

## 순환유동층에서 기체의 혼합특성에 관한 연구

남궁 원, 김 상돈  
한국과학기술원 화학공학과

### A Study on Gas Mixing in a Circulating Fluidized Bed

W. Namkung and S.D. Kim  
Dept. of Chem. Eng., KAIST, Taejeon, Korea

#### 요약

내경 0.1 m, 높이 5.3 m 의 순환유동층 반응기를 사용하여 기체의 역혼합특성을 조사하였다. 기체의 역혼합은 동일한 기상유속일때 고체순환속도가 증가할수록 증가하였다. 희박상영역에서 일정한 고체체류량에서는 기상유속이 증가할수록 벽면에서의 하강흐름도 증가되어 기체의 역혼합은 증가되었다. Tracer 주입위치가 반응기 벽면에서 중심으로 이동할수록 빠른 기체와 고체의 흐름으로 인하여 기체의 역혼합은 상당히 감소하였다. 그리고, 희박상영역에서 core-annulus 구조를 기초로 하여 기체역혼합과 core 와 annulus 간의 물질전달계수를 예측할 수 있는 모델식을 제안하였다.

#### 서론

순환유동층이란 상승관(riser)내에 기체를 고속으로 주입하여 비발동반되는 고체 입자를 집진기에서 포집하여 층내에 재주입하는 유동층으로 기존의 기포유동층에 비하여 기-고체의 접촉효율이 우수하여 적은 과잉공기로 99% 이상의 석탄 연소효율을 얻을 수 있으며 석탄의 연소뿐만 아니라 각종쓰레기, 슬릿지등의 저열량 물질에 대한 소각 등에 대하여 우수한 연소효과를 가지며, 최근에는 환경문제가 대두되면서 SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> 등 공해방지특성이 우수하여 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 순환유동층의 중요성으로 인하여 많은 연구가 수행되었지만 대부분은 고체체류량등 고체의 수력학적특성에 맞추어져있었고, 기체의 특성에 대한 연구는 미비한 실정이다.

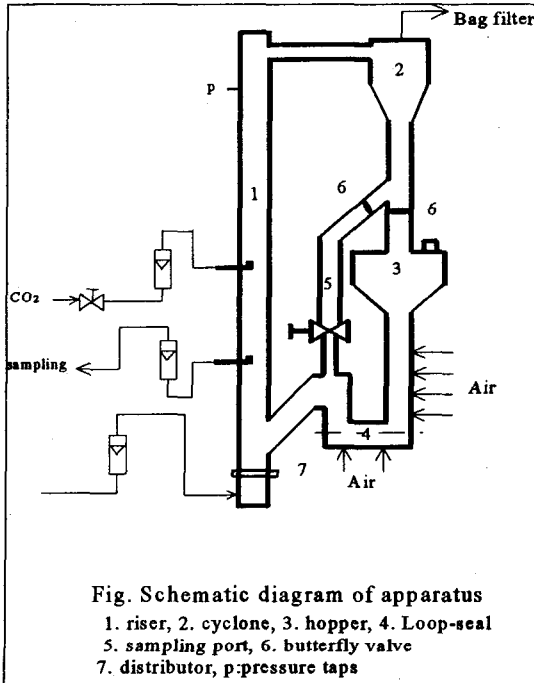
기-고 반응기의 효율은 기체혼합정도를 조절하여 향상시킬 수 있다. 순환유동층 내 기체혼합의 이해는 실제 반응기 설계시 중요하다[1]. 일반적으로 기체흐름형태는 기체 역혼합정도 측정에 의하여 간접적으로 예측할 수 있다. 비록 역혼합 특성을 안다고 정확하게 기체흐름 특성을 아는 것은 아니지만, 이를 통하여 반응기내 전환율에 영향을 미치는 기체흐름 특성에 대한 정보를 제공받을 수 있다[2].

순환유동층은 중심에서는 기-고가 빠른 상승흐름을 갖는 반면에 반응기 벽면에서는 입자가 하강하는 흐름을 갖는다. 이로 인하여, 중심과 벽면에서의 기체의 혼합특성을 다른 특성을 갖게 된다. 그러므로, 이 특성을 고려하면서 기체의 역혼합특성을 이해하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 순환유동층에서 역혼합특성에 대한 조업변수의 영향을 조사하고, 희박상영역에서 core-annulus 구조를 고려하면서, core-annulus 간 물질전달계수와 역혼합계수를 구할 수 있는 core-annulus 모델을 제안하였다.

## 실험

본 연구에 사용된 실험장치를 Fig. 1 에 나타내었다. 그림에서 보듯이 장치는 상승관과 싸이클론, 호퍼와 loop-seal 로 구성되어 있다. 상승관은 내경 0.1 m 이고, 분산판



으로 부터 상단까지의 높이는 5.3 m 이다. 상승관은 아크릴로 제작되었으며 공기는 유량이 조절되어 상승관의 하단에서 분산판을 통하여 반응기내로 주입되었고, 순환되는 고체의 양은 loop-seal내로 주입되는 공기유량을 조절하여 조정하였다. 본 실험에 사용된 시료는 FCC 로써 평균입径은 64  $\mu\text{m}$  이고, 밀도는 1720  $\text{kg/m}^3$  이다. Tracer 기체 CO<sub>2</sub> 를 사용하였고, 주입되는 영향을 최소화하기 위하여 주입부 tip 에서의 속도가 공탑속도보다 낮은 유속으로 주입하였다. Tracer 는 분산판위 3.0 m 지점에서 주입하였고, 기체의 sampling 은 주입부 아래 0.1, 0.2, 0.35, 0.55 m 지점에서 행하였다. 농후상 영역의 경우는 1.85 m 지점에서 주입하였고, sampling 은 주입부 아래 0.1, 0.25, 0.35 0.55 m 지점에서 수행하였다.

주입관과 sampling 관은 반경방향의 기체농도 주입과 측정을 위하여 반경방향으로 이동이 가능하게 하였다. 기체의 Sampling 된 기체는 GC(HP 5890II) 를 사용하여 분석하였다.

## 결과 및 고찰

Fig. 2 는 희박상영역에서 반경방향으로 주입위치를 달리했을 때 주입부 아래의 tracer gas 농도분포를 나타낸 그림이다. 그림에서 보듯이 주입위치가 중심으로 접근할수록 역혼합되는 tracer 농도의 양은 급격히 감소하였다. 이것은 CFB 반응기의 특징중의 하나인 core-annulus 구조 때문이다. 즉, 중심영역에서는 기체와 고체가 빠른 속도로 상승하는 반면에 벽면근처에서는 입자의 하강흐름이 존재하기 때문이다. 벽면근처의 하강흐름으로 인하여 역혼합이 일어나게 된다. 이것은 하강하는 입자가 주위의 기체를 안고 내려오기 때문이다. 그림에서 보듯이 주입위치가  $r/R$  이 0.9 일 때 (벽면근처에서 주입했을 때) 상당한 양의 역혼합된 tracer 기체가 측정되었다. 그러나, 주입위치가  $r/R$  은 0.7 로 이동하면서 측정되는 tracer 기체량은 크게 감소하였으며,

중심에서 주입한 경우에는 tracer 기체는 거의 관찰되지 않았다. 이것을 통하여 순환 유동층의 경우 tracer 기체 주입위치가 역혼합측정에 크게 영향을 미침을 알 수 있다.

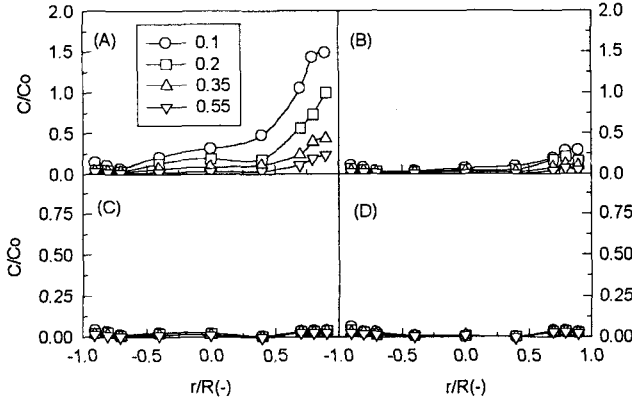


Fig. Backmixed tracer concentration in the dilute region ( $U_g = 3.0$  m/s).  
injection (from the wall)  
(A) 0.5 cm, (B) 1.5 cm, (C) 3.0 cm, (D) 5.0 cm

Backmixing 계수 : 회박상영역의 경우 위의 기체 역혼합실험으로부터 core-annulus 구조가 명확히 존재함을 알 수가 있다. 그러므로, system 을 좀더 명확하게 이해하면서 역혼합계수를 구하기 위해서는 core-annulus 구조를 바탕으로 한 새로운 방법의 접근이 필요하다. 그러므로, 본 실험에서는 core-annulus 구조를 기본으로 하고 다음과 같은 가정을 사용하여 역혼합계수를 구할 수 있는 core-annulus model 을 제안하였다.

가정) Core : 모든 기체는 중심영역에서 공탑속도보다 빠른 속도로 상승하므로, 기체 역혼합은 무시할 수 있고, 반경방향 혼합도 convective 항에 비하여 무시할 수 있다.

Annulus : 입자의 하강흐름으로 인하여 기체의 역혼합이 일어나며, 기체는 stagnant 하다. 그리고, 역혼합계수  $D_b$  와 core-annulus 간의 물질전달 계수  $k$  는 높이에 따라 변화되지 않는다.

$$\text{core : } \varepsilon_c u_c \frac{dc_c}{dx} + \frac{2k}{r_c} (c_c - c_a) = 0 \quad (1)$$

$$\text{annulus : } -D_b \varepsilon_a \frac{d^2 c_a}{dx^2} + \frac{2r_c}{R^2 - r_c^2} k (c_a - c_c) = 0 \quad (2)$$

$$\text{b.c.) } x = -\infty, c_c = c_a = 0 \quad (3)$$

$$x = 0, \left[ 1 - \left( \frac{r_c}{R} \right)^2 \right] \frac{c_a}{c_o} + \left( \frac{r_c}{R} \right)^2 \frac{c_c}{c_o} = 1 \quad (4)$$

(1), (2) 식을 (3) 과 (4) 식의 경계조건을 이용하여 풀면 다음과 같이 된다.

$$\frac{c_a}{c_o} = \frac{(a + \varepsilon_c u_c r_1) e^{r_1 x}}{a + \varepsilon_c u_c r_1 \left[ 1 - \left( \frac{r_c}{R} \right)^2 \right]} \quad (5)$$

$$\frac{c_c}{c_o} = \frac{ae^{r_1 x}}{a + \epsilon_c u_c r_1 [1 - (\frac{r_c}{R})^2]} \quad (6)$$

여기서,  $a = \frac{2k}{r_c}$ ,  $b = \frac{2r_c k}{R^2 - r_c^2}$ ,  $r_1 = \frac{-\frac{a}{\epsilon_c u_c} + \sqrt{(\frac{a}{\epsilon_c u_c})^2 + \frac{4b}{\epsilon_a D_b}}}{2}$  이다.

여기서,  $D_b$  값은 측정된  $c_a$ ,  $c_c$  의 기울기로 부터 (5), (6) 식을 이용하여 구할 수 있다.

Fig. 3 에 회박상 영역에서 역혼합계수와 core-annulus 간의 물질전달계수에 대한 기상유속의 영향을 나타내었다. 동일한 고체체류량의 경우 기체역혼합은 기상유속이 증가할수록 증가하였다. 이것은 기상유속의 증가로 벽면에서(annulus 영역) 하강하는 입자의 정도가 증가되어 이들이 하강하면서 기체의 역혼합정도를 증가시키기 때문으로 생각된다. 또한 기상유속이 증가할수록 벽면에서 하강흐름정도도 증가되고 core 와 annulus 간의 물질전달값도 증가하였다.

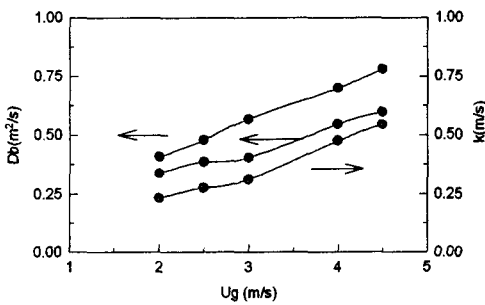


Fig. 3 The effects of gas velocity on gas backmixing coefficient and core-annulus mass transfer.

Tracer 주입위치가 벽면에서 반응기 중심으로 이동할수록 기체의 역혼합은 감소하였다. 동일한 기상유속의 경우 고체순환속도가 증가할수록 고체체류량도 증가하여 반응기내의 역혼합은 증가하였다. 그리고, 회박상의 경우 동일한 고체체류량인 경우 기상유속이 증가할수록 벽면에서 하강하는 정도가 강하여 core-annulus 간의 물질전달과 역혼합계수는 증가하였다.

### 참고문헌

1. Li, Y. and Wu, P.: "A Study of Axial Gas Mixing in a Fast Fluidized Bed", CFB III, eds. by P. Basu, M. Horio and M. Hasatani, 581(1991).
2. Li, J. and Weinsteine, H.: "An Experimental Comparison of Gas Backmixing in Fluidized Beds Across the Regime Spectrum", CES, 44, 1697(1989).