

## 순환유동층에서 기체역혼합 특성에 대한 연구

남궁원, 김상돈  
한국과학기술원 화학공학과

A Study on Gas Backmixing Characteristics  
in a Circulating Fluidized Bed

W. Namkung and S. D. Kim  
Dept. of Chemical Engineering, KAIST, Taejon, Korea

### 서론

기-고 반응기의 효율은 기체혼합정도를 조절하여 크게 향상시킬 수 있다. 새로운 반응기의 형태로써 고속유동층내 기체혼합 특성의 이해는 실제 설계시 대단히 중요하다[1]. 반응기체의 수력학적 특성은 기체의 흐름특성과 연관되고, 이 흐름특성은 기체의 역혼합 정도를 측정하여 간접적으로 예측할 수가 있다[2]. 비록, 역혼합특성이 정확하게 기체흐름특성에 대한 정보를 제공하지 않지만, 이를 통하여 반응기내의 전환율에 대한 선형적인 관계를 제공 받을 수 있다. 이러한 이유 때문에 유동층에서 역혼합 특성은 폭넓게 연구되었다. 그러나, 고속유동층내 역혼합 특성에 대한 연구는 미비한 실정이고, 발표된 연구결과에도 아직까지 토론의 여지가 남아 있다. 이것은 고속유동층내 축방향 고체체류량 분포의 존재와 core-annulus 구조로 인하여 기체혼합 측정이 상대적으로 어렵고 해석이 간단치 않기 때문이다. Cankurt 와 Yerushalmi [3]는 고속유동층에서 처음으로 기체 역혼합특성에 대하여 연구하였다. 이들은 고속유동층에서는 난류유동층에 비하여 기체역혼합이 크게 줄어들어 반응기는 plug 흐름 형태로 존재한다고 하였다. 그러나, Brereton 등[4]은 기체체류시간측정으로 기체의 역혼합이 상당히 존재함을 보였다. 위의 두 차이는 순환유동층내에 core-annulus 존재로 인하여 반응기내에 다른 흐름영역이 존재하기 때문이다. 즉, 중심영역에서는 기체와 고체가 빠른 속도로 상승하여 기체의 역혼합이 거의 일어나지 않지만 벽면 근처에서는 입자의 하강 흐름이 존재하여 기체의 역혼합이 일어나기 때문이다. 그러므로, 일부 연구자들에 의하여 core-annulus 구조를 바탕으로 기체혼합을 설명하려는 시도가 있었으나[4,5], 아직까지 일반적으로 사용할 수 있는 모델은 부족한 실정이다.

그러므로, 본 연구에서는 순환유동층내 고체체류량특성을 고려하여 조업변수에 대한 기체의 역혼합특성을 연구하고, 회박상 영역에서 core-annulus 구조를 바탕으로 역혼합계수를 구할 수 있는 모델식을 제안하였다.

### 실험

본 연구에 사용된 실험장치를 Fig. 1에 나타내었다. 그림에서 보듯이 장치는 상승관과 사이클론, 호퍼와 loop-seal 로 구성되어 있다. 상승관은 내경 0.1m, 높이 5.3m 로 상승관내 흐름현상을 관찰하기 위하여 아크릴로 제작되었다. 공기는 유량이 조절되어 분산관을 통하여 반응기내로 주입되었고, 순환되는 고체의 양은 loop-seal내로 주입되는 공기유량을 조절하여 조정하였다. 본 실험에서 사용된 시료는 FCC 로서 평균입径은  $64\mu\text{m}$ 이고, 밀도는  $1720\text{kg/m}^3$  이다. Tracer 기체

는 CO<sub>2</sub> 를 사용하였고, 주입되는 영향을 최소화하기 위하여 주입부 tip 에서의 속도는 공탑속도보다 낮은 속도로 주입하였다. Tracer 기체는 분산판위 3.0m 지점에서 주입하였고, 기체의 sampling은 주입부 아래 0.1, 0.2, 0.35, 0.55 m 지점에서 행하였다. 농후상 영역의 경우는 1.85m 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. Sampling 된 기체는 GC(HP 5890 II) 를 사용하여 분석하였다.

### 결과 및 고찰

Figs. 2 와 3은 회박상 영역과 농후상영역에서 각각 반경방향으로 주입위치를 달리했을 때 주입부 아래의 측정된 tracer gas 농도 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 주입 위치가 중심으로 접근할수록 역혼합되는 tracer 농도의 양은 급격히 감소하였다. 주입 위치가 r/R 이 0.9 일 때 (벽면 근처에서 주입했을 때) 상당한 양의 역혼합된 tracer 기체가 측정되었다. 그러나, 주입 위치가 r/R 은 0.7 로 이동하면서 측정되는 tracer 기체 양은 크게 감소하였으며, 중심에서 주입한 경우에는 tracer 기체는 거의 관찰되지 않았다. 이것은 역혼합이 tracer 기체 주입 위치에 크게 영향을 받지 않는 기포유동층에 비해 순환유동층의 경우는 반응기내 반경 방향으로의 주입 위치가 역혼합측정시 크게 영향을 미침을 알 수 있다[2]. 이렇게 반경방향 주입에 대하여 기체 역혼합특성이 달라지는 것은 CFB 반응기의 특징 중의 하나인 core-annulus 구조 때문이다. Fig. 3에서 보듯이 농후상 영역의 경우가 회박상영역(Fig. 2)에 비하여 고체체류량의 증가로 기체 역혼합이 증가하였다.

### Backmixing 계수

현재까지 역혼합계수는 one-dimensional flow 로 가정된 dispersion model 을 이용하여 구하였다. 정상상태에서 조업되고, 반경 방향의 혼합은 convective 항에 비하여 무시할 수 있으므로 dispersion model 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon D_b \frac{d^2 c}{dx^2} - \epsilon \frac{U_g}{\epsilon} \frac{dc}{dx} = 0 \quad (1)$$

$$\text{b.c.) } x = 0, c/c_0 = 1 \quad (2)$$

$$x = -\infty, c/c_0 = 0 \quad (3)$$

(1) 식을 (2) 와 (3) 식의 경계조건을 이용하여 풀면 다음과 같이된다.

$$\frac{c}{c_0} = \exp\left(-\frac{U_g}{\epsilon D_b} x\right) \quad (4)$$

여기서 D<sub>b</sub> 는 역혼합계수이다

회박상영역의 경우 core-annulus 구조가 명확히 존재하여 core 와 annulus 의 혼합특성이 상이하므로 system 을 좀 더 명확하게 이해하면서 역혼합계수를 구하기 위해서는 core-annulus 구조를 바탕으로 한 새로운 방법의 접근이 필요하다. 그러므로, 본 실험에서는 core-annulus 구조를 기본으로 다음과 같은 가정을 사용하여 역혼합계수를 구할 수 있는 core-annulus model 을 제안하였다.

가정) 모든 기체는 core 에서 공탑속도보다 빠른 속도로 상승하며, core 에서 기체역혼합은 무시할 만큼 작고, radial mixing 은 convective 항에 비하여 무시할 수 있다. Annulus 에서는 입자의 하강 흐름으로 인하여 기체의 역혼합이 일어

나며, 이 영역에서 기체는 stagnant 하다[4]. 그리고, 역혼합계수  $D_b$  와 core-annulus 간의 물질전달 계수  $k$  는 높이에 따라 변화되지 않는다.

위의 가정과 core 와 annulus 에서의 물질수지식을 바탕으로 core-annulus 모델을 전개하면 식 (5) 와 (6) 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{core : } \epsilon_c u_c \frac{dc_c}{dx} + \frac{2k}{r_c} (c_c - c_a) = 0 \quad (5)$$

$$\text{annulus : } -D_b \epsilon_a \frac{d^2 c_a}{dx^2} + \frac{2r_c}{R^2 - r_c^2} k (c_a - c_c) = 0 \quad (6)$$

$$\text{b.c.) } x = -\infty, c_a = c_c = 0 \quad (7)$$

$$x = 0, \left[1 - \left(\frac{r_c}{R}\right)^2\right] \frac{c_a}{c_o} + \left(\frac{r_c}{R}\right)^2 \frac{c_c}{c_o} = 1 \quad (8)$$

(5) 와 (6) 식을 (7) 과 (8) 식의 경계조건을 이용하여 풀면 다음과 같이된다.

$$\frac{c_a}{c_o} = \frac{(a + \epsilon_c u_c r_1) e^{r_1 x}}{a + \epsilon_c u_c r_1 \left[1 - \left(\frac{r_c}{R}\right)^2\right]} \quad (9)$$

$$\frac{c_c}{c_o} = \frac{a e^{r_1 x}}{a + \epsilon_c u_c r_1 \left[1 - \left(\frac{r_c}{R}\right)^2\right]} \quad (10)$$

$$\text{여기서, } a = \frac{2k}{r_c}, \quad b = \frac{2r_c k}{R^2 - r_c^2}$$

$$r_1 = \frac{-\frac{a}{\epsilon_c u_c} + \sqrt{\left(\frac{a}{\epsilon_c u_c}\right)^2 + \frac{4b}{\epsilon_a D_b}}}{2} \quad \text{이다.}$$

여기서,  $\epsilon_{sc} = 0.6 \times \epsilon_s$ ,  $\epsilon_{sa} = 2 \times \epsilon_s$ ,  $r_c = 0.85 R$  [6]을 대입하였다.

Fig. 4에 회박상 영역에서 dispersion 모델과 본 연구에서 제시한 core-annulus 모델을 이용하여 구한  $D_b$  값과  $k$  값을 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 core 와 annulus 간의 물질전달계수  $k$ 는 입자속도( $U_p = G_s/\rho_s$ ) 대 기상유속의 비가 증가할수록 증가하였다. 이것은  $U_p/U_g$  의 비가 증가할수록 중심에서의 상승흐름이 빨라지고, 하강하는 입자의 흐름정도가 강화되어 core-annulus 간의 물질전달이 활발히 일어나기 때문이라 생각된다. 그림에서 보듯이 역혼합계수는 모델식에 관계없이  $U_p/U_g$  가 증가할수록 증가하여 같은 경향을 나타내었다.

### 참고문헌

1. Li, Y. and Wu, P.: in "CFB Technol. III", eds. by P. Basu, M. Horio and M. Hasatani, 581(1991).
2. Li, J. and Weinstein, H.: *Chem. Eng. Sci.*, **44**, 1697(1989).
3. Cankurt, N. T. and Yerushalmi, J.: in "Fluidization", eds. by J. F. Davidson and D. L. Keairns, Cambridge Univ. Press, London, 387(1978).
4. Brereton, C. M. H., Grace, J. R. and Yu, J.: in "CFB Technol. II", eds. by

P. Basu and J. F. Large, Pergamon Press, New York, 307(1988).  
 5. Werther, J., Hartge, E. U. and Kruse, M: *Powder Technol.*, **70**, 293(1992).  
 6. Kagawa, H., Mineo, H., Yamazaki, R. and Yoshida, K.: in "CFB Technol. III", eds. by P. Basu, M. Horio and M. Hasatani, 551(1991).

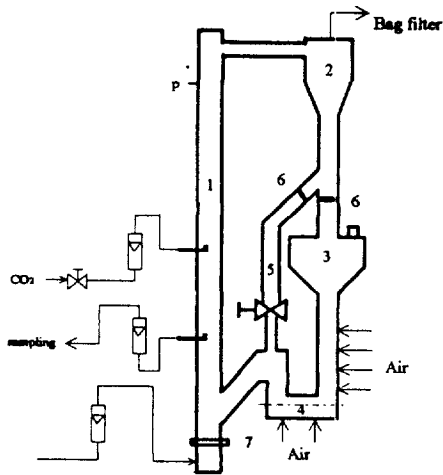


Fig. 1 Schematic diagram of apparatus  
 1. riser, 2. cyclone, 3. hopper, 4. Loop-seal  
 5. sampling bottle, 6. butterfly valve  
 7. distributor, p: pressure taps

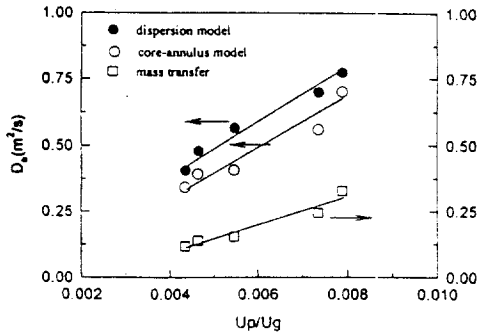


Fig. 4 Effect of  $U_p/U_g$  on backmixing coefficient and mass transfer in the dilute region.

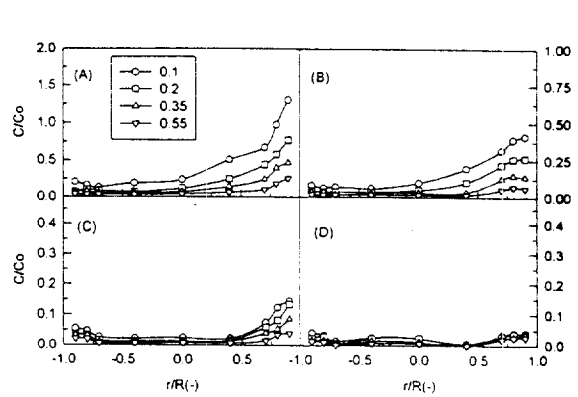


Fig. 2 Backmixed tracer concentration in the dilute region ( $U_g = 2.0$  m/s).  
 injection ( $r/R$ )  
 (A) 0.9 (B) 0.7 (C) 0.4 (D) 0

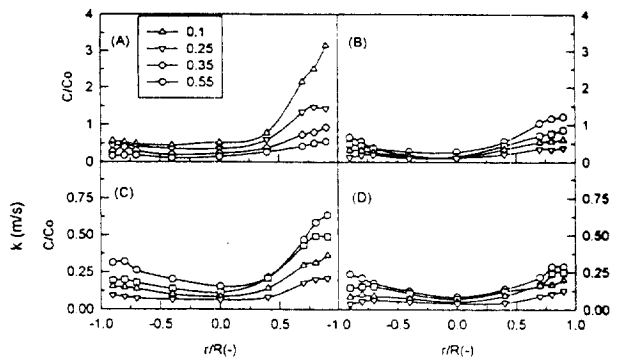


Fig. 3 Backmixed tracer concentration in the dense region ( $U_g = 2.0$  m/s).  
 injection ( $r/R$ )  
 (A) 0.9 (B) 0.7 (C) 0.4 (D) 0