

## 점성 유체 삼상 역 유동층에서 기포의 흐름특성

김현태, 송평섭, 김상우, 조용준\*, 강 용

충남대학교 화학공학과

\*한국원자력연구소 핵화학연구팀

## Bubble Flow Characteristics in Three-Phase Inverse Fluidized Bed with Viscous Liquid

Hyun-Tae Kim, Pyung-Seob Song, Sang-Woo Kim, Yong-Jun Cho\*, Yong Kang<sup>†</sup>

Department of Chemical Engineering, Chungnam National University,

Taejon 305-764, Korea

\*Nuclear Chemical Research Team, Korea Atomic Energy Research Institute,

Taejon 305-353 Korea

### 서론

삼상 역 유동층은 고체 입자의 밀도가 액체보다 작기 때문에 기체는 유동층의 밑부분에서 상승방향으로 흐르는 반면, 액체는 관의 하향방향으로 흐르는 향류흐름에 의해 유동화 되기 때문에 액체상을 고체입자에 작용하는 순 부력에 반대방향으로 흐르게 하여 유동층의 윗부분부터 아랫방향으로 유동화 시킬 수 있다[1-2].

삼상 역 유동층은 상들간의 접촉 효과가 좋고, 열 및 물질 전달 효과가 좋고, 유동 입자에 작용하는 중력이 아닌 부력에 대하여 유동화 시키는 역 유동화의 특성을 이용할 수 있어서 유동 입자의 밀도가 액체보다 작은 경우나 다공성의 입자 그리고 미소입자를 이용할 수 있으며, 에너지 소비가 낮고 고체 입자의 마모를 최소화 할 수 있다는 장점도 있다. 삼상 역 유동층은 기체 유속만으로도 고체입자를 유동화 시킬 수 있기 때문에 여러 가지 생물공정과 폐수처리 등의 환경공학 그리고 생화학 그리고 다른 주변산업에도 그 응용성은 더욱 확대 될 수 있으며 현재 폐수처리 공정이나 생물공정에서 많은 연구가 이루어지고 있고 많은 공정에 이용되고 있다. 특히, 삼상 역 유동층은 유동입자의 둘레에 형성되는 생물학적 필름(biofilm)의 두께를 미세하게 조절할 수 있기 때문에 생물학적 폐수처리 및 반응, 효소고정화 등에 매우 유동하게 응용될 수 있다[3-4].

그러나, 삼상 역 유동층에 대한 연구는 수력학적 특성이나 전달특성에 대한 연구, 그리고 생물공정에 대한 연구가 이루어지고 있지만 반응기내에 가장 큰 영향을 미칠 수 있는 기포 특성에 대한 연구는 현재 진행되고 있지 않다.

따라서, 본 연구에서는 점성 유체 삼상 역 유동층에서의 기포가 반응에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 기포의 상승속도와 그 크기를 연구함으로써 반응기내의 기포특성을 고찰하고자 하였다.

### 이론

기포특성에 대한 연구는 기포크기 및 크기분포, 기포상승속도, 기포빈도수 및 분율 등의 특성에 대한 연구가 행하여 졌으며, 기포의 측정 방법에는 2차원 유동층에서 사용되는 사진기술 방법과 뛰어난 투과성으로 3차원 유동층에서 기포거동을 측정할 수 있는 X-Ray 방법, 유동입자가 비전도성인 경우에 사용 가능한 정전용량 탐침(Capacitance probe) 방법, 광섬유를 이용한 광섬유 탐침방법(Optical Fiber probe), 기포에 의한 압력변

동을 측정하여 기포의 거동을 해석하는 압력요동방법(Pressure fluctuations), Probe tip이 액체상과 접촉하면 전기를 통하고 기체상과 접촉하면 전기를 통하지 않는 원리를 이용하여 기포의 특성을 알아내는 방법으로 전기저항탐침(Electrical-Resistivity probe)방법 등이 있다[5-6].

삼상 역 유동층내에서 축방향 위치에 따른 기포크기는 많은 복잡한 상호작용을 반영하며 분배기 지역에서 기포들이 형성되고 그들의 크기는 부력, 점성항력, 표면장력, 관성력과 같이 그들을 거동하게 하는 힘뿐만 아니라 분배기의 형태에 따라서도 영향을 받는다. 유동층에서 제한적 요소는 큰 기포가 어떻게 형성될 수 있는가에 관한 것에 있다. 큰 기포들은 액-고 현탁액에서 생겨난 난류에디(Turbulent Eddy)에 의해 변형되고 파괴되어 작은 기포를 형성한다. 기포의 분쇄는 앞선 기포의 가장자리 근처의 수직흐름과 난류저항에 의해서 영향을 받아 뒤따르는 기포가 평평해짐, 놀림, 분해와 같은 수평유입 때문에 생겨나기도 하고 기포와 개개의 입자 사이의 상호작용 또한 기포의 분쇄를 유도한다.

탐침에 의해 측정된 전기적인 신호는 기체상(gas phase)과 액체상(liquid phase)으로 나뉘게 되는데, 액체상의 경우에는 최대값을 기체상의 경우에는 최소값을 가지게 된다. 따라서, 탐침의 두 tip 간의 신호시간차이를 이용하여 다음 식들로부터 기포상승속도, 기포수직길이, 기포빈도수 등을 구할 수 있다[7]. 즉, 두 tip 간의 신호시간차이를  $t_1$ , 기포가 탐침에 머무는 시간을  $t_2$ 라 하여 식 (1)와 (2)로 구할 수 있다.

$$\text{단일기포의 상승속도, } U_{bi} = \frac{\text{탐침 tip 거리}(\ell)}{t_{1i}} \quad (1)$$

$$\text{평균기포의 상승속도, } U_b = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{bi} \quad (2)$$

$$\text{단일기포의 수직길이, } L_{Vi} = U_{bi} \cdot t_{2i} = \frac{t_{2i}}{t_{1i}} [\text{탐침 tip 거리}(\ell)] \quad (3)$$

한편, 기포의 수직길이( $L_V$ )는 기포가 두 tip 사이에 머무르는 시간  $t_2$ 로부터 식(3)과(4)에 의해 구하였다.

$$\begin{aligned} \text{평균기포의 수직길이, } L_V &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L_{Vi} \\ &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{bi} \cdot t_{2i} \\ &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{t_{2i}}{t_{1i}} \ell \end{aligned} \quad (4)$$

## 실험

본 연구에서 사용된 실험장치는 Fig.1.에서 보는 바와 같이 내경이 0.152m이고 높이가 2.5m인 아크릴 관을 사용하였다.

유동 고체입자로는 밀도가  $877.3 \text{ kg/m}^3$ 이고 직경이 0.004m 인 구형의 폴리프로필렌 입자와 밀도가  $966.6 \text{ kg/m}^3$ 이고 직경이 0.004m인 구형의 폴리에틸렌 입자를 사용하였으며, 여기서 밀도값은 실험에 의해 구한 평균 밀도값을 사용하였다. 또한, 연속액상(continuous liquid phase)으로는 물과 CMC(Carboxy Methyl Cellulose)을, 기체분산상(dispersed phase)으로는 여과된 압축공기를 사용하였다. 유동입자의 역 유동을 위해 연속액상을 유동층의 상부에서 하부로 일정유속으로 균일하게 흐르게 하기 위해 다공판 형태의 액체 분산판을 사용하였는데, 액체 분산판은 직경 0.003m의 구멍을 삼각피치로 균일하게 배치하였다. 한편, 기체 분산상은 유동층의 하부에서 주입되어 상부로 상승하도록 하였는데 기체 분산상의 균일한 분포를 위해 유동층 하부 판에 직경 0.00635 mm 의 관을 균일하게 4개 삽입하여 용접한 후 이 관에 직경 1mm의 오리피스를 일정간격으로 만

들어 사용하였다.

기포특성은 전기저항 탐침(electric resistivity probe)를 이용하여 상부 액체분산관의 0.5m하부에서 측정하였으며, 탐침의 전압은 9V이며 탐침으로부터 나오는 전기적 신호는 증폭기를 거쳐 A/D변환기를 사용하여 디지털 신호로 변환하였다. A/D변환기를 거친자료(50Hz)들은 데이터 획득장치(DT 2805 Lap Card)을 사용하여 sample의 크기를 각 실험 조건에서 3000개가 되도록 하여 PC에 입력시킨 후 off-line process로 통계적으로 처리하여 해석하였다.

## 결과 및 고찰

저항탐침으로부터 나오는 신호의 전형적인 형태를 Fig.2에 나타내었다. 각 실험조건에서 탐침으로부터 나오는 이러한 신호는 최대값과 최소값의 중간값을 설정하여 이보다 큰 경우는 연속상, 작은 경우는 기포상으로 전환한 후  $t_{1i}$ 과  $t_{2i}$ 값을 구하였다.

또한, 점성 유체 삼상 역 유동층에서 기체유속이 기포의 상당직경, 상승속도에 미치는 영향을 Figs.3~4에 각각 나타내었다. Figs.3~4에서 보는바와 같이 기체유속이 증가함에 따라 기포의 상승속도와 상당직경 모두 선형적으로 증가하는 경향을 나타냈다.

점성 유체 삼상 역 유동층에서 CMC의 증가에 따른 기포의 상승속도와 상당직경의 변화를 Figs.5~6에 나타냈다. 연속상의 점도가 증가함에 따라 기포의 상당직경은 증가하였으며, 반면 기포의 상승속도는 감소하는 경향을 볼 수 있다.

## 참고문헌

1. Fan, L.S., *Gas-Liquid-Solid Fluidization Engineering*, Butterworths, Boston, Stoneham, MA (1989).
2. Fan, L.S., Muroyama, K. and Chern, S.H., "Hydrodynamic Characteristics of Inverse Fluidization in Liquid-Solid and Gas-Liquid-Solid System", *Chem. Eng. J.*, **24**, 143 (1982a).
3. Garcia-Calderon, D., Buffiere, P., Moletta, R. and Elmaleh, S., "Anaerobic Digestion of Wine Distillery Wastewater in Down-Flow Fluidized Bed", *Wat. Res.*, **32**, 3593 (1998).
4. Garcia-Bernet, D., Buffiere, P., Elmaleh, S. and Moletta, R., "Application of the Down-Flow Fluidized Bed to the Anaerobic Treatment of Wine Distillery Wastewater", *Wat. Sci. Tech.*, **38**, 393 (1998).
5. Kim, S.H., Cho, Y.J., Song, P.S., Kang, Y. and Kim, S.D., *HWAHAK KONGHAK*, **37**, 916(1999).
6. Cho, Y.J., Song, P.S., Kim, S.H., Kang, Y. and Kim, S.D., *J. Chem. Eng. Japan*, in Press(2000).
7. Kang, Y., Cho, Y.J., Woo, K.J., Kim, K.I. and Kim, S.D., *Chem. Eng. Sci.*, **55**, 411(2000).

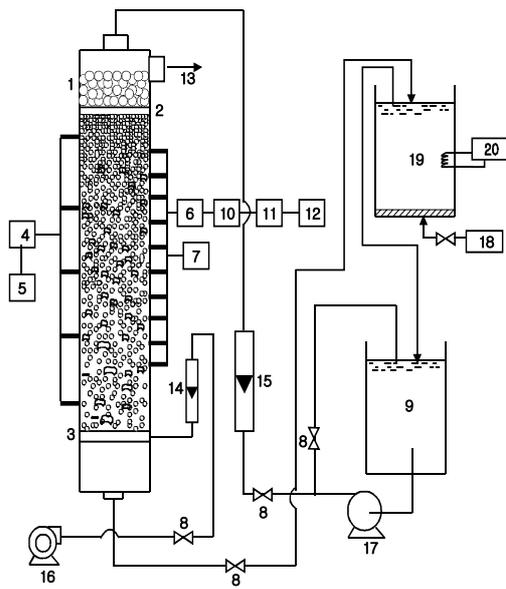


Fig. 1. Experimental apparatus :  
 1. Calming section 2. Liquid distributor 3. Gas distributor  
 4. Vent line 5. Resistivity probe 6. Valve  
 7. Amplifier 8. A/D converter 9. Computer  
 10. Reservoir 11. Gas flow meter 12. Liquid flow meter  
 13. Air compressor 14. Pump

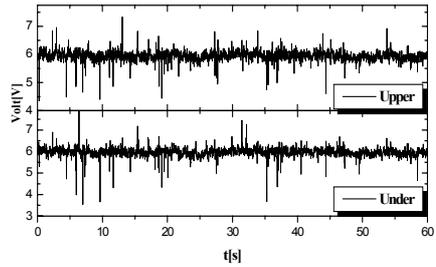


Fig. 2. Typical output signals from the electrical resistivity probe  
 ( $U_G = 0.006$  m/s,  $U_L = 0.04$  m/s, 0.2 wt% CMC, particle : Polyethylene)

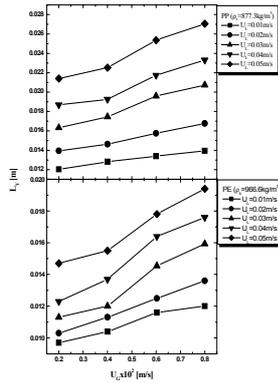


Fig. 3. Effects of  $U_G$  on the bubble chord length in viscous fluid three-phase inverse fluidized beds. (CMC 0.2 wt%)

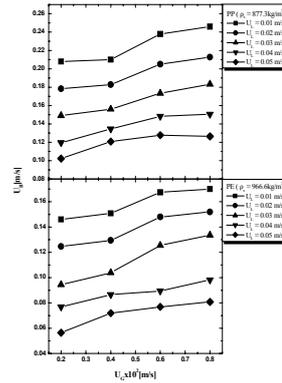


Fig. 4. Effects of  $U_G$  on the bubble rising velocity in viscous fluid three-phase inverse fluidized beds. (CMC 0.2 wt%)

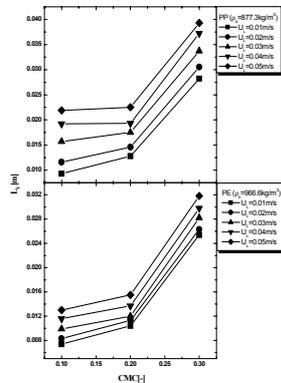


Fig. 5. Effects of Viscous fluid on the bubble chord length in viscous fluid three-phase inverse fluidized beds. ( $U_G = 0.004$  m/s)

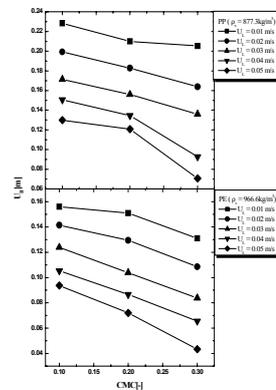


Fig. 6. Effects of viscous fluid on the bubble rising velocity in viscous fluid three-phase inverse fluidized beds. ( $U_G = 0.004$  m/s)