

오염물질분리를 위한 활성탄슬러리흡착조의 혼합특성

박 찬 진

시립인천전문대학 환경공학과
(1999년 2월 1일 접수, 1999년 6월 22일 채택)

Mixing Characteristics of Adsorption Column with Activated Carbon Slurry with Bubble-Agitation for the Separation of Pollutants

Chan-Jin Park

Department of Environmental Engineering, Junior College of Incheon, Incheon 402-750, Korea
(Received 1 February 1999; accepted 22 June 1999)

요 약

흡착조내에서 분말활성탄 슬러리 혼합의 최적조건을 산출하기 위하여 비교적 고농도 활성탄슬러리에 대한 혼합특성을 연구하였다. 사용된 장치는 흡착제인 분말상 활성탄이 기포유입으로 교반되는 내부순환형 혼합조이며 실험결과 슬러리 혼합속도는 기체유입량이 증가할수록 증진되었고 활성탄 유입량이 증가할수록 감소하였으나 기체유입속도가 0.04-0.06 m/s에서는 활성탄농도가 증가되면 오히려 혼합속도가 증진됨을 알 수 있었다. 이러한 경향을 기체체류량과 활성탄슬러리속도를 산출하여 분석한 결과 액상내 활성탄입자가 초래하는 기포함체에 의한 슬러리속도 증진에 따른 현상임을 알 수 있었으며 높은 혼합속도를 갖는 활성탄농도와 기체유입속도의 조건을 제시할 수 있었다.

Abstract – The mixing characteristics of powdered activated carbon slurry of relatively high concentration was studied to find the optimal mixing condition in an adsorption column with bubble-agitation. System adopted was an activated carbon slurry column with internal looping where the mixing of adsorbents are conducted by gas input. From the experiment, it was found that the mixing rate increased with gas input and decreased with increasing activated carbon content, but the mixing rate increased with increasing activated carbon concentration at the superficial gas velocity of 0.04-0.06 m/s. From the analysis of gas holdup and the calculated slurry velocity, this tendency could be explained by the enhanced slurry fluidization due to coalescence of bubbles and the condition of high mixing with activated carbon concentration and input gas velocity could be suggested.

Key words: Slurry, Mixing Rate, Activated Carbon

1. 서 론

슬러리 유동화 공정은 액체중 기포(bubble)의 원활한 에너지 전달에 의한 슬러리의 우수한 혼합특성과 이에 의한 열전달 및 물질전달속도의 용이한 제어로 촉매나 bio-particle, 침출(leaching) 및 결정화공정 등에 매우 적합한 공정이라고 할 수 있으며[1-5], 활성탄을 이용한 액체중 오염물질의 흡착 분리에도 효과적으로 사용될 수 있다.

활성탄은 탈취나 유해가스제거 등의 공기정화와 액상중 유기용매의 분리회수, 배연탈황과 탈질 및 상하수 처리 등 환경분야에서 중요하게 사용되고 있는 물질이다. 특히 분말활성탄(PAC: powdered activated carbon)을 이용한 액상중 물질의 분리는 대기오염물질 습식처리공정에서 발생하는 폐수처리나 미생물반응을 이용한 오염물질의 제어 또는 액상중 약취처리 등에 적합하게 응용될 수 있다[6].

이처럼 활성탄을 이용한 액체중 오염물질 분리공정은 일정량의 흡착제를 가한 다음 기계적인 교반(mechanical agitation)이나 기포교반(bubble agitation)에 의한 교반이 이루어지며 이때의 흡착성능은 활성탄입자의 크기와 농도, 액체의 점도, 용질의 농도 및 교반정도의 영향을 받는다[7].

그런데 기계적인 교반에 의한 혼합특성은 혼합강도나 에너지소멸(energy dissipation) 측면에서 이론적인 해석이 이루어져 있으나[8], 기포교반에 의한 활성탄슬러리의 혼합특성은 체계적인 연구가 미비한 상태이다. 이것은 슬러리와 기포의 복합적인 거동으로 인하여 이론적인 접근이 용이하지 않기 때문인 것으로 사료된다. 한편 입자농도가 낮을 경우 슬러리 혼합은 순수액체와 유사한 경향을 나타내지만 농도가 증가할수록 다상류의 거동을 나타내게 되므로 이에 대한 고찰이 필요하다. 본 연구에서는 이러한 점에 근거하여 비교적 고농도의 활성탄슬러리 교반에 대한 혼합특성을 슬러리순환속도와 관련지어 전달 현상학적으로 해석함으로써 PAC 흡착공정에 대한 보다 효율적인 조업조건을 제시하고자 한다.

†E-mail: cjpark@www.icc.ac.kr

2. 실험방법

본 연구에 사용된 흡착조는 원통형 아크릴관으로 제작하였으며 내경 0.15 m, 높이 1.50 m가 되도록 하였고 활성탄슬러리가 순환되는 draft 관은 내경 0.10 m, 높이 1 m의 원통형 관으로 제작하였다. 액체중에서 활성탄을 교반시키기 위하여 필요한 압축공기를 흡착조내에 균일하게 유입되도록 기체분산판을 sintered plate로 제작하여 흡착조 하부에 설치하였다. 활성탄은 표준채분석법에 의하여 평균입경 85 μm 인 분말탄을 사용하였고 활성탄슬러리의 혼합특성을 측정하기 위하여 기체분산판에서 0.50 m 높이에 tracer 주입장치를 설치하고 solenoid valve를 이용하여 impulse 형태로 tracer를 주입하였으며 전기저항탐침기로 출력된 신호를 동일한 방법으로 기록 분석하였다. NaCl 3 M 용액을 1회에 5 cc 주입하여 tracer로 사용하였는데 이로 인한 슬러리 상층 기포의 거동이 영향을 받지 않음을 확인하였다. 한편 슬러리상의 기체분포량을 측정하기 위하여 pressure tap을 흡착조 외벽에 7개, 내관에 5개를 일정 간격으로 장착하여 steady state의 압력분포를 산출하였다. 본 연구의 실험장치와 실험조건을 각각 Fig. 1과 Table 1에 나타내었다.

활성탄슬러리의 혼합시간은 impulse 형태로 주입한 tracer의 RTD 곡선에서 혼합도, Γ 가 0.95에 도달될 때까지 소요되는 시간으로 정의될 수 있다.

$$\Gamma = (C_{\infty} - C)/C_{\infty} \quad (1)$$

여기에서 C_{∞} , C 는 각각 tracer의 최종 및 임의농도를 나타낸다.

한편 흡착조가 회분식으로 운영될 경우 흡착조 내부의 슬러리혼합

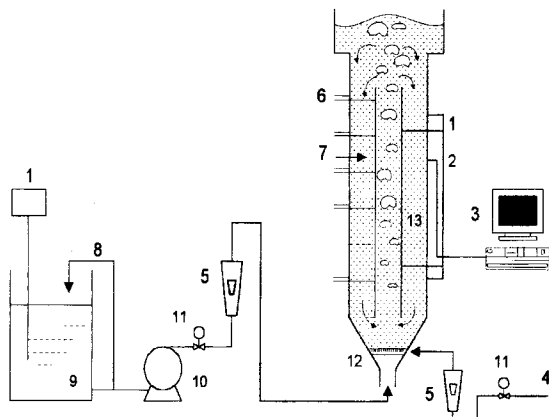


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

- | | |
|----------------------------------|---------------------|
| 1. Thermometer | 7. Tracer injector |
| 2. Conductivity probe with meter | 8. Bypass |
| 3. PC with A/D conversion | 9. Reservoir |
| 4. Compressed air | 10. Liquid pump |
| 5. Air flow meter | 11. Valve |
| 6. Pressure taps | 12. Gas distributor |
| | 13. Draft tube |

Table 1. Experimental conditions

Experimental variables	Range of variables
Input gas velocity(m/s)	0-0.1
Powdered activated carbon	
Mean diameter(μm)	85.0
True density(kg/m^3)	0.025
Apparent density(kg/m^3)	0.012
Concentration of PAC(wt%)	0-6

은 측방향 분산식으로 표현되며[9], 본 연구의 경우 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_r = \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{Pe}{4\pi\theta} \right)^{1/2} \exp \left[-\frac{(X+n-\theta)^2}{4\theta} Pe \right] \quad (2)$$

여기에서 Pe 는 Peclet 수이며 $Pe=U_{SL}L_c/D_L$ 이고, $C_r=C/C_{\infty}$, $\theta=t/t_c$ 를 의미한다.

측정된 RTD에서 슬러리순환시간과 혼합시간을 산출하였으며 측정 자료를 식 (2)에 least square fitting하여 측방향분산계수를 계산하였다. 활성탄슬러리 혼합의 주에너지를 제공하는 기체체류량의 산출은 총괄 기체체류량(overall gas holdup)의 경우 총팽창 높이측정법으로, 주관과 순환관의 국부기체체류량(local gas holdup)은 각 영역의 압력구배 (pressure gradient)측정으로 산출하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 분말활성탄슬러리의 혼합특성

분말활성탄은 활성탄의 입도가 일반적으로 100 μm 이하이고 주로 접촉여과 방식으로 조업이 이루어지므로 기계적인 교반 보다는 기체 유입으로 생성되는 상승 기포에 의하여 활성탄슬러리가 혼합되는 폭기형 혼합조가 보다 효율적인 접촉장치(contactor)로 사용될 수 있으므로 혼합특성에 대한 정보는 매우 중요하다고 할 수 있다. 우선 기체유입속도의 증가에 따른 PAC 슬러리의 혼합시간을 PAC 농도를 매개변수로 하여 나타낸 그림이 Fig. 2이다. 이때의 혼합시간은 전술한 바와 같이 추적자를 impulse 형태로 주입한 후 추적자의 농도가 혼합에 의하여 완전히 균일화되었을 때의 최종농도치의 95% 이내에 도달될 때까지 소요되는 시간을 의미한다. 그림에서 알 수 있듯이 슬러리의 혼합시간은 가스유속 증가에 따라 실험범위 전반에 대하여 감소하는 경향을 나타내며 이는 가스유량이 커질수록 흡착조내 슬러리 교반에너지가 증가하여 tracer 확산 및 농도균일화가 촉진되기 때문이라고 할 수 있다.

한편 혼합시간은 Fig. 3에서 알 수 있듯이 PAC 슬러리 농도변화에 따라 다양한 경향을 나타내었는데 우선 기체유속이 0.02 m/s일 경우 PAC농도에 따라 혼합시간이 슬러리 벌크밀도 상승으로 인하여 점차 증가하였다. 그런데 슬러리농도가 4 wt%로 증가하면 기체유속이 0.04

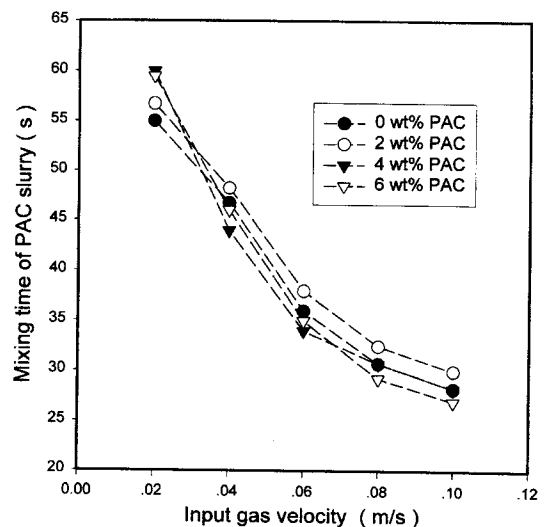


Fig. 2. Effect of input gas velocity on the mixing time of PAC slurry with the concentration of PAC.

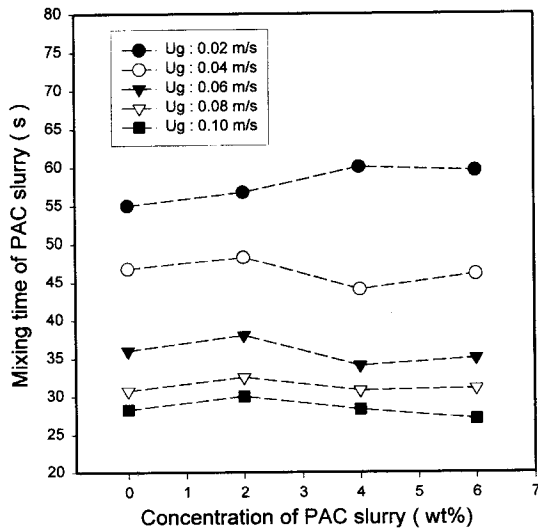


Fig. 3. Effect of concentration of PAC slurry on the mixing time with input gas velocity.

m/s로 증가하였을 때 혼합시간이 감소되는 경향을 보여 오히려 혼합 속도가 증진되는 현상을 나타내었다.

이와 같이 활성탄농도 변화에 따른 혼합시간의 경향이 기체유입속도의 증가에 따라 다른 경향을 나타내는 이유는 활성탄슬러리의 혼합속도가 활성탄농도 변화에 따라 필요한 슬러리혼합에너지와 기포함체 정도에 따른 기포상승속도 변화로 유도되는 슬러리순환의 촉진정도에 따라 결정되기 때문이다. 본 연구에서는 기포함체유발 입자군에 속하는[1] 평균입경 85 μ m인 활성탄의 농도가 4 wt%, 기체유속이 0.04-0.06 m/s일 때 슬러리점도 증가와 활성탄의 장치하부 침적에 의한 축방향 정압력분포(axial static pressure distribution)의 변화 등이 슬러리상의 기포함체를 촉진시키고 이에 따라 기포상승속도가 증가되어 슬러리 교반에너지가 슬러리혼합에 필요한 에너지 증가보다 크기 때문에 혼합속도가 증가된다고 할 수 있다. 활성탄농도가 6 wt%로 증가 되면 혼합시간이 다소 증가하는 경향을 나타내며 이는 기포함체로 촉진되는 기포상승에너지보다 입자농도 증가에 의한 슬러리 교반부하가 커지기 때문인 것으로 사료된다. 슬러리상내 기포의 상승속도는 기포경의 제곱근에 비례하여 증가하므로[10], 활성탄농도가 높을 경우 기포함체에 의하여 기포크기가 증가하는 영역에 조압범위를 설정하는 것이 바람직하다고 판단된다. 일반적으로 활성탄농도가 낮은 범위에서는 액체의 거동이 영향을 받지 않으나 고농도 영역이 되면 전술한 바와 같이 입자의 동적 특성에 따라 수력학적 특성이 변화하게 된다 [11].

3.2. 분말활성탄슬러리의 순환특성

일반적으로 고정층이 아닌 슬러리유동층 상태에서의 흡착은 공정진행에 따라 활성탄의 벌크밀도나 액상조건이 변화될 수 있으므로 유속에 대한 적절한 제어가 필요하며 이에 따라 슬러리순환에 대한 해석이 중요하다고 할 수 있다. 활성탄슬러리의 혼합특성을 결정짓는 가장 중요한 요소는 장치내부 유체순환이며[12], 본 절에서는 슬러리의 혼합을 순환특성과 관련지어 설명하고자 한다. 본 연구에 사용된 장치에는 Fig. 1에서 알 수 있듯이 슬러리의 안정적인 순환을 유도하는 내관이 설치되어 주어진 기체에너지가 효과적으로 유체의 운동에너지로 전환시키므로 입자 유동화에 대하여 높은 효율을 나타낸다. 우선 혼합조내에서 기포교반에 따른 슬러리 순환시간을 산출하기 위하여 충격함수로 주입된 추적자의 체류시간분포를 분석하였으며, 그 결

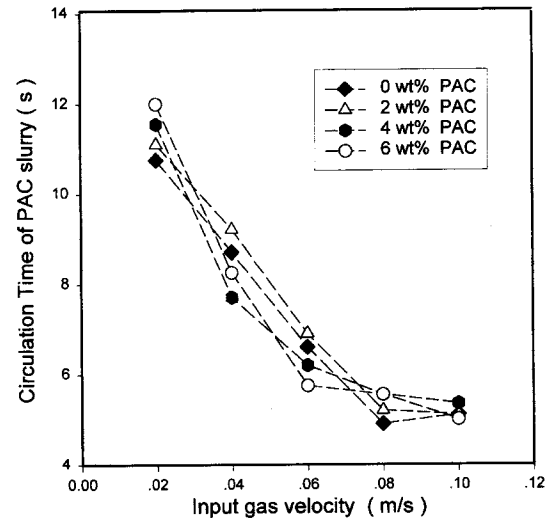


Fig. 4. Effect of input gas velocity on the circulation time of PAC slurry with the concentration of PAC.

과로서 슬러리순환시간과 유입기체속도간의 관계를 Fig. 4에 도시하였다.

그림에서 알 수 있듯이 순환시간은 기체유속 전반에 대하여 혼합특성과 대체적으로 유사한 경향을 보였고 매개변수인 PAC 농도변화에 따라 다소 상이하게 나타났다. 즉, 활성탄의 투입량에 따라 영향이 변화하였는데 이러한 현상은 PAC 농도가 증가하면 슬러리 벌크밀도의 증가에 따라 슬러리 전체의 중량이 커지고 한편으로는 슬러리농도 증가에 의한 점도상승이나 활성탄입자의 장치하부농도 증가에 의한 기포함체로 기포상승속도가 증가하여 슬러리순환을 촉진시키는데 기체유입속도 0.02 m/s에서는 슬러리 중량부하증가가 기포함체에 의한 슬러리 순환요인보다 우세하여 입자농도 증가시 순환시간이 증가한다. 반면 기체유입속도 0.04-0.06 m/s에서는 기포함체에 의한 슬러리순환 촉진이 우세하여 활성탄농도 4-6 wt%에서 슬러리순환시간이 감소되는 경향을 나타내었다.

PAC 농도와 순환시간의 관계를 좀더 명확히 분석하기 위하여 나타낸 그림이 Fig. 5로서 순환시간이 슬러리농도 변화에 대하여 다양한 경향을 나타냄을 확인할 수 있다. 우선 유입기체속도가 0.02 m/s일 때에는 PAC 농도 증가에 따라 혼합시간이 점차 증가하여 교반속도가

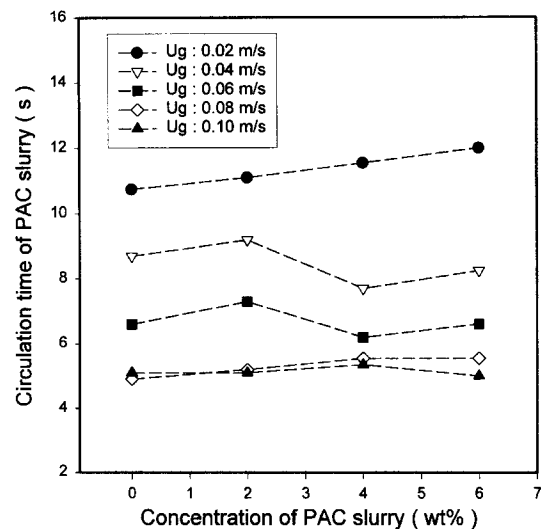


Fig. 5. Effect of concentration of PAC slurry on the circulation time with input gas velocity.

감소됨을 알 수 있는데 이러한 현상은 전술하였듯이 입자농도의 증가에 따른 활성탄슬러리 무게부하의 증가가 기포상승에너지보다 크기 때문이다. 기체속도가 0.04-0.06 m/s로 증가되면 PAC 농도가 4 wt% 일 경우에 순환시간이 감소하는 특이한 현상을 나타내어 혼합속도가 증진됨을 알 수 있으며 이것은 입자농도의 증가에 따른 활성탄슬러리 무게부하 보다 기포의 합체로 인하여 기포상승속도 증가로 슬러리순환이 촉진되기 때문이라고 할 수 있다. 또한 미세기포가 감소됨에 따라 장치상부에서 슬러리하강류를 따라 하강영역으로 entrainment 되는 기포개수가 감소되는 것도 슬러리상승영역과 하강영역간의 기체체류량 차이를 증가시켜 혼합속도를 증진시키는 요인이 된다고 할 수 있다. 한편 유입기체속도가 0.08-0.10 m/s일 때에는 순환시간의 슬러리농도에 대한 변화가 거의 없어지는데 이러한 현상들은 흐름영역이 기포가 탑 내부를 거의 차지하는 Slug 흐름영역에 속하여 활성탄 농도의 영향이 거의 나타나지 않기 때문이라고 할 수 있다.

3.3. 슬러리혼합과 분말활성탄농도의 상관관계

분말활성탄을 사용할 때에는 입자의 침강특성, 여과 및 재생가능도를 고려하여 조업을 진행하여야 하며 액상교반시에는 입자부유 한계 조건 이상에서 운영하여야 한다. 활성탄 흡착공정에서 가장 중요한 변수는 흡착평형, 흡착속도와 접촉시간 등인데 슬러리의 교반속도와 밀접한 관계를 갖고 있다. 한편 슬러리의 교반에 영향을 미치는 주요항목으로는 기체의 체적분율을 의미하는 기체체류량이 있으며, 이것은 기포형태로 존재하는 기체의 거동과 기체체류량의 증감이 서로 관련되어 있기 때문이다. Fig. 6에 혼합조내 총괄기체체류량(overall gas holdup)과 유입가스속도의 관계를 PAC 농도를 매개변수로 하여 도시하였는데 기체유입속도 전반에 대하여 활성탄 농도가 증가할수록 기포의 합체 현상이 증가하여 기체체류량이 감소됨을 알 수 있었다. 또한 Fig. 7에 장치내 내관을 중심으로 형성되는 활성탄슬러리의 하강 및 상승영역에서의 국소기체체류량(local gas holdup)과 유입가스속도와와의 관계를 나타내었는데 실험영역 전반에 대하여 기체체류량이 활성탄 농도증가에 따라서 감소하였다. 전술하였듯이 기포의 합체가 슬러리의 혼합속도와 관련이 있고 이는 슬러리혼합의 주요소가 슬러리상승과 하강영역 간의 기체체류량 차이이기 때문인데, 우선 기포합체 현상이 우세하면 미세기포형성이 감소되어 하강영역으로 entrainment 되는 현상이 줄어들고 이에 따라 양쪽 영역간 기체체류량차가 더욱 커지게 되어 슬러리순환을 촉진시킨다. 반면에 합체현상이 감소되면

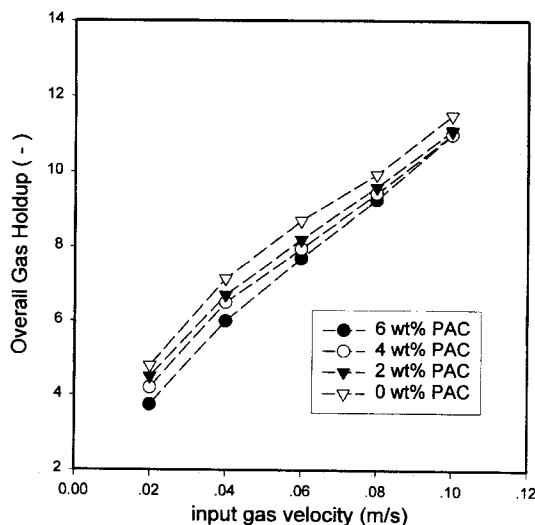


Fig. 6. Effect of input velocity on the overall gas holdups with the concentration of PAC slurry.

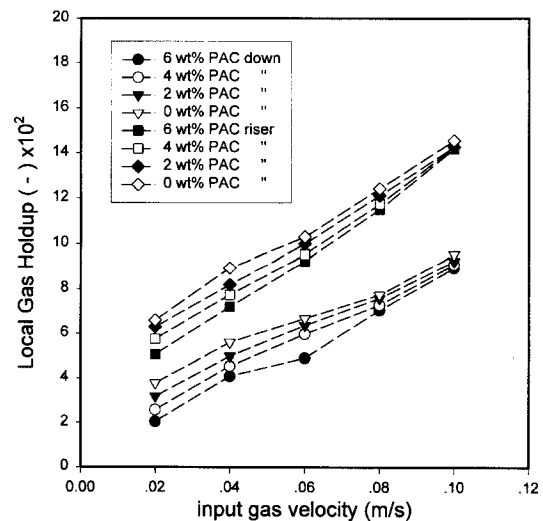


Fig. 7. Effect of input gas velocity on the local gas holdup with the concentration of PAC slurry.

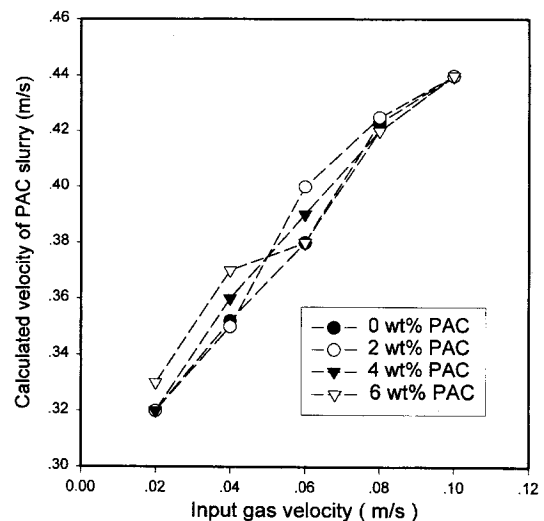


Fig. 8. Tendency of calculated PAC slurry velocity with gas velocity and the concentration of PAC.

미세기포가 하강슬러리에 따라 유입되어 유체순환의 기전력인 국소 기체체류량차이가 감소되도록 유도하므로써 슬러리순환속도를 저하시키는 것이다. 거시적 에너지수지로부터 슬러리유속, U_{SL} 에 대한 식은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있으며[13], 이를 이용하여 산출한 활성탄슬러리속도를 Fig. 8에 나타내었는데 0.04-0.06 m/s의 기체유속에서 순수액체보다 활성탄농도 증가시에 슬러리속도가 증가됨을 확인할 수 있었다.

$$C_1 U_{SL}^2 - C_2 U_{SL}^{7/4} - C_3 = 0 \quad (3)$$

이때에 C_1 , C_2 , C_3 는 각각 장치와 슬러리물성치와 관련되는 실험상수로써 다음과 같이 표현된다.

$$C_1 = \left(\frac{A_i}{A_o} \right)^2 \frac{f_{Db}}{(1 - \epsilon_{GO})^2} \quad (4)$$

$$C_2 = 4h_L \left[\frac{0.079}{d_i} \left(\frac{\rho_{SL} d_i}{(1 - \epsilon_{GI}) \mu_{SL}} \right)^{-0.25} + \left(\frac{A_i}{A_o} \right)^2 \frac{0.085}{d_e} \left(\frac{A_i}{A_o} \frac{\rho_{SL} d_i}{(1 - \epsilon_{GO}) \mu_{SL}} \right)^{-0.25} \right] \quad (5)$$

$$C_3 = 2 \text{ g } h_D (\epsilon_{GI} - \epsilon_{GO}) \quad (6)$$

여기에서 A_r , A_o 는 슬러리상승 및 하강영역면적, d_r , d_o 는 상승영역의 내경과 하강영역상당직경이며 ρ_{SL} , μ_{SL} 은 슬러리의 밀도와 점도를 나타낸다.

활성탄슬러리의 신속한 순환은 곧 혼합특성과 관련되고 액상중 오염물질의 원활한 이동과 온도 및 농도제어의 용이성 측면에서 중요한 요소라고 할 수 있다. 슬러리혼합시간은 다음 식 (7)과 같이 설명될 수 있다[14-16].

$$t_m/t_c = k \text{ Pe } \Gamma^{-0.189} \quad (7)$$

Peclet 수의 정의인 식 (8)을 식 (7)에 대입하고 t_m 에 대하여 정리하면 식 (9)처럼 표현된다.

$$\text{Pe} = U_{SL} X_c / D_L \quad (8)$$

$$t_m = k U_{SL} t_c X_c D_L^{-1} \Gamma^{-0.189} \quad (9)$$

여기에서 X_c 는 활성탄슬러리의 순환길이, Γ 는 혼합도를 의미하며 k 는 실험상수이다.

또한 D_L 은 측방향분산계수이며 Kolmogoroff의 난류등방성이론에 의거하여 식 (10)처럼 표시할 수 있으며[17], 실험자료와 상관시킨 결과 상관계수는 0.95로 나타났다.

$$D_L = 2.5 D_T^{4/3} V_D^{1/3} \quad (10)$$

이때에 D_T 는 length parameter로서 혼합조의 내경을 의미하며 V_D 는 에너지소멸속도인데 슬러리상의 기포에너지와 밀접한 관계를 갖고 있으므로[18], 이에 대한 해석이 매우 중요하다고 할 수 있다. 한편 슬러리속도는 슬러리순환길이와 순환시간의 비로서 다음과 같이 표현된다.

$$U_{SL} = X_c / t_c \quad (11)$$

식 (10)과 (11)을 식 (9)에 대입하고 정리하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$t_m = k X_c^2 D_T^{-4/3} V_D^{-1/3} \Gamma^{-0.189} \quad (12)$$

시스템에 공급된 에너지로부터 유체의 운동 및 마찰에너지 그리고 방향전환에 의한 에너지손실 등 다양한 요인의 에너지소멸(energy dissipation)을 제하면 기포에 의하여 수행되는 유체혼합 관련 액체 단위질량에 대한 에너지소멸속도를 산출할 수 있으며 다음의 식 (13)과

같이 표현될 수 있다.

$$V_D = \frac{1}{m_L} [E_r + E_b + E_f + E_K] \quad (13)$$

m_L 은 액체의 질량이고 E_r , E_b , E_f , E_K 는 각각 에너지유입, 장치상부와 하부의 에너지손실이며 E_f , E_K 는 마찰 및 운동에너지에 의한 손실을 나타낸다.

Fig. 9에 에너지소멸속도와 PAC 농도의 관계를 나타내었는데 그림에서 알 수 있듯이 에너지소멸속도는 전반적으로 유입기체속도에 따라 증가하였고 기체유속이 0.04-0.06 m/s에서 PAC 농도변화에 대한 증가율이 크게 나타나 혼합속도의 증진과 효과적인 에너지소멸의 상호관련성을 나타내 주고 있다.

종합적으로 활성탄슬러리의 기포교반에 의한 혼합시간을 식 (12)에 의하여 실험값과 결합시킨 결과 식 (14)와 같이 설명할 수 있었으며 이때의 표준오차는 0.05, 상관계수는 0.96이었다.

$$t_m = 3.52 X_c^2 D_T^{-4/3} V_D^{-1/3} \Gamma^{-0.189} \quad (14)$$

4. 결 론

오염물질의 분리에 다양한 용도로 사용되는 활성탄흡착조에서 평균 입경 85 μm 인 활성탄을 농도 0-6 wt%로 변화시키면서 유입기체속도 0.02-0.10 m/s의 범위에서 기포교반에 의한 분말활성탄슬러리의 혼합 특성에 대하여 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) PAC 슬러리의 혼합속도는 실험범위 내에서 기체유입속도 증가에 대하여 전반적으로 증가하는 경향을 나타내었고 이러한 경향은 기체유입속도 증가에 따라 슬러리 교반에너지가 증가하여 농도 균일화가 촉진되기 때문임을 알 수 있었다.

(2) PAC 슬러리의 혼합속도는 활성탄 농도 증가에 따라 기체유속 0.02 m/s에서는 감소하는 경향을 나타내었으나 기체유속 0.04-0.06 m/s의 범위에서는 증진되었으며 이러한 경향이 기포합체로 인한 슬러리 순환 및 혼합속도의 증가 때문임을 알 수 있었다.

(3) 활성탄슬러리의 혼합속도는 활성탄을 4 wt%로 주입하고 기체유입속도를 0.04-0.06 m/s로 유지할 때에 증진됨을 알 수 있었으며 이러한 경향을 에너지소멸속도 및 추적자의 체류시간분포에서 산출된 혼합도와 관련지어 설명할 수 있었다.

사용기호

A_i : cross-sectional area of riser [m^2]

A_o : cross-sectional area of downcomer [m^2]

C : concentration of tracer [kg/mol]

C_{∞} : homogenized concentration of tracer [kg/mol]

C_1, C_2, C_3 : empirical constants of Eq. (6)

D_L : mass diffusion coefficient [m^2/s]

D_T : length parameter of the system [m]

E_b, E_f, E_r, E_K, E_t : rate of energy dissipation at bottom section, by friction at wall section, by input, by kinetic energy and at top location [m^2/s^3]

f_{Db} : Darcy friction factor at bottom section [-]

f_i : fanning friction factor in riser section [-]

f_o : fanning friction factor in downcomer section [-]

h_L : height of liquid dispersion section [m]

k : empirical constant of Eq. (7)

L_c : circulation length of fluid path [m]

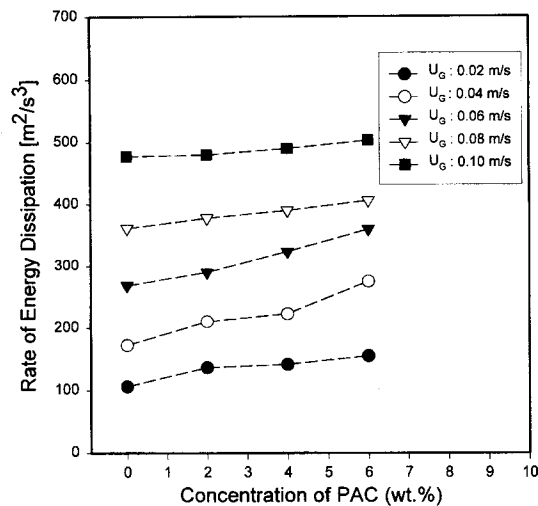


Fig. 9. Tendency of the rate of energy dissipation with the concentration of PAC slurry.

m_L : mass of fluidizing medium [kg]
 n : number of fluid circulation [-]
 Pe : Peclet number [-]
 P_h : pressure at head space of bubble column [m H₂O]
 Q_G : volumetric gas flow rate [m³/s]
 t : time [s]
 t_c, t_m : time of circulation and of mixing [s]
 U_{SL} : calculated slurry velocity [m/s]
 V_D : rate of energy dissipation per unit mass of liquid [m²/s³]
 X : normalized location of tracer input [-]
 X_c : mean circulation path [m]

그리스 문자

θ : normalized time of elapse [s]
 Γ : degree of homogenization [-]
 τ : dimensionless time [-]
 ρ_{SL} : density of slurry [kg/m³]
 μ_{SL} : viscosity of slurry [kg/m s]
 $\epsilon_{Go}, \epsilon_{Gi}$: gas holdup in slurry downflow and upflow [-]

참고문헌

1. Fan, L. S.: "Gas-Liquid-Solid Fluidization Engineering," Butterworths, Boston(1989).
2. Garcia-Ochoa, J., Khalfet, R., Poncin, S. and Wild, G.: *Chem. Eng. Sci.*, **21**(52), 3827(1997).
3. Pironti, F. F., Medina, V. R., Calvo, R. and Saez, A. E.: *Chem. Eng. J.*, **60**, 155(1995).
4. Bergault, I., Rajashekharan, V., Chaudhari, V. and Schweich, D.: *Chem. Eng. Sci.*, **21**(52), 4033(1997).
5. Kang, Y., Shim, J. S., Kim, S. D., Ko, M. H. and Kim, S. D.: *Korean J. Chem. Eng.*, **13**, 317(1996).
6. Noll, K. E.: "Adsorption Technology for Air and Water Pollution Control," Lewis Publishers, Michigan(1992).
7. McKay, G.: "Use of Adsorbents for the Removal of Pollutants from Wastewaters," CRC Press, Florida(1996).
8. Oldsue, J. Y.: "Fluid Mixing Technology," McGraw-Hill, NY(1983).
9. Toseland, B. A., Brown, D. M., Zou, B. S. and Dudukovic, M. P.: *Trans IChemE*, **73**(A), 297(1995).
10. Rodrigues, A. E., Calo, J. M. and Sweed, N. H.: "Multiphase Chemical Reactors," Sijthoff & Noordhoff Publishers, Maryland(1981).
11. Swart, J. W. A. and Krishna, R.: *Trans IChemE*, **73**(A), 308(1995).
12. Rehm, H. J. and Reed, G.: "Biotechnology," 2nd ed., VCH publishers, NY, 3(1993).
13. Park, C. J. and Doh, D.S.: *HWAHAK KONGHAK*, **27**, 459(1989).
14. Verlaan, P. and Tramper, J.: *Chem. Eng. Sci.*, **5**(44), 1139(1989).
15. Blenke, H.: *Adv. Biochem. Eng.*, **13**, 121(1979).
16. Murakami, Y.: *J. Chem. Eng. Japan*, **15**, 121(1982).
17. Baird, M. H. I. and Rice, R.G.: *Chem. Eng. Journal*, **9**, 171(1975).
18. Kim, S. D., Kang, Y. and Kwon, H. K.: *AIChE J.*, **8**(32), 1397(1986).