

Downflow 순환유동층에서의 열전달 특성

김 용진, 방 진환, 김 상돈

한국과학기술원 화학공학과 및 에너지·환경 연구 센터

Heat Transfer Characteristics of Concurrent Downflow Circulating Fluidized Reactor

Y. I. Kim, J. H. Bang and S. D. Kim

Dept. of Chem. Eng. & Energy and Environment Research Center
KAIST, Taejon, Korea

서 론

지난 수십 년간 순환유동층과 riser 반응기에 관한 연구는 상당한 진전을 이뤄왔다. 비록, 순환유동층(riser)반응기가 전형적인 유동층에 비해 여러 가지 장점 - 높은 기-고의 접촉효율, 높은 기체와 고체의 처리량, 기상과 고상의 낮은 축방향 분산, 높은 turndown ratio, 점결성 입자의 처리 - 을 가지고 있으나, 불균일한 기-고의 흐름에 의한 고체의 역혼합(back-mixing)으로, 기체와 고체의 반경방향의 분리를 일으켜 두상간의 접촉을 감소시켜 생성물의 균일성과 선택도를 감소시킨다. 이러한 riser 반응기의 단점을 보완하기 위해 최근에는 기-고의 하향흐름을 갖는 downer(downflow) 반응기에 대한 관심이 증가하고 있다[1]. Downer 반응기는 축-횡 방향의 기체 및 고체 흐름의 균일성 증가로 기-고 접촉시간이 균일해 생성물의 선택도가 높고, 국부가열이 없어 hot spot 이 생성되지 않는다. 또한 기체 및 고체의 하향흐름으로 최소 유동화 속도, 최소 transport 속도가 존재하지 않아 반응구역에서의 불필요한 반응기체량을 줄일 수가 있어 매우 집약적 반응을 일으킬 수가 있으며 고체의 처리량이 상대적으로 크다는 장점이 있다 [1]. 이러한 downer 반응기를 본 연구에서는 가스화 반응기에 적용하고자 한다.

순환유동층 downer 를 이용한 분류층 반응기는 크게 석탄이 반응가스(공기)로 인해 상향흐름을 갖는 riser (연소로)와 반응가스(스팀)와 석탄이 하향흐름을 갖는 downer (가스화로)로 나눌 수 있다. 연소로에서 생성된 열은 순환매체(모래, 석탄)를 가열하고 가열된 순환매체는 가스화 반응에 필요한 열을 공급한다. 각각의 반응구역에서 생성된 가스를 분리하면 가스화구역에서 중열량가스를 얻을 수 있다. 이러한 순환유동층 반응기의 riser 및 downer 개념은 분류층 반응기의 건식 상향흐름과 습식하향흐름과 비슷하나 미반응 석탄의 순환으로 인한 반응완료로 분류층과는 달리 저온조업(950℃ 이하)이 가능하고, 석탄의 제한성이 적다는 장점이 있다.

이러한 순환유동층 downer 반응기의 설계를 위해서는 대부분의 기-고 반응 및 촉매 반응에 수반되는 열의 효율적인 공급 및 제거는 매우 중요하다. 그러나 순환유동층 riser 반응기에서의 열전달 특성에 관한 연구는 비교적 많이 수행되

어 왔으나[2-6], 기-고의 하향 흐름을 갖는 downer 에서의 열전달 특성에 관한 연구는 문헌에 보고되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 순환유동층 downer 반응기의 설계시 기초가 되는 벽면에서의 열전달계수에 대한 기체유속(1.0 - 4.0 m/s), 고체순환속도(0 - 20 kg/m²s), 입자크기(84, 104, 163, 236 μm) 등의 조업 변수의 영향을 고찰하였다.

실 험

Fig. 1 은 순환유동층 downer 반응기의 개략도를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 순환유동층 downer 반응기는 riser, 사이클론, 유동층 공급장치, downer, separator 와 loopseal 로 구성되어 있다.

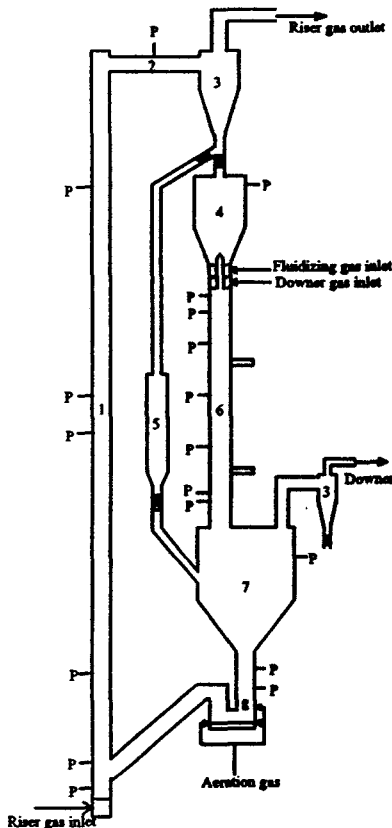


Fig. 1 Schematic flow diagram of the experimental apparatus

1. upflow riser, 2. horizontal pipe, 3. cyclone, 4. fluidized bed feeder, 5. measuring tank, 6. downer, 7. separator and solid hopper, 8. loopseal

내에서 기체와 고체의 흐름 현상을 관찰하기 위하여 separator 상부에 sight glass(viewing port) 를 설치하였고 분리된 고체의 흐름을 용이하게하기 위해 tangential aeration point 를 설치하였다. Riser 로 고체를 공급하기 위한 고체 재주입부는 비기계적 밸브인 loopseal 을 사용하였고, 순환되는 고체의 양은 loopseal 내로 들어가는 공기유량을 조절하여 조정하였다.

반응기내의 압력분포를 측정하기 위하여 riser 의 벽면에 분산판으로부터 0.1, 0.3, 0.9, 3.1, 6.2, 7.3 m. downer 에는 분산판으로부터 0.1, 0.5, 1.2, 1.9, 2.6,

separator 와 loopseal 로 구성되어 있다. Riser (0.078 m I.D. × 7.5 m high) 를 통해 이송된 고체는 사이클론에서 분리되어 유동층 공급장치로 이동하고 기체는 대기로 배출된다. 포집된 고체를 downer (0.1 m I.D. × 3.5 m-high)로 공급하기 위한 유동층 공급 장치는 중앙에 설치된 6 개의 5 mm orifice 를 갖는 bubble cap (25 mm I.D. × 30 mm high) 형태의 노즐을 통해 downer 로 고체를 공급하였다. 노즐을 통해 공급된 고체는 downer 상부에 설치된 분산판을 통해 공급되는 가스에 의해 균일하게 분산된다. 기-고 suspension 의 하강흐름을 갖는 downer 는 흐름현상을 관찰하기 위하여 아크릴로 제작하였고 배출부에는 기체와 고체의 빠른 분리를 위해 separator 를 설치하였다. Separator 는 loopseal 에서의 입자순환을 위해 충분한 고체순환속도를 제공할 수 있는 고체의 inventory 를 갖고 dead zone 이 생기지 않도록 설계하였다. Separator

3.3 m 의 지점에 압력탭을 설치하였다. 압력은 pressure transmitter 를 이용하여 측정하였고 data acquisition system 을 통해 computer 에 저장하였다. 실험에

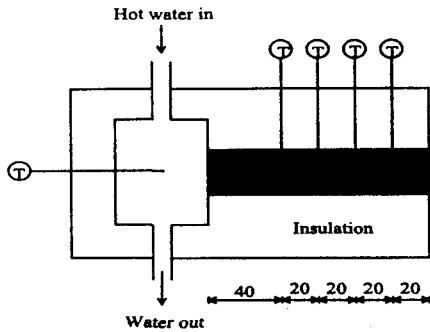


Fig. 2 Heat fluxmeter

T-type 열전대를 설치하여 온도를 측정하였다. Steel rod 의 한쪽 끝은 반응기 벽면에 설치되어있고 다른 한 면은 hot water 와 접촉한다. Heat flux(q) 는 식 (1)과 같이 steel rod 의 열전도도(k) 와 온도구배(dT/dx) 로부터 결정된다.

$$q = -k(dT/dx) \quad (1)$$

입자층과 접촉하는 표면의 온도는 온도구배를 외삽하여 구하였다. 주어진 조건에서 벽면에서의 열전달계수(h)는 식 (2) 와 같이 입자층(T_{bed}), 표면의 온도 (T_w)와 heat flux(q)로부터 결정된다.

$$h = q/(T_w - T_{bed}) \quad (2)$$

열전달 계수의 측정을 위한 heat fluxmeter 는 downer 상부로부터 1.65 와 2.90 m 지점에 설치하였다.

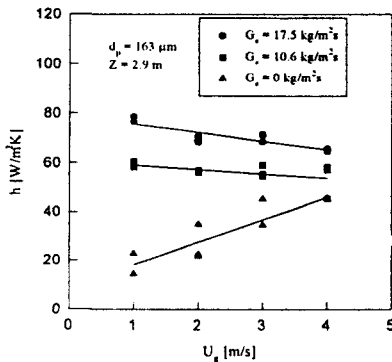


Fig. 3 Effects of gas velocity on heat transfer coefficients at different solid circulation rate.

사용된 고체물질은 밀도 3120 kg/m³, 평균입경 84, 104, 163, 236 μm 인 모래 (silica sand)를 사용하였다. 각각의 반응기로 공급되는 공기는 유량계를 통하여 공급하였고 고체순환속도의 측정은 사이클론 하부에 설치된 3-way 밸브를 이용하여 측정하였다.

벽면에서의 열전달 계수 측정에 사용된 heat fluxmeter 를 Fig. 2 에 나타내었다[5]. 이 장치는 carbon steel rod 로 제작되었으며 0.02 m 간격으로 4 개의

결과 및 고찰

일반적으로 순환유동층에서의 열전달은 기체 대류, 입자 대류, 복사로 이루어져있다. 상온에서는 복사에 의한 영향은 매우 적어, 측정된 열전달은 기체 대류와 입자대류의 합으로 나타낼 수 있다. 고체순환속도가 다른 경우 열전달계수에 대한 기상 유속의 영향을 Fig. 3 에 나타내었다. 그림에서 보듯이 주어진 고체순환속도에서 기상 유속이 증가함에 따라 벽면에서의 열전달 계수는 감소함을 알 수 있는데 이는 기상유속이 증가함에 따라 층내 부유밀도와 벽근처에서의 입자

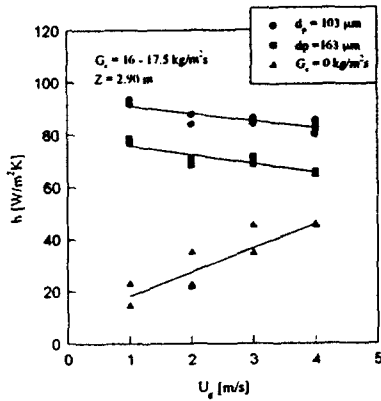


Fig. 4 Effects of gas velocity on heat transfer coefficients at different particle diameter

체류시간이 감소되기 때문이다[5]. 기상 유속이 증가함에 따라 기체 대류에 의한 열전달은 증가하나 부유밀도의 감소로 입자의 대류에 의한 열전달이 감소해 전체 열전달 계수는 감소하는 경향을 보이고 있다. 마찬가지로 기상 유속이 일정할 때, 고체순환속도가 증가하면 층내 부유밀도를 증가해 벽면에서의 열전달 계수도 증가함을 알 수 있었다. 고체순환속도가 일정하고 입자 크기가 다른 경우, 열전달계수에 대한 기상 유속의 영향을 Fig. 4 에 나타내었다. Fig. 3 과 마찬가지로 고체순환속도가 증가함에 따라 열전달계수는 감소하였고, 입자 크기가 감소할수록 열전달계

수는 증가함을 알 수 있었다. 이는 입자크기가 감소할수록 단위 표면적당 접촉점의 수가 증가하고, 경계층을 더 효율적으로 간섭하기 때문이다[6].

참고문헌

1. Zhu, J.-X., Yu, Z.-Q. Jin, Y. : *Can. J. Chem. Eng.* 73, 662 (1995).
2. Subbarao, D. and Basu, P. : *Int. J. Heat Mass Transfer*, 29(3), 487 (1986).
3. Basu, P. and Nag, P. K. : *Int. J. Heat Mass Transfer*, 30(11), 2399 (1987).
4. Chen, C. C. and Chen, C. L. : *Chem. Eng. Sci.*, 47(5), 1017 (1992).
5. Cho, Y. J., Namkung, W. and Kim, S. D. : *J. of Chem. Eng. Jap.*, 29(1), 44 (1996).
6. Ahn, G. R. and Han, G. Y. : *J. of Chem. Eng. Jap.*, 30(3), 421 (1997).