

고성능 순산소 연소시스템의 가열특성에 대한 연구

이상준* · 노동순* · 김혁주* · 이은경* · 최규성* · 고창복* · 이승수*

Development of High Performance Intelligent Oxy-fuel Combustion Reheating Furnace

Sang-Jun Lee, Dong-Soon Noh, Hyouck-Ju Kim, Eun-kyung Lee, Kyu-sung Choi,
Chang-Buk Ko and Sung-Soo Lee

ABSTRACT

Improving furnace efficiency is a high priority need for aluminum, glass, steel and other metal casting industries. Oxy-fuel combustion is considered to be one of the most effective method to improve thermal efficiency and reduce NO_x, SO_x and CO₂ emissions for high temperature furnaces. The characteristics of an oxy-fuel flame, in particular its shape, radiation profile and exhaust gas composition are considerably different to those of an air-fuel burner. For this reason, a new approach is needed regarding factors such as burner design, power input levels, number and positioning strategies of burners and also control philosophies. In this paper will discuss the latest developments of high performance oxy-fuel combustion reheating furnace system. This high performance oxy-fuel combustion system will be shown to be technologically superior to other types of combustion systems in the areas of fuel efficiency, emissions and productivity.

Key Words : Oxy-fuel combustion, Reheating furnace

1. 서 론

산소연소에 대하여 국내에서는 산소부화 연소를 중심으로 기반기술에 대한 연구가 수행되어 저NO_x 연소를 위한 기본기술은 확보되어 있는 상태이나 순산소 연소에 대해서는 대학을 중심으로 한 기초연구가 시작된 단계이다.

철강용 열 설비의 고성능화 요소기술은 Fig. 1에 나타내었다.

이중 연소 및 폐열회수 기능을 동시에 수행할 수 있는 고온공기 연소기술은 에너지절약성이 매우 우수하다는 장점이 있는 반면, 고온연소에 따른 질소산화물(NO_x) 발생량이 대폭 증가하는 단점이 있다. 따라서 산성비의 원인이 되는 NO_x의 배출을 저감할 수 있는 연소방법(연소기 헤드의

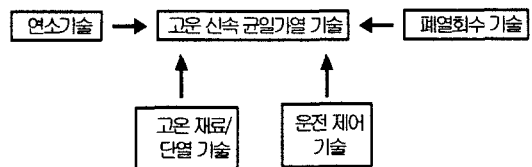


Fig. 1 Essential technique for high performance steel heating furnace

구조)의 도출이 시급하다. 기존의 NO_x 저감 방법 외에 연료직접분사방법의 접목이 효과적인 것으로 보고 되고 있으나, 연료분사위치 및 방향에 관한 정량적인 기술적 자료가 정립되어 있지 못한 실정이다. 아울러 연소기 용량, 적용될 공업로 형식 및 구조적 특성을 고려한 구조의 최적설계 기술/신속가열기술/운전기술 역시 확립되지 않은 실정이다. 실 조업과 비교될 수 있는 조건에 근거한 database화가 절실히 요구된다.

* KIER, 한국에너지기술연구원

† 연락처, sjlee@kier.re.kr

한편 기후변화협약에 따른 온실가스 저감 의무 부담이 이행될 경우 국가 산업활동에 상당한 영향을 초래하게 되므로 환경, 경제 및 기술적으로 국가적 차원에서 대응방안을 마련하여야 한다. 즉 이러한 기술 개발의 성패 여부에 따라 기존 설비들을 포함하는 각종 연소시스템 가동 중단은 물론 수출에 타격을 받을 것은 당연하다. 또한 세계적인 기술 수준에 비추어 볼 때 현 시점에서 모두가 동등한 입장에 있다는 측면에서 기술의 선점은 바로 타국에 대한 정치·경제적 우위의 선점을 기대할 수 있어 국가적 차원에서의 기술 개발 투자가 필수적이라 아니할 수 없다. 또한 연소효율을 제고하여 에너지 비용을 절감할 수 있고, 에너지의 밀도가 높기 때문에 생산성의 향상을 가져올 수 있으며, 청정연료와 순산소를 연소시키므로 대기오염물질의 배출이 거의 없어 배연가스의 후처리비용을 절감할 수 있다.

이와 같이 산소연소 기술은 이론적으로 볼 때 경제적으로나 기술적으로 얻을 수 있는 이점으로써 상당한 잠재력을 내포하고 있다.

특히 산소연소에 있어서 화염특성, 화염형태, 및 복사열 변화 그리고 배기가스의 구성에 있어서 공기연소와는 완전히 다른 양상을 가지고 있다.

산소연소 기술은 생산성향상, 에너지효율의 증가 그리고 배출가스의 감소 등 시스템 전반에 향상을 가져오는 반면, 산소사용에 따른 비용부담 요인이 되나 산소제조비용의 저가화 및 CO₂처리 비용 등을 고려하면 향후 에너지 다소비 철강 및 고온공정 열설비에 산소연소기술의 적용은 에너지절감 및 CO₂ 회수의 경제성 면에서 수요가 증가할 것으로 기대된다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치 및 실험조건

본 연구에서 사용된 순산소 연소 가열 시뮬레이터의 연료 및 산화제 공급계통과 제어장치의 구성을 Fig. 2에 나타내었으며, Fig. 3은 로 시뮬레이터의 전경을 보여준다. 시뮬레이터는 기본적으로 강제 용량 0.2톤으로 설계되었으나, 작은 크기의 강재는 1.0톤까지도 장입할 수 있었다.

이번 실험은 강제 용량 0.6톤을 장입하여 공기 및 순산소 연소에 있어서 시뮬레이터 내부 온도 특성 변화 및 장입된 강재의 승온 특성과 분위기 온도의 변화를 측정 비교하였다. 연료는 중남도시가스를 사용하였으며, 연료유량이 약 12 m³/hr와 15.7m³/hr 인 경우, 배가스 중의 산소농도를 2%로 유지하는 조건에 대하여 공기연소와 산소연소시 강제 승온 패턴을 비교하였다.

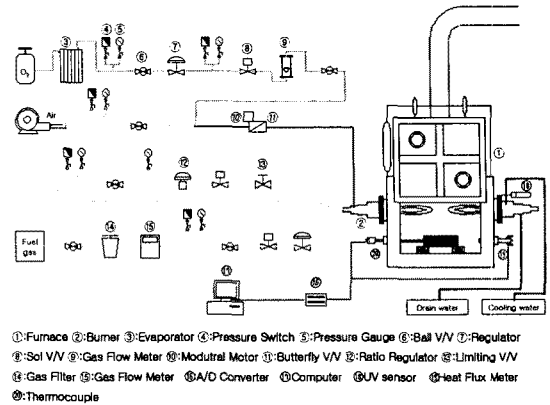


Fig. 2 Schematic drawing for the simulator

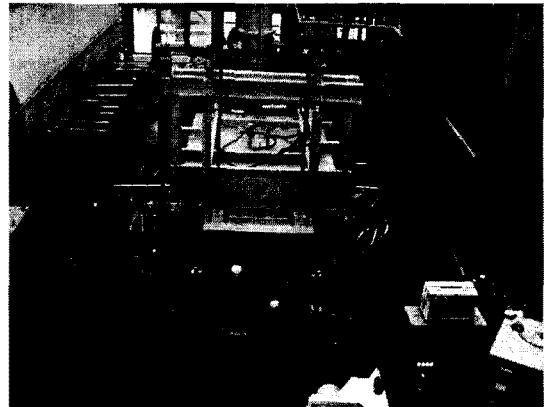


Fig. 3 Complete view of the actual simulator

로내 분위기 온도는 R-type 열전대를 로의 천장 중앙부에 1개, 우측벽 상단부에 2개, 중간부에 2개, 좌측벽 하단부에 1개 그리고 배기가스 온도 측정을 위해 연통부에 1개 thermocouple를 각각 설치하였다.

실험에 사용된 버너는 공기와 산소에 겸용할 수 있도록 개발되었으며, 액체산소를 기화시킨 순산소와 송풍기를 이용하여 대기 중의 공기를 사용하였다.

버너구조는 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 산소연소의 노즐형태(상단 왼쪽)와 공기연소시의 노즐 형태를 달리 하였으며, 연료는 노즐의 중앙에서 그리고 산화제는 1, 2차 형태로 공급된다. 또한 버너는 정 중앙에서 약 70cm 편심된 곳에 위치하고 있어서 중앙을 중심으로 회전함으로써 버너를 하단부, 중단부 그리고 상단부로 그 위치를 달리 할 수 있도록 설계되었으며, 그 위에 파일럿 버너와 점화 여부를 판단하기 위하여 UV센서도 장착되었으며, 본 실험에서는 하단부 그리고 중단부에서 실행되었다.

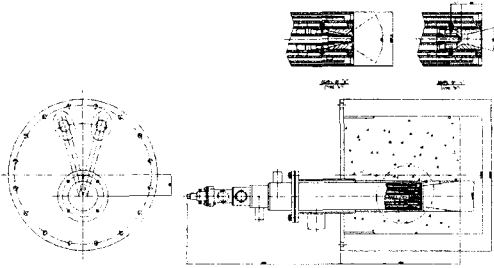


Fig. 4 Schematic of burner and nozzles

Fig. 5는 본 실험에 사용된 강재(200x200x600 mm)를 표시한 것으로서 강재 내부의 온도변화를 측정하기 위하여 3 곳(강재의 중간부, 하단부 그리고 선단부)의 온도 측정점을 만들고 각 각 1개의 K-type 열전대를 설치하여 측정하였다. 또한 로내의 고온으로 인한 열전대의 보호를 위하여 세라쿨(ceracool)이라는 단열재료를 사용하였다. 배기가스중의 O₂, CO 및 NO_x 농도는 SIEMANS사의 ULTRAMAT23 가스분석기를 사용하였다.

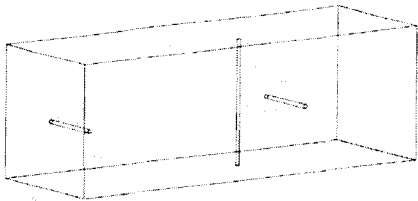
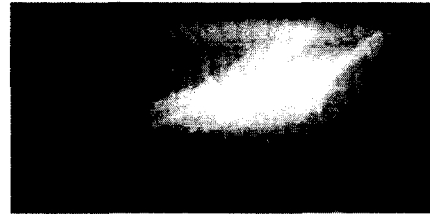


Fig. 5 Thermocouples positions for steel material

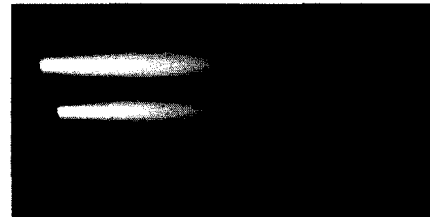
3. 실험 결과 및 고찰

Fig. 6에서는 대표적인 공기 그리고 산소 연소 화염의 형태를 보여주고 있다. Fig. 7은 산소를 사용하여 강재를 가열하고 있는 시뮬레이터의 내부를 촬영한 사진으로서 (a)는 가열 초기단계, (b)는 가열 종료단계의 로 내부 모습을 보여주며, 종료단계에서는 초기에 비해 화염의 길이가 작아지고 로 내 분위기 온도와 강재 온도가 거의 같아져 물체가 잘 구별되지 않음을 알 수 있다.

Fig. 8에서는 버너위치가 중간에 위치해 있을 때, 연료유량에 따른 공기와 산소 연소의 온도 변화를 비교하여 나타내었다.



(a) Air

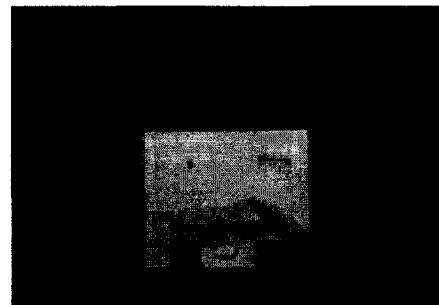


(b) Oxygen

Fig. 6 Flame formation by oxidant

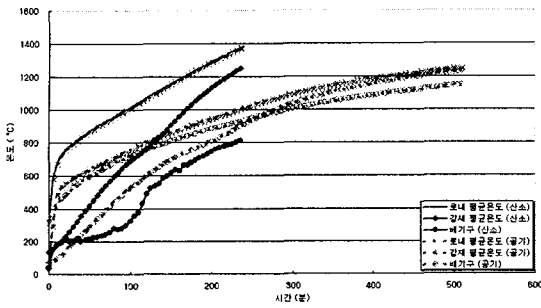


(a) Early stage of heating

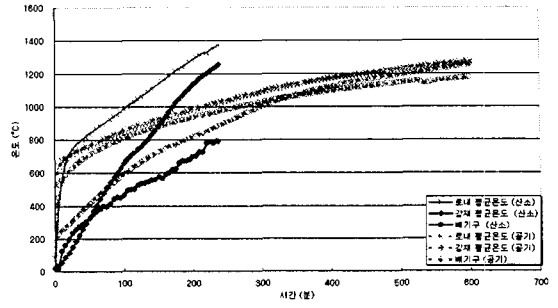


(b) Final stage of heating

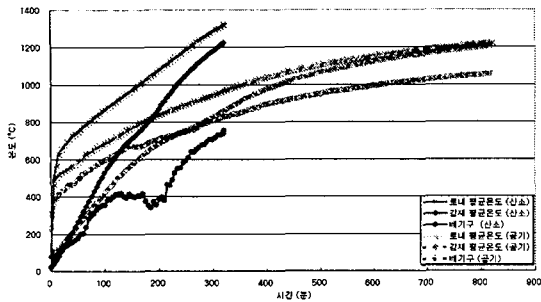
Fig. 7 Overview of simulator with heating steel material



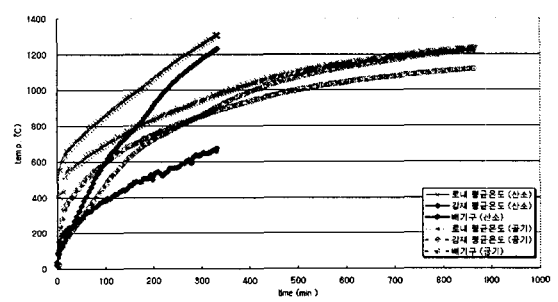
(a) Fuel rate : 15.7 m³/hr



(a) Fuel rate : 15.7 m³/hr



(b) Fuel rate : 12 m³/hr



(b) Fuel rate : 12 m³/hr

Fig. 8 The effect of oxidants (burner location - middle)

Fig. 9 The effect of oxidants (burner location - bottom)

Table 1에서 나타난 시간은 강제 평균온도가 1200°C까지 도달하는 시간을 나타낸 것이며, 배기가스 온도는 앞에서 언급한 바와 같이 배기구에 K-type 열전대를 설치하여 측정된 값이다.

Table 1 Comparison for heating characteristics of Fig. 8

연료량	15.7 m ³ /hr		12 m ³ /hr	
	승온시간	배가스 온도	승온시간	배가스 온도
산소	220분	782 °C	310분	731 °C
공기	455분	1116 °C	795분	1050 °C

거의 없다는 것을 알 수 있다.

각 연료 유량에 따른 산소와 공기연소에서 강제 평균온도를 비교하여 보면, 산소 연소에서 강제 가열 시간이 약 60%정도 단축된 사실을

Table 2 Comparison for heating characteristics of Fig. 9

연료량	15.7 m ³ /hr		12 m ³ /hr	
	승온시간	배가스 온도	승온시간	배가스 온도
산소	215분	780 °C	315분	646 °C
공기	515분	1150 °C	790분	1100 °C

Fig. 9에서는 버너위치를 하부 쪽으로 하여, 연료유량에 따른 공기와 산소 연소의 온도 변화를 나타내었다.

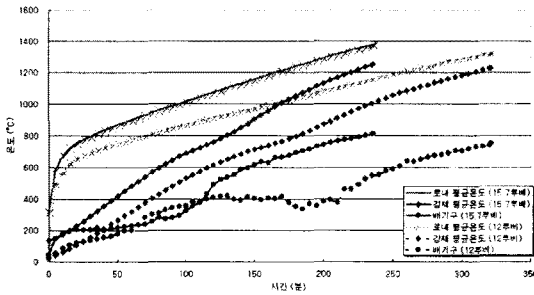
Table 2에서는 Fig. 9에서 나타난 온도 승온 특성의 데이터 값들을 보여준다.

Table 2와 Table 1에서 알 수 있듯이, 같은 산화제에서는 버너위치에 따른 온도 승온 특성은

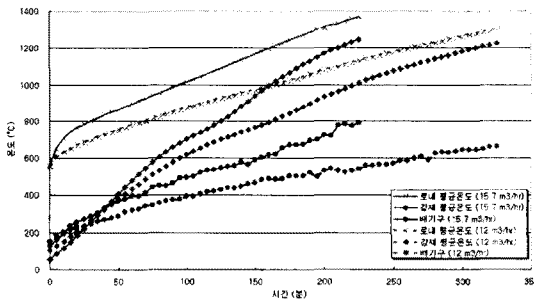
알 수 있으며, 이것은 곧 에너지 절약과 직접적인 관계를 보여준다. 또한 운영비 측면(operating cost)으로 볼 때, 공기 연소 시, 연료비용이 약 64,000원(현 시세가 기준)정도 이며, 산소 연소 시에는 산소가격 24,300원과 연료가격 24,800원 정도로써 전부 약 49,100원의 비용이 든다. 즉 약 23%정도의 운영비 절감 효과가 있으며, 산소 연

소를 이용 시, 강제 승온 시간의 절감으로 나타나는 생성성의 증대 또한 공기 연소보다 그 효과는 크다고 할 수 있다.

Fig. 10에서는 연료유량에 따른 산소 연소의 강제 승온 특성을 보여준다.



(a) Burner location : middle



(b) Burner location : bottom

Fig. 10 The effect of fuel rate for oxy-fuel

같은 버너위치에서 연료유량에 따른 강제 승온에 대한 시간 차이가 있는 것은 당연한 현상이나, 같은 연료 유량에 있어서 버너 위치에 따른 강제 승온에는 거의 차이가 없다(Table 3 참조).

Table 3 Comparison for heating characteristics of Fig. 10

버너위치	middle		bottom	
	승온시간	배가스 온도	승온시간	배가스 온도
15.7 m ³ /hr	220분	782 °C	215분	780 °C
12 m ³ /hr	310분	731 °C	315분	646 °C

위에서 언급했듯이, 예를 들어, 연료 유량 12 m³/hr에서 불 때, 강제 승온 시간에서는 거의 똑같은 결과를 보여주지만, 배기가스 온도에서는

다소 차이를 보여준다(Table 3). 오히려 연료 유량이 작은 12 m³/hr에서 배기가스의 온도가 15.7 m³/hr의 그것보다 낮게 나타났다.

이것은 화염과 강재의 형태가 같은 조건이고, 복사열이 산소 연소에 있어서 강제 승온에 많은 영향을 주므로 본 실험 설비에 있어서 버너위치에 따른 효과가 크게 나타나지 않았다.

배기가스 온도로 본 이러한 현상은 이번 실험에 잠입된 강재 용량이 0.6톤에 있어서 12 m³/hr의 연료유량이 사용되었을 경우 강재에 전달되는 열량(enthalphy)의 효과가 그보다 많은 연료량을 사용했을 때보다, 비록 시간은 다소 지연될 수 있더라도, 더욱 크다는 것을 알 수 있다.

즉 15.7m³/hr의 연료 유량으로는 0.6톤 이상의 강재 장입 시에 그 열량의 효율성이 더욱 증가될 것으로 예상된다.

특히 Table 1에서 공기연소의 경우, 15.7 m³/hr에서의 배기가스의 온도는 강제온도(1200°C)에 가까운 1116°C를 나타내는데, 산소연소와 비교하여 불 때, 그만큼 많은 열량의 손실이 있음을 알 수 있다.

가스 분석기로 배기가스의 성분을 분석해 보면, 산소 연소의 경우 CO와 NO는 0 ppm 그리고 O₂는 약 1.5 ~ 2%로 나타나며, 공기 연소의 경우, CO와 NO는 각각 7ppm과 74 ppm 그리고 O₂는 약 1.5 ~ 2%였다.

4. 결론

본 연구를 통해서 시뮬레이터 시운전, 순산소 연소시스템 안정화 및 제어장치 보완과 순산소 연소가열 시 산화재와 버너위치에 따른 로내 온도 분포 및 승온 특성을 측정하고 이에 대한 데이터를 확보하였다.

가열로 시뮬레이터를 이용하여 현재까지 수행된 성능실험을 통해서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 본 가열로 시뮬레이터에서 공기 대비 순산소 연소 시, 강제온도 1200°C 도달 시간이 약 60% 단축되었다. 이것은 생산성 향상에 있어서도 더욱 효율적임을 보여준다.

2. 강제 승온 시간의 단축으로 인한 에너지절감과 운영비용(operation cost) 측면으로 볼 때, 공기 대비 약 23%의 운영비용 절감을 가져왔다. 또한 가까운 미래에 산소 제조비용이 낮아지면, 그 효율성은 더욱 커질 것으로 예상된다.

3. 같은 연료유량을 사용 하였을 때, 버너위치에 따른 강제 승온 특성은 별 차이가 없었으며, 공기연소에 있어서 로내에서의 대류가 전체적인 열전달에 있어서 중요한 역할을 한다. 반면에 산소 연소의 경우, 배출가스에서 나오는 수증기와

CO₂에 의한 높은 복사열전달의 효율은 열전달에 있어서 주요 근원(source)이 된다는 것을 이번 실험을 통해서 확인하였다.

4. 순산소 연소 시, 배기가스 온도 특성을 비교해 볼 때, 연료유량 15.7m³/hr에서는 보다 많은 강제 용량이 본 가열로 시플레이트에서 가능할 것으로 예측된다.

5. 또한 순산소 연소의 경우, 강제 스케일 (scaling)의 생성 두께가 공기 연소의 그것보다 거의 50%정도로 작았으며, 이것으로 미루어 볼 때, 순산소 사용 시, 생산 품질 향상을 가져올 것으로 기대된다.

6. 위와 같이 고성능 지능화 순산소 연소시스템을 현재 병행하고 있는 로제/제어, 연소기 및 제촉 기술 등을 조합하여 고성능 국산화 설계기술을 확립하여 기술 보급 확대를 통해서 국가 에너지절약 및 효율성에 상당히 기여를 할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] "Proceeding of Forum on High Performance Industrial Furnace and Boiler", NEDO, JSUP, JIFMA, JSIM, March 1999.
- [2] A. Brown, T. Ekman and C. L. Axelsson, "The Development and Application of Oxy-fuel technology for Use in Heating Furnace Applications", AFRC/JFRC/IEA 2001 Joint International Combustion Symposium, 2001.
- [3] O. Delabroy, et al. "Oxycombustion for Reheat Furnace", AFRC/JFRC/IEA 2001 Joint International Combustion Symposium, 2001.
- [4] L. E. Bool, "Oxygen Enhanced Combustion of Biomass and Biosolids", AFRC/JFRC/IEA 2001 Joint International Combustion Symposium, 2001.
- [5] O. Marin, et al., "Oxygen Enrichment in Boilers", AFRC/JFRC/IEA 2001 Joint International Combustion Symposium, 2001.
- [6] T. Suwa, "Overview of Application Technologies using Oxy-Fuel Combustion in Japan", AFRC/JFRC/IEA 2001 Joint International Combustion Symposium, 2001.
- [7] C. E. Baukal, "Oxygen-enhanced Combustion", CRC Press, 1998.