

고온 축열체 최적설계에 관한 연구

노동순, 이은경
한국에너지기술연구소

A Design of High Temperature Air Regenerator

Dong-Soon NOH and Eun-Kyung LEE
Korea Institute of Energy Research

1. 서론

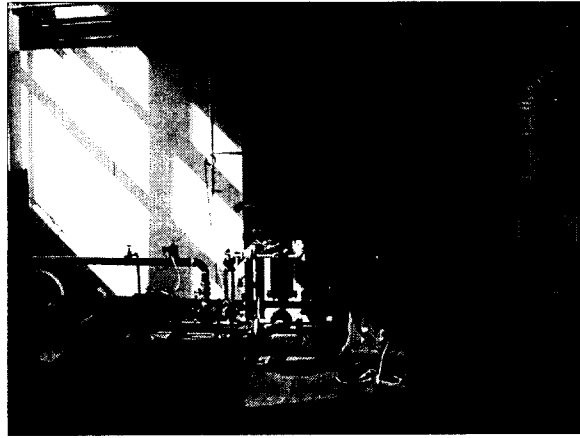
국가 총에너지소비의 약 13%를 점하고 있는 공업로(가열로, 용해로, 단조로 등)의 열효율은 선진국 수준에 크게 미치지 못하여 관련산업의 국가경쟁력 강화에 걸림돌이 되고 있다. 공업로는 연료의 연소기술, 피열물로의 전열기술, 로체의 단열기술 및 운전제어기술이 복합적으로 요구되는 열설비이기 때문에 요소기술개선을 위한 노력이 병행하여 추진될 필요가 있다. 그중에서 에너지절감 및 생산성향상에 단기내에 효과를 거둘 수 있는 연소 및 전열효율향상기술에 대하여 집중적으로 기술개발투자를 함으로써 선진국과의 기술격차를 다소 해소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 공업로의 에너지절감율을 30% 이상으로 달성하기 위하여 고온 배가스 현열의 80% 이상 회수가능한 축열연소시스템의 실용화를 지향하여 축열연소시스템의 핵심인 축열설 최적설계기법을 도출코자 하였다.

2. 고온공기재생 실험장치 및 방법

고온축열/재생실험을 겸한 연소실험을 수행하고자 [그림 1]과 같은 연소장치를 구성하였다. 축열/재생을 위한 축열기, 연소절환을 위한 절환기 및 연소실로 구성하였다. 축열체로 사용한 세라믹 하니컴은 국내 시판 제품(D사)으로 100셀, 200셀 및 300셀을 사용하였다. 재질은 100셀 및 300셀의 경우 코디어라이트(50%)와 뮤라이트(50%) 혼합재질이고 200셀의 경우는 코디어라이트(100%)이다. 단위 축열체는 공히 직경 70mm이고 길이는 50mm이었다. 축열층의 깊이는 세라믹 하니컴을 적층하여 조절하였으며 100mm 및 200mm 에 대하여 실험하였다. 축열체(실) 주위는 세라믹울을 사용하여 열손실을 최소화 하였다.

축열/재생시 축열체 입출구에서의 온도는 선경 0.5mm인 R-형 열전대 온도계를 사용하였고, 절환시간동안의 온도신호(전압)는 DT Vee(Data translation)을 사용하여 초당 5개의 온도 데이터를 수집토록 하였으며, 온도변환 프로그램을 작성하여 온도로 환산하여 저장하였다. 절환주기는 10, 20, 30, 40, 60 및 90초로 설정하였고, 연소조건은 축열체 입구에서의 배가스 온도가 약 1,000℃를 유지하도록 연소량과 공기비를 조절하였으며, 이 경우 연소량은 22,000kcal/h 이고 공기비는 약 1.3 이었다. 온도 데이터는 실험 시간과 동시에 저장하여 절환시간에 따른 축열/재생과정의 온도변동을 그래프화 하는데 사용하였고 통계처리 프로그램을 이용하여 축열/재생과정의 온도효율 및 재생효율을 계산하였다.

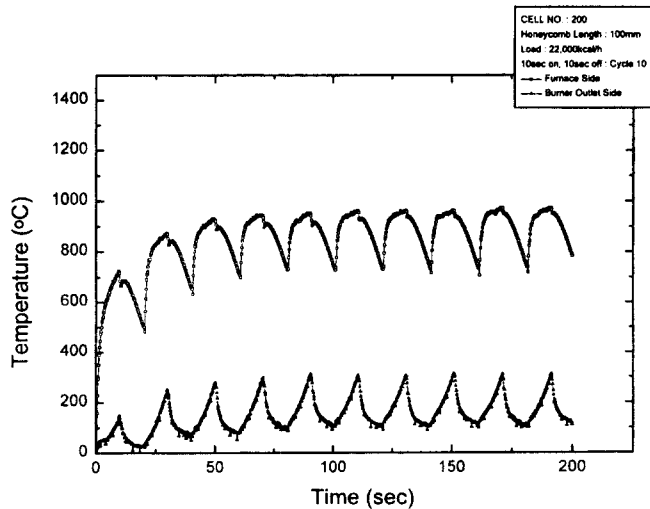


[그림 1] 고온공기재생 연소실험장치

3. 고온공기재생 실험결과 및 검토

가. 절환주기에 따른 축열체 입출구의 온도변동특성

축열체 셀 크기 및 축열체 길이에 따른 입출구에서의 온도 변동을 [그림 2]에 비교하였다. 전반적으로 축열체의 고온측(연소실 측)에서의 온도변동은 저온측(연소기 출구 측)에서의 온도변동에 비하여 완만하다. 축열후 배가스온도는 셀 크기가 작고 축열체의 길이가 길 수록 저하되고 있다. 즉, 단위셀당 비표면적이 클 수록 축열량이 증가함을 의미한다.



[그림 2] 축열체 길이 및 절환주기에 따른 축열/재생온도변동 특성(200셀)

나. 절환주기에 따른 온도효율 및 축열량의 변동

1) 온도효율 변동특성

축열/재생과정중에 축열체 입출구의 평균온도를 취하여 각 과정에서의 온도효율을 다음식을 이용하여 도출하였다.

$$\text{축열시 온도효율} : \eta_h = (T_{hin} - T_{hout}) / (T_{hin} - T_{cin})$$

$$\text{재생시 온도효율} : \eta_c = (T_{cout} - T_{cin}) / (T_{hin} - T_{cin})$$

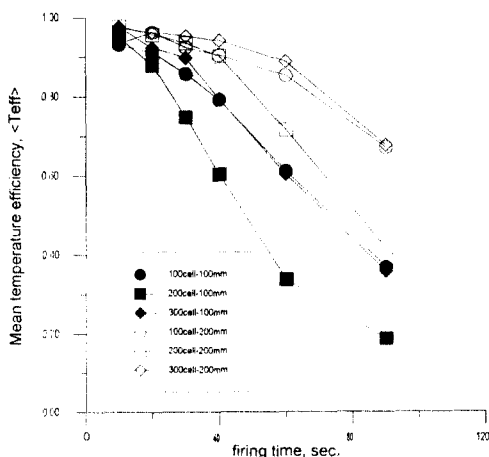
절환주기에 따라 셀크기와 축열체의 길이가 평균(축열 및 재생시의 평균) 온도효율에 미치는 영향을 [그림 3]에 비교하였다.

셀 크기 및 축열체의 길이가 일정한 경우에 절환주기가 증가하면 온도효율은 감소되고 있다. 한편 축열체의 재질이 동일할 경우에, 절환주기 및 축열체 길이가 일정한 경우에는 온도효율은 거의 동일한 수준을 보이고 있으나, 절환주기 및 셀 크기가 일정할 경우 온도효율은 축열체의 길이에 비례하여 증가하고 있음을 알 수 있다.

2) 축열특성

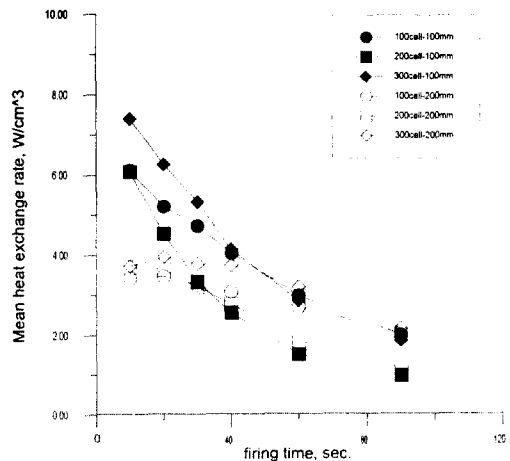
[그림 4]의 절환주기에 따른 축열량의 변동특성을 살펴보면, 절환주기가 짧은 범위에서는 축열량은 축열체의 길이에 영향을 많이 받는 반면, 절환주기가 클수록 축열체의 물성치(열전도도, 밀도)의 영향이 상대적으로 큰 것을 알 수 있다. 따라서 축열체 선정시 축열량 및 절환시간을 고려하여 축열체의 재질을 선정할 필요가 있다. 일반적으로 코디어라이트 재질은 알루미늄나 또는 코디어라이트 및 플라이트 혼합재질에 비하여 단위체적당 축열성능이 다소 낮음을 보여 준다

Effect of Cell Size and Regenerator Length on the Variation of Mean Temperature Efficiency



[그림 3] 온도효율에 미치는 셀 크기 및 축열체의 길이의 영향

Effect of Cell Size and Regenerator Length on the Variation of Mean Heat Exchange Rate per Volume



[그림 4] 축열량에 미치는 셀 크기 및 축열체의 길이의 영향

다. 절환주기 및 축열량의 무차원화

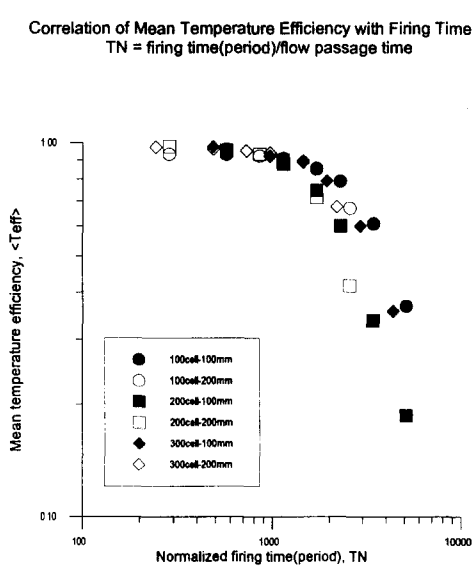
[그림 3] 및 [그림 4]의 온도효율 및 열교환량 변동특성은 셀의 크기, 축열체의 길이 및 절환주기에 따라 다양하게 나타나고 있다. 이러한 다양한 특성을 물리적 의미를 갖는 무차원 계수로 일관성 있게 표시할 수 있으므로써 축열구조의 최적화 또는 경량화 기법을 도출코자 하였다.

1) 절환주기의 무차원화

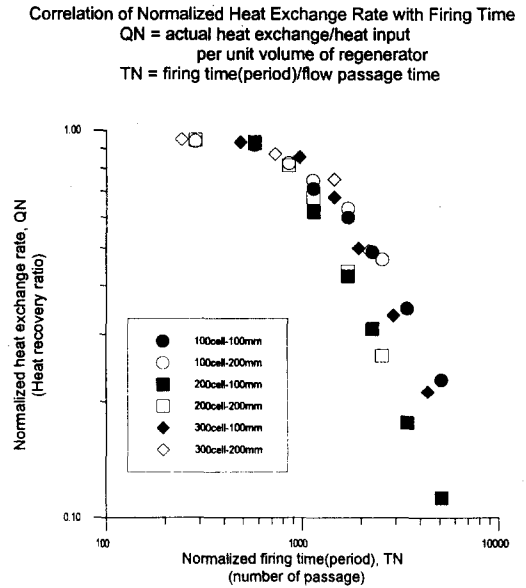
세라믹 하니컴 축열체의 구조적 특징을 고려하여 단위셀당 단위시간당 배가스 통과시간 개념을 이용하였다. 즉, 단위시간당 배가스 총량은 축열체 단면에 형성된 세라믹 하니컴이 차지하는 총단면적을 통해 균일하게 배출되는 것으로 가정하면 단위시간당 단위셀, A_{cell} , 을 통과해야 하는 배가스량, Q_{cell} , 을 도출할 수 있다. 한편 축열체의 길이, L_r , 를 고려하면 단위셀이 차지하는 체적을 도출할 수 있으며, 이로부터 단위셀당 배가스 통과시간을 도출 할 수 있다. 즉 $t_{pass} = L_r \cdot A_{cell} / Q_{cell}$ 로 표시할 수 있다.

결국 단위셀당 통과배가스량, Q_{cell} , 은 총 연소배가스량, Q_t , 축열실 단면적, D_r^2 및 단위면적당 셀수, n_{cell} 로 표시할 수 있으므로 단위셀당 배가스 통과시간은 $t_{pass} \sim f(L_r, D_r^2, A_{cell}, n_{cell}, Q_t^{-1})$ 또는 $t_{pass} \sim f(L_r^3, (D_r/L_r)^2, A_{cell}, n_{cell}, Q_t^{-1})$ 의 관계가 있다. 따라서 절환주기, t_f , 동안 단위셀당 배가스량이 단위셀을 통과하는 횟수, TN , 는 $TN = t_f / t_{pass}$ 로 표시할 수 있다. 여기서 배가스 통과시 일정량의 열량이 축열되는 것으로 가정하면 통과횟수, N , 는 수열횟수의 의미를 갖는다고 볼 수 있다.

[그림 5]는 온도효율을 무차원 절환주기(수열횟수)에 대하여 log-log 좌표상에 비교한 것으로 모든 경우에 있어서 일관성 있는 변동을 보여 준다.



[그림 5] 무차원 절환주기에 따른 온도효율 변동



[그림 6] 무차원 절환주기에 따른 열회수율의 변동

2) 축열량의 무차원화

축열연소기술의 특징은 직접 열교환에 의하여 배가스의 현열을 재생하는데 있다. 본 실험결과 축열 및 재생시 열교환량은 거의 동일하므로 평균 열교환량을 축열량으로 취급하였으며, 배열시 축열체 단위체적당 축열량을 유입열량(배가스 현열)으로 무차원화하고자 하였다. 따라서 무차원 계수는 열회수율(재생율)의 의미를 갖는다. 따라서 축열체 단위체적당 유입열량은 축열층(축열실)의 단면적 및 길이, 연소 배가스량(연소량 및 공기비), 배가스온도, 평균비열 및 실질적인 배가스 회수율의 함수로 표시될 수 있다. 한편 절환주기의 무차원화는 온도효율의 경우와 동일하므로, [그림 4]에 표시한 각 축열조건에 대하여 무차원 절환주기에 따른 열회수율의 변동을 [그림 6]에 비교하였다. 역시 모든 경우에 있어서 일관성 있는 변동을 보이고 있는 것을 알 수 있다.

고온재생특성 실험결과인 [그림 5] 및 [그림 6]의 무차원 절환주기에 따른 온도효율 및 열회수율 변동특성으로부터, 온도효율 90% 이상, 열회수율 80% 이상을 유지하기 위한 무차원 절환주기는 약 1,000 이내임을 알 수 있다. 따라서 연소기 운전조건(연소부하, 공기비)에 대하여 무차원 절환주기값을 약 1,000미만으로 유지하기 위한 축열체의 단면적, 셀크기 및 길이를 도출할 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 국가 총에너지소비의 약 10%를 점하고 있는 공업로(가열로, 용해로, 단조로 등)의 고온 배가스 현열의 80% 이상을 회수하여 에너지절감율을 30% 이상 달성 가능한 축열연소시스템의 실용화를 지향하여 축열연소시스템의 핵심인 축열실 최적설계기법을 도출코자 축열체로 사용 가능한 세라믹하니컴을 대상으로 축열/재생실험을 수행하였으며, 다음의 결과를 도출하였다.

- 1) 연소부하 및 공기비에 대하여 온도효율 90% 이상, 열회수율 80% 이상을 유지하기 위한 최대 무차원 절환주기는 약 1,000 이다.

참고문헌

1. "Application of Regenerative Burners to a Continuous Heat Treatment Furnace", Expanded Project Profile 191, EEDS, Energy Efficiency Office (1986).
2. "Energy Saving Using Regenerative Ceramic Burners", Expanded Project Profile 203, EEDS, Energy Efficiency Office (1986).
3. "Energy Saving Using Impulse Fired Regenerative Burners", Expanded Project Profile 232, EEDS, Energy Efficiency Office (1988).
4. Hallett, A. G. et al: The application of self-recuperative and regenerative burner in the steel industry', The Journal of the Institute of Energy, **32**, 32-41 (1987).
5. K. Watanabe, et al: The application of regenerative combustion technology, 공업가열(일), **30**(1), 26-37 (1993).
6. "高温空氣燃燒" 特集, 省에너지, **48**(10) (1996).