

## Three Phase Slurry Bubble Column의 수력학적 특성 및 UV Intensity에 관한 연구

박병섭, 이현희, 한귀영, 이동현\*, 김상돈\*,  
성균관대학교, 한국과학기술원  
(dhlee@skku.edu\*)

### Hydrodynamic Characteristics and UV Intensity in the Three Phase Slurry Bubble Column

Byung Sub Park, Hyun Hee Lee, Gui Young Han, Dong Hyun Lee\*, Sang Done Kim\*  
Department of Chemical Engineering, Sungkyunkwan University  
Department of Chemical and Biomolecular Engineering and Energy & Environment Research Center,  
Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 305-701, Korea  
(dhlee@skku.edu\*)

#### 서론

슬러리 기포탑 광반응시스템의 반응기는 삼상 슬러리 반응기 (three phase slurry reactor)로서 일반적으로 기체와 고체입자가 분산상을, 그리고 액체가 연속상을 형성하며 다상간의 혼합효과가 매우 좋고 열전달 및 물질전달속도가 매우 높다는 장점을 가지고 있다. 특히 최근에는 환경오염이 매우 심각한 문제로 대두되면서 삼상 반응기의 환경공학적 응용 기술이 큰 관심의 대상이 되고 있다. 그 예로서 대기오염방지를 위한 석유잔류분의 탈황공정과 석탄의 액화에 의한 탈황공정, 수질오염방지를 위한 생화학적 폐수공정 등을 들 수 있다. 하지만 연속상의 액체와 분산상의 기체상 모두 상당한 backmixing을 가지고 있을 뿐만 아니라 어느 정도의 촉매가 쌓이며 bubble이 합체할 수 있는 단점을 가지고 있어 슬러리 반응기의 scale-up 하는 데에는 어려움이 있다. 그 예로 슬러리의 농도가 증가함에 따라 촉매의 비활성도도 증가하는 것을 볼 수 있으며 foaming 현상과 입자에 의한 슬러리 반응기의 마모현상도 그 예로 들 수 있다. 무엇보다도 슬러리 반응기의 수력학적 특성 및 물질전달 특성에 관한 연구의 부족이 scale-up의 가장 큰 어려움이다[1-3].

또한 광촉매를 이용한 유기오염물질의 제거 반응은 일반적인 불균일계 반응과는 다르게, 반응물(오염물질)의 촉매표면으로의 흡착뿐만 아니라, 광촉매를 활성화시키는 광원이 촉매 표면에 잘 전달이 되어야 하며 광원의 균일한 조사가 필요하다.

기존의 연구와 달리 새로운 형태의 슬러리 기포탑 광반응시스템은 슬러리 기포탑의 특성으로 반응기 내에서 반응기체와 광촉매가 유입되는 유체에 의하여 혼합을 하게 되고 이때 광촉매는 반응기의 축방향, 반경방향으로 움직이며 반응기에 투입된 광촉매가 골고루 빛을 받으면서 광반응을 일으키게 된다. 따라서 반응기 체적 당 처리할 수 있는 유기오염물질의 양이 증가하게 되는 결과로 대용량, 저농도의 유기오염물질의 처리에 매우 적합한 반응기 형태로 판단되어 연구가 진행되고 있다.

따라서 본 연구에서는 슬러리 기포탑 광반응기의 scale-up과 반응기의 모델링을 위해 슬러리 반응기 내 고체입자의 dead zone을 해결할 수 있는 조업조건을 파악하고자 입자 크기, 유속, 고체평균농도의 변경에 따른 유동특성 해석과 고체입자의 축방향 농도 분포를 살펴보고자 한다. 또한 하나의 광원에서 나오는 광량을 효율적으로 이용하기 위해서 광원을 반응기 내부 중심에 설치하고 원환관 형태의 반응기를 제작하는 것이 우수하다는 연구를 바탕으로 슬러리 반응기의 수력학적 특성을 파악한 후 반응기의 조업조건에 따라 광원의 세기에 대해서 파악하고자 한다.

## 실험

슬러리 기포탑 광반응기의 수력학적 특성을 고찰하기 위하여 Fig. 1-(a)과 같이 내경 11 cm, 높이가 1 m인 아크릴 관을 이용하여 실험하였다. 아크릴 관 안은 광원을 고려하여 내경 4 cm, 높이 1 m인 아크릴 tube를 사용하여 반응물이나 촉매가 혼입되지 않도록 하였다. 반응기 하부에 설치된 air sparger는 sintered metal을 이용하였다. 또한 축방향으로 압력을 측정하기 위하여 분배기 위 5 cm에서부터 10 cm 간격으로 tap을 설치하여 차압측정기 (OMEGA, PX771A)로 측정하였다. 또한 유동 시 고체입자의 균일함/불균일함을 알아보기 위하여 분배기 위 17 cm 간격으로 4개의 밸브를 설치하였다. 광촉매 입자들의 수력학적 거동을 살펴보기 위하여 사용된 입자는 바이넥스(주)에서 제조한 glass bead로 각각의 평균입경은 111, 134, 158, 192  $\mu\text{m}$ 를 사용하였으며 UV 광원의 세기 측정 실험에서는 평균입경이 130  $\mu\text{m}$ 인 silica gel (Merck, pore volume: 0.74-0.84 ml/g)을 함께 실험하였다.

또한 기상유속을 0 에서 4.05 cm/s까지 변경시켜가면서 광촉매 입자크기에 따른, 고체입자의 농도에 따른 각 상의 체류량 측정 및 축방향 고체농도 분포 측정실험을 하였다.

슬러리 기포탑 광반응기 내의 광원의 세기를 측정하기 위하여 Fig. 1-(b)와 같이 아크릴 실험장치와 동일한 크기의 stainless steel관으로 제작하여 실험하였다. 사용한 기체는 공기이며 반응기 하부에 90° 간격으로 4개를 원형으로 설치한 air distributor를 통해 공급하였다. stainless steel관 내부 중앙에는 석영관으로 보호되는 직경 1.8 cm, 높이 1.55m 인 UV-lamp가 설치되었으며 이 UV-lamp는 254nm의 UV-C 파장을 주 파장으로 하는 Germicidal lamp(Sankyo Denki Co., Japan, 65W)로서 반응기 중앙에 1개를 설치하여 반응기를 통해 상승하는 광촉매에 직접 자외선을 쬐여줄 수 있도록 하였다. 내부에 설치된 UV-lamp의 강도를 측정하기 위하여 분배기 위 15, 35, 55, 70cm에서 stainless steel관 내부로 probe를 삽입하여 내부 중앙으로부터 2 cm 떨어진 곳에 설치된 probe를 통해 광신호를 전기신호로 전환한 다음 이를 신호증폭기로 증폭시켜 A/D Converter를 통해 컴퓨터에 저장하였다.

## 결과 및 고찰

Fig. 2은 기상 체류량에 대한 평균 고체입자 농도의 영향을 나타내었다. 일반적으로 기체유속이 증가함에 따라 gas holdup은 증가하며 고체입자의 농도가 증가함에 따라 감소한다. 이는 공탑기체속도가 증가함에 따라 탑내 유동층의 단위면적 및 단위시간당 기포 생성속도가 증가하고 이에 따라 액상을 통하여 상승하는 기포가 자신이 지닌 운동량을 더욱 많이 기포후면의 액상 wake의 형성에 사용하기 때문에 gas holdup이 증가하지만 그 증가율은 기상유속이 증가함에 따라 감소한다. 또한 고체농도의 증가에 따라 slurry 내의 액상의 점도가 증가하므로 기포의 상승속도가 감소하고 기포의 합체가 증가하며 이에 따라 기포크기가 커지기 때문에 gas holdup이 감소한다. 그러나 Fig. 3에서 보는 바와 같이 slurry 농도가 0.8 vol.%까지는 gas holdup이 약간 증가하다가 slurry 농도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 알 수 있다.

Fig. 3은  $d_p$ 가 158  $\mu\text{m}$ 이고 기체유속이 4.05 cm/s에서 각 평균고체농도에 따른 축방향 고체농도 분포를 나타내었으며 평균고체농도가 작은 경우 축방향에 따른 변화량은 적으나 농도가 클수록 column의 bottom 부근에서 채취된 입자의 양과 top 부근에서 채취된 입자의 양의 차이가 큼을 알 수 있다. 이는 중력의 영향과 분산관을 통해 순환되는 기체와 액체의 순환 운동에너지사이에서 고체의 농도가 작은 경우는 가라앉는 입자의 양이 부유되어있는 입자의 양보다 많기 때문에 column내에 부유되어 있는 입자가 거의 없었으나 고체의 농도가 높은 경우는 상대적으로 부유되어 있는 입자의 양이 더 많기 때문에 column의 bottom 부근을 중심으로 많은 양의 고체입자들이 부유되어 있음을 알 수 있었다. 또한 각 평균고체농도의 축방향 높이에 따른 UV 강도비를 살펴보면 Fig. 4와 같이

나타낼 수 있는데 축방향 높이가 증가함에 따라 UV 강도비는 증가하며, 고체의 농도가 증가함에 따라 UV 강도비는 낮아짐 알 수 있다. 이와 같은 경향은 동일한 조건에서 고체평균농도의 증가에 따라 기포의 합체가 증가하며 이에 따라 기포크기가 커지고 기포후면의 wake의 크기도 증가하여 유체단위 질량당 에너지 소멸속도를 증가시키기 때문이다. 여기에서 기포경의 증가가 보다 빠른 기포의 상승속도를 초래하고 이에 따라 더욱 강렬한 액상혼합이 유도됨을 알 수 있다. 또한 고체평균농도가 높을수록 물속에 존재하는 입자의 양이 많으며 물속에 부유한 고체입자들은 UV light를 난반사시키므로 같은 조건에서 고체입자들이 적은 경우보다 UV 강도비가 낮아짐을 알 수 있다.

Fig. 5는  $d_p$ 가 158 $\mu\text{m}$ 이고 고체의 평균농도가 30 g/L에서 각 유속에 따른 축방향 기체 유속 분포를 나타내었다. 기체유속이 증가할수록 column의 bottom에 가까울수록 슬러리 고체농도가 높음을 알 수 있으며 유속이 낮으며 top에 가까울수록 고체농도가 희박함을 알 수 있다. 이는 기체유속이 증가할수록 기포생성속도가 증가하며 액상을 통해 상승하는 기포의 운동량으로 인한 액상 wake의 형성을 촉진하기 때문에 상대적으로 부유되어 있는 고체입자의 양이 많다고 할 수 있다[4,5]. 고체의 평균농도 30 g/L에서 유속에 따른 축방향 UV 강도를 측정하면 Fig. 6.과 같이 나타낼 수 있는데 column의 bottom은 top에 비해 유속이 증가할수록 기포의 수가 상대적으로 많으며 이로 인한 광산란으로 UV의 흡수량은 적어지므로 UV 강도는 낮아짐을 알 수 있다.

Fig. 7은 기체유속이 4.05 cm/s이고 평균고체농도가 30g/L에서 각 고체입경에 따른 축방향 고체농도 분포를 나타낸 것이다. 입자 크기가 작을수록 전체 column 내의 농도분포가 균일해짐을 알 수 있다. 이는 고체입자의 크기가 증가할수록 입자의 종말속도가 증가하게 되며 특히 bubbly 흐름영역에서는 축방향에 따른 입자의 불균일도에 의하여 탑하부에 입자가 쌓이게 되고 이것이 기포와 액체의 상향류에 상당한 저항요소로 작용하기 때문에 작은 입자가 큰 입자에 비해 부유되어 있는 고체 입자의 양이 많음을 알 수 있다. 이러한 이유로 Fig. 8에서 보는 바와 같이 입자크기가 작을수록 큰 입자에 비해 낮은 UV 강도비를 나타내었다.

## 결론

삼상 슬러리 기포탑 광반응기의 입자크기, 유속, 고체평균농도의 변경에 따른 유동 특성 및 축방향 농도 분포에 대한 연구를 통하여 기체 유속이 증가함에 따라 기상 체류량은 증가하였으나 증가율은 감소함을 알 수 있었다. 또한 기체유속 및 고체 평균농도가 증가할수록 입자크기가 작을수록 반응기 내의 농도분포가 균일해 짐을 알 수 있었으며 이에 따른 UV intensity 또한 낮아짐을 알 수 있었다.

## 참고문헌

- [1] Park, C.J., K.J. Oh, D.S. Doh: *HWAHAK KONGHAK*, **28**, 493 (1990).
- [2] Kim, S.D. and Kim, C.H.: *J. Chem. Japan.*, **16**, 172 (1983)
- [3] B. Gandhi, A. Prakash, M.A. Bergougnou : *Powder Technology*, **103**, 80 (1999)
- [4] Shah, Y.T., Kelkar, B.G., Godbole, S.P. and Deckwer, W.D.: *AIChE J.*, **28**, 353 (1982)
- [5] Kelkar, B.G., Shah, Y.T. and Carr, N.L.: *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, **23**, 308 (1984)

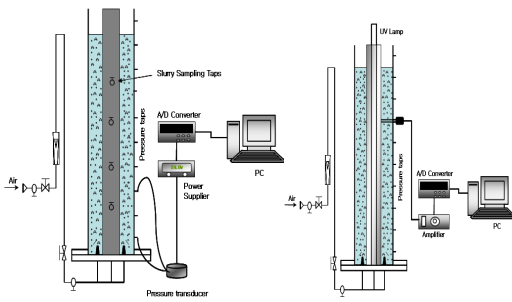


Fig. 1. 장치도

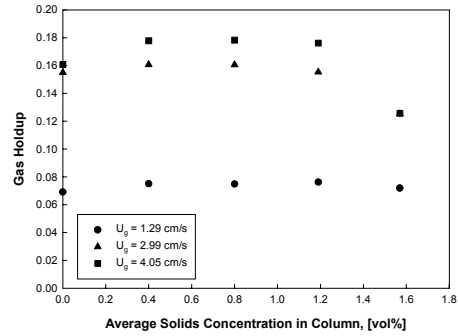


Fig. 2. 고체농도에 따른 기체 상체류량.

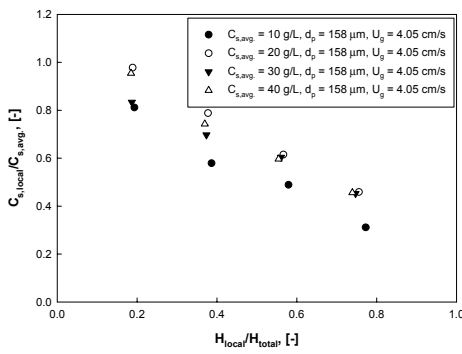


Fig. 3.  $H_{local}/H_{total}$  에 따른  $C_{s,local}/C_{s,avg}$  변화.

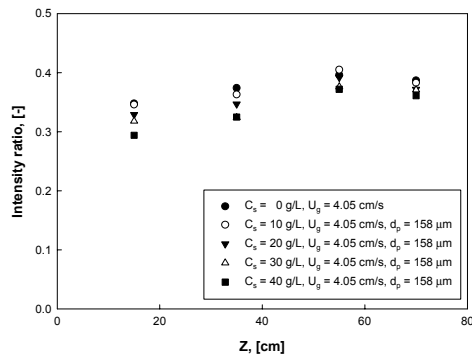


Fig. 4. Z에 따른 UV Intensity ratio 변화.

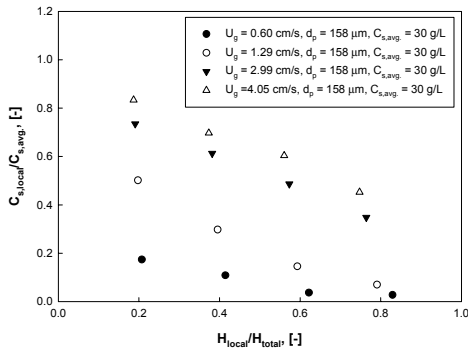


Fig. 5.  $H_{local}/H_{total}$  에 따른 vs.  $C_{s,local}/C_{s,avg}$  변화.

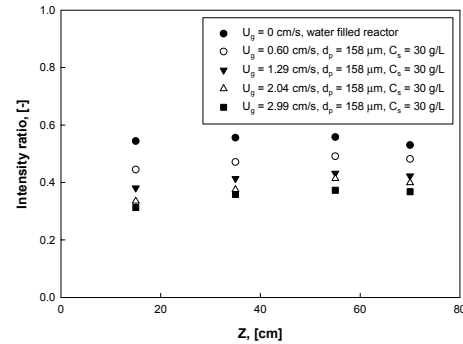


Fig. 6. Z에 따른 UV Intensity ratio 변화.

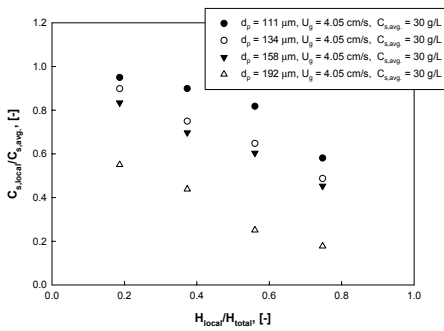


Fig. 7.  $H_{local}/H_{total}$  에 따른  $C_{s,local}/C_{s,avg}$  변화.

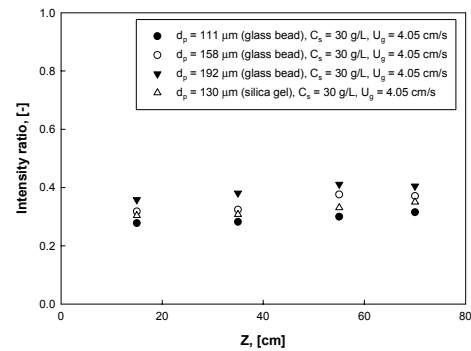


Fig. 8. Z에 따른 UV Intensity ratio 변화.