

구형축열체를 이용한 축열기내 열유동 해석

조한창* 조길원* 이용국*
*포항산업과학연구원 에너지화성연구팀

Thermal flow analysis in heat regenerator with spheres

H. C. Cho, K. W. Cho and Y. K. Lee
Research Institute of Industrial Science & Technology

ABSTRACT

Heat regenerator occupied by regenerative materials improves thermal efficiency of regenerative combustion system through the recovery of sensible heat of exhaust gases. By using one-dimensional two-phase fluid dynamics model, the unsteady thermal flow of regenerator with spherical particles, were numerically analyzed to evaluate the heat transfer and pressure losses and to suggest the parameter for designing heat regenerator. It is confirmed that the computational results, such as air preheat temperature, exhausted gases outlet temperature, and pressure losses, agreed well with the experimental data conducted from Chugairo. The thermal flow in heat regenerator varies with porosity, configuration of regenerator and diameter of regenerative particle. Assuming a given exhaust gases temperature at the regenerator outlet, the regenerator length need to be linearly increased with inlet Reynolds number of exhaust gases. It is considered that inlet Reynolds number of exhaust gases should be introduced as a regenerator design parameter.

1. 서론

축열연소시스템에서 축열기는 채워진 축열체를 통해 배가스의 현열을 직접 회수하고 이를 공기에 전달하는 역할을 통해 시스템의 열효율을 크게 증대시킨다. 축열기에는 1000℃ 이상의 고온 배가스가 유입되어 200℃내외로 배출되고 대기온도의 공기가 800℃이상으로 예열되어 배출된다. 구형과 허니컴형의 축열체가 주로 이용되며, 낮은 압력손실과 높은 배열회수율을 갖는 허니컴형에 비해 재사용과 운용상의 편리성 때문에 구형도 많이 사용된다. 구형 축열체를 이용한 축열기는 다음 방법으로 해석하고 있다. 일본 Chugairo사 등의 버너전문업체에서 수행하고 있는 방식으로 간단한 이론적 열정산을 통해 배열회수율과 공기/배가스의 출구온도를 예측하고 실험자료를 종합하여 기초적 설계가 이루어지고 있다. 고체-기체 이상이 존재하는 유동장인 축열기를 연속체역학 또는 PSIC 방식으로 이론적으로 분석하여 축열기내 온도분포, 압력분포 등의 수치해를 얻을 수 있다. 이때 축열기가 고정층이므로 연속체역학을 이용한 수치모델이 주로 적용되는데, 조 등은 연속체역학 모델의 하나인 1차원 2상 유체역학 모델을 사용하여 축열기내 열유동을 해석하고 열전달과 압력손실 등을 평가하였다. 그러나 실제 사용되는 축열체의 물성치를 사용하지 못하였고 축열기 설계인자를 도출하지 않아 수치코드의 정확성과 열전달 및 압력손실 크기에 대한 경향을 평가할 수 없었다. 이에 본 연구에서는 실제 사용되는 축열체의 물성치를 이용하여 수치해석을 수행하였으며 실험결과와의 비교를 통해 수치코드의 응용성을 평가해 보고자 한다. 또한 변수들에 따른 축열기내 열전달 및 압력손실의 경향을 파악하고, 축열기 설계인자를 도출하고자 한다.

2. 이론적 해석

2-1 지배방정식

축열기는 입자와 가스가 공존하는 이상 고정층 유동장으로 Fig.1과 같이 정리할 수 있다. 일정 시간동안은 저온의 공기가 공급되고 다음 일정 시간동안은 고온의 배가스가 공급되는 비정상상태의 유동장이다. 공기와 배가스가 교차되면서 공급되는 시간주기를 축열연소시스템에서는 전환시간이라 정의한다. 이상 유동장에 대한 해석모델중에 반경방향의 구배를 무시하고 축방향 구배만 고려하는 1차원 이상 유체역학 모델을 채택하였다. 이 모델은 유동장의 제어체적에서 입자와 가스가 차지하는 부분의 질량, 운동량과 에너지 유속(flux)에 대한

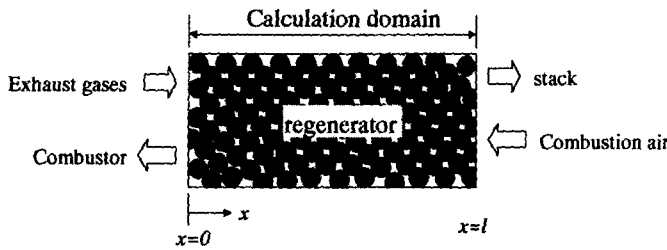


Fig.1 Calculation domain of the regenerator

보존법칙을 근거로 수식화한 것이다. 1차원 이상 유체역학 모델을 완성하기 위해서는 다음의 가정들이 필요하다. a)유체는 축열기의 반경방향과 축면방향으로 역학적 구배없이 공급된다. b)비압축성, 비반응성의 축열체는 모두 같은 형태와 크기를 갖는다. c)축

열기는 연속체 역학으로 해석가능한 충분한 단면적을 갖고 있다. 가스의 연속 방정식, 운동량 방정식, 그리고 에너지 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial(\phi\rho)}{\partial t} + \frac{\partial(\phi\rho U)}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\phi\rho U)}{\partial t} + \frac{\partial(\phi\rho U^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\phi P)}{\partial x} = -A_s D_p \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\phi\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial(\phi\rho UE)}{\partial x} + \frac{\partial(\phi PU)}{\partial x} = -A_s D_p U - A_s h_f (T - T_{ss}) - \frac{\partial(q\phi)}{\partial x} - Q_w \quad (3)$$

여기서 ρ 는 밀도, U 는 기체유속, P 는 압력, T 는 온도를 의미한다. 축열기내 기공률, ϕ 는 제어체적에서 가스가 차지하는 부피비이며, 구형 축열체를 사용하는 고정층에서는 0.3으로 일정하다. 입자의 비표면적(specific surface area), A_s 은 $(1-\phi)S_p/V_p$ 로 정량화되며 이때 S_p , V_p 는 입자의 표면적과 부피이다. 에너지, E 는 내부에너지와 운동에너지의 합으로 정의하였다. D_p 는 점성항력, q 는 열전도량, Q_w 는 벽면 열손실량, T_{ss} 는 입자의 표면온도, h_f 는 입자와의 열전달에 따른 전체 열전달계수이다.

입자의 에너지방정식에서는 입자의 평균온도(bulk temperature)를 얻을 수 있지만, 이상간의 열전달은 입자 표면에서 이루어진다. 적은 열전도계수를 갖는 축열체에서 축열체의 평균온도를 가지고 열전달을 계산하면 상당한 오차가 발생할 수 있다. 입자내 온도분포와 표면온도 계산을 통해 보다 정확히 계산할 필요가 있다. 이를 위해서 본 연구에서는 입자내 온도를 반경방향 구배만 존재하는 1차원이라 가정하고, 입자표면과 입자내 온도, T_s 는 다음의 에너지방정식으로부터 계산하였다.

$$\left(\frac{\partial T_s(t)}{\partial t} \right)_{s \text{ at } r=r_s} = \frac{\alpha_s}{r} \frac{\partial^2(rT_s)}{\partial r^2} + \frac{A_s}{1-\phi} \frac{\alpha_s}{k_s} h_f [T(t) - T_{ss}(t)] \quad (4)$$

2-2 구성방정식(Constitutive laws)

5개 지배방정식에 9개의 변수들이 존재한다. 이에 따라 네 개의 구성방정식이 더 필요하다. 모든 유체는 이상기체 상태방정식(ideal gas law), $P=\rho R_u T/M_i$ 을 만족한다. 입자와 유체간의 전체 열전달 계수, h_t 는 전도 열전달량이 매우 적기때문에 대류 열전달과 복사 열전달만을 고려하였으며, 대류 열전달계수, h_c 는 Denton의 관계식⁽²⁾을 사용하였다.

$$h_t = h_c + \epsilon_s \sigma [T(t) - T_{ss}(t)] \cdot [T(t)^2 + T_{ss}(t)^2] \quad (5)$$

$$h_c = 0.58(k_g/d_p)Re^{0.7}Pr^{0.3} \quad (6)$$

여기서 Re 는 레이놀즈 수($Re = \rho \phi d_p |U| / \mu$)이고 Pr 은 프란틀 수이다. 이상간의 속도차에 의해 발생하는 점성항력, D_v 는 Ergun의 관계식⁽⁴⁾을 적용하였다.

$$D_v = \rho U |U| [1.75 + 150(1 - \phi) / (\phi Re)] / 6 \quad (7)$$

벽면 열손실은 $Q_w = hA_w(T_w - T_\infty)$ 으로 계산되며, 여기서 A_w 는 대기에 노출된 축열기의 표면적이다. 대기에 노출된 벽면온도, T_w 를 125°C, 대기온도, T_∞ 를 25°C로 가정하였다. 자연 대류(natural convection) 열전달계수, h 는 Churchill & Chiu의 관계식⁽⁵⁾을 적용할 수 있다.

$$Nu_L = \frac{hL}{k} = \left(0.825 + \frac{0.387 Ra_L^{1/6}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right) \quad (8)$$

여기서 Ra_L 은 레이일리 수($Ra_L = g\beta(T_w - T_\infty)L^3/\nu\alpha$), L 은 축열기의벽 높이, g 는 중력가속도이다. $\beta = 2/(T_w + T_\infty)$ 에서 정의된 가스의 열전도율 k , 열확산률 α , 동점성계수 ν 등을 대입하여 대류열전달계수, h 를 계산하였다.

Table 1 Basic data for the computations

Gases	Pr=0.7 $\alpha_g=131 \times 10^{-2}$ (cm ² /s)	$\mu=384.3 \times 10^{-6}$ (g/cm s) at 850K $k_g=59.6 \times 10^2$ (g/s ² K)
Exhaust gases	$Q_i=896$ (Nm ³ /hr) $T_i=1393$ K	$P_i= -200$ mm H2O $M_i=32$ (g/mol)
Air	$Q_i=1060$ (m ³ /hr) $T_i=323$ K	$P_i= 500$ mm H2O $M_i=30$ (g/mol)
regenerative particles	$k_s=1.682$ (W/m K) $\epsilon_s=1.0$ $d_p=1.9$ cm	$\alpha_s=2.944$ (J/kg K) at 700K $\rho_s=3.51$ (g/cm ³) $\sigma=5.67 \times 10^{-5}$ (erg/cm ²)
regenerator	$A=4200$ cm ² (40×105cm) $\phi=0.30$	$l=37$ cm $t_r=60$ s

2-3. 계산방법(Computation procedure)

5개의 비선형(coupled non-linear) 지배방정식은 선행자(predictor)와 교정자(corrector)로 구성된 이단 MacCormack 방식⁽⁶⁾으로 풀이하였다. 계산의 불안정성을 해소하기 위하여

Courant 조건을 만족하도록 시간간격 $\Delta t=1.0ms$ 으로 계산하였다.

수치해석을 위한 경계조건은 다음과 같다. 모든 변수에 대하여 벽면에서는 벽면조건(wall condition)을, 유체가 공급되는 격자면에 대해서는 Dirichlet의 경계조건을 사용하였다.

사용된 조건과 데이터는 Table 1과 같이 C-중유를 사용한 연소부하 100만kcal/hr의 버너에 부착된 축열기를 기준으로 수행한 슈가이로의 실험 및 수치조건을 대입하였다. 축열기 단면적은 A 이고, 높이를 l , 절환시간을 t_r , 축열체 구경을 d_b 로 정의하였다. 공기는 가압된 상태로 공급되고, 가스 비열은 종류에 관계없이 온도의 1차함수로 정의하였다. 물성치는 축열기내 평균온도인 850K에서의 값을 사용하였으며, $\Delta x=1.0cm$ 의 동일 격자를 적용하였다.

수치해석은 배가스가 $x=0$ 에 공급되면서 시작된다. 지배방정식을 풀이하여 시간간격(time step)의 시간진행(time marching)된 해를 절환이 될 때까지 얻고 그 결과를 유동장 전후단면에 대하여 바꾸어 저장한다. 절환, 즉 배가스공급을 중단하고 공기가 $x=0$ 에 공급하여 다음 절환이 이루어질 때까지 지배방정식을 풀이한다. 그 결과를 유동장 전후단면에 대하여 바꾸어 저장한다. 이러한 과정을 반복 수행하여 온도상승과 하강곡선이 일치할 때까지 수행하는데, 본 연구에서는 총 600분동안의 열유동을 해석하였다.

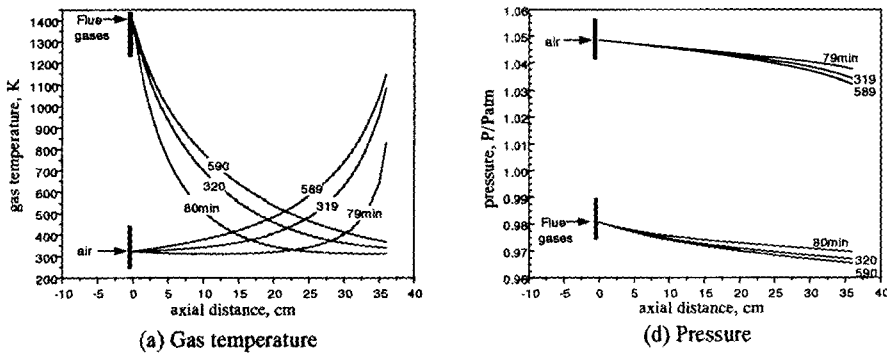


Fig 2. Axial profiles of several variables with time

3. 결과 및 고찰

비정상 상태의 축열기내 열유동을 해석하여 그 결과를 Fig.2에 도시하였다. Fig.2는 매 60분마다 저장된 온도와 압력분포중 대표적인 결과를 축열기 길이에 따라 나타낸 것이다. $x=0$

에 배가스와 공기가 공급되는데, 이는 계산방법에서 설명한 것처럼 축열기 전후단의 결과를 바꾸어 저장하였기 때문이다. 가스 온도분포를 도시한 Fig.2(a)에서 배가스가 공급되면, 입자로의 열전달에 의해 배가스 온도는 급격히 저하된다. 그러나 시간이 지나면서 배가스 배기온도와 공기 예열온도가 점차 상승되었으며 축열기내 온도분포가 점차 선형적으로 되었다. 10시간후에 가스의 출구온도가 다음 절환시 0.005K이하로 상승되어 본 연구에서는 10시간동안의 수치해석만을 풀이하였다. 10시간후의 온도분포결과인 Fig.3을 보면, 공기가 배가스 입구온도의 약 82%인 1150K로 예열되었다. 이는 배가스 온도의 85-90%수준까지 공기를 예열시킬 수 있다는 타 연구결과⁽⁷⁾와 비슷한 값이다. 배가스 배

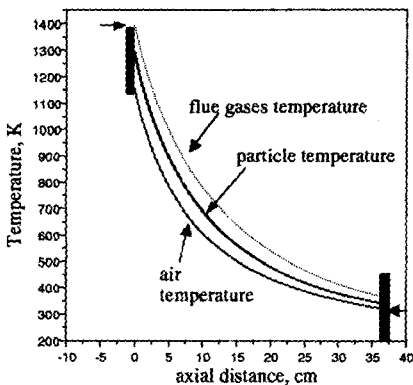


Fig 3. Temperature profiles at $t=589$ and $590min$

기온도는 적정값(473K)보다 매우 낮은 369K였다. 축열체 온도는 배가스보다 대략 70K정도 낮고 공기에 비해 70K정도 높은 온도를 유지하였다. 즉 입자의 열흡수율과 열방출량이 동일함에 따라 절환과정에 의한 온도상승이 없는 정상상태로 정의할 수 있다. 축열기 압력분포를 도시한 Fig.2(b)에서 시간에 따라 압력손실이 증가되는 것을 알 수 있다.

Table 2는 추가이로에서의 연구결과와 본 수치해석에서 얻은 결과를 비교한 것이다. 추가이로 실험결과에서 배가스가 387K로 매우 낮은 온도로 배출되며, 압력손실이 대략 150mm H₂O정도되는 것을 알 수 있다. 추가이로의 수치해석에서는 공기에 열온도는 20K정도 높게 예측되지만 배가스 배기온도에서는 80K이상의 큰 오차가 얻어졌다.

Table 2 Comparison with the results of this study and other works

		Chugairo		this study
		experiments	computation	
outlet temperature(K)	air	1143	1166	1150
	flue gases	387	468	369
pressure loss(mmH ₂ O)	air	150	172	167
	flue gases	165	152	158

본 연구의 수치해석 결과에서 배가스와 공기의 배출온도가 20K이내로 높고 낮은 온도 오차를 보이며 압력손실은 20mm H₂O이내의 오차를 보였다. Table 2에서 추가이로의 실험결과와 달리 배가스측 압력손실이 공기측 압력손실에 비해 적게 나오는 것은 낮은 배가스 흡입률을 대입하였기 때문이다. 즉 실제 연소로에서 배가스 흡입률에 대한 측정이 매우 어렵지만 보통 90-85%정도의 배가스 흡입률이 얻어진다. 하지만 여기서는 이보다 낮은 80%의 값을 적용하였기 때문으로 사료된다.

축열기 성능을 평가하기 위하여 배가스 입구온도에 대한 공기의 예열온도를 나타내는 온도효율과 배열중 공기에 열로 회수된 열에너지의 비율을 나타내는 배열회수율을 계산하였다. 실험에서의 온도효율은 77.7%, 배열회수율은 66.5%(여기서 대기온도 0℃)였으며, case 1에서 예측된 온도효율은 78.3%, 배열회수율은 67.0%로서 실험결과를 잘 예측하고 있다.

Table 2로부터 본 연구의 수치결과가 추가이로 실험 결과를 잘 추종하는 것을 알 수 있었으며 이로부터 본 수치코드가 축열기 설계를 위해 응용될 수 있을 것이라 사료된다.

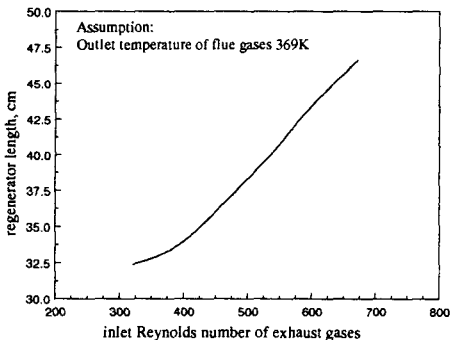


Fig. 4 The relation between inlet Reynolds number of flue gases and regenerator length with the assumption of outlet temperature of flue gases of 369K

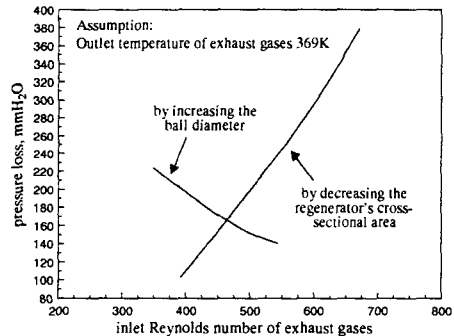


Fig. 5 The relation between inlet Reynolds number of flue gases and pressure loss with the assumption of outlet temperature of flue gases of 369K

배가스 배기온도를 기준으로 설계되는 축열기의 최적 설계를 위하여 설계인자를 도출해 보았다. 허용가능한 배가스 배기온도를 369K라고 한다면, 축열기 길이는 Fig.4처럼 축열기에 유입되는 배가스의 레이놀즈 수에 1차함수로 근사할 수 있다. 즉 축열기 길이는 레이놀즈 수를 결정하는 배가스의 유입유속과 축열체 구경에 의해 지배되고, 축열체량이 레이놀즈 수에 의한 축열기 길이와 축열기 단면적의 함수로 결정할 수 있음을 의미한다. 큰 레이놀즈 수를 이용하면, 축열기의 길이단축으로 공기 예열온도는 상승되어 전체적인 열회수율은 향상된다. 그러나 압력손실은 Fig.5에서 보는 바와 같이 배가스의 레이놀즈 수에 1차함수로 근사되지 않고 레이놀즈 수를 지배하는 축열기 구경이 증가되면 압력손실은 감소하고 축열기 단면을 줄이면 빠른 유속으로 압력손실이 증가되는 것을 알 수 있다. 이에 따라 레이놀즈 수를 증가시켜 열회수율을 증가시키기 위해서는 큰 축열체 구경을 사용하여 압력손실을 억제하는 것이 필요하다고 판단된다. 이를 통해 축열기 및 팬의 초기 설치비와 팬의 운전비용을 절감할 수 있을 것이다.

4. 결론

연소 배가스의 현열을 회수하여 연소용공기를 고온으로 예열, 연소시키는 축열연소시스템의 요소설비인 축열기내 열유동을 해석하기 위하여 고1차원 2상 유체역학모델을 도입한 수치코드를 개발하였다. 수치코드의 유용성을 확인하기 위하여 Chugairo의 실험결과와 비교평가하였으며, 수치코드가 실험결과를 잘 유추하고 있음을 알 수 있었다. 축열기의 배가스 배기온도를 기준으로 축열기 길이를 선정한다면, 축열기 길이는 배가스 공급구에서의 레이놀즈 수에 비례되어야 함을 알 수 있었다. 즉 축열기 길이는 축열기 단면적, 축열체 직경, 가스밀도 등의 영향을 받음을 알 수 있었으며, 특히 작은 구경의 축열체를 사용하는 경우에는 짧은 축열기로도 충분한 양의 배열을 회수할 수 있지만 급격히 증가되는 압력손실을 고려하여 축열기를 설계하여야 함을 알 수 있었다.

5. 후기

본 연구는 에너지관리공단 “에너지절약기술개발사업 중대형과제”사업의 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

6. 참고문헌

- (1) F. Duprat and G. L. Lopez, Comparison of performance of heat regenerators: Relation between heat transfer efficiency and pressure drop, vol.25, pp.319-329, 2001
- (2) H. Krier and M. Summerfield, eds., Interior ballistics of guns, Progress in Aeronautics and Astronautics, vol.66, AIAA, 1979
- (3) K. K. Kuo, Principles of Combustion, John Wiley & Sons, 1986
- (4) H. Krier and S. S. Gokhale, AIAA Journal, vol.16, p.177, 1978
- (5) F. P. Incropera and D. P. Witt, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, John Wiley & Sons, 1985
- (6) 조한창, 고체-기체 이상에서의 비정상 연소현상에 관한 연구, 한국과학기술원 석사학위논문, 1992
- (7) J. R. Cornfroth, Combustion Engineering and Gas Utilization, British gas E&Fn spon, 3rd ed., 1992