

수직 Rayleigh 유동내의 입자 거동 해석

고 석 보^{*†}, 전 용 두, 이 금 배

^{*}공주대학교 기계공학과 대학원, 공주대학교 기계자동차공학부

Analysis for Particle Motion of Vertical Rayleigh flow

Seok-Bo Ko^{*†}, Yong-Du Jun, Kum-Bae Lee

ABSTRACT: The exhaust gas with solid particle goes through the riser in both particle circulating type and circulating fluidized bed type heat exchanger to recover the heat. During heat transfer, gas velocity in vertical riser decreases as viscosity of exhaust gas decreases. In this case, when the particle size is fixed, sometimes the exhaust gas happens to have lower velocity which prohibit them to go out of the riser. In this paper the particle motion in vertical Rayleigh flow was studied. The behavior of heat transfer was investigated by means of velocity and temperature distribution. The result from numerical analysis was validated by the experimental results. Fortran code was used to analyze the particle motion in vertical Rayleigh flow.

Key words: Particle motion(입자 거동), Fluidized bed(유동층), Heat Exchanger(열교환기), Rayleigh flow(레이리 유동), Riser(상승관)

기 호 설 명

C_D : 입자의 항력계수
 C_p : 입자의 비열 [J/kg·K]
 D : 지름 [m]
 k : 열전도계수 [W/m·K]
 t : 시간 [s]
 T : 온도 [K]
 T_∞ : 가스의 평균온도 [K]
 V : 속도 [m/s]
 ρ : 입자의 밀도 [kg/m³]
 ρ_f : 유체의 밀도 [kg/m³]
 $\bar{\rho}$: 밀도 비, ρ_f/ρ [-]
 μ : 점성 [N·s/m²]

\bar{h} : 평균대류열전달 계수 [W/m²·K]

$\overline{Nu_D}$: 평균 Nusselt 수

Pr : Prandtl 수

Re_D : Reynolds 수, VD/ν

하첨자

p : 입자

i : 초기값

f : 목표값

1. 서론

배가스 폐열회수용 입자 순환식 혹은 순환유동층 열교환기는 배가스가 전열면을 통과하는 과정에 고체입자를 함께 순환시키는 형식의 열교환기이다. 일반적으로 가스-입자 이상유동의 경우 가스에 비해 높은 열전도계수를 갖는 고체입자의

[†]Corresponding author

Tel.: +82-41-857-9480; fax: +82-41-854-1449

E-mail address: sbko@kongju.ac.kr

영향으로 단상(가스)유동에 비해 증가된 전열성능을 나타낼 수 있음이 알려져 있고, 이를 열교환기에 응용하기 위한 연구가 최근 많은 연구자들에 의하여 진행되어 왔다.⁽¹⁾⁻⁽³⁾ 또한 유리구슬, 알루미나, 구리 등 순환유동층 열교환기에 사용되는 입자들은 전열성능의 향상, 파울링에 대한 자정기능이 기대되며 자체적으로는 내부식성이 있어 분진 및 부식성이 있는 산업공정으로부터의 배가스 열회수기로서 많은 관심이 집중되고 있다.

입자순환과 관련된 주요 열교환기구조로는 가스-입자(gas-particle)간, 가스-벽면(gas-wall)간, 입자-벽면(particle-wall)간의 열전달을 들 수 있으며, 그 밖에 입자-난류간접도 열전달에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 실제 응용 시에는 설계특성 및 운전조건에 따라 각각의 열전달기구의 중요도에 차이가 있으며, 용도에 따라 서로 다른 형태의 열교환기들이 개발되어 사용되어 오고 있다.

Fig. 1은 수직형 입자순환식 열교환기를 보여준다. 배가스는 열교환기 하부에 설치된 입구를 통하여 유입된 후 수직관을 통하여 상승하는 동안 열교환을 수행한다. 입자주입구를 통하여 주입된 입자들은 전열면의 상부에 수직전열관 주위에 설치된 입자하강관을 통하여 하강한 뒤, 수직전열관 하부에 원주상으로 설치된 틈새를 통하여 수직전열관의 관 내로 유입되어 유동화된다. 수직관 상부에서는 관의 벽면에 설치된 개구부를 통하여 흐름이 분산되며, 이 때 관성력의 차이로 인하여 입자와 가스가 분리된다. 분리된 가스는 열교환기를 빠져 나간다.

상승관을 통한 가스측 열전달은 가스-입자간 열전달과 가스-벽면간 열전달이 최대화될 수 있도록 고려된다. 가스-벽면간의 열전달은 입자가 없는 경우의 기본 열전기구이며 배가스에 함유된 열에너지 회수를 최대화하려면 가스-입자로의 열전달을 최대화하는 것이 중요하다. 배가스가 가지고 있는 열에너지를 입자가 충분히 흡수하기 위해서는 입자유입시 입자의 온도가 낮아야 하며 배가스와 상승관을 따라 상승하는 동안 충분한 열을 흡수할 수 있어야 한다. 본 연구에서는 입자-벽면간 열전달 증진효과는 부차적인 것으로 보아 고려하지 않으며, 열교환이 이루어지는 수직상승관에서의 입자의 거동을 알아보고자 한다.

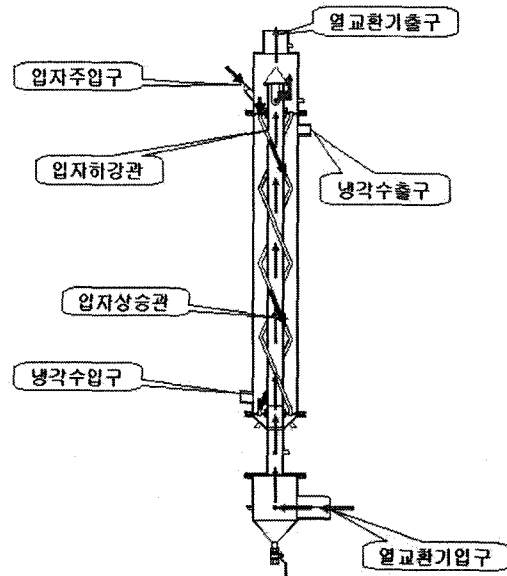


Fig. 1 Particle-Circulation-Type Heat Exchangers

2. 수직상승관 수치해석

2.1 수치해석 방법

수치해석에는 범용 열·유체 해석용 코드인 STAR-CD V3.10을 사용하였다. STAR-CD는 일반 좌표계를 사용하고 유한체적법(FVM)에 기초한다. 형상은 수직형 입자순환식 열교환기의 수직전열관을 부분을 원주방향으로 1/4로 하였다.

경계조건은 실험에서 측정된 값을 검증한 후, 조건에 따라 대입하였으며, 수치계산은 외벽으로부터 전도열전달과 대류를 함께 고려하는 conjugate heat transfer로 고려하였고, 유동장은 정상상태의 난류유동으로 난류모델로는 $k-\epsilon$ / High Reynolds Number 모델을 사용하여 계산을 수행하였다. 본 계산에 사용된 알고리즘은 SIMPLE(semi-implicit Method for Pressure-Linked Equation) method 이다.⁽⁴⁾

2.2 형상 및 격자

형상은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 수직형 입자순환식 열교환기의 수직전열관을 부분으로 크기는 내경(D)이 54mm, 높이(L)는 1m이며 두께(t)는 3mm이며 재질은 Steel이다.

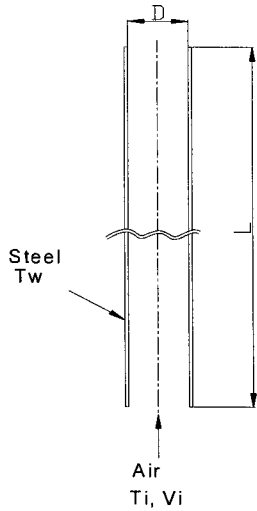


Fig. 2 Schematic diagram

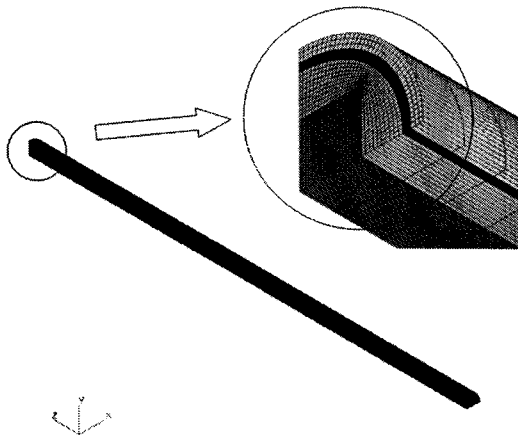


Fig. 3 Mesh (About 120,000 cells)

계산에 사용된 격자는 수직상승관의 원주방향으로 1/4 크기로 Fig. 3에서 자세히 보여주며, 격자(셀)수는 약 12만개이다.

2.3 경계조건

경계조건의 검증을 위해 실험에서 측정된 값과 비교를 하였다. 실험에 수행된 실험장치는 Fig. 1에서 보여주며, 측정된 값은 Table 1에서 나타내었다. 검증을 위해 계산에 사용된 경계조건 (Table 2의 Case I)은 입구에 온도 379.5℃, 속도 11.62m/s이며, 벽온도는 물 입·출구온도의 평균값 45.35℃를 사용하였다. 이때 입구속도는

Table 1 Experimental data

	Measured value
Gas inlet temp.(℃)	379.5
Gas outlet temp.(℃)	289.5
Water inlet temp.(℃)	44.4
Water outlet temp.(℃)	46.3
Gas velocity(m/s)	11.62

Table 2 Boundary condition

	Case I	Case II
Inlet	Vi=11.62 m/s Ti=379.5℃	Vi=11.62 m/s Ti=379.5℃
Outlet	outlet	outlet
Wall	Tw=45.35 ℃	Tw=adiabatic
Symm. wall	Symmetry	Symmetry

오리피스로부터 측정된 유량을 온도보정을 통하여 사용하였으며, 수직전열관을 통과하는 유체는 건연소배가스로서 비열이 $1.35 < C_p < 1.42$ kJ/(m³N-℃)이고, 간단하게 건연소배가스의 평균비열로 1.385 kJ/(m³N-℃)를 사용하였다.⁽⁵⁾

수직상승관에서의 열교환을 하는 경우와 하지 않는 경우의 비교를 통하여 유체의 속도변화에 대하여 알아보기 위한 경계조건은 Table 2에 보여준다.

3. 프로그램

3.1 가정사항

(1) 희박이상유동(dilute two-phase flow)이다. 즉 입자의 운동은 유체의 유동에 의하여 이루어지나, 입자에 의한 가스유동은 변화가 없는 것으로 가정한다.

(2) 순환입자는 균일한 크기의 균질한 구로 가정한다.

(3) 가스-입자간 열전달은 Lumped Heat System이다.

(4) 구내의 온도는 균일하다(spatially isothermal).

- (5) 복사효과는 무시한다.
 (6) 가스의 온도는 일정하다.

3.2 입자의 온도변화 소요시간

수직관을 통과하는 가스의 관내 평균속도(V_∞), 평균온도(T_∞)라 할 때, 관내에 유입된 구형입자가 초기온도(T_i)에서 일정 목표온도(T_f)에 도달하는데 필요한 시간은 Lumped Capacitance System하에서

$$t = \frac{\rho C_p D_p}{6 \bar{h}} \ln \frac{T_i - T_\infty}{T_f - T_\infty} \quad (1)$$

이며, 여기서 ρ 는 입자의 밀도, C_p 는 입자의 비열, D_p 는 입자의 직경이며, 평균대류열전달 계수 \bar{h} 는 등온의 구와 등온의 자유흐름에 대하여 Whitaker의 식으로부터 얻는다.⁽⁶⁾ 즉,

$$\overline{Nu}_D = 2 + (0.4 Re_D^{1/2} + 0.06 Re_D^{2/3}) Pr^{0.4} \left(\frac{\mu_\infty}{\mu_p} \right)^{1/4} \quad (2)$$

$$\left[\begin{array}{l} 0.71 < Pr < 380 \\ 3.5 < Re_D < 7.6 \times 10^4 \\ 1.0 < \frac{\mu_\infty}{\mu_p} < 3.2 \end{array} \right]$$

이고, 입자레이놀즈수는 $Re_D = \frac{VD}{v}$ 로 정의된다. 한편, Nu수의 정의로부터

$$\bar{h} = \overline{Nu}_D \frac{k}{D} \quad (3)$$

이 성립한다. 따라서 식(3)에서 얻어진 결과를 식(1)에 대입하면, 주어진 입자 및 유동 조건에 대하여 원하는 입자온도차를 얻기 위한 소요시간 t_{req} 이 결정된다.

3.3 입자의 운동

입자의 관내 상승운동은 희박 가스-입자 이상 유동 하에서 다음의 1차원 입자운동방정식으로 표현된다. 즉,

$$\frac{dV_p}{dt} = \frac{1}{A} [B - C V_p | V_p | C_D(V_p)] \quad (4)$$

이다. 여기서, $A = 1 + \frac{1}{2}\bar{\rho}$, $B = (1 - \bar{\rho})$ 및 $C = \frac{3\bar{\rho}}{4\rho}$ 이며, 구의 항력계수 C_D 는 Re_D 의 함수로서 다음의 관계식이 사용되었다⁽⁷⁾. 즉,

$$C_D = \frac{24}{Re_D}, \quad Re_D \leq 1$$

$$C_D = \frac{24}{Re_D^{0.646}}, \quad 1 < Re_D \leq 400$$

$$C_D = 0.5, \quad 400 < Re_D \leq 3 \times 10^5$$

$$C_D = 3.66 \times 10^{-4} Re_D^{0.4275}, \quad 3 \times 10^5 < Re_D \leq 2 \times 10^6$$

$$C_D = 0.18, \quad 2 \times 10^6 < Re_D$$

이다.

입자의 초기조건은 초기속도 $V_0=0$ 으로부터 수치적분을 통하여 계산되며, 계산결과로부터 입자 변위-시간 자료를 얻는다. 수치적분은 4차 Runge-Kutta formula를 사용하였다. 이 과정에서는 편의상 필요에 따라 입자의 종말속도를 이용할 수도 있다.

4. 결과 및 고찰

4.1 수치계산값과 실험값의 비교

수치계산을 통하여 얻은 값은 실험에서 측정된 값과의 비교하였다. 상승관의 입구유속에 따라 배가스로부터 전열량이 다르므로 유속이 빠르면 수직상승관의 입·출구 온도차는 온도감소는 줄어들고, 유속이 빠르면 온도감소는 크게 된다.

상승관의 입구유속은 오리피스에서 측정된 유량으로 온도보정을 통하여 계산하였고, 배가스 비열은 문헌에서 구한 값을 사용하였다.

Fig. 5는 실험에서 측정된 값과 수치계산에 의한 수직상승관의 입구 및 출구의 온도를 보여준다. 수치계산결과가 잘 일치함을 보여준다.

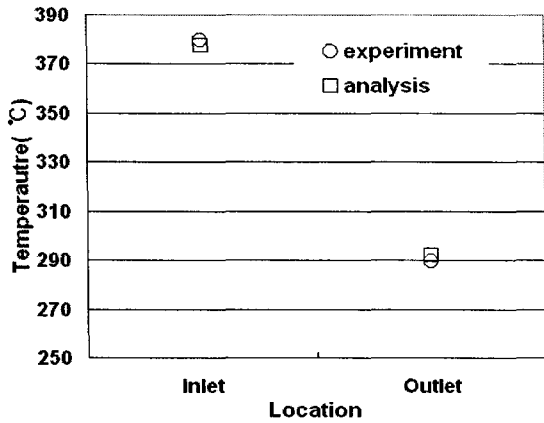


Fig. 4 Temperature at inlet and outlet

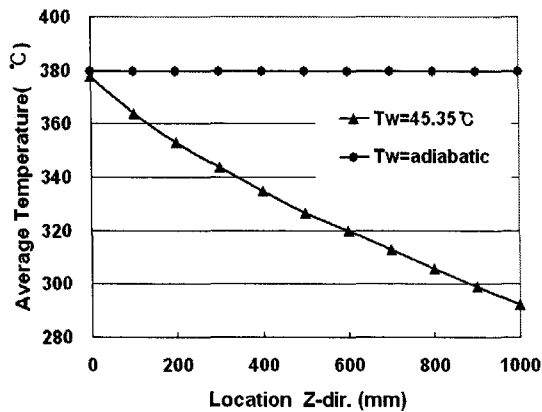


Fig. 5 Average temperature at various point of suction surface

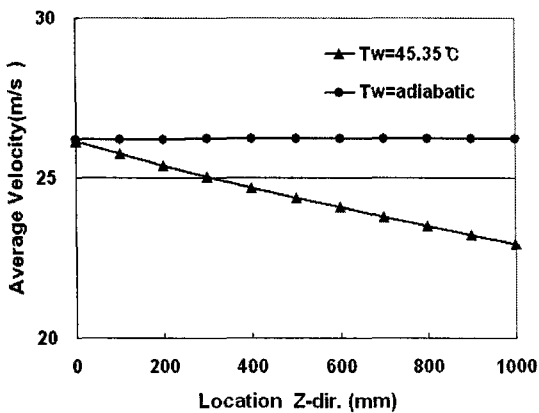


Fig. 6 Average velocity at various point of suction surface

4.2 수직상승관의 온도 및 속도

Fig. 5는 수직상승관의 위치에 따른 단면에서의 평균온도를 나타내었다. 벽에 온도조건을 준 경우 온도변화는 상승관의 상부로 갈수록 온도가 감소하였다. 벽에 단열조건을 주었을 경우에는 상승관의 상부와 하부의 온도차가 거의 나타나지 않았다. 온도변화는 영향을 주는 것은 벽으로부터의 열전달에 의해서 나타났다.

Fig. 6은 수직상승관의 위치에 따른 단면에서의 평균속도를 나타내었다. 벽에 온도조건을 준 경우에는 배가스가 상승하면서 기류속도가 점점 떨어졌으며, 벽에 단열조건을 주었을 경우에는 기류속도변화가 나타나지 않았다.

온도변화에 따른 속도변화를 알아보았다. 배가스의 온도변화는 가스의 점성에 영향을 주며, 이 영향은 기류속도에 까지 영향을 준다. 이때 입자의 크기가 정해지고, 입자와 같이 유동할 경우 입자는 상황에 따라서는 입자를 상승관 밖으로 빠져나가지 못하는 경우도 생긴다.

4.3 입자의 거동

입자의 운동은 입자의 크기, 배가스 속도 및 상승관의 크기 등에 밀접한 관련이 있고, 그 예로써 Fig. 7은 배가스 운전범위에 따른 입자의 상승속도를 보여준다. 열교환기의 배가스 운전범위가 300°C에서 150°C일 경우 입자를 500 μ m으로 선정한다면, 열교환기 입구에서 입자의 상승속도는 배가스 기류속도와 입자의 종말속도의 차로 상승한다. 상승하면서 배가스 온도는 내려가고 배가스 기류속도도 줄어들지만 입자는 상승관을 빠져나가게 된다. 하지만, 입자가 800 μ m일 경우를 보면 입자가 상승관의 입구로부터 순조롭게 올라가다가 온도가 낮아하고, 기류속도가 감소하면서 입자는 상승관을 빠져나가지 못하고 다시 떨어지게 된다. 이와 같이 온도변화에 따른 입자의 거동을 예측하는 것은 수직형 입자순환식 열교환기 또는 순환유동층 열교환기의 상승관의 설계시 중요하다.

입자의 거동을 간략한 열평형 개념 (Lumped Capacitance System) 및 입자상승속도를 고려하여 포트란 프로그램으로 코딩하였다. 입자순환에 의한 가스-입자간 열교환을 최적화하는 조건으로

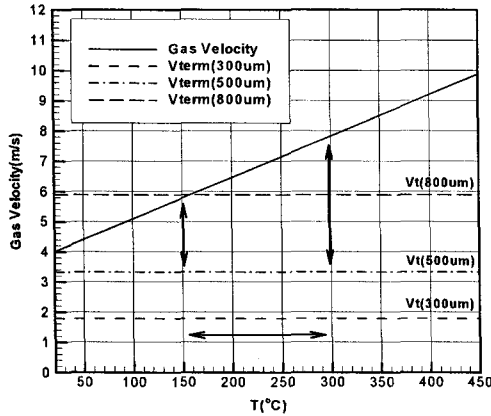


Fig. 7 Variation in particles velocity in operation temperature range

부터 입자의 크기를 결정하거나 전열관 길이를 결정하고자 할 때 사용할 수 있다.

5. 결론

지금까지 입자의 거동은 수직형 입자순환식 및 순환유동층열교환기의 상승관 설계를 위하여 연구를 수행하였다. 본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 입자의 거동에 가장 영향을 주는 기류속도에 대하여 실험값과 수치해석결과를 비교하였으며, 그 결과 잘 일치하였다. 수치해석으로 얻은 유동장 결과는 포트란 프로그램과 연계해서 사용이 가능할 것으로 보인다.

(2) 열교환이 있는 수직상승관에서의 입자의 거동을 알아보기 위해 열교환이 있는 경우와 없는 경우에 대하여 온도분포 및 속도분포를 비교하였다. 상승기류속도는 온도가 감소하면 속도도 감소하며, 이는 입자의 상승속도에 영향을 미친다.

(3) 배가스의 운전범위에 따른 입자의 상승속도를 알아보았다. 배가스의 운전범위, 입자의 크기가 정해졌을 경우 상황에 따라서는 입자는 상승관 밖으로 빠져나가지 못할 수도 있다.

(4) 입자의 거동을 입자순환에 의한 가스-입자간 열교환을 최적화하는 조건으로 간략한 열평형 개념(Lumped Capacitance System)으로 포트란 프로그램으로 코딩하였다. 이 프로그램은 입자의 크기를 결정하거나 상승관 길이를 결정하고자 할 때 사용할 수 있다.

참고문헌

1. Watanabe, T. et. al., Gas-Solid Interfacial Heat Transfer in Circulating Fluidized Beds, Heat Transfer-Japanese Research, 22 (3), (1993), pp.269-280.
2. Chen, C.-C. and Chen C.-L., Experimental Study of Bed-to-Wall Heat Transfer in a Circulating Fluidized Bed, Chemical Engineering Science, Vol. 47, No. 5 (1992), pp.1017-1025.
3. Park, S., Heat Transfer in Countercurrent Gas-Solid Flow Inside the Vertical Pipes, KSME Journal, Vol. 5, No. 2 (1991), pp.125-129.
4. Computational Dynamics Co., 2000, STAR-CD User & Methodology Manual version 3.1
5. Jung, H. J., Combustion Engineering, 1995, pp. 77.
6. Incropera, F. P. and DeWitt, D. P., Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 4th Ed. (1996), pp.212-214, 374-376.
7. Chow, C.-Y., An Introduction to Computational Fluid Mechanics, (1979), pp.7-8.