

고온공기에 열용 세라믹 하니컴 축열체 성능에 관한 실험적 연구

노동순, 이은경
한국에너지기술연구소 에너지효율연구부

A Study on Ceramic Honeycomb Performance for High Temperature Air Preheat

Dong-Soon Noh, Eun-Kyung Lee
Energy Efficiency Research Division, Korea Institute of Energy Research

1. 서론

고효율 폐열회수 및 연소용 공기 고온예열성능을 갖는 축열연소기술은 공업로의 에너지 절약기술로 인식되고 있다. 축열연소와 관련된 연구는 고온연소현상[1], 질소산화물 저감기술[2], 실용 공업로에의 적용기술[3,4,5,6]등이 있다. 축열연소에 있어서 폐열회수는 연소용 공기의 예열과 밀접한 관계가 있다. 열교환은 내열성 다공성 재질로 충전된 축열실에서 이루어지며, 축열체의 폐열회수성능은 연소량, 운전공기비 및 절환주기의 영향을 받게 된다. 따라서 축열연소시스템의 성능을 최대화하기 위해서는 운전조건을 고려한 경제적인 축열설계기술이 요구된다. 세라믹 구형체는 관리 및 취급의 편리성을 이유로 축열체로 사용되고 있으나[7], 축열실에서의 압력손실 및 중량 등이 크기 때문에 적용에 있어서 제약 받는 것이 사실이다. 따라서 단위체적당 상대적으로 경량이며, 압력손실이 작고 열전달속도가 큰 세라믹하니컴의 사용을 검토하게 되었다. 세라믹하니컴을 축열체로 사용한 축열연소시스템은 소용량 연소시스템에서 부분적으로 상용화되기 시작하였으나, 축열실의 최적화를 위한 설계 방법은 제시하지 못하고 있는 실정이다.

예로서, 임의의 축열체적에 대하여 세라믹하니컴의 열용량은 세라믹구형체에 비하여 작고, 폐열회수율은 배가스의 체적 및 온도 뿐만 아니라 연소기 운전주기(연소시간)에 따라 좌우되므로, 세라믹하니컴 축열체의 경우 축열용량을 고려하여 동일 연소조건에 대하여 세라믹구형 축열체의 경우보다 운전주기(연소시간)를 단축해야 하는 문제가 생길 수 있다. 반면 연소실내에서의 가스혼합촉진 및 폐열회수성능을 동시에 고려하여 운전주기를 결정해야 하는 경우가 발생할 수 있다. 결국 연소조건 및 폐열회수조건을 고려한 최적의 축열실 구조설계기술이 요구되는 것이다.

본 연구는 1차적으로 세라믹하니컴을 축열체로 사용한 경우, 임의의 연소운전조건에 대하여 축열성능을 최대화할 수 있는 구조설계기준을 도출하는데 있다.

2. 실험장치 및 방법

고온축열/재생실험을 겸한 연소실험을 수행하고자 Fig. 1과 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 축열체 크기는 공히 직경 70mm이고 길이는 50mm이었다.

축열층의 깊이는 세라믹 하니컴을 적층하여 조절하였으며, 축열체(실) 주위는 세라믹울을 사용하여 열손실을 최소화 하였다.

공압실린더를 이용한 4방 밸브를 사용하여 연소용 공기와 연소배가스의 유로를 주기적으로 전환시킬 수 있는 절환기를 제작 설치하였으며, 연소용 노즐출구에 설치된 점화용 파이롯트 연소기 및 주 연료공급 전자밸브와 동조하였다.

실험초기 연소용 공기온도가 800℃에 도달하기까지는 연소안전을 위하여 주 연료와 점화용 파이롯트 연소기를 가동하였고, 예열공기온도가 800℃이상에서 파이롯트 연소기는 차단하고 고온공기에 의한 자연착화가 유지되도록 하였다. 실험로의 연소실 분위기 온도가 1200℃를 안정적으로 유지한 후 축열실 입출구의 온도를 측정하였다. 축열/재생시 축열체의 고온측(배가스 입구)에서의 온도는 선경 0.5mm인 R-형 열전대를 사용하여 측정하였고, 저온측(연소용 공기 입구)에서는 선경 0.5mm인 K-형 열전대를 사용하였다. 운전시간동안의 온도신호(전압)는 DT Vee(Data translation)을 사용하여 초당 5개의 온도 데이터를 수집토록 하였으며, 온도변환 프로그램을 작성하여 온도로 환산하여 저장하였다. 온도-시간 데이터를 수집하여 운전시간에 따른 축열/재생과정의 온도변동을 그래프화 하는데 사용하였고 통계처리 프로그램을 이용하여 축열/재생과정의 온도효율 및 재생효율을 계산하였다.

실험조건은 연소부하 23-60kW, 운전공기비 1.05-1.5, 운전절환시간은 10-90초 및 축열체의 길이는 100-300mm이었다.

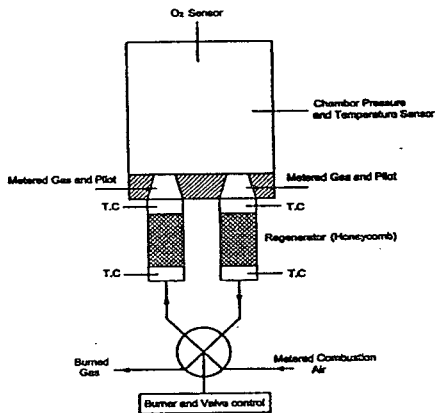


Fig. 1. A Schematic diagram of regenerative combustion test furnace.

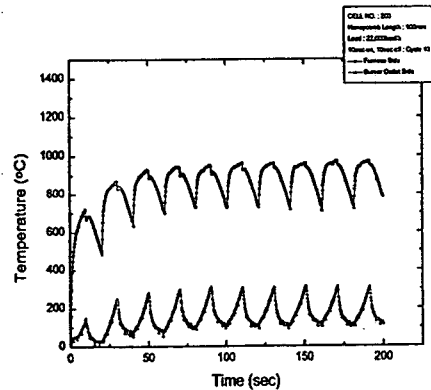


Fig. 2. Typical temperature characteristics with cycle time for 200cell honeycomb.

3. 실험결과 및 검토

온도변동특성

축열체 셀 크기 및 축열체 길이에 따른 입출구에서의 온도변동을 Fig. 2에 비교하였다. 전반적으로 축열체의 고온측(연소실 측)에서의 온도변동은 저온측(연소기 출구 측)에서의 온도변동에 비하여 완만하다. 축열후 배가스온도는 셀 크기가 작고 축열체의 길이가 길수록 저하되고 있다. 즉, 단위셀당 비표면적이 클수록 축열량이 증가함을 의미한다.

온도효율

축열/재생과정 중에 축열체 입출구의 평균온도를 취하여 각 과정에서의 온도효율은 다음 식을 이용하여 도출하였고, 축열시와 재생시의 평균효율을 취하였다.

$$\text{축열시 온도효율} : \eta_k = (T_{hin} - T_{hout}) / (T_{hin} - T_{cin}) \quad (1)$$

$$\text{재생시 온도효율} : \eta_c = (T_{cout} - T_{cin}) / (T_{hin} - T_{cin}) \quad (2)$$

운전시간에 따라 셀크기와 축열체의 길이가 온도효율에 미치는 영향을 Fig. 3에 비교하였다. 셀 크기 및 축열체의 재질이 동일할 경우에, 운전시간이 증가하면 온도효율은 감소되고 있다. 한편 축열체의 재질이 동일할 경우에, 운전시간 및 축열체 길이가 일정하면 온도효율은 거의 동일한 수준을 보이고 있으나, 운전시간 및 셀 크기가 일정할 경우 온도효율은 축열체의 길이에 비례하여 증가하고 있음을 알 수 있다.

열교환 특성

축열체 단위체적당 단위 운전시간당 열교환량은 축열체 입출구에서의 유체 온도로부터 다음 식을 이용하여 도출하였다.

$$W = (\dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{out}) / V, \quad (3)$$

여기서, \dot{Q}_{in} 및 \dot{Q}_{out} 은 축열체 입출구에서의 열유량이며 V , 은 축열체의 체적이다.

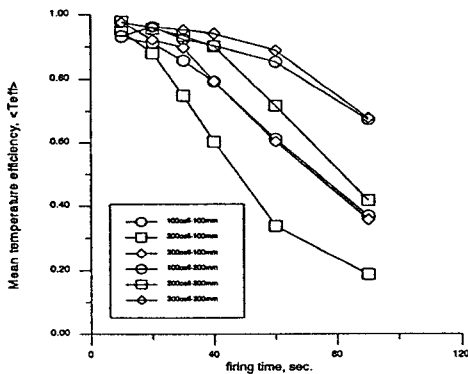


Fig. 3. Effects of number of cells and honeycomb length on temperature efficiency.

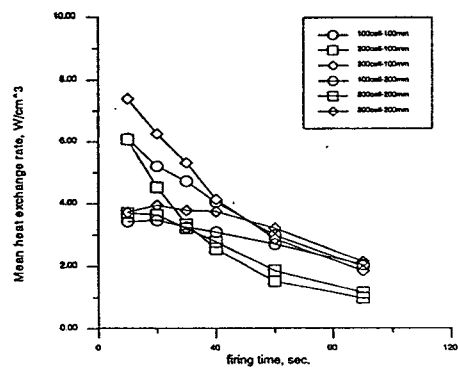


Fig. 4. Effects of number of cells and honeycomb length on heat exchange rate.

본 실험에서 열교환율은 운전시간동안의 축열량 또는 폐열회수량으로 가정하였으며, 운전시간에 따라 셀크기와 축열체의 길이가 열교환율에 미치는 영향을 Fig. 4에 비교하였다. Fig. 4의 운전시간에 따른 축열량의 변동은 운전시간이 짧은 범위에서는 축열량은 축열체의 길이에 영향을 많이 받는 반면, 운전시간이 길 수록 축열체의 물성치(열전도도, 밀도)의 영향이 상대적으로 큰 것을 알 수 있다. 따라서 축열체 선정시 축열량 및 운전시간을 고려하

여 축열체의 재질을 선정할 필요가 있다. 일반적으로 코디어라이트 재질은 알루미나 또는 코디어라이트 및 몰라이트 혼합재질에 비하여 단위체적당 축열성능이 다소 낮음을 보여 준다. Fig. 3과 Fig. 4의 온도효율 및 열교환량 변동특성은 셀의 크기, 축열체의 길이 및 운전 시간에 따라 다양하게 나타나고 있다. 이러한 다양한 특성을 물리적 의미를 갖는 무차원 계수로 일관성 있게 표시할 수 있으므로 축열구조의 최적화 또는 경량화 기법을 도출코자 하였다.

운전시간의 무차원화

세라믹 하니컴 축열체의 구조적 특징을 고려하여 단위셀당 단위시간당 배가스 통과시간 개념을 이용하였다. 즉, 배가스의 유속은 축열체 단면(유동방향에 수직한 면)에 대해 일정한 것으로 가정하면, 총 셀수, N 을 갖는 하니컴의 경우, 단위시간당 단위셀을 통과하는 배가스 체적유량, \dot{V}_{cell} 은 다음과 같다. 즉,

$$\dot{V}_{cell} = \dot{V}_i / N \quad (4)$$

여기서 \dot{V}_i 는 단위시간당 연소 배가스 체적유량으로서 연료의 발열량 CV , 단위시간당 연료량 \dot{m} , 공기비 AR , 배가스 온도 T_g 의 함수이다. 즉,

$$\dot{V}_i \sim f(\dot{m}, CV, AR, T_g) \quad (5)$$

한편 셀의 단면적 A_{cell} 및 축열체의 길이 L_r 를 고려하면 단위셀이 차지하는 체적 V_{cell} 은

$$V_{cell} = A_{cell} * L_r \quad (6)$$

따라서 단위셀 체적당 배가스량의 통과시간, t_{pass} 는 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$t_{pass} = V_{cell} / \dot{V}_{cell} = L_r * A_{cell} * N / \dot{V}_i \quad (7)$$

여기서 통과시간, t_{pass} 의 역수는 단위시간당 단위셀 체적에 상응하는 배가스량의 통과횟수, TN 을 의미한다.

한편 총 셀수, N 은 배가스 유동방향에 수직한 축열실 단면적, D_r^2 (또는 $\pi D_r^2 / 4$) 및 단위면적당 셀수, n 으로 표시할 수 있으므로,

$$N = nD_r^2 \quad \text{또는} \quad n\pi D_r^2 / 4 \quad (8)$$

따라서

$$t_{pass} \sim f(L_r, D_r^2, A_{cell}, n, \dot{V}_i^{-1}) \quad (9)$$

여기서 연소조건((5)식)을 고려하면, 운전시간, t_f (=cycle time/2), 동안 배가스량이 단위셀 체적을 통과하는 횟수, TN 는

$$TN = t_f / t_{pass} \sim f(L_r^{-1}, D_r^{-2}, A_{cell}^{-1}, n^{-1}, \dot{V}_i, t_f) \quad (10)$$

(10)식은 축열체 조건, 연소조건 및 운전조건등 실험적으로 측정이 가능한 변수로 표시된 것이다.

한편 임의의 단위셀 체적당 배가스 통과시 일정 열량이 축열되는 것으로 가정하면,

① 축열체 조건 및 연소조건이 동일한 경우, 운전시간의 증가에 따라 통과횟수는 증가하여 일정횟수 이상이면 축열체 축열용량한계를 초과하여 축열성능(온도효율)이 저하되며,

② 축열체 조건 및 운전시간이 동일한 경우, 연소조건 즉, 연소부하의 증가에 따라 배가스 열량은 증가하여 상대적으로 적은 통과횟수에서 축열용량한계를 초과하게 되며,

③ 연소조건 및 운전시간이 동일한 경우, 축열체의 체적이 작으면 상대적으로 적은 통과횟수에서 축열용량한계를 초과하여 축열성능이 저하될 수 있음을 예상할 수 있다.

따라서 임의의 실험조건에 대하여 무차원 운전시간(통과횟수)에 따른 온도효율의 변동을 일관성있게 표현할 수 있다면 (10)식은 하니컴 축열체에 대한 최적설계기준으로 활용할 수 있는 것이다.

Fig. 5는 Fig. 3의 데이터를 통과횟수에 따른 온도효율의 변동을 log-log 좌표상에 비교한 것으로 모든 경우에 있어서 일관성 있는 변동을 보여 준다.

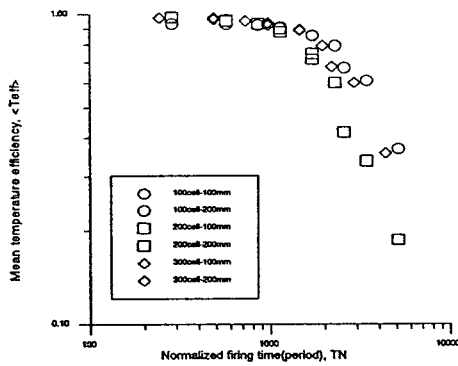


Fig. 5. The variation of temperature efficiency with the number of passages efficiency

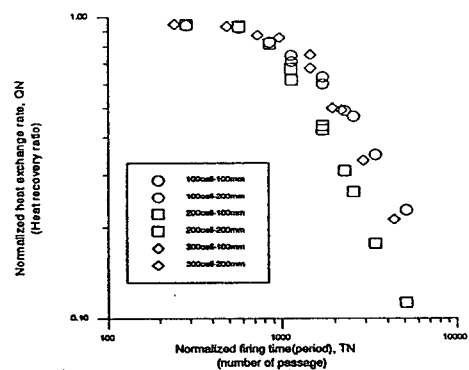


Fig. 6. The variation of heat exchange rate with the number of passages

열교환량의 무차원화

실험결과 축열량 및 재생시 열량은 거의 동일한 것으로 측정되었으며, 평균 열교환량을 축열량으로 취급하였고, 배열시 축열체 단위체적당 축열량을 유입열량(배가스 열량)으로 무차원화하고자 하였다. 따라서 무차원 수는 열회수율(재생율)의 의미를 갖는다. 한편 축열체 단위체적당 유입열량은 축열층(축열실)의 단면적 및 길이, 연소 배가스량(연소량 및 공기비), 배가스 온도, 평균비열 및 실질적인 배가스 회수율의 함수로 표시될 수 있다.

Fig. 4의 각 운전조건에 대하여 통과횟수에 따른 열회수율의 변동을 Fig. 6에 비교하였다. 역시 모든 경우에 있어서 일관성 있는 변동을 보이고 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 7 및 Fig. 8은 실험조건에 대한 온도효율 변동을 각각 실제 운전시간 및 통과횟수에 대하여 표시한 것이다. Fig. 8의 통과횟수에 따른 온도효율 및 열회수율 변동특성으로부터, 온도효율 90% 이상, 열회수율 80% 이상을 유지하기 위한 무차원 운전시간은 약 1,000 이내임을 알 수 있다. 따라서 연소기 운전조건(연소부하, 공기비)에 대하여 약 1,000이하의 통과횟수를 만족하는 축열체의 단면적, 셀크기 및 길이를 도출할 수 있다.

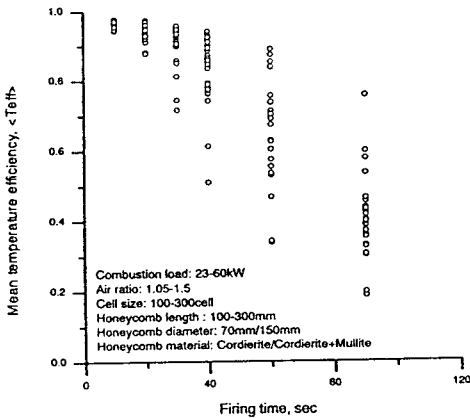


Fig. 7. The variation of temperature efficiency with the firing time

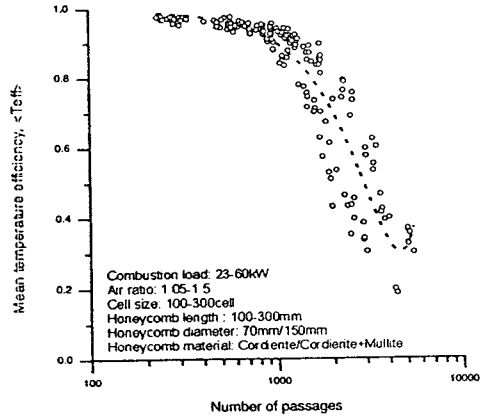


Fig. 8. The variation of temperature efficiency the number of passages

4. 결론

본 연구는 국가 총에너지소비의 약 12%를 점하고 있는 공업로(가열로, 용해로, 단조로 등)의 고온 배가스 현열의 85% 이상을 회수하고 30% 이상 에너지절감이 가능한 축열연소시스템의 실용화를 지향하여 시스템의 핵심인 축열실 최적설계기법을 도출코자 세라믹하니컴 축열체를 대상으로 다음의 결과를 도출하였다.

- 1) 실험조건에 대하여 세라믹하니컴 축열체의 고온재생 온도효율 90% 이상, 열회수율 85% 이상을 유지하기 위한 최대 배가스 통과횟수는 약 1,000 이다.
- 2) 세라믹 구형체 및 reticulated 세라믹 구조에 대한 성능실험과 넓은 조건에 대한 체계적인 보완연구가 필요하다.

참고문헌

1. Sato, J.: The 1st Asia-Pacific Conference on Combustion, May 12-15, Osaka, Japan (1997).
2. Hasegawa, T. and Tanaka, R.: The 1st Asia-Pacific Conference on Combustion, May 12-15, Osaka, Japan (1997).
3. Hallett, A. G. et al.: The Journal of the Institute of Energy, 32, 32-41 (1997).
4. Watannabe, K. et al.: Industrial Heating (Japan), 30(1), 26-37 (1993).
5. Sugiyama, S. et al.: Forum on High Performance Industrial Furnace and Boiler, March 8-9, Tokyo, Japan (1999).
6. Ishimoto, T. and Tsuzuki, H.: Forum on High Performance Industrial Furnace and Boiler, pp. 117-124, March 8-9, Tokyo, Japan (1999).
7. Jalalzadeh-Azar, A. A. et al.: J. Energy Resources Technology, Trans. of The ASME, 118, pp. 50-57 (1996).