio

기 호 설 명

| | |
|-------------------------------|---------------------|
| T/D Turn-down ratio | L Length of furnace |
| λ Excess Oxygen ratio | W Width of furnace |
| T Temperature | H Height of furnace |

1. 서 론

지난 수십년 동안 유리 제조 산업에서 제품의 질과 생산력 향상을 위해 산업 경쟁력과 에너지

절약 문제가 대두되어 왔다. 그리고 이러한 유리 제품을 생산하기 위해서 연소 과정 중에 발생하는 유해성 대기 오염물질 문제 또한 하나의 문제로 제시되어 왔다. 이러한 유해성 배기가스를 줄이기 위하여 많은 연구보고가 제시되고 있으나 이러한 문제들은 유리 용해시 사용되는 연소기의 고효율을 유지하면서 유해성 배기가스를 줄이는 목적인 것으로 상충되는 문제를 가지고 있다. 따라서 이러한 유해성 대기 오염물질 중의 하나인 질소 산화물(NOx)을 감소시키고 에너지 절약 차

* 한국생산기술연구원 청정기술팀

† 연락처자 E-mail : swkim@kitech.re.kr

** 한양대학교 기계공학과 대학원

원과 연소기의 고효율을 유지하기 위하여 산화제를 일반 대기 중의 공기를 이용하지 않고 순산소를 이용하여 연소기를 가동함으로써 배기가스 내의 에너지를 최소화시키는 고효율의 연소 시스템의 경우를 두 가지 형태의 버너 즉 Annular Jet Burner 그리고 Flat Jet Burner에 대해 가능성을 검토하였다.

2. Experimental Apparatus and Procedure

Annular Jet 버너를 이용한 연소 시스템의 경우는 아래의 Fig. 1과 같이 도식적으로 나타내어진다. 버너는 1200 mm(L)×800 mm(W)×800 mm(H)의 치수를 가진 직육면체 형상의 로의 측면에 장착되어 있고, 이 로의 내부 모든 벽은 단열 캐스터블과 화염 캐스터블에 의해 이중 내화재로 처리되어 있다. 그리고 로 내부의 관측을 위한 관측창이 로의 측면에 3개의 주관측창과 4개의 부관측창이 부착되어 있으며 고온에서 견딜 수 있도록 고온 강화유리를 이용하였다. 로의 상부 벽에는 연소과정중의 온도 계측을 위한 열전대를 로 내부에 투입할 수 있는 계측부 6개를 두었다. 이 연소 시스템에 사용된 버너는 최대 열용량이 50,000 kcal/hr 로 설계가 되었는데, 순산소 버너는 기존의 공기를 이용한 버너보다 flow rate가 적기 때문에 상대적으로 momentum이 적다. 따라서 momentum의 감소로 인해 연료와 산화제의 mixing rate가 감소하게 된다. 이러한 mixing rate의 감소를 야기시키는 momentum의 감소를 보상하기 위해서 버너의 노즐에서 높은 속도를 얻을 수 있도록 설계를 하였는데, 버너에서 연료와 산화제인 산소의 출구 평균 속도가 62 m/s, 40 m/s가 되도록 설계되었다. 부가적으로 vane의 각도가 15°, 30°, 45° 인 swirl generator를 사용하여 mixing rate를 증진시키는 효과를 얻었다.

본 연구에 사용된 위 연소기의 연료 노즐은 높은 출구 속도를 가지는 단공 노즐과 낮은 출구 속도를 가지는 단공 노즐, 그리고 다공 노즐을 사용하였으며 단공 노즐의 직경은 각각 2.7 mm와 3.7 mm 사용하였다. 다공 노즐은 1.2 mm의 직경으로 8개를 가지며 분무각도는 90°를 이룬다.

본 연구의 실험 파라미터는 Table 1과 같으며 부하비와 과잉 산소비, 산화제의 예열온도 그리고 노즐의 형태, 스윙 강도, 노즐의 출구 속도, 노즐의 위치를 파라미터를 잡았다.

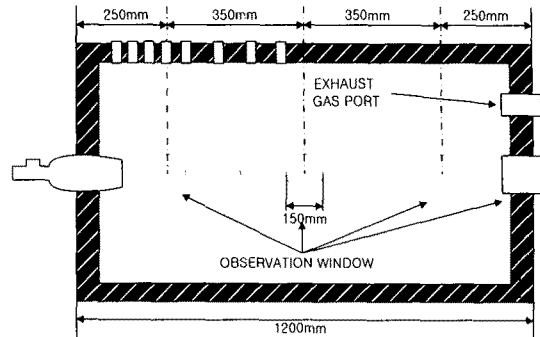


Fig. 1 Schematic of test furnace on Annular Jet burner

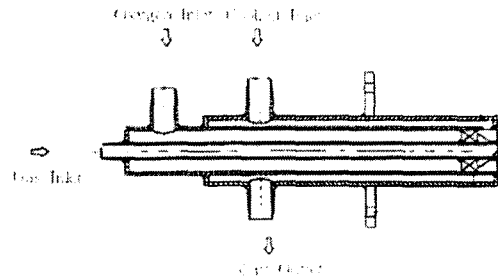


Fig. 2 Schematic of Annular Jet Burner

Table 1 Experimental Conditions

| parameter | Condition |
|----------------------------------|--------------------------|
| Turn-down ratio | 0.4 / 0.6 / 0.8 / 1.0 |
| Excess oxygen ratio(λ) | 1.0 / 1.2 / 1.4 |
| Preheat temperature | 15°C / 50°C / 110°C |
| Nozzle exit Velocity(u) | low, high |
| Nozzle type | single-hole / multi-hole |
| swirl intensity | 15° 30° 45° |
| Nozzle location | 0 mm, 1.1mm |

온도의 계측은 축방향으로 연소기의 노즐 끝에서 30, 160, 290, 420, 550, 680 mm 지점의 각 포인트에서와 반경방향으로는 로의 중심축에서 반경방향으로 0, 50, 100, 150, 200 mm 지점의 각 포인트에서 R-type(0~1450°C)과 몰리브덴으로 실링이 된 C-type(0~2200°C)으로 계측을 실행하였다.

Flat Jet Burner를 이용한 연소시스템의 경우는 아래의 Fig. 3과 같이 도식적으로 나타내어진다. 버너는 1000 mm(L)×1800 mm(W)×800 mm(H)의 치수를 가진 직육면체 형태의 로의 측면에 장착되어 있고, 이 로의 내부 모든 변은 난열 캐스터블과 화염 캐스터블에 의해 이중 내화재로 처리되어 있다. 그리고 로 내부의 관측을 위해 로의 측면에 8개의 주 관측창과 로의 전 후면에 부 관측창이 2개가 부착되어 있고, 고온에서 견딜 수 있도록 고온 강화 유리를 이용하였다. 로의 상부 벽에는 연소 과정중의 온도 계측을 위한 열전대 투입구를 두었다.

이 연소 시스템에 사용된 버너는 최대 열용량이 300,000 kcal/hr 로 설계가 되었으며, 유리 용해로와 같이 넓은 면적을 가열해야 하는 경우처럼 화염의 폭을 증가시켜 전열효과를 증대시킬 수 있도록 Fig. 4 와 같이 다수의 연료 노즐과 그 상, 하부에 슬릿 형태의 산화제 출구부를 위치하여 편평한 화염을 형성하는 버너이다. 화염 폭의 증가로 인해 노즐 출구 부분의 유속이 작아져 연료-산소 혼합이 저해되고 내부 재순환 영역의 크기가 감소하지만 작은 출구 유속을 이용하여 강제적으로 soot 입자를 형성시켜 화염에서의 복사열전달을 극대화하는 버너이다.

본 연구의 실험 파라미터는 아래에 Table 2와 같으며 과잉 산소비, 켈의 각도에 따른 로내 온도 분포를 나타낸다

Flat Jet Burner 실험에서의 온도분포는 로의 중심축을 따라 축방향 위치 95 cm, 125 cm, 155 cm 위치에서의 온도분포를 로의 중심에서의 반경 방향으로 계측을 하였으며, 또한 로의 중심축에서 상, 하부 30 cm 지점의 온도를 계측하였다.

3. Results and Discussion

순산소를 이용한 Annular Jet 버너는 열부하비와 과잉 산소비와 노즐의 형상 위의 table 1에서 나오는 여러 가지 조건에서 연구하고자 설계되고 로에 장착을 하였다. 열부하비에 따른 효과를 실험적으로 계측하여 나타낸 것이 아래와 같이 Fig. 5, 6 에 나타나는데 여기에서 고속 단공 노즐을 사용하였으며 과잉 산소비 1.2 에서 최고 온도 영역이 로의 축방향 420 mm 지점에서 2000°C 정도 달하는 온도가 계측되었다.

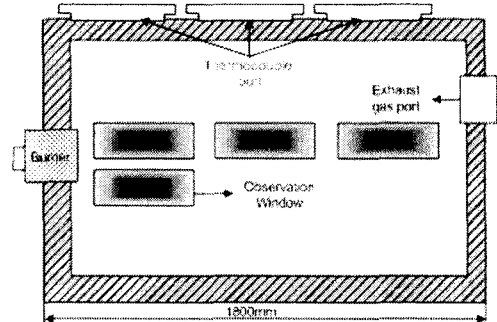


Fig. 3 Schematic of test furnace on Flat Jet Burner

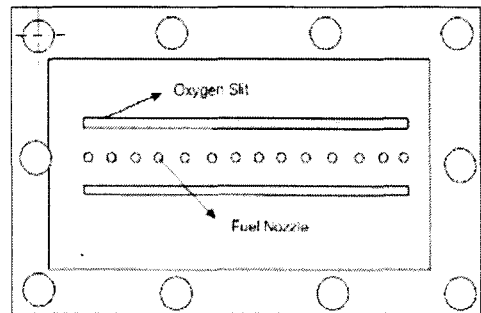


Fig. 4 Schematic of Flat Jet Burner

Table 2 Experimental Conditions

| Parameter | Condition |
|---------------------|-------------------------|
| Excess Oxygen Ratio | 1.0 / 1.05 / 1.1 / 1.15 |
| Quarl Angle | 0° / 8° |

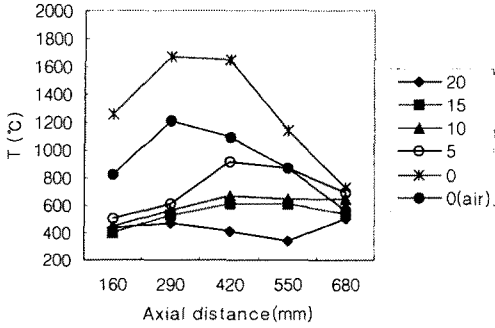


Fig. 5 Temp. distribution at T/D ratio 0.4
단공고속노즐, 과잉 산소비 1.2

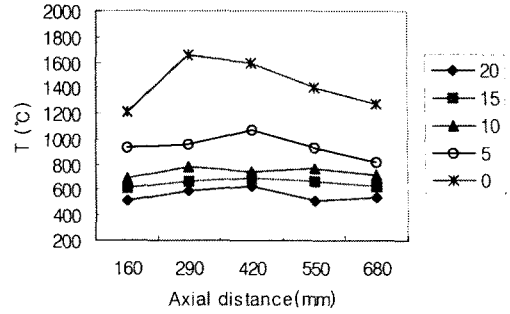


Fig. 8 Temp. distribution at T/D ratio 1.0
단공고속노즐, 과잉 산소비 1.4

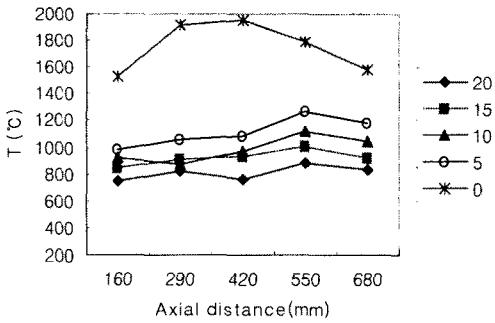


Fig. 6 Temp. distribution at T/D ratio 1.0
단공고속노즐, 과잉 산소비 1.2

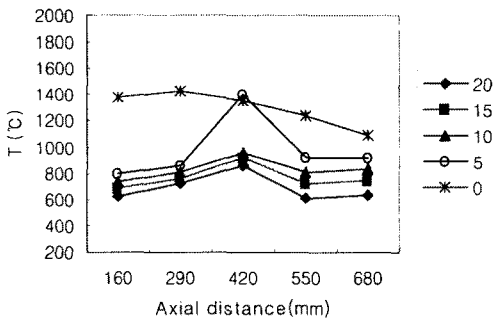


Fig. 7 Temp. distribution at T/D ratio 1.0
단공고속노즐, 과잉 산소비 1.0

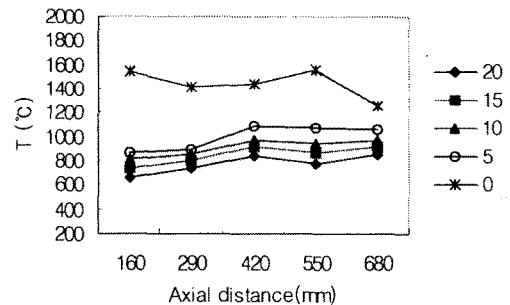


Fig. 9 Temp. distribution at T/D ratio 1.0
단공저속노즐, 과잉 산소비 1.2

Fig. 5에서는 순산소를 이용한 연소와 공기를 이용한 산소를 비교하여 나타내었는데 순산소를 이용한 연소가 35% 정도 높은 온도 분포도를 보이고 있으며 열부하비에 따른 온도 분포에서 열부하비가 1.0에서 1.70°C인 최고 온도 분포를 보인다.

그림 Fig. 6, 7, 8은 과잉 산소비에 따른 온도 분포를 나타내고 있다. Fig. 6, 7, 8은 45°의 vane을 가진 swirl generator와 단공 고속 노즐을 사용하였을 때 과잉 산소비에 따른 온도 분포를 나타내고 있다. 평균온도 분포와 최고온도 분포는 과잉 산소비 1.2에서 나타나는 것으로 알 수 있다. 또한 과잉 산소비가 1.0에서는 충분한 산소 공급이 되지 않아 낮은 화염 온도 분포를 나타내고, 과잉 산소비 1.4의 경우는 과도한 산소 공급으로 인한 화염에서의 냉각 효과로 인해 낮은 화염 온도 분포가 나타나는 것으로 사료된다. 따라서 여기에서 최적 과잉 산소비는 1.2 근방임을 알 수 있다.

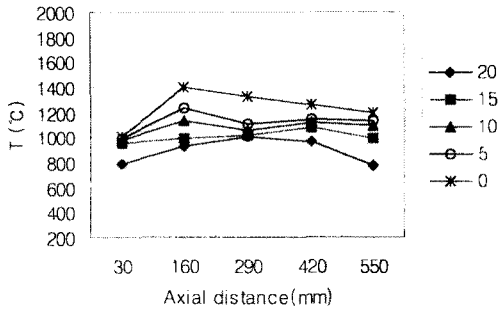


Fig. 10 Temp. distribution at T/D ratio 1.0
다공노즐, 과잉 산소비 1.2

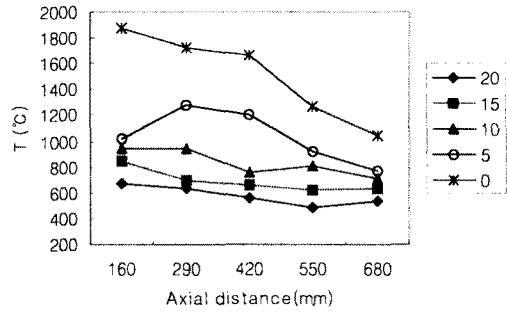


Fig. 13 Temp. distribution at T/D ratio 0.6
단공고속노즐, 과잉 산소비 1.2
예열온도 110°C

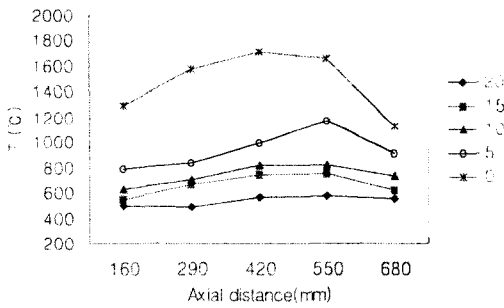


Fig. 11 Temp. distribution at T/D ratio 0.6
단공고속노즐, 과잉 산소비 1.2
Swirl angle 30°

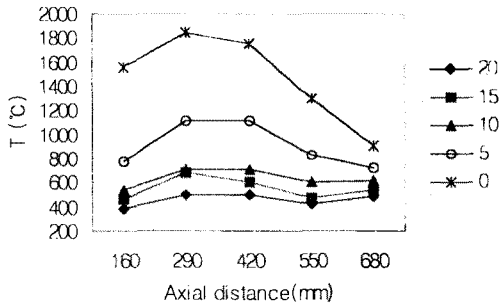


Fig. 12 Temp. distribution at T/D ratio 0.6
단공고속노즐, 과잉 산소비 1.2
예열온도 50°C

노즐 출구 속도에 따른 온도 분포는 Fig 6,9에서 알 수 있다. 여기에서는 단공 고속 노즐과 단공 저속 노즐 그리고 vane 각도가 45°인 swirl generator를 사용하였으며 위에서 제시한 최적 과잉 산소비 1.2를 적용하여 실험을 수행하였다. 이에 따른 결과는 단공 고속 노즐이 단공 저속 노즐보다 비교적 높은 온도 분포를 보였으며 화염의 길이도 짧게 관측되었다. 이것은 유동의 momentum 증가에 따라서 연료와 산소의 혼합이 활발하게 이루어지는 것으로 예측을 할 수 있다. Fig. 10은 다공 노즐에 관한 온도 분포를 나타내고 있는데 단공 저속, 고속 노즐과는 다른 유동 특성과 화염 특성 및 온도 분포를 나타낸다. 다공 노즐의 경우는 단공 고속 노즐보다 연료의 넓은 분사각과 높은 출구 속도로 인하여 좀더 짧은 화염의 길이와 넓은 화염의 폭을 얻을 수 있다. Fig. 11은 스윙각에 따른 온도 분포를 나타내는 것으로 swirl intensity의 감소와 축방향 속도 성분의 증가로 인하여 화염의 길이가 증가와 화염의 폭이 줄어드는 경향을 보인다.

Fig 12, 13은 산화제인 산소를 연소기에 주입시키기 이전에 50°C 와 110°C로 예열을 하여 주입시켜서 얻은 온도 분포 그래프로 과잉 산소비 1.2 그리고 열부하비를 0.6으로 고정하여 실험을 수행하였다. 그 결과 예열온도가 높아 질수록 고온의 화염대를 획득할 수 있으며, 화염의 길이는 짧아지고 화염의 폭은 증가함을 알 수 있었다.

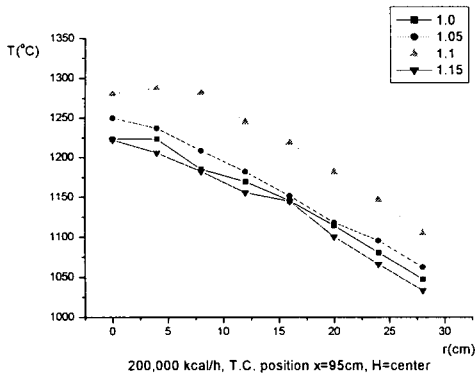


Fig. 14 Temp. distribution of quarl angle 0°
H = centerline

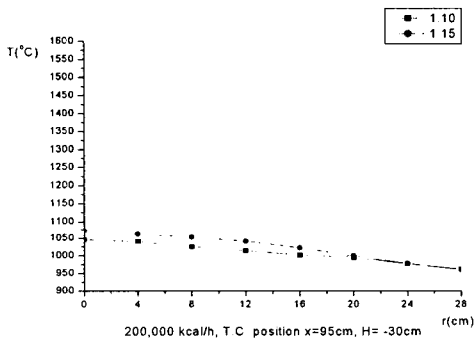


Fig. 15 Temp. distribution of quarl angle 0°
H = -30cm

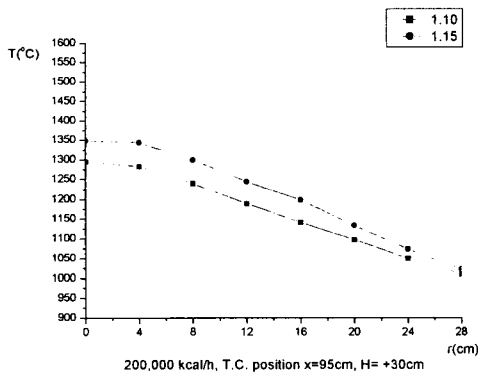


Fig. 16 Temp. distribution of quarl angle 0°
H = +30cm

Flat Jet Burner에 대한 온도 분포는 다음과 같다. Fig. 14는 로의 중심선상에서 버너의 끝에서 축방향으로 95cm 떨어진 지점에서 과잉 공기별 온도 분포를 나타내고 있다. 여기에서는 과잉 산소비가 1.1의 경우가 최고 화염 온도 분포를 나타내고 있으며, 1.0의 경우는 미연소 반응에 의한 낮은 온도 분포를 보이며, 1.15의 경우에는 과잉 산소 공급에 의한 미반응 산소의 냉각효과로 인해 화염의 온도가 감소함을 알 수 있다. 또한 Fig. 15, 16은 로의 중심선상에서 상, 하 30cm 지점에서의 온도를 반경 방향으로 계측한 것으로 여기에서는 온도의 계측 위치가 로의 중심선 상의 상, 하부에 위치하므로 화염과 직접적인 접촉을 하지 않아 재순환 유동의 온도가 계측되어 과잉 산소비에 따른 온도차이가 크게 나타나지 않았으며, 과잉 산소비 1.15가 1.1보다 운동량 증가로 인한 재순환 영역의 강도가 증가하여 좀 더 높은 온도가 계측되었다.

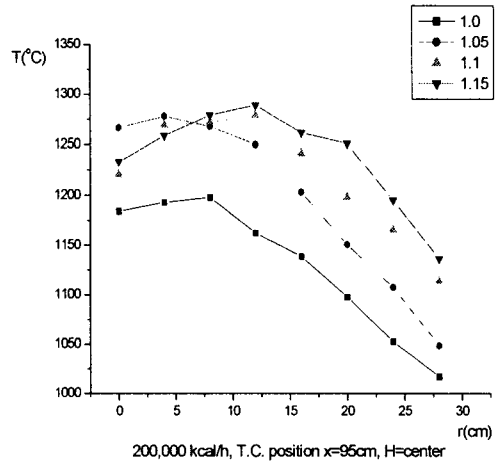


Fig. 17 Temp. distribution of quarl angle 8°
H = centerline

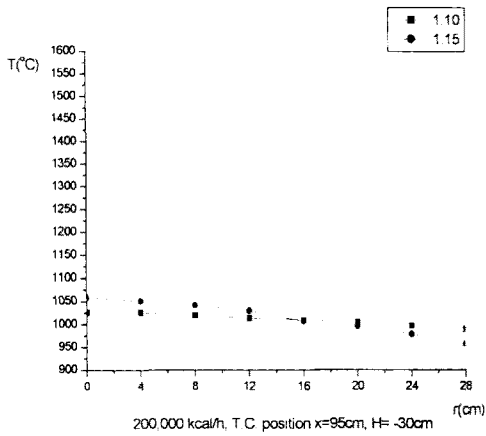


Fig. 18 Temp. distribution of quarl angle 8°
H = -30cm

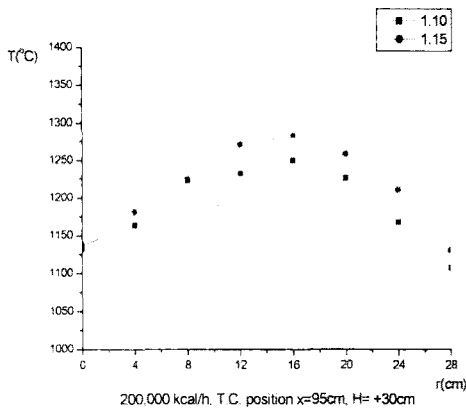


Fig. 19 Temp. distribution of quarl angle 8°
H = +30cm

Fig. 17, 18, 19는 켈 각도가 8°인 경우에 대해서 과잉 산소비에 따른 온도 분포를 위의 0° 켈의 경우와 같은 조건으로 축방향의 위치에 따른 반경방향별로 온도분포를 나타낸 것이다. 그러나 켈 각도 8°에서는 0° 켈과 비교하여 상당히 큰 온도 편차를 보이고 있는데 Fig. 17과 같은 온도 분포는 반경 방향 위치가 10cm 이내에서는 과잉 산소비 1.05의 경우가 국부적으로 최적의 화학당론 산소량이 형성되어 높은 온도를 보이고 있으나 그 이후에서는 상대적으로 과잉 산소비 1.15

가 운동량 증가에 따른 재순환 영역의 증가로 높은 온도 분포를 보인다. 또한 로 상, 하부의 온도 분포를 나타낸 Fig 18, 19의 경우를 보면 전반적으로 과잉 산소비 1.15가 1.1보다 운동량 증가로 인한 재순환 영역의 강도가 증가하여 좀더 높은 온도가 계속되었다.

4. 결론

본 연구에서는 Annular Jet Burner와 Flat Jet Burner를 설계하고 이 버너에 산화제로 순산소를 이용하여 열 부하비, 과잉 산소비, 예열 온도, 그리고 여러 가지 변수들에 대하여 로내의 온도 분포에 대한 연구를 수행하였다. 위에서 제시한 두 가지 버너에 대한 결론을 취합하여 열거하면 아래와 같다.

- 1) 열용량 50,000 kcal/hr, 300,000 kcal/hr의 실험용 연소로에서 높고 균일한 온도 분포를 획득할 수 있었다.
- 2) 열 부하비에 따른 온도 분포는 열부하비에 비례적으로 증가하는 것으로 보였으며 최고 화염 온도는 2250 K 이다.
- 3) Annular Jet burner에서는 최적의 과잉 산소비가 1.2 정도 이고, Flat Jet Burner에서는 1.1이며 이 과잉 산소비에서 최고의 온도 분포를 보였다.
- 4) Annular Jet Burner에서 최적의 연료 노즐은 단공 고속 노즐임을 실험을 통해 알 수 있었고, 단공 저속 노즐은 낮은 연료 출구 속도로 인하여 혼합특성이 저해되었으며 다공 노즐은 화염의 길이가 짧아지는 빠른 혼합 특성을 보였다. 또한 예열온도가 증가함에 따라 화염의 길이가 짧아지고 폭이 증가함을 알 수 있었다.
- 5) Flat Jet Burner의 경우 켈 각도 0°를 이용할 시에 화염 후류의 부상으로 인해 로 상하부의 수직 방향 온도 구배가 급격히 형성이 되나 8°켈의 적용시는 로의 폭 방향 및 수직 방향으로의 온도 구배가 완만히 형성되어 0° 켈의 경우보다 안정적이고 고른 로내 온도 분포를 이루었다.

후 기

본 연구는 한국 에너지 관리 공단의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] Prince, B. and Alekander, G., 1994, "Clean Firing of Glass Furnaces Through the Use of Oxygen," *Ceram. Eng. Sci. Proc.*, 15[2], pp. 159~174
- [2] Marvin, G., 1997, "Philosophy, Design, and Performance of Oxy-Fuel Furnaces", *Ceram. Eng. Sci. Proc.*, 18[1], pp. 1~14.
- [3] Baukal, C. and Dalton, A., 1990, "NOx Reduction with Oxygen-Fuel Combustion," AFRC Symposium, paper 18.
- [4] Brown, J., 1991, "100% Oxygen-Fuel Combustion for Glass Furnaces," *Ceram. Eng. Sci. Proc.* 12[3~4] 202.
- [5] Shamp, D. and Slavejkov, A., 1993, "Oxy-Fuel Firing for Emission Control on a Fiberglass Melter," *Ceram. Eng. Sci. Proc.*, 14[3~4]
- [6] Ross, C. and Eleazer, P., 1993, "Glass: Challenges Pave Road to Opportunities," *Ceram. Ind.*, pp. 28
- [7] Jurick, B. and Schnepfer, C., 1996, "Geometric Considerations for Modeling Oxy-Fuel Glass Tanks," *Glass Ind.*, 77[4], pp. 28~30.
- [8] Carvaiho, M. and Nogueira, M., 1996, "Model-Based Evaluation of Oxy-Fuel Glass-Melting Furnaces Performance," *Ceram. Eng. Sci. Proc.*, 17[2], pp. 121~131.
- [9] Wu, M and Misra, M., 1996, "Design Modeling of Glass Furnaces Oxy-Fuel Conversion Using Three-Dimensional Combustion Models," *Ceram. Eng. Sci. Proc.*, 17[2], pp. 132~142.
- [10] Hoke, R. and Gershtein, V., 1995, "Coupling Combustion Space and Glass Melt Models Improves Predictions," *Am. Xeram. Soc. Bull.*, 74[11], pp.75~86.
- [11] 연소제어용 산소부화농축시스템 개발에 관한 최종보고서, 산업자원부, 1998