

입자 순환식 열교환기의 상승관 설계방법

전용두*

Riser Design Approach for Particle-Circulation-Type Heat Exchangers

Yong-Du Jun *

Key Words : Heat Exchanger(열교환기), Circulating Fluidized Bed(순환유동층), Particulate Flow(입자유동), Riser(상승관)

Abstract

In this paper a systematic design approach to determine the optimum size (height) of circulating fluidized bed heat exchanger for exhaust gas heat recovery is proposed. Unlike the conventional heat exchangers where the length of the heat exchanger section is not very much emphasized, the vertical length of heat exchanger tube in the case of fluidized bed heat exchangers is important because this length determines the time interval during which particles reside and transfer heat in the heat exchanger section. For particles initial conditions are nearly stationary, accelerating particles motion should be considered rather than simply assuming fully developed condition. A way to estimate optimum tube length at different fluid velocity and particle sizes is suggested based on the required conditioning time for heat transfer from the flue gas to solid particles.

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 영향으로 단상(가스)유동에 비해 증가된 전열성능을 나타낼 수 있음이 알려져 있고, 이를 열교환기에 응용하기 위한 연구가 최근 많은 연구자들에 의하여 진행되어 왔다.⁽¹⁾⁽²⁾ 또한 유리구슬, 알루미늄, 구리 등 순환유동층 열교환기에 사용되는 입자들은 전열성능의 향상, 파울링에 대한 자정기능이 기대되며 자체적으로는 내부식성이 있어 분진 및 부식성이 있는 산업공정으로부터의 폐가스 열회수 기로서 많은 관심이 집중되고 있다.

입자순환과 관련된 주요 열교환기구조는 가스-입자(gas-particle)간, 가스-벽면(gas-wall)간, 입자-벽면(particle-wall)간의 열전달을 들 수 있으며, 그 밖에 입자-난류간섭도 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.

수직다관형 shell-tube형의 열교환기는 기존 폐열회수열교환기의 문제점인 주기적인 청소와 이로 인한 운전정지 문제를 해결하고 더 나아가 전열성능의 획기적인 향상을 기대할 수 있어 이에 대한 연구가 꾸준히 진행되어 오고 있으나, 체계적인 설계방법에 관한 연구는 그 동안 부족한 실정이었다. 본 연구에서는 수직형 입자순환식 열교환기의 크기를 결정하는 요소중의 하나인 상승관의 높이를 결정하기 위한 설계개념에 대하여 소개하고자 한다.

2. 수직형 입자순환식 열교환기

2.1 기본설계개념

가스유동 및 입자의 순환모형

폐가스는 열교환기(그림 1) 하부에 설치된 입구를 통하여 유입된 후 수직관을 통하여 상승하는 동안 열교환을 수행한다. 수직관 상부에서는 관의 벽면에 설치된 개구부를 통하여 흐름이 분산되며, 이 때 관성력의 차이로 인하여 입자와 가스가 분리된다. 분리된 가스는 열교환기를 빠져 나간다.

입자주입구를 통하여 주입된 입자들은 전열면의 상부에 수직전열관 주위에 설치된 입자하강관을 통하여 하강한 뒤, 수직전열관 하부에 원주상으로 설치된 틈새를 통하여 수직전열관의 관내로 유입되어 유동화된다.

가스와 입자의 열전달모형

상승관을 통한 가스측 열전달은 가스-입자간 열전달과 가스-벽면간 열전달이 최대화될 수 있도록 고려된다. 가스-벽면간의 열전달은 입자가 없는 경우의 기본 열전기구이며 폐가스에 함유된 열에너지 회수를 최대화하려면 가스-입자로의 열전달을 최대화하는 것이 중요하다. 폐가스가 가지고 있는 열에너지를 입자가 충분히 흡수하기 위해서는 입자유입시 입자의 온도가 낮아야 하며 폐가스와 상승관을 따라 상승하는 동안 충분한 열을 흡수할 수 있어야 한다. 본 연구에서는 입자-벽면간 열전달 증진효과를 부차적인 것으로 보아 고려하지 않는다.

3. 상승관 설계개념

3.1 가정사항

- 1) 희박이상유동(dilute two-phase flow)이다.
- 2) 순환입자는 균일한 크기의 균질한 구로 가정한다.

* 공주대학교 기계공학부, yjun@kongju.ac.kr

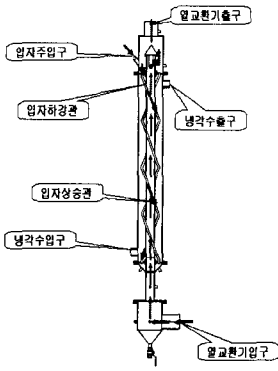


그림 1 수직형 입자순환형 열교환기

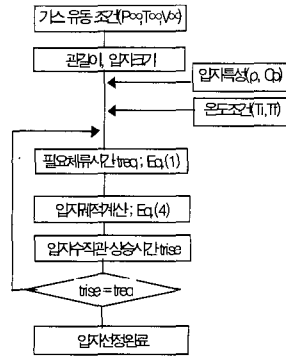


그림 2 상승관 설계과정

- 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 목표 온도(T_f)에 도달하는데 필요한 시간은 Lumped Capacitance System 하에서

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

이며, 여기서 ρ 는 입자의 밀도, C_p 는 입자의 비열, D 는 입자의 직경이며, 평균대류열전달계수 \bar{h} 는 등온의 구와 등온의 자유흐름에 대하여 Whitaker의 식으로부터 얻는다.⁽⁴⁾ 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 $Re_D = \frac{VD}{\nu}$ 로 정의된다. 한편, Nu 수의 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 입자운동과 상승관길이

입자의 관내 상승운동은 회박 가스-입자 이상유동 하에서 다음의 1차원 입자운동방정식으로 표현된다. 즉,

$$m \frac{dV_p}{dt} = C_D \frac{1}{2} \rho (V_\infty - V_p) |V_\infty - V_p| A_p \quad (4)$$

이다. 여기서, 구의 항력계수 C_D 는 Re_D 의 함수이다. 수치계산 결과로부터 입자변위-시간 자료를 얻는다.

4. 적용 예

다음은 수직관내 기류조건, 공기 및 glass beads의 특성은 표 1과 같이 주어지고 인 경우이다.

표 1 수직관내 기류, 입자 및 공기특성

항목(단위)	값	항목(단위)	값		
기류 조건	P_∞ (Pa)	101,300	공기 물성	μ ($N \cdot s/m^2$)	305.8×10^{-7}
	V_∞ (m/s)	10.0		ν (m^2/s)	52.69×10^{-6}
	T_∞ ($^\circ C$)	325		k ($W/m \cdot K$)	46.9×10^{-3}
입자 온도	T_i ($^\circ C$)	100	Pr(-)		0.685
	T_f ($^\circ C$)	200			
입자 물성*	ρ (kg/m^3)	2,520	T _∞ , P _∞		
	D_p (μm)	850			
	C_p ($J/kg \cdot K$)	750			

* 입자공급업체 제공 자료임.

수직관의 길이가 1.5m이고, 입자직경 D 가 $800 \mu m$ 인 glass beads의 경우, 입자온도조건을 만족시키기 위하여 필요한 시간 t_{req} 는 0.53 sec, 입자의 수직관체류시간 t_{rise} 는 종말속도 $5.65 m/s$ 로 계산 시 0.344 sec로 각각 계산되었다.

5. 결론

입자순환식 열교환기의 상승관 최적설계를 위하여 간략한 열평형 개념 (Lumped Capacitance System) 및 입자상승속도를 고려한 설계접근방법을 제안하였다. 본 접근방법은 입자순환에 의한 가스-입자간 열교환을 최적화하는 조건으로부터 입자의 크기를 결정하거나 전열관 길이를 결정하고자 할 때 사용할 수 있다.

후기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호 : R02-2000-00319)지원으로 수행되었습니다.

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] Incropera, F. P. and DeWitt, D. P., Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 4소 Ed. (1996), pp.212-214, 374-376.