

Radiant Tube 버너에 있어서 흡기 온도 및 산소분율이 연료 소모에 미치는 영향

김현우 · 이경환[†] · 노동순*

순천대학교, *한국에너지기술연구원

(2004년 11월 22일 접수, 2005년 3월 22일 채택)

An Experimental Study on Effect of Temperature and Oxygen Fraction of Intake Air on Fuel Consumption in Radiant Tube Burner

Hyun-woo Kim, Kyung-Hwan Lee[†] and Dong-Soon Roh*

Sunchon National University, *Korea Institute of Energy Research

(Received 22 November 2004, Accepted 22 March 2005)

요 약

강판의 냉간압연 후 소둔을 하기 위한 열처리 공정에서 사용되고 있는 Radiant Tube Burner(이하 RT버너)의 연비를 개선하기 위한 효율적인 방법을 실험적으로 조사하였다. 재열기가 설치된 모델 RT버너를 실험에 맞도록 개조하여, 배기 중 산소 농도 조건을 변화시키면서 연료 소모에 대한 흡입공기의 온도와 산소분율의 영향도를 파악하였다. 본 연구의 결과, 흡기 온도를 상승시키면 RT버너의 chamber 온도가 상승하나 그 상승폭은 흡기 온도 상승폭의 10%에 지나지 않아, 흡입 공기 온도의 상승만으로는 연료 소모 개선을 기대할 수 없다는 것을 알 수 있었다. 그러나, 흡입 공기 중 산소분율 변경 실험 결과, 흡입 공기 중의 산소분율을 1.5% 증가시키면 NOx의 배출이 약 40% 정도 증가하지만 약 20%의 연비 개선 효과를 보였다. 따라서, NOx 배출 증가를 억제하는 산소 고부하 전용 RT버너는 RT버너 시스템의 연료 소모를 개선하는 효과적인 방법의 하나로 기대된다.

주요어 : RT버너, 산소분율, 연비, NOx

Abstract — An Experimental study was conducted to investigate the effective way for fuel consumption improvement in radiant tube burner heating system used in steel manufacturing process. To find effectiveness of increase of temperature and oxygen fraction of intake air on fuel consumption, the model radiant tube burner heating system with recuperator was designed to be able to adjust temperature and oxygen fraction of intake air, and was operated under various conditions with oxygen concentration in exhaust gas changed. The results show that burner chamber temperature was increased about 10% of intake air temperature increase, so it was difficult to expect fuel consumption improvement. But only 1 or 2% increase of oxygen fraction in intake air made a significant improvement in fuel consumption even though it made much NOx emissions also. Therefore, if NOx emissions is controlled under regulation with burner modification, it is expected that increase of oxygen fraction in intake air is effective way to improve fuel consumption.

Key words : Radiant tube burner, Oxygen fraction, Fuel consumption, NOx

[†]To whom correspondence should be addressed.
Sunchon National University
Tel: 061-750-3822
E-mail: khlee@sunchon.ac.kr

1. 서 론

최근 들어 원유 수급이 안정적이지 못한 관계로 석유 에너지의 가격이 대폭 상승하였고 이런 추세는 향후에도 계속될 것이라 예상되고 있다. 고유가 시대에 다량의 에너지를 소비하는 산업들은 연소시스템의 효율을 개선하여 연료비를 절감하는 것이 경영차원에서 절실한 문제가 되고 있다. 특히, 많은 양의 에너지를 소비하는 산업 중의 하나인 철강산업에서는 그 중요성이 더욱 심각하다^[1,2].

강판의 생산 공정 중의 하나인 냉간압연 후 소둔(annealing)을 하기 위한 열처리 공정에서 Radiant Tube Burner(이하 RT버너라 칭한다.)가 많이 사용되고 있다. 연료로서 대개 천연가스를 사용하여 열을 발생시키는데, furnace의 양쪽에 RT버너를 설치하여 강판에 균일한 열을 점진적으로 가하는 시스템으로 되어 있다. RT버너는 연속적으로 운용되며, 공정에 투입된 강판의 제원이나 작업조건에 따라 RT버너의 작동조건이 변경되는데, 규모가 큰 생산 공정 중의 일부임이 고려되어 RT버너의 연소제어는 배기가스 중의 산소분율(oxygen fraction)을 기준으로 이루어진다.

RT버너의 기능은 기본적으로 균일한 온도분포가 이루어진 공간을 확보하는 것에 있다. 따라서 RT버너의 연비를 개선하기 위해서는 연소기의 성능 개선, tube의 형상 개선, tube의 온도 분포 개선 등 하드웨어적인 측면부터 RT버너의 운용에 관한 소프트웨어적인 측면까지 모두 고려되어야 할 것이다^[3]. 하지만, 하드웨어적인 접근은 너무 범위가 크고 실제 운용 중인 생산 공정에 직접 적용하는 것에도 많은 위험 부담이 있다. 그런 이유로, RT버너의 연비를 개선하기 위해서 1차적으로 소규모의 개조나 소프트웨어적인 측면에서의 변경을 먼저 고려하게 된다.

흡기 온도를 증가시키는 것은 흡기 온도가 상승한 만큼 연소기의 부담을 줄이는 것이 되므로 연비개선 방법 중의 하나로 이용되고 있다^[4,5]. 기존의 설비에서도 recuperator를 사용하여 배기가스가 가지고 있는 열의 일부를 회수하여 흡기를 가열하는 방법이 사용되고 있다. 따라서 기존의 recuperator의 성능을 개선하여 흡기 온도 상승폭을 크게 하는 것이 연비 개선에 얼마나 효과가 있는지를 검토하는 것도 중요하다.

한편, 공기 중의 산소분율은 21%이나, 공기 중의 산소분율을 증대시키면, 동일한 공연비에서 연소에 필요한 산소는 확보한 가운데 불활성기체인 질소의 분율은 낮아지므로 화염온도의 상승을 기대할 수 있다. 따라서 훨씬 희박한 공연비로 시스템을 작동시키는 것이 가능하여 연료비 절감을 도모할 수 있다. 이론상으로 산소분

율이 33% 정도일 경우에 약 30~40% 정도 희박한 공연비에서 동등한 화염온도를 얻을 수 있다고 보고 되고 있는데, 이것은 버너 화염에 의한 직접적인 가열이 아니라 고온의 배기가스 온도에 의한 일정 공간의 균일한 가열을 목적으로 하고 있는 RT버너에서 연비 향상의 수단으로 고려될 수 있다^[6].

본 연구에서는 현재 운용되고 있는 RT버너 시스템의 연비를 개선할 목적으로 흡기 온도와 흡기 중의 산소분율을 증가시켰을 때의 연비개선 효과를 파악하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2-1. 실험장치 및 실험조건

RT버너 시스템의 연비를 개선할 목적으로 흡기 온도와 흡기 중의 산소분율을 증가시켰을 때의 연비개선 효과를 파악하고자 모델 RT버너를 제작하였다. 모델 RT버너는 단열벽으로 둘러싸인 chamber 내부 공간을 가열하게 된다. 버너의 연소에 의해 chamber 내부 공간에 일정한 분위기 온도를 유지한다고 할 때, 흡기 온도를 상승시키면 연료 소모에서 기대할 수 있는 이득은 얼마나 되는지, 흡기의 산소분율을 21% 이상의 고부하로 하면 공급연료는 얼마나 감소시킬 수 있는지 등을 실험하였다. 이런 목적에 맞는 실험을 수행하기 위해서 흡기 온도와 산소 농도를 변화시키는 수단을 고안했다. Fig. 1에 전체 시스템 구성도를 나타낸다.

우선, 단열벽으로 둘러싸인 내부 공간인 chamber의 온도를 측정하기 위하여 16개의 열전대를 Fig. 2에서와 같이 설치하였다. 또한, 버너로 흡기가 유입되기 직전의 흡

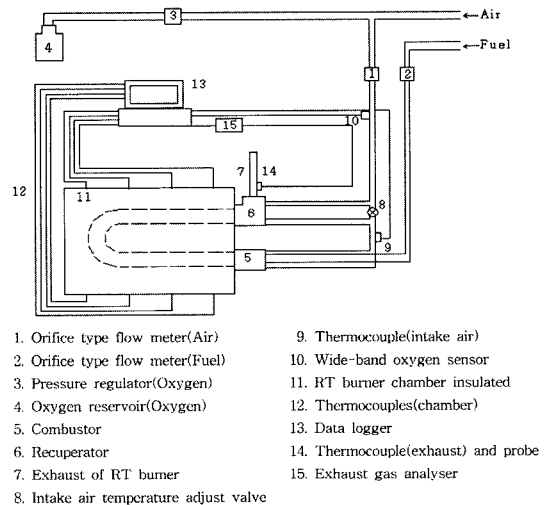


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

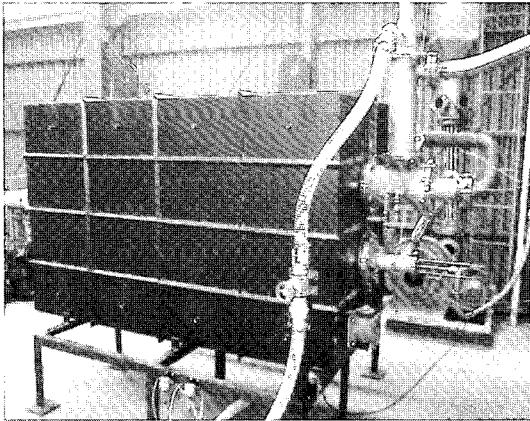


Fig. 2. Photo of radiant tube burner view.

기 온도와에 배기가스 통로 중의 배기가스 온도를 측정하기 위하여 별도의 열전대를 사용하였다. 이들 열전대의 측정값들은 Agilent Technology사의 Agilent 34970A Data Acquisition/Switch Unit에 의해 저장되었다.

Chamber 내부 온도 측정용 18개 열전대는 단열벽 양쪽에 각각 8개(상부 4개, 하부 4개)씩 설치되었고, 이들 18개 열전대의 온도 측정주기(data scanning interval)는 30초로 하였다. 1회 측정시 18개의 측정값이 저장되는 데에 걸리는 시간은 0.66초가 소요되었는데 chamber 온도가 매우 완만하게 변화한다는 것을 고려하면 18개의 측정이 거의 동시에 이루어진다고 볼 수 있다. 한편, 전체적으로 단열벽으로 둘러싸인 모델 RT버너는 대기와 완벽하게 분리되므로 RT버너로부터 열을 흡수해가는 열부하(Load)가 없게 된다. 따라서, 단열벽 내부로 찬공기가 순환될 수 있도록 흡입구와 방출구를 만들어서 이들 흡입구와 방출구의 개폐를 조절함으로써 부하의 기능을 할 수 있도록 하였다.

흡기의 유량과 버너에 공급되는 연료의 양은 각각의 공급관에 설치되어 있는 오리피스를 통한 압력강하분에 의해 제측되었다. 버너의 연소부로 흡입되는 공기가 공기 통로 상류측에 설치된 흡기 유량 제측부를 지나면, 공기 통로는 두개로 분기되었다가 버너 유입 전에 다시 하나로 합쳐진다. 한 통로는 배기가스 통로와 열교환이 이뤄지도록 한 recuperator를 통과하도록 구성되어 흡기 온도를 상승시키는 기능을 하며, 다른 통로는 배기가스 통로와는 별도로 구성되어 배기가스와의 열교환이 이루어지지 않기 때문에 흡기 온도를 낮추는 기능을 한다. 이 두 통로를 통과하여 버너에 흡입되는 전체 유량은 일정하게 하고, 각 통로로 유입되는 공기의 유량을 조절함으로써, 흡입되는 공기의 온도를 제어할 수 있었다. 또, 흡기 중의 산소분율을 변화시킬 수 있도록 흡기 통

Table 1. Characteristics of wide-band oxygen sensor.

Output	9~13 mV
Range	0~100% O ₂
Resolution	0.01% O ₂
T ₉₀ response time	<5 sec.
Linearity/linear	0~100% O ₂
Temperature range	-20~50°C

로 중에 100% 산소가 공급되는 파이프를 별도로 연결하였으며, 산소 공급 통로의 밸브를 조절함으로써 흡기 중의 산소분율을 21% 이상으로 조절할 수 있다. 이때, 흡기 중의 산소분율을 제측하기 위하여 광역산소 센서가 사용되었다. 산소분율에 따라 해당되는 전기 신호(mV)를 출력하는 광역산소센서는 City Technology사의 AO2 CiTicel 센서로 구체적인 성능은 Table 1과 같다. 각각의 실험조건에서 배기가스 중의 산소농도는 배기가스분석기를 사용하여 5~7% 범위에서 조절되었다.

2-2. Chamber 내부 온도

모델 RT버너에 부하를 가할 목적으로 설치한 cold air 순환용 흡입구와 방출구 때문에 열전대의 측정 위치에 따라 chamber 내부 온도는 위치에 따라 달라진다. Fig. 3은 chamber 내부 최고 온도와 최저 온도, 그리고 chamber 내부 평균온도를 비교한 것이다.

여기에서 보면 최고 온도가 변화하더라도 평균온도는

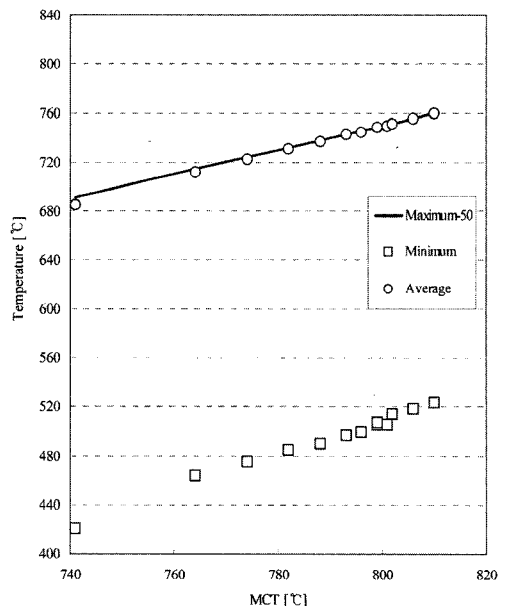


Fig. 3. Relation between average temperature and maximum chamber temperature.

최고 온도에서 50도를 뺀 값과 거의 동일함을 알 수 있다. 이는 최고온도가 변화하더라도 chamber 내부의 전체적인 상대 온도차는 일정하게 유지되고 있음을 말하는 것이다. 즉, 최고온도가 10도 하강하면 chamber 내부의 다른 영역도 10도 하강한다는 것을 의미한다. 따라서, 이하에서는 chamber 내부온도를 대표할 수 있는 온도값으로 최고 온도(Maximum Chamber Temperature 또는 MCT)를 사용한다.

2-3. 배기가스 중 산소농도

RT버너의 운전조건은 chamber 내부의 분위기 온도뿐만 아니라 배기가스 중의 산소농도에 의해서도 결정된다. 배기가스 중 산소농도는 버너 화염의 안정성 측면과 배기가스 중의 유해배출성분 측면에서 고려되는 중요한 운전요소이기 때문이다. 따라서, 배기가스 중의 산소농도 설정에 따라 chamber 내부 온도, 배기가스 온도(FT : Fume Temperature), 배기가스 중 NOx 농도 등이 어떻게 변화하느냐를 살펴보는 것도 RT버너의 특성을 파악하는 하나의 수단이며, 이를 위해서는 좀 더 정확한 배기가스 중의 산소농도의 측정이 중요하다. 그러나, RT버너의 연소조건은 고정된 것이 아니라 연속적으로 변화하는 것이 일반적이다. 특히, 흡기와 연료의 공급이 버너의 화염영역과 공급관로의 압력 차이에 의해서 이루어지는 RT버너에서는 제어변수를 일정조건으로 설정하였다 하더라도 버너 내부에 형성되어 있는 연

소화염의 변동에 의해 연소조건이 계속적으로 변동한다. 결국 배기가스 중 산소농도도 연소화염의 변동에 의한 영향을 받아 적은 범위에서나마 계속적으로 변동한다. 따라서, 본 연구에서는 배기가스 중의 산소농도와 압력비(Pa/Pf)에 대한 실험 결과를 근거로 일반적인 산소농도-압력비의 관계식을 이용하여 산소농도와 압력비의 상관식을 구했으며, 상관식에서 사용되는 계수 α는 7.499이다. Pa는 흡기 통로에 설치되어 통과하는 유량을 측정하는 오리피스스의 차압을 나타내고, Pf는 연료 통로에 설치되어 통과 연료량을 측정하는 오리피스스의 차압을 나타낸 것이다. Fig. 4는 측정된 배기가스 중 산소농도와 교정식을 사용하여 구한 배기가스 중 산소농도를 비교한 그림이다.

$$[O_2] = 21 * \left\{ 1 - \frac{12.04}{\alpha * \sqrt{\frac{P_a}{P_f} + 1.09}} \right\}$$

3. 결과 및 고찰

3-1. 배기가스 중 산소농도의 영향

다음 Fig. 5, 6에 배기가스 중 산소농도 설정을 다르

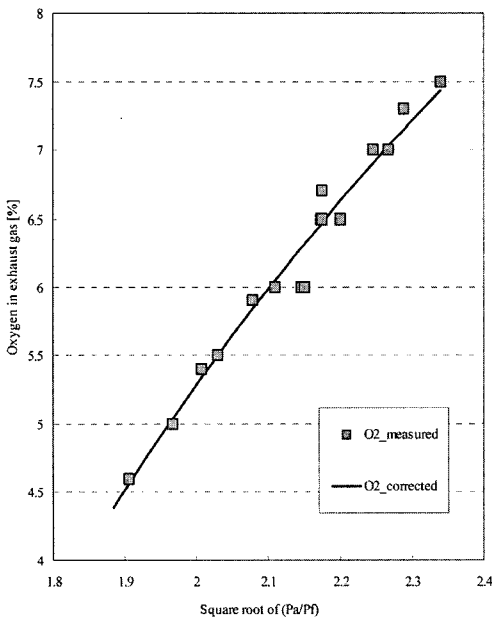


Fig. 4. Calibration of oxygen in exhaust.

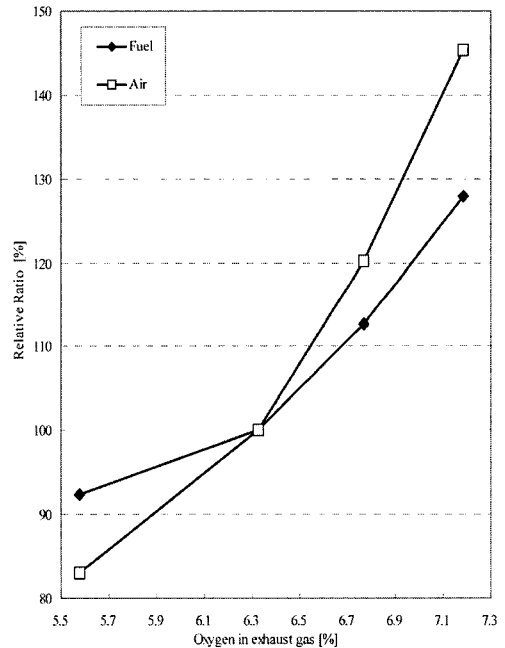


Fig. 5. Effects of oxygen in exhaust on fuel and air supply.

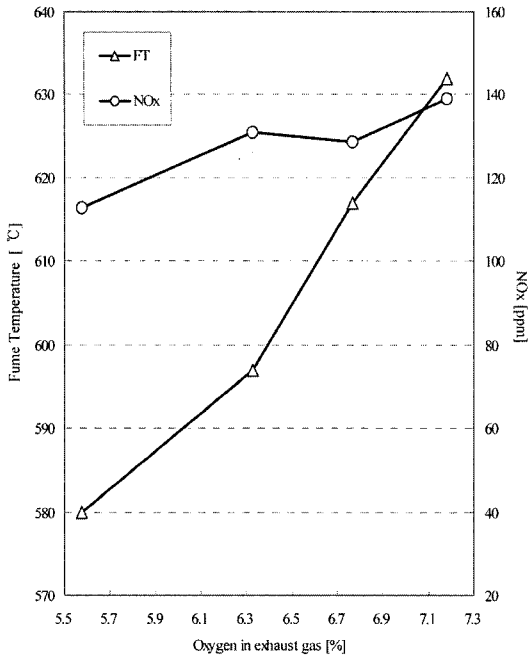


Fig. 6. Effects of oxygen in exhaust on fume temperature and NOx emissions.

게 하였을 경우의 연료량, 흡기량, 배기가스 온도, 그리고 NOx의 배출 특성을 보인다. 이때 chamber 온도는 최고온도(MCT)가 800°C로 일정하게 유지되도록 하였으며, 또한 흡기 온도도 200°C로 일정하게 유지되게 하였다. Fig. 5, 6은 배기가스 중 산소농도가 6.3%일 때를 기준으로 하여 배기가스 중 산소농도가 변화할 때 연료량, 흡기량, 배기가스 온도, NOx의 배출이 어느 정도의 비율로 변동하는가를 나타낸 것이다. 배기가스 중 산소농도가 감소하는 것은 1차적으로 흡기량이 줄어드는 것을 의미하는데, 흡기량이 줄어들면 배기가스량도 줄어들게 되므로 배기가스의 온도는 높아지게 되고, 따라서 RT 버너를 통과하는 배기가스에 의해 가열되는 chamber의 온도는 상승하게 된다. 그런데 MCT를 일정하게 유지시키는 실험조건이므로 이를 만족하기 위해서는 연료공급량이 줄어들게 된다. 반대로 배기가스 중 산소농도를 증가시키면 흡기량이 증가하므로 MCT가 하강하게 된다. 그러므로 이 경우에는 MCT를 유지하기 위해서는 더 많은 연료의 공급이 필요하게 된다. 이는 연료량과 흡기량 모두가 증가된다는 것을 의미한다. 연료량과 흡기량이 모두 증가하면 이들의 연소에 의해 생성되는 배기가스의 양도 증가하게 되는데, 이렇게 증가된 배기가스가 일정한 단면을 가지는 RT버너를 통과하려면 배기가스의 흐름속도가 빨라져야 한다. 배기가스가 RT버너를 통과

하는 흐름속도가 빨라지면 고온의 배기가스가 RT버너 내부에 체류하는 시간은 짧아지게 되므로 배기가스가 가지고 있는 고열이 chamber 온도의 상승에 기여하는 정도는 떨어지게 된다. 그러므로 MCT를 일정하게 유지시키기 위해서는 더 많은 연료가 소모되게 된다. 따라서, 배기가스 중 산소농도가 증가할수록 연료량 및 흡기량이 큰 폭으로 증가할 것으로 예상되고 이런 경향은 Fig. 5에서도 확인할 수 있다. 배기가스 중 산소농도 6.3%를 기준으로 산소농도가 5.7%일 때 연료량이 약 8% 정도 감소하는 반면에 산소농도가 7.0%일 때에는 연료량 증가가 약 20%에 이른다.

한편, Fig. 6에서 배기가스 중 산소농도가 증가할수록 고온의 연소가스가 더 빨리 RT버너를 빠져 나오게 되므로 연소가스가 주위로 열을 미쳐 전달하기 전에 배출될 것이다. 그래서 배기가스 중 산소농도가 증가할수록 배기가스의 온도도 상승한다. 그만큼 배기가스 손실이 커진다는 것을 의미한다. Fig. 6에 배기가스 중 NOx의 농도를 산소농도 6%를 기준으로 환산하여 표시하였다. NOx 배출은 배기가스 중 산소농도가 6% 정도일 때까지는 증가폭이 크지만, 배기가스 중 산소농도가 그보다 더 증가하면 증가폭이 둔화되는 경향을 보인다. NOx의 배출 특성이 이런 경향을 보이는 것은 공기가 많을수록 NOx의 배출이 많아지는 특성과 공기가 과다하게 많아지면 연소온도가 저하되어 NOx의 배출이 적어지는 특성이 한

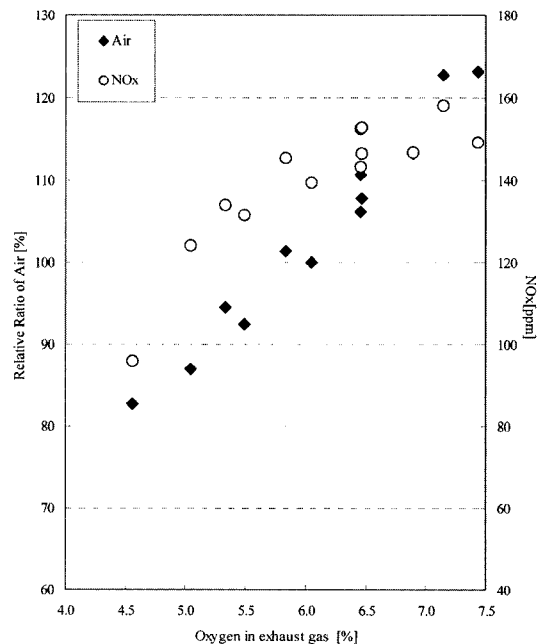


Fig. 7. Effects of oxygen in exhaust on NOx.

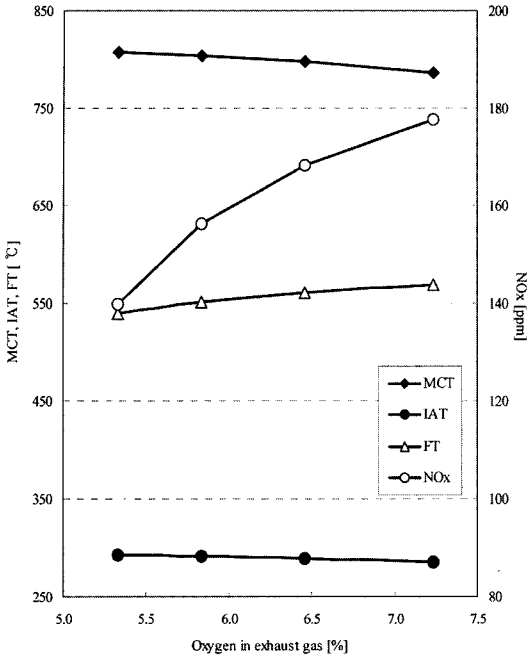


Fig. 8. Effects of oxygen in exhaust at constant fuel supply condition.

거번에 작용하여 나타난 결과로 이해할 수 있다. 이런 경향은 흡기 온도와 공급 연료량을 일정하게 유지할 실험의 결과인 Fig. 7에서도 확인된다. 이 경우에 있어서도 배기가스 중 산소농도가 증가할수록 흡기량은 선형적으로 증가하지만, NOx(산소농도 6% 기준) 배출량은 배기가스 중 산소농도 6% 정도까지는 큰 폭으로 증가하다가 그 이상에서는 완만하게 증가하고 있음을 알 수 있다.

다음은 연료량을 일정하게 할 때 배기가스 중 산소농도의 변화가 미치는 영향에 관한 것이다. Fig. 8은 배기가스 중 산소농도를 5.3%에서 7.3%까지 변화시켰을 때 MCT, 흡기 온도, 배기가스 온도, 그리고 NOx(산소농도 6% 기준)의 변화량을 보인 것이다. 한편, 배기가스 온도의 상승에도 불구하고 흡기 온도(IAT : Intake Air Temperature)는 하강하고 있다. 배기가스로부터 열을 흡수하여 흡기 온도를 상승시킬 목적으로 Recuperator가 설치되어 있으므로 배기가스 온도가 상승하면 흡기 온도도 어느 정도 상승하여야 할 것이나 Fig. 8에서는 그와 반대되는 결과를 보인다. 이것은 공급 연료량을 일정하게 한 상태에서 배기가스 중 산소농도를 증가시키기 위하여 흡기량을 증가시켰기 때문이다. 흡기량이 증가되어서 배기가스의 흐름속도가 빨라지면 고온의 배기가스가 Recuperator를 통과하는 시간이 단축되므로 설사 배기가

스의 온도가 높아서 열전달에 유리하다고 하더라도 일정시간 동안 Recuperator를 통하여 흡기쪽으로 전달되는 열량에 있어서 이득은 별로 없을 것으로 예상할 수 있다. 반면에 Recuperator를 통하여 더 많은 양의 흡기량 수열을 받으므로 단위 흡기당 온도 상승분은 감소될 것이다. 이런 이유로 배기가스 온도가 상승하여도 흡기 온도가 상승하지 않고 반대로 감소하게 된다고 사료된다.

3-2. 흡기 온도 변화의 영향

흡기량, 연료 공급량, 배기가스 중 산소농도는 일정하게 유지하면서 흡기 온도를 200°C에서 290°C까지 30°C 간격으로 변경해 가면서 그 영향을 살펴보았다. 이때 배기가스 중 산소농도의 설정은 6.5%로 하였다. 그 결과를 Fig. 9에 보인다. MCT와 배기가스 온도는 실제 측정값을 그대로 나타내었고, NOx의 배출량은 산소농도 6%를 기준으로 환산한 값이다. Fig. 9에서 보면 흡기 온도를 상승시킬수록 MCT와 NOx의 배출량은 증가하는 반면에 배기가스 온도는 감소하고 있다. 흡기 온도를 90°C 정도 상승시켰을 때 MCT는 약 10°C의 상승을 보인다. 또한, 흡기 온도를 90°C 정도 상승시켰을 때 NOx의 배출은 약 40% 정도 증가함을 알 수 있다. 이는 흡기 온도를 상승시켰을 때 버너 내부 연소영역의 온도를 상승시키고 있다는 것을 의미한다. 흡기 온도가 상승하면, RT 버너 내부의 화염온도가 상승하여 chamber 내부의 온도

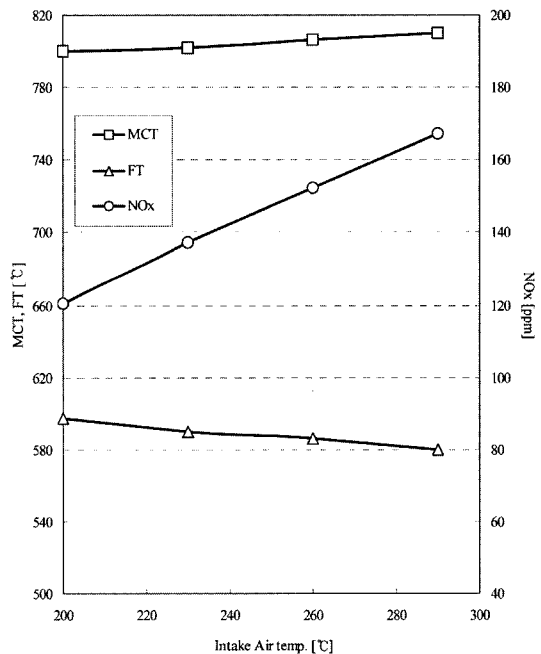


Fig. 9. Effects of intake air temperature.

를 상승시키고, 그에 따라 NOx 배출의 증가를 초래한다고 여겨진다. 반면에 흡기 온도가 상승할수록 배기가스 온도는 하강하고 있는 것을 보이는데 이것은 흡기 온도 상승에 따른 결과가 아니고 흡기 온도를 상승시키는 과정에 의한 결과이다. 즉, Recuperator에 의해서 배기가스 중의 열이 흡기로 이동되어 흡기 온도가 상승되는 것이므로, 흡기 온도가 상승한다는 것은 더 많은 양의 열이 배기가스로부터 흡기 쪽으로 이동했다는 것을 의미한다. 그러므로 그런 열 이동의 결과 배기가스의 온도는 저하된다. 위의 결과에서, 흡기 온도의 변화량이 90°C 정도가 되더라도 chamber 온도에는 10°C 정도의 영향 밖에 미치지 못함을 알 수 있다. chamber 내부 온도의 변화량이 흡기 온도의 변화량에 비해 약 1/10 정도에 지나지 않는다는 사실은 기존에 설치되어 있는 Recuperator의 성능 개선을 통하여 RT버너 시스템 전체의 효율성을 개선하는 것은 한계가 있다는 것을 의미한다.

3-3. 흡기 중 산소분율 변화의 영향

기존의 RT버너 시스템의 열효율을 획기적으로 개선하는 방법의 하나로 큰 관심을 받고 있는 것이 산소 고부하 연소방법이다. 보통의 연소기들이 21%의 산소분율을 보이는 공기를 산화제로 사용하는 것에 반하여, 산소 고부하 연소방법에서는 21% 이상의 산소분율을 가

지도록 별도의 산소를 추가한 산화제를 공급하여 연소시키는 방법이다. 고부하 산소에 의해 화염온도가 상승하며 따라서 RT버너의 온도가 상승하게 되므로 일정 chamber 온도를 유지시키는 데 소요되는 연료의 양을 저감할 수 있다. 산소 추가로 인하여 1차적으로 화염온도를 상승시킬 수 있을 뿐만 아니라, 2차적으로는 흡기의 양을 줄일 수 있으므로 버너 통과 유속을 작게 하여 RT 버너로부터 chamber 내부의 분위기로 전열되는 효율을 상승시킬 수 있기 때문이다. 연료량을 일정하게 하고 배기가스 중 산소 농도를 6%로 설정하고 흡기 중 산소분율을 21%~27%까지 변경하였을 때의 실험 결과를 Fig. 10, 11에 나타낸다. 여기서 MCT, 흡기 온도, 그리고 배기가스 온도는 실제 측정값이 표시되어 있고, 흡기량은 흡기 중 산소분율이 21%일 때를 기준으로 하여 표시되어 있으며, NOx 배출량은 산소농도 6%를 기준으로 환산한 값이다.

한편, 본 실험에서는 흡기 중 산소분율의 변화를 최대 27%까지로 한정했는데, 그것은 6% 정도의 산소분율 증가만으로도 MCT를 충분히 상승시킬 수 있었기 때문이다. Fig. 10에서 보면 흡기 중 산소분율을 21%에서 27%로 변경하였을 때, MCT가 약 70°C 정도 상승하였다. 이는 실제의 RT버너 시스템이 운용될 때 chamber 온도의 변동범위인 ±50°C 정도 보다 더 큰 폭의 변화

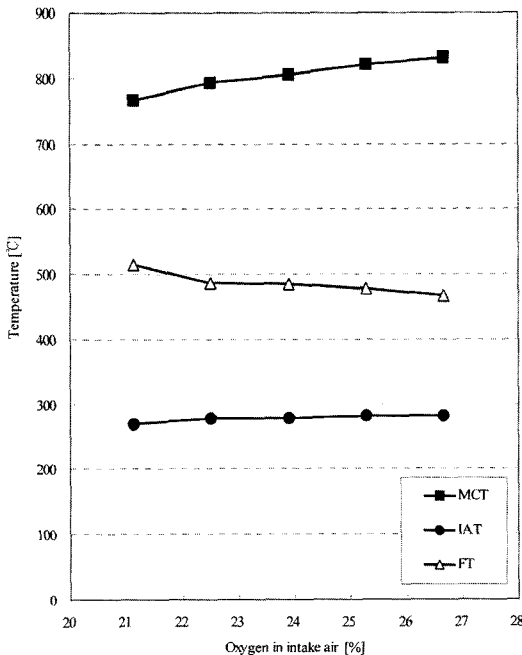


Fig. 10. Effects of oxygen concentration in intake air at constant fuel supply.

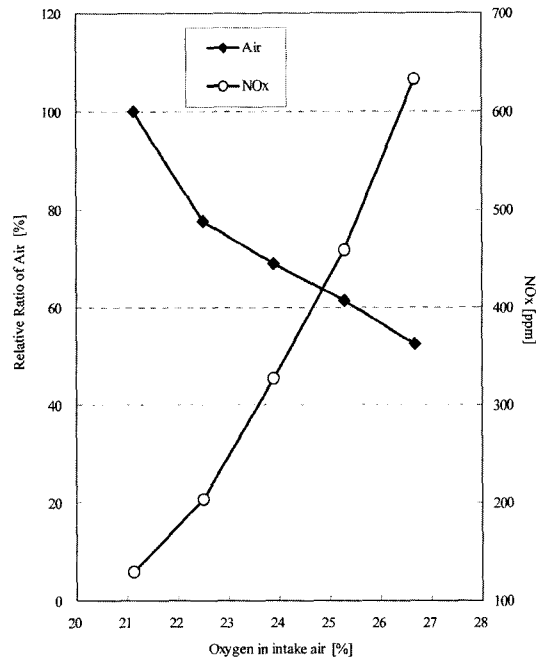


Fig. 11. Effects of oxygen concentration in intake air at constant fuel supply.

이다. 또한, 산소 고부하에 의해서 화염온도의 상승이 크므로 모델 RT버너 모형의 안정성을 고려하였다. Fig. 10 과 Fig. 11에서 보면 흡기 중 산소분율이 21%에서 27%로 증가할 때, 흡기 온도와 배기가스 온도의 변화는 상대적으로 미약한 반면에, MCT, 흡기량, 그리고 NOx 배출량은 큰 변동을 보이고 있다. 연료 공급량이 일정함에도 불구하고 chamber 내부 온도는 약 70°C 정도의 상승이 있으며, 흡기량은 약 50% 정도 감소하였고, NOx의 배출은 약 4배 정도 증가하였다. 이것은 산소 고부하 연소방법이 화염온도를 현저하게 상승시키고, 그 결과, 직접적으로 chamber 내부 온도의 상승에 기여할 뿐만 아니라 흡기량의 감소에 따르는 간접적인 열전달 효율 개선에도 효과가 있음을 의미하는 것이다. NOx 배출의 증가는 화염온도 상승의 역효과이다. 보다 직접적인 연비 개선 효과를 파악하기 위하여 일정한 Room 내부 온도를 유지하는 데에 소요되는 연료 소모량에 미치는 산소 고부하 연소방법의 영향을 파악하였다.

Fig. 12와 Fig. 13은 MCT를 800°C로 일정하게 하고, 배기가스 중 산소 농도는 7%로 설정하였을 때, 흡기 중 산소분율의 변화에 따르는 연료 소모량 변동 결과를 보인 것으로, NOx의 비율은 산소농도 6% 기준 환산 NOx 농도의 비율이다. 여기에서 보면, chamber 내부온도를 일정하게 유지하는 상태에서, 흡기 중 산소분율이 증가할수록 배기가스 온도와 흡기 온도가 모두 하강하는 경향

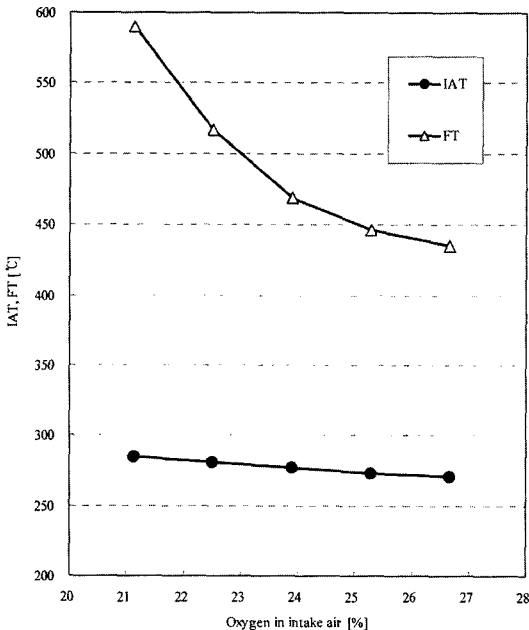


Fig. 12. Effects of oxygen concentration in intake air at constant MCT.

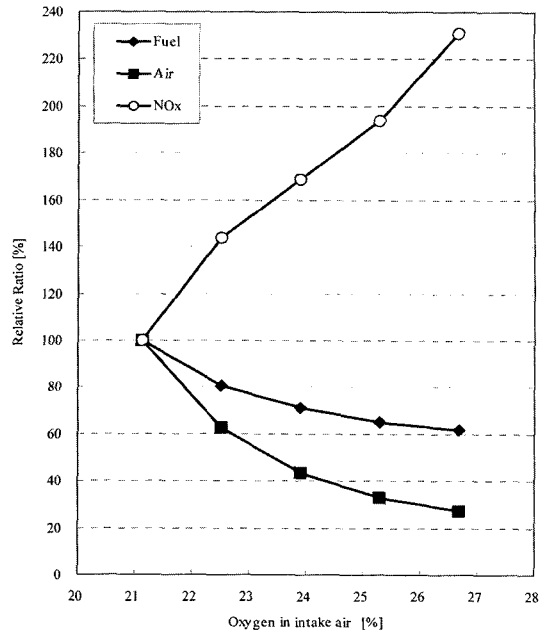


Fig. 13. Effects of oxygen concentration in intake air at constant MCT.

을 보이고 있다. 그러나, 흡기 온도의 하강 쪽은 약 15°C로 배기가스 온도의 하강 쪽 150°C과 비교할 때 약 1/10에 지나지 않는다. 즉, 배기가스 온도가 하강함에도 불구하고 배기가스에서 열을 전달받는 흡기의 온도는 비교적 일정한 수준을 유지하고 있다고 볼 수 있다. 이는 흡기 중 산소분율이 증가할수록 흡기량이 감소하게 되는 것의 영향이다. 흡기 중 산소분율이 21%에서 27%로 변경될 때 흡기량은 약 30% 수준까지 감소한다. 배기가스 온도가 저하되어 배기가스로부터 전달받는 열량이 적어지더라도 흡기량이 감소함으로써 흡기의 온도는 일정한 수준을 유지할 수 있는 것이다. 또, 흡기량이 감소됨으로써 RT버너를 통과하는 흐름의 속도가 떨어지고 이 때문에 고온의 배기가스가 RT버너 내부에 체류하는 시간이 길어져서, chamber 온도의 상승에 충분히 기여할 수 있기 때문에 최종적으로 배출될 때의 온도가 저하되는 것으로 사료된다.

한편, 흡기 중 산소분율이 21%에서 27%로 증가될 때 연료 소모량은 약 40% 정도 감소하고 있다. 반면에 NOx의 배출은 약 130% 정도 증가하였다. 비록 NOx 배출의 증가가 상당하지만 연료 소모량에 있어서 개선 효과 또한 매우 크다는 것을 확인할 수 있다. 만일 NOx의 배출 증가를 50%만 허용할 경우, 흡입 공기 중 산소분율은 23% 수준이 요구되는데, 이때의 연료 소모량 개선 효과는 25%에 근접한다. 또, 흡입 공기 중 산소분율을

1.5%만 증가시키더라도 약 20%의 연료 절감을 기대할 수 있다.

5. 결 론

1) RT버너시스템에서 흡기량이 많을수록 chamber 내부 온도를 고온으로 유지하는 데에 더 많은 연료가 소요되며, 흡기 온도를 상승시키는 데에도 더 불리하므로, 배기가스 중 산소농도의 설정은 가능한 한 적은 값으로 하는 것이 유리하다.

2) 흡기 온도를 상승시켰을 경우, chamber 내부 온도의 변화량은 흡기 온도의 변화량에 비해 약 1/10 정도에 지나지 않는다. 이것은 이미 설치되어 있는 Recuperator의 성능 개선을 통하여 RT버너시스템 전체의 연비를 개선하는 것은 한계가 있다는 것을 의미한다.

3) 흡기 중의 산소분율을 21% 이상으로 하면, 일정 공간을 가지는 chamber의 내부 온도를 일정하게 유지하는 데에 소요되는 연료 소모량을 큰 폭으로 줄일 수 있었다. 본 연구에서 수행한 실험에서는 흡기 중 산소분율을 1.5% 증가시키면 NOx의 배출이 40% 정도 증가하지만 약 20%의 연비 개선 효과를 보였다. 그러므로, NOx 배출의 증가는 억제하면서 연료 소모량의 개선 효과를 극대화할 수 있는 산소 고부하 전용 연소기를 제작한다면 매우 효율적인 RT버너시스템을 구축할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. Engdahl, J. "Measures for Regenerative Burner Installation in an Existing Reheating Furnace",

Second International Seminar on High Temperature Combustion, 2000.

2. Andachi, K.; Nakagawa, T.; Obashi, M. "Advanced Heating Technologies Applying Regenerative Heat Exchange System for Energy Saving", 川崎製鐵技報, 2000, 32-4, 292-299.
3. Cho, K.W.; Park, H.S.; Lee, Y.K. "Experimental Study on the Radiant Tube Burner with Self-biased Fuel Nozzle", Korean J. of Chem. Eng., 1993, 10(3), 140-145.
4. Fukushima, S.; Suzukawa, Y.; Akiyama, T.; Kato, Y.; Fujibayashi, A.; Tada, T. "Eco-friendly Regenerative Burner Heating System Technology Application and Its Future Prospects", NKK Technical Review, 2002, 87, 30-37.
5. Tomeczek, J.; Goral, J.; Gradon, B. "Application of the Gaft Burner to Low NOx Radiant Tubes Firing", Proceedings of 4th European Conference of Industrial Furnaces and Boilers, 1997.
6. Kesting, A.; Trimis, D.; Durst, F. "Development of a Radiation Burner for Methane and Pure Oxygen Using the Porous Burner Technology", Fifth International Conference on Technologies and Combustion for a Clean Environment, 1999.