

# 순산소 연소를 이용한 연소로 가열특성에 관한 실험적 연구

정유석\* · 이은경\* · 고창복\* · 노동순\* · 장병록\*\* · 한형기\*\*

## A Study on the Furnace Heating Characteristics Using Oxy-fuel Combustion

Yu-Seok Jeong\*†, Eun-Kyung Lee\*, Chang-Bok Ko\*, Dong-Soon Noh\*,  
Byung-Lok Jang\*\*, Hyung-Kee Han\*\*

### ABSTRACT

The oxy-fuel combustion heating characteristics is investigated experimentally by measuring furnace and steel temperature variations for batch type furnace simulator with a specially designed low NO<sub>x</sub> oxy-fuel burner. Economics of using oxy-fuel combustion is confirmed and, the furnace and steel temperature variations for different heating conditions are compared to deduce optimal heating control pattern for energy savings and rapid uniform heating. High CO<sub>2</sub> concentration (> 80-90%), low NO<sub>x</sub> (< 40ppm) and CO (< 10ppm) are measured in the flue gas. Temperature differences (< 30°C) inside the furnace and steel are reduced relatively by increasing the burner jet momentum.

**Key Words** : Oxy-Fuel Combustion, Reheating furnace, Low NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub> Capture

### 1. 서 론

화석연료의 연소를 통한 직접가열방식을 사용하는 산업공정중 대표적인 에너지다소비 공정으로서 철강공정을 꼽을 수 있다. 제반 철강공정에서 사용되는 핵심 열설비인 공업로의 에너지사용비중은 해당 공정의 약 80%이상이고, 국내의 경우 열효율은 25~30% 수준으로 선진국의 평균 40%에 비하여 낮을 뿐만 아니라 설비운용/관리의 효율성도 매우 열악하여 개선의 여지가 많다. 열설비의 열효율 향상은 상당량의 에너지사용절감 및 CO<sub>2</sub> 저감과 직결됨은 주지의 사실이며, 에너지절약형 연소기술 뿐만 아니라 설비의 핵심기능인 신속 균일가열성능도 최종제품의 품질 및 생산성과 직결되므로 최종제품의 에너지원단위에 큰 영향을 주게 된다.

특히 공업로의 열효율 향상을 위해서는 고효율 연소기기, 연소제어기술, 전열효율 향상기술 및 고효율 가열기술 등의 종합적인 개발과 보급이 필요하며 이들 기술의 근간은 무엇보다도 고성능 연소기술의 개발이라 할 수 있다. 최근 꾸준히 연구되고 있는 에너지절약형 축열식 연소기술 [1,2]의 실용화가 진행되는 가운데 고온 NO<sub>x</sub> 생성저감과 생산성 향상 및 CO<sub>2</sub> 저감 또는 고농도 CO<sub>2</sub> 회수를 동시에 만족시킬 수 있는 산소연소 가열기술에 대한 관심이 증가하고 있다.[3-9] 산소연소는 산화제로서 기존의 공기 대신 순산소를 사용함으로써 배가스 손실을 줄이고 전열효율을 증대시키는 동시에 고농도 CO<sub>2</sub>를 유지할 수 있으므로 회수 경제성도 확보할 수 있는 특징이 있다.[10]

본 연구에서는 철강공정용 열설비의 생산성 및 청정성 확보와 CO<sub>2</sub> 배출저감을 위한 산소연소 가열기술의 실용화를 목표로 저 NO<sub>x</sub> 산소연소기 개발과 이를 이용한 순산소 연소 단조가열로의 강제가열특성에 관한 실험적 연구를 수행하여 기초적 가열제어 방법을 도출코자 하였다.

\* 한국에너지기술연구원

\*\* (주)에스에이씨 기술연구소

\*† 저자연락처, ysjeong@kier.re.kr

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

본 실험은 Fig. 1과 같이 가열시물레이터 본체, 연소기, 연료와 산화제 공급 및 제어장치 그리고 배가스 측정 장치로 이루어져있다.

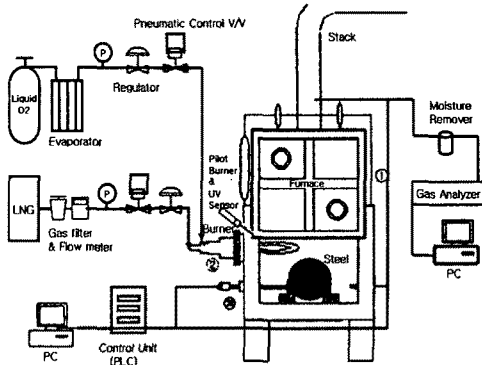


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup.

시물레이터는 강제용량 1.5톤까지 장입하여 가열할 수 있도록 설계되었다. 장입된 강재의 크기와 연소기의 화염길이를 고려하여 가열실 체적 및 연소부하를 결정하였고 로체는 노벽으로부터 열손실을 최소화하기 위해 그 내벽에 300mm 두께의 세라믹모듈로 단열처리를 하였다[6].

가열로 정면은 피열물의 장출입이 가능하도록 상하개폐식 door를 설치하였으며 노내 분위기를 직접 확인하기 위한 가시창을 설치하였다. 그리고 가열시 door틈새로 외부공기유입을 차단하기 위해 벽체와 약간의 경사를 갖도록 하여 기밀성을 유지하도록 하였다. 그리고 시물레이터 내부의 온도변화 특성을 파악하고자 로 상단 천정부와 우측 벽에서 로내 분위기 온도를, 연소로 후단에는 배가스 온도를 측정하기 위해 R-type의 Thermocouple을 설치하였다.

장입된 강재는 직경 0.5m, 길이 1.0m의 원통형 강재(SM45C)를 사용하였고 중량은 1.45 톤이다. 강재의 정확한 온도이력을 파악하고자 강재 내부 중심과 표면에서 중심축방향으로 1/4 지점에 K-type의 thermocouple을 삽입한 후 세라믹 울(wool)로 단열처리를 하여 온도를 측정하였다.

### 2.2 실험조건 및 방법

실험에 사용한 버너는 Fig. 2와 같은 구조적 형태를 기본으로 하는 CO<sub>2</sub> 재순환 산소버너로써, CO<sub>2</sub> 노즐 내부에 O<sub>2</sub> 노즐이 편심으로 설치되었고 O<sub>2</sub> 노즐 내부 연료노즐을 역시 편심 설치하여 각각의 노즐이 독립적으로 회전함으로써 다양한 화염형상을 얻을 수 있을 뿐만 아니라 복사열전달량을 증가시킬 수 있게 설계되었다. 본 실험에서는 CO<sub>2</sub> 공급을 차단하고 Table 1의 세 가지 경우에 대하여 가열실험을 수행하였다. 여기서 버너 A는 21.2mm의 내경을 갖는 O<sub>2</sub>노즐 내부에 11.4 mm 내경을 갖는 연료노즐을 조합한 구조이며, 버너 B는 버너 A의 O<sub>2</sub> 노즐의 내경을 19.4 mm로 줄여 O<sub>2</sub> 유속을 증가시키는 동시에 연료노즐선단을 O<sub>2</sub> 노즐선단으로부터 20mm 돌출시킨 구조를 갖는다. 버너 C는 버너 B 노즐의 연료 하단부를 노즐길이 방향으로 절개하여 연료 분사각도를 넓힌 경우이다.

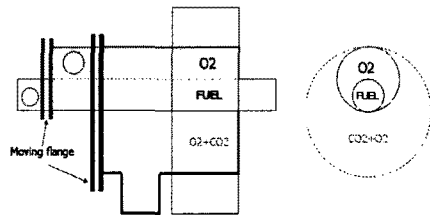


Fig. 2 Concept of single flex burner.

Table 1. Experimental conditions.

	Fuel Flow Rate [m <sup>3</sup> /hr]	Oxygen Flow Rate [m <sup>3</sup> /hr]	Burner type
Case I	16	34	A
Case II	12	26	A
Case III	8	17	C

실험에 사용된 연료는 충남도시가스를 사용하였고 산소는 액체산소를 기화시켜 각각 비례조절밸브를 이용하여 공급량을 제어하였다.

배가스는 가열실 후단 배기구에서 포집하여 TESTO 360 분석기를 이용하여 O<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> 및 NO<sub>x</sub> 농도를 측정하였다. 분석기는 실험을 수행하기 전에 표준가스를 사용하여 교정하였다.

Fig. 3은 가열실 내부를 1300℃까지 승온시킨 상태를 나타낸다. 화염은 우측 상단에 유지되고 있으나 연소실 벽면 복사광에 의한 상쇄효과로 화염의 휘도는 감소됨을 볼 수 있다. 가열에 따른 강재 표면의 산화 스케일을 볼 수 있다.

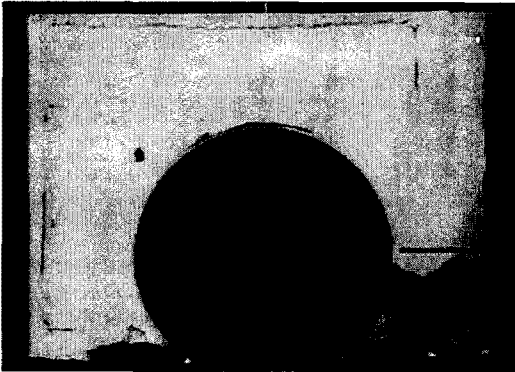


Fig. 3 가열상태의 강재(1300℃)

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 산소연소가열의 경제성

순산소 연소시 대두되는 경제성을 판단하기 위하여 1톤-강재를 1,200℃까지 단순 가열할 경우 공기연소 대비 승온시간을 Fig. 4에 비교하였다. 동일한 시간당 가열량 (연소부하) 조건에서 공기연소의 경우 1,200℃ 승온에 약 800분이 소요되는 반면 산소연소의 경우는 약 310분이 소요되어 약 61%의 가열시간 단축 즉, 에너지소비절감이 가능함을 보이고 있다. 한편 산소연소시 소비되는 산소량 (2.5 m<sup>3</sup>-O<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>-fuel)을 고려한 경제성을 비교한 결과 공기연소 대비 약 37%의 운전비용 (연료비용+산소비용) 절감이 확인되었다. 가열시간의 단축은 생산성 향상과 생산량 변동 추종성 향상 및 강재 표면의 스케일 생성저감을 의미하지만 상대적으로 강재 내부온도의 불균일로 인한 품질저하로 이어질 수 있으므로 강재의 용량 및 형태와 가열실 구조를 고려한 신속 균일가열 패턴의 도출은 중요하다.

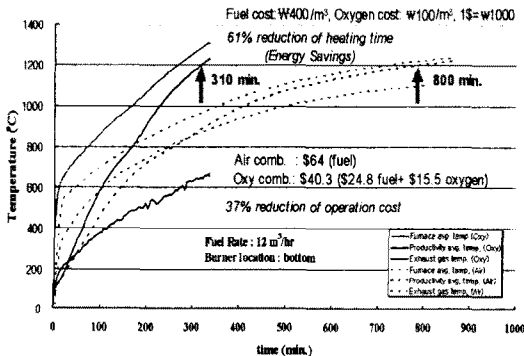
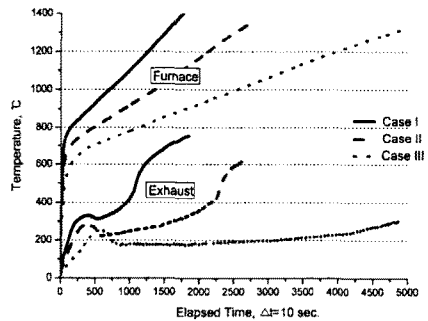


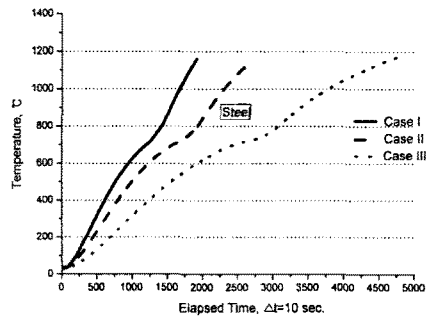
Fig. 4 공기연소와 산소연소의 가열특성 비교

#### 3.2 승온특성 및 온도 변동율

시간당 가열량에 따른 승온특성을 알아보기 위하여 Case I, II 및 III에 대하여 가열 경과시간에 따른 가열실 평균온도, 강재 평균온도 및 배가스 온도를 Fig. 5에 비교하였다. 가열실 평균온도는 가열초기에 급상승한 후 각각 일정한 온도구배를 유지하면서 상승하고 있으며, 강재의 평균온도 역시 변태온도 (760℃)를 기준하여 각각 일정한 온도구배를 갖고 승온되고 있다. 전반적으로 일정온도까지의 승온율은 시간당 가열량에 비례함을 보여 준다. 특히 배가스 온도는 가열 경과시간에 따라 승온되다가 감소된 후 재 승온되는 경향을 보이고 있고 재 승온시 온도구배는 시간당 가열량에 비례함을 보여 준다.



(a) 가열실 승온 및 배가스 온도 특성

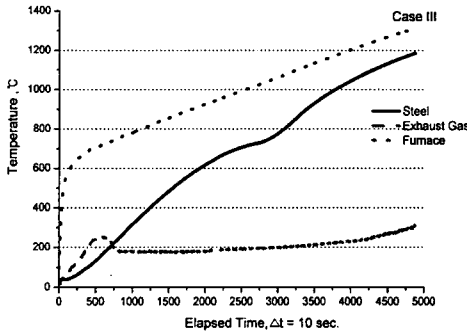


(b) 강재 승온 특성

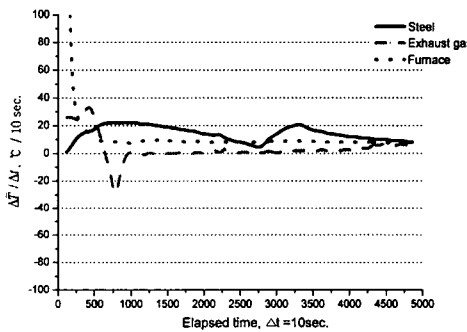
Fig. 5 가열경과시간에 따른 승온특성

이러한 배가스 온도의 변동특성을 규명하기 위하여 Case III에 대한 각 온도변동율을 Fig. 6에 비교하였다. 가열초기 단계에서 상승하던 배가스 온도가 감소 후 재 승온되는 시점은 강재의 온도변동율이 최대를 유지하는 시점과 일치하고 있으

며, 이러한 사실은 Case I 및 Case II의 경우에도 확인할 수 있다. 이러한 현상은 강재로의 전열량이 증진되어 가열실내 잉여열량이 감소됨으로써 배가스 온도의 저하로 나타나기 때문인 것으로 판단된다.



(a) 평균온도 변동



(b) 평균온도 변동율

Fig. 6 가열경과시간에 따른 온도 변동율

한편 강재의 가열에는 최종제품의 용도에 따라 주기적인 시간당 가열량 및 가열시간을 제어하는 가열패턴이 적용된다. 즉, 일례로 고부하 단시간 가열 및 저부하 장시간 가열이 반복되는 가열제어가 요구된다. 그러나 피열물인 강재의 온도는 현장에서 실시간 정확한 온도측정이 불가능하므로 풍부한 조업 경험에 의해 가열패턴을 적용하고 있다. 따라서 산소연소가열인 경우에 있어서도 정성적 승온특성을 일반화함으로써 가열패턴 제어 기준을 도출할 필요가 있다.

Fig. 5에서 강재량이 동일한 경우, 가열실 평균온도 및 강재의 평균온도 승온율은 시간당 가열량에 비례함을 알 수 있었다. 즉, 일정 온도까지 도달시간은 시간당 가열량에 반비례하고 있다. 가열제어에 있어서 가열량과 가열시간은 매우 중요한 제어변수로서 상호 반비례적인 관계를 유지

하게 된다. 따라서 최소의 에너지 투입으로 최단 시간에 요구온도까지 승온시키기 위한 최적의 가열패턴을 도출하기 위해서는 강재의 승온특성을 일반화 할 수 있는 방법이 요구된다. 이를 위하여 Fig. 5의 승온결과를 총 투입열량에 따른 승온특성으로 변환하여 비교하였다. 즉, 각 조건에서의 시간당 가열량을 고려하여 가열 경과시간을 그에 상응하는 누적가열량으로 변환하고 가열실 분위기 및 강재의 평균온도 승온특성을 Fig. 7에 비교하였다. 여기서 가열실 분위기 평균온도 승온특성은 누적가열량에 비례하여 증가하고 있으나, 강재의 경우는 변태온도(760°C)까지는 시간당 가열량과는 무관하게 누적가열량에 따라 승온특성이 일정함을 보이고 있으며 변태온도 이상에서는 시간당 가열량에 비례적으로 승온되고 있다.

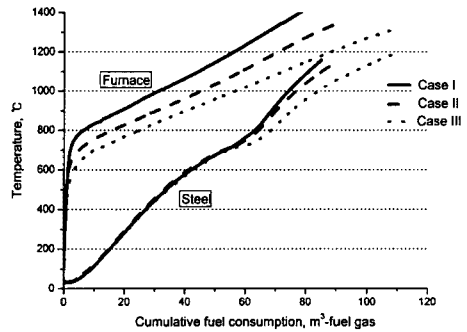


Fig. 7 누적가열량에 따른 승온특성

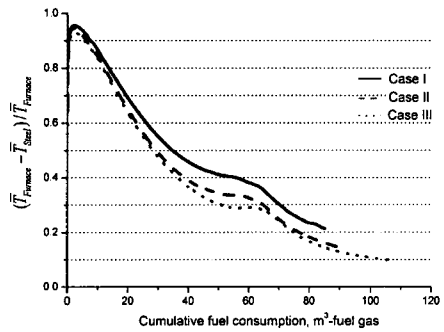


Fig. 8 누적가열량에 따른 가열실-강재 온도차

아울러 Fig. 8에 보인 바와 같이, 일반적으로 가열실 평균온도는 강재의 평균온도보다 높고 강재 평균온도와의 편차는 전반적으로 누적가열량(가열 경과시간)이 증가할수록 감소되고 있으나, 누적가열량이 동일한 경우에는 시간당 가열량이 큰 경우에 있어서 편차가 상대적으로 큼을 보여 준

다. 여기서 가열실 평균온도와 강제 평균온도와 의 편차가 상대적으로 크다는 사실은 가열량이 강제의 수열량보다 상대적으로 커서 과잉의 열량이 투입됨을 의미하고 따라서 배가스의 온도가 높아 배기 손실이 크다는 것을 의미하므로(Fig. 5) 가능한 한 편차를 줄일 수 있는 가열패턴이 요구된다.

이러한 결과로부터, 생산성과 관련되어 제한된 총 가열시간을 고려할 때, 변태온도 이하에서는 가급적 시간당 가열량을 크게 하여 승온시간을 단축하고 변태온도 이상에서는 가열실의 최고 허용온도 및 잉여 가열시간을 고려하여 시간당 가열량을 주기적으로 변동 제어하는 방법을 고려할 필요가 있음을 알 수 있다. 아울러 모든 경우에 있어서 가열실의 승온율은 초기 가열과정을 제외하고는 일정하게 유지하는 반면, 배가스의 온도는 가열 경과시간에 따라 변동되고 있으며 특히 일정 구간에서는 온도변동이 상대적으로 작다는 결과로부터 시간에 따른 배가스 온도변동이 가열실의 온도변동율보다 클 경우에 배가스 손실을 저감하기 위하여 시간당 가열량을 저하시키는 제어패턴도 고려될 수 있다.

### 3.3 가열실 및 강제내 온도편차

한편 강제가열에 있어서 균일가열은 강제의 품질에 미치는 영향이 크므로 시간당 가열량이 온도 균일화에 미치는 영향을 살펴보았다.

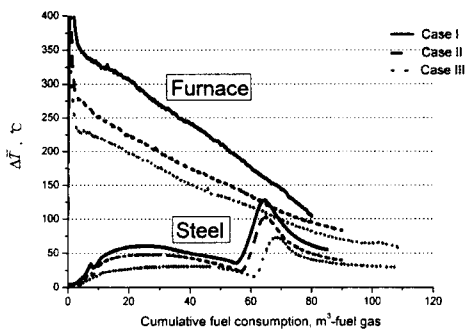


Fig. 9 누적가열량에 따른 온도편차

Fig. 9는 누적가열량에 따른 가열실 상하부 분위기 온도편차 및 강제의 중심과 표면의 온도편차를 비교한 것이다. 일반적으로 최종 목표온도에 도달할수록 온도편차는 작아지며, 누적가열량이 동일하더라도 시간당 가열량이 큰 경우에 온도편차가 상대적으로 커짐을 보여 준다. 일반적으로 연소기 용량이 동일한 경우, 시간당 가열량이 크면 연료-산화제의 분사 운동량이 커져서 가열실

내의 가스혼합이 촉진되는 효과를 기대할 수 있으나, 본 실험의 경우에는 시간당 가열량이 커짐에 따라 가열실내 국부적 온도상승이 가열실 분위기 가스의 혼합 및 강제로의 대류 전열율보다 상대적으로 커지는데 기인하는 것으로 판단된다. 아울러 시간당 가열량이 동일한 경우에 연소기에서의 분사 운동량이 가열실 분위기 가스의 혼합 및 강제의 온도편차에 미치는 영향을 알아보기 위하여 Case II 조건의 동일한 가열량에 대하여 2대의 저부하 연소기를 사용한 경우와 1대의 고부하 연소기를 사용한 경우에 대하여 Fig. 10에 비교하였다. 즉, 2대의 A 버너를 사용한 경우, 연료 분사유속은 약 15m/sec, 산소 분사유속은 약 27m/sec 이었고, 1대의 B 버너를 사용한 경우 연료유속은 약 30m/sec 이고 산소의 유속은 약 108m/sec 이었다. 따라서 연소화염의 운동량을 크게 증가시킨 경우이다. Fig. 10에서 연소화염의 운동량을 증가시킨 경우에 가열실 분위기 온도편차는 전 가열과정에 대하여 감소되고 있으며, 강제내부의 온도편차 역시 변태온도 이전까지 가열과정에서는 상대적으로 작아짐을 보여 준다.

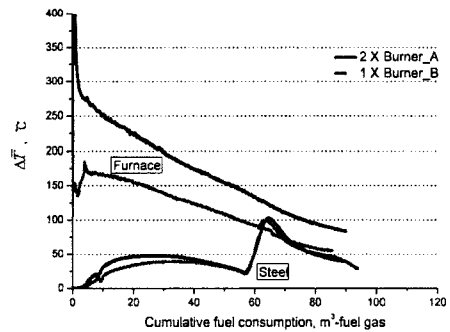


Fig. 10 연소화염 운동량에 따른 온도편차

### 3.4 가열로 배가스 특성

시간당 가열량 (연소부하)이 일정한 경우 (Case II), 버너형태 및 노즐 분사유속이 상이한 버너 A, B 및 C에 대하여 배가스 특성을 Fig. 11에 비교하였다.

가열실 평균온도가 1300°C 유지될 때 배가스 중 CO<sub>2</sub> 농도는 80-90% 이상 유지하고 있으며, NO<sub>x</sub> 및 CO는 각각 최대 40ppm 및 10ppm 미만을 유지하고 있다. NO<sub>x</sub>는 노즐 분사유속이 크면 (버너 A와 B) 감소되는 경향을 보이고 연료분사 형태의 변경 (버너 B와 C)으로 다소 증가되는 경향을 보이거나 산소분사유속 증가로 (버너 A와 C) 감소되는 결과를 보인다. 한편 CO는 모든 경우에 있어서 10 ppm 미만을 유지하여 연소효율

은 매우 우수함을 알 수 있다.

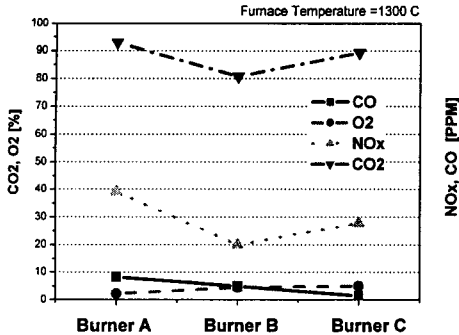


Fig. 11 버너에 따른 배가스특성

이상의 결과를 종합하면, 소재의 품질과 생산성 측면에서 강제 가열패턴은 변태온도 이하에서는 가급적 시간당 가열량을 크게 하여 승온시간을 단축하고 변태온도 이상에서는 가열실의 최고 허용온도 및 잉여 가열시간을 고려하여 시간당 가열량을 주기적으로 변동 제어하는 방법을 고려할 필요가 있다.

이러한 기초적 결과를 바탕으로 향후 실용급 10톤/charge용량의 단조로에 확대 적용하여 가열제어기술로서의 실용성을 검증할 계획이다.

### 4. 결론

순산소 연소를 이용한 가열실 온도와 강제 온도 및 배가스 온도 변동특성 실험을 통해 다음과 같은 결과를 도출하였다.

1) 동일한 연소부하조건에서 산소연소의 경우는 공기연소 대비 약 61%의 가열시간 단축과 약 37%의 운전비용의 절감이 확인되었다. 따라서 산소연소가열에 따른 생산성 향상 및 경제성을 확인할 수 있었다.

2) 전반적으로 가열실 온도 및 강제온도의 승온율은 시간당 가열량에 비례함을 보였다. 특히 배가스 온도는 가열 경과시간에 따라 승온되다가 감소된 후 재 승온되는 경향을 보이고 있고 재 승온시 온도구배는 시간당 가열량에 비례함을 보였다.

3) 순산소 연소가열에 있어서도 초기 고부하-후기 저부하 가열패턴 및 고 운동량 연소기 적용 등을 통해 배가스 손실의 최소화와 가열실 및 강제 온도의 균일화를 달성할 수 있을 것으로 판단된다.

4) 배가스 중 CO<sub>2</sub> 농도는 80-90% 이상 유지하였으며, NO<sub>x</sub> 및 CO는 각각 최대 40ppm 및 10ppm 미만을 유지하여 개발 산소버너의 연소성능은 매우 우수함을 보였다.

### 후 기

이 연구는 2005년 과학기술부 프론티어사업인 이산화탄소저감 및 처리기술개발사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사의 뜻을 전합니다.

### 참고문헌

- [1] Hiroshi Tsuji, et al., "High Temperature Air Combustion", CRC Press, 2003.
- [2] High Temperature Air Combustion, TOTem25, IFRF, October 2003.
- [3] 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.
- [4] O. Delabroy, et al., "Oxycombustion for Reheat Furnace", AFRC/JFRC/IEA 2001 Joint International Combustion Symposium, 2001.
- [5] T. Suwa, "Overview of Application Technologies using Oxy-fuel Combustion in Japan", AFRC/JFRC/IEA 2001 Joint International Combustion Symposium, 2001.
- [6] 이상준, 노동순, 김혁주, 이은경, " 고성능 순산소 연소시스템의 가열특성에 대한 연구", 제 29회 KOSCO Symposium 논문집, 175-180, 2004.
- [7] 노동순 외, "연소시스템 고성능 지능화 기술 개발", 이산화탄소 저감 및 처리기술 개발 사업보고서. 2005.
- [8] Per Vesterberg, et al., "Fuel Savings and Reduced Emissions: Experience from 80 Oxy-fuel Installations in Reheat Furnaces", AISTech 2004, Nashville, Tenn., USA.
- [9] Narayanan Krishnamurthy, et al., "Development of High Temperature Air and Oxy-Fuel Combustion Technologies for Minimized CO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> Emissions in Industrial Heating", The Joint Conference on "Sustainable Energy and Environment (SEE)", 1-3 December 2004, Thailand.
- [10] Chales, E. Baukal, "Oxygen-Enhanced Combustion", CRC Press, 1998.