

연속조작 기포탑에서 열전달 모델 및 에너지 소멸 속도

장지화 · 서명재 · 임대호 · 강 용[†] · 정 현* · 이호태*

충남대학교 화학공학과
305-764 대전시 유성구 궁동 220
*한국에너지기술연구원 합성연료센터
305-343 대전시 유성구 장동 71-2
(2009년 7월 13일 접수, 2009년 8월 21일 채택)

Heat Transfer Model and Energy Dissipation Rate in Bubble Columns with Continuous Operation

Ji Hwa Jang, Myung Jae Seo, Dae Ho Lim, Yong Kang[†], Heon Jung* and Ho Tae Lee*

School of Chemical Engineering, Chungnam National University, 220 Gung-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-764, Korea

*Synfuel Research Group, KIER, 71-2 Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Korea

(Received 13 July 2009; accepted 21 August 2009)

요 약

연속조작 기포탑에서 열전달 메커니즘을 검토하기 위하여 열전달 모델과 에너지 소멸속도를 고찰하였다. 기포탑에서 표면갱신이론(Surface renewal theory)에 기초한 비정상상태 열전달모델에 의한 에너지소멸 속도(E_D)는 기포탑에서 기체와 액체상의 거동에 의한 수력학적인 에너지소멸 속도(P_v)와 비교하여 매우 작게 나타났다. 이와같은 결과로 표면 갱신 이론에 의한 비정상상태 열전달모델에서 사용된 에너지 소멸속도와 기포탑 전체에 대한 수력학적 에너지 수지에 의해 산출된 수력학적 에너지 소멸속도는 산출 메커니즘이 서로 다른 별개의 에너지 소멸속도로 규정되었다. 이들 두 종류의 에너지 소멸속도를 각각 본 연구의 실험 변수인 기체와 액체 유속의 상관식으로 나타내어 완전히 다른 값을 나타냄을 확인하였다.

Abstract – Heat transfer model and energy dissipation rate were investigated to examine the heat transfer mechanism in bubble columns with continuous operation. The energy dissipation rate(E_D) obtained from the unsteady state heat transfer model based on the surface renewal theory was significantly small, comparing with the hydrodynamic energy dissipation rate(P_v) calculated from the overall hydrodynamic energy balance based on the behaviors and holdups of gas and liquid phases in the column. It was found from these results that the energy dissipation rate based on the surface renewal theory is independent of the hydrodynamic energy dissipation rate obtained from the overall hydrodynamic energy balance in the bubble column, in considering their mechanism. The different two energy dissipation rates were correlated in terms of operating variables within this experimental conditions, respectively.

Key words: Heat Transfer, Energy Dissipation Rate, Bubble Column

1. 서 론

기포탑은 연속상인 액상에 분산상인 기포가 흐르며 존재하는 불균일상을 이루며 접촉하는 공정이므로 기체와 액체의 접촉효과가 매우 좋아서 기체-액체간의 물질전달이나 기포탑 내부에서의 열전달효과가 매우 우수한 것으로 알려져 있다. 따라서, 기포탑은 기체, 액체 등의 불균일상을 다루는 공정들에서 산업적으로 그 적용성은 매우 증대해 가고 있다. 구조가 단순하면서도 조작 효율이 좋은 기포탑은 기체-액체의 반응기로 매우 효율성이 높을 뿐만 아니라, 폐

수에 포함된 특정성분이나 이온의 회수 및 처리, 폐수처리를 위한 미생물에 산소공급 등에 매우 효율적으로 사용되고 있다. 또한, 바이오공학의 발전과 더불어 미생물에 산소나 영양분의 공급에 기포탑은 매우 유용하게 사용되고 있으며, 각종 식품공학, 발효공학 등에 그 효율도는 매우 확산되고 있다. 또한, 기포탑을 에너지의 생산이나 재생 그리고 변환공정으로 사용하고자 하는 많은 연구들이 진행되고 있으며 특정물질의 분리정제, 플라스틱폐기물의 처리공정 등에도 적용하고자 하는 연구들이 진행되고 있다[1,2].

이와같은 공업적 응용의 효율성이 증대됨에 따라 기포탑 반응기에서 반응특성과 반응기의 모델링, 열전달, 수력학적 특성 등에 대한 연구들이 꾸준히 진행되어 왔으며 기체-액체간의 물질전달 특성에 대한 연구들도 진행되고 있다[3-5]. 기포탑에서 열전달 특성

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: kangyong@cnu.ac.kr

*이 논문은 부산대학교 박상욱 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

에 대한 연구는 대체적으로 두 가지의 계(system)로 분류할 수 있는데, 하나는 기포탑의 벽면과 기포탑 내부간의 열전달계에 대한 연구이고 다른 하나는 기포탑 내부에 설치된 내부 열원과 기포탑 간의 열전달계에 대한 연구가 진행되어져 왔다. 기포탑의 열전달 연구에 사용되어온 열전달 모델로는 정상상태(Steady State)에서의 모델과 비정상상태에서의 열전달계에 대한 모델로 대별될 수 있는데, 각각의 경우 대부분 기포탑 내부 열전달계에서 에너지의 소멸 특성이 열전달계수에 미치는 영향이 큰 것으로 보고되고 있다 [1,2,6,7].

그러나, 기포탑의 열전달계에서 에너지 소멸속도에 대한 고찰은 미흡한 실정이라서 이에대한 고찰이 요청되고 있다. 따라서, 본 연구에서는 기포탑 반응기나 공정의 설계 및 Scale-up에 필수적인 열전달계의 예측과 특성분석에 중요정보를 제공하고자 기포탑 내부에 설치된 수직열원과 기포탑 간의 열전달계에서의 열전달현상을 비정상상태 열전달 모델로 해석하고 이 특성을 에너지 소멸속도와 연계하여 해석하고자 하였으며 이를 기포탑 내부에서의 각 상들의 수력학적 거동에 의한 수력학적 에너지 소멸 특성과 비교 검토 하였다.

2. 열전달 모델

기포탑의 내부 수직열원과 기포탑 간의 열전달을 열원주위를 흐르는 유체요소(fluid element)와 열원의 열전달 표면과의 접촉에 의해 기포탑 내부의 열원주위에서 비정상상태(unsteady state)의 열수지를 세우면 식 (1)과 같으며, 기포탑에서의 열전달계에 적합한 초기조건과 경계조건을 세우면 식 (2)와 같다[1,5].

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k_L}{\rho_L C_{PL}} \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \tag{1}$$

$$T = T_h, \text{ at } r=0, t \geq 0$$

$$T = T_b, \text{ at } r>0, t = 0$$

$$T = T_b, \text{ at } r=\infty, t>0 \tag{2}$$

연속조작 기포탑에서 식 (1)의 모델식을 식 (2)의 초기조건과 경계조건에 의해 해를 구하면, 기포탑 내부의 수직열원에서 열원의 단위면적 당 기포탑으로 전달되는 열량을 식 (3)과 같이 쓸 수 있다.

$$Q = 2 \left(\frac{k_L \rho_L C_{PL}}{\pi \theta} \right)^{1/2} (T_h - T_b) \tag{3}$$

한편, 기포탑 내부의 수직열원에서 기포탑으로 전달되는 열량은 총괄열전달계수를 사용하여 식 (4)와 같이 쓸 수 있으므로 기포탑에서 수직열원과 기포탑과의 총괄열전달계수는 식 (3)과 (4)로부터 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = hA(T_h - T_b) \tag{4}$$

$$h = 2 \left(\frac{k_L \rho_L C_{PL}}{\pi \theta} \right)^{1/2} \tag{5}$$

여기서, θ 는 표면갱신이론에 의하여 기포탑 내부에서 매우 작은 소용돌이들의 평균접촉시간(mean contacting time)을 나타낸다. Kolmogorov 이론에 의하면 이 접촉시간은 기포탑 내부의 기체와 액체의 흐름에 따라 생성되는 매우 작은 소용돌이(micro eddy)의 흐름현상에 의해 큰 영향을 받는데, 그 속도와 크기는 이들 유체요소

의 접촉시간과 식 (6)과 같은 관계로 나타낼 수 있다[1,5,8].

$$\theta = L_e / V_e \tag{6}$$

식 (6)에서 L_e 는 매우 작은 소용돌이들의 규모(length scale)를 나타내고 V_e 는 이 소용돌이들의 속도규모(velocity scale)를 나타내는데 이들은 각각 기포탑 내부에서 이들 매우 작은 소용돌이 현상에 의해 소멸되는 에너지 소멸속도인 E_D 의 함수로 식 (7) 및 (8)로 나타낼 수 있다[1,5,8].

$$L_e = \left[\left(\frac{\mu_L}{\rho_L} \right)^3 / E_D \right]^{0.25} \tag{7}$$

$$V_e = \left[\left(\frac{\mu_L}{\rho_L} \right) E_D \right]^{0.25} \tag{8}$$

3. 실험

본 연구에 사용한 실험장치는 Fig. 1에서 보는바와 같이 내경이 15.2 cm이고 길이가 2.5 m인 아크릴관을 사용하였다[4]. 기포탑에서 열전달 특성을 고찰하기 위하여 기포탑의 중앙에 직경 3 cm이고 길이 35.6 cm인 수직열원(Heater)을 설치하였다. 설치된 내부 열원은 수직 구리봉내에 열원을 내장시켜 사용하였으며, 열원표면과 기포탑 내부에는 각각 5개의 철-텅스텐 열전대(J-type)를 설치하여 온도 변화를 측정하였다. 기포탑 내부 각 지점과 열원표면에서 동시에 측정된 온도는 자료수집장치(Data Precision Model, D-6000)를 통해 PC에 저장하였다[9-11]. 기포탑을 구성하는 기체로는 압축공기를 그리고 액체로는 물을 사용하였다. 기포탑 내부의 일정 영역에서 기체와 액체의 흐름이 정상상태에 도달되었을 때 압력센서를 사용하여 압력강하를 측정하였으며 이를 자료수집장치(data

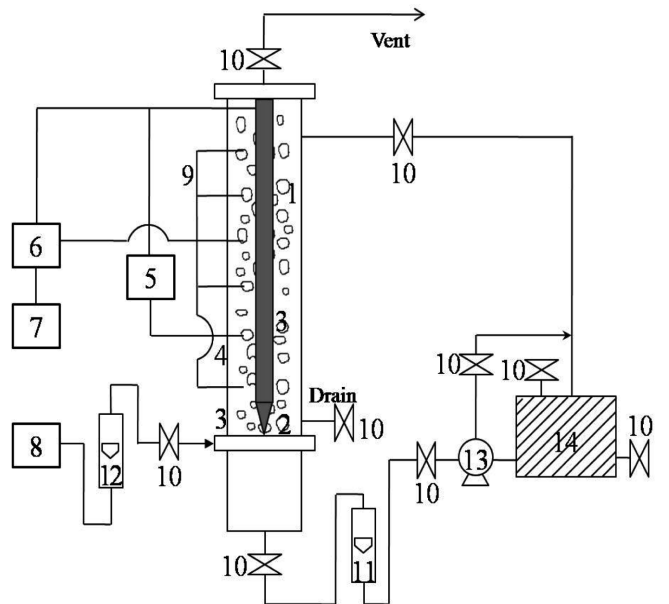


Fig. 1. Experimental apparatus.

- | | |
|----------------------|----------------------|
| 1. Main Column | 8. Compressor |
| 2. Gas Distributor | 9. Pressure taps |
| 3. Heater | 10. Valve |
| 4. Thermocouples | 11. Liquid flowmeter |
| 5. Digital Indicator | 12. Gas Flowmeter |
| 6. A/D Converter | 13. Liquid pump |
| 7. Computer | 14. Liquid reservoir |

acquisition system)를 통해 PC에 저장하였다. 각 운전조건에서 기포탑 내부에서의 기체와 액체의 체류량은 식 (9)와 (10)을 사용하여 구하였다.

$$\frac{\Delta P}{L} = (\epsilon_G \rho_G + \epsilon_L \rho_L)g \quad (9)$$

$$\epsilon_G + \epsilon_L = 1.0 \quad (10)$$

기포탑의 중앙에 설치된 열원에서 기포탑으로 전달된 열량은 DC Power supply로 측정하여 결정하였으며 이는 식 (11)과 같은 기포탑에서의 에너지 수지로 보정하였다.

연속조작 기포탑에서 내부 열원으로부터 기포탑으로 열이 전달되는 계의 열전달계수는 전달된 열량과 열원표면과 기포탑간의 온도차를 측정하여 그 평균값을 구하여 식 (12)로부터 결정하였다. 내부 열원과 기포탑과의 온도차는 상기 설명한 기포탑 내부의 각각 5개의 지점에서 측정된 온도차의 평균값으로 결정하였다.

$$q = \dot{m}C_{PL}(T_{mo} - T_{mi}) \quad (11)$$

$$h = \frac{Q}{(T_h - T_b)} \quad (12)$$

4. 결과 및 고찰

연속조작 기포탑의 내부에 설치된 수직열원에서 기포탑으로 열이 전달되는 계에서 총괄 열전달계수(h)는 Fig. 2에서 보는바와 같이 기체유속이 증가함에 따라 점점 증가하였다. 이는 기체의 유속이 증가함에 따라 기포탑 내부에 기체의 체류량이 증가하게되며, 기포탑 내부에 난류현상(Turbulence)이 증가하게 되어 기포탑 내부의 열원으로부터 기포탑으로의 열전달이 잘 이루어져서 열전달계수가 증가한다고 설명할 수 있다.

열원주위에서의 표면갱신이론(Surface renewal theory)에 기초한 비정상상태 열수지로부터 얻을 수 있는 기포탑 내부에서 매우 작은 소용돌이(micro eddy)들의 거동에 기인된 평균접촉 시간 θ 를 식

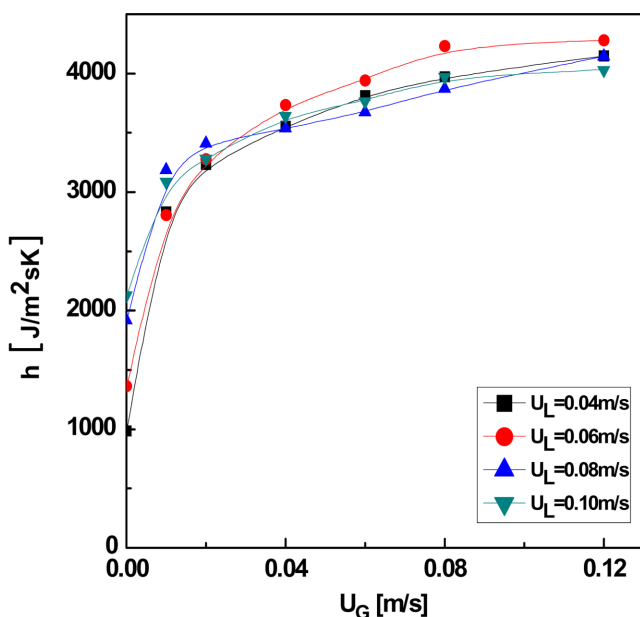


Fig. 2. Effects of gas(U_G) and liquid(U_L) velocities on h in bubble columns with continuous operation.

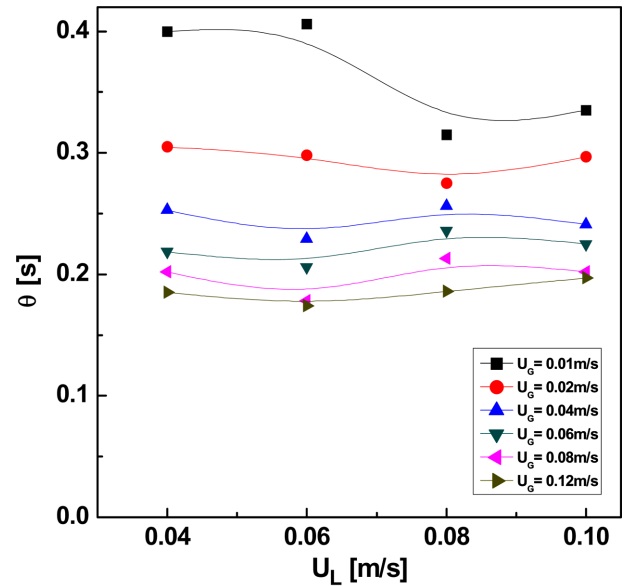


Fig. 3. Effects of U_L on the mean contact time of microscale eddies based on the unsteady state heat transfer model.

(5)로부터 얻을 수 있다. 즉, 표면갱신이론에 의하면, 유체요소(fluid element)는 매우 작은 소용돌이의 거동에 의해 형성되는데 이들의 평균접촉 시간이 열전달에 영향을 미치는 것으로 해석되고 있다 [12,13]. 본 연구의 실험에서 측정된 열전달계수를 사용하면 식 (5)에 의해 기포탑 내부에서 매우 작은 소용돌이의 평균접촉시간을 구할 수 있는데, 이렇게 구한 매우 작은 소용돌이의 평균접촉시간 θ 를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 매우 작은 소용돌이의 평균접촉시간 θ 는 기체의 유속이 증가함에 따라 감소하였으나 액체의 유속에는 큰 영향을 받지않는 것으로 나타났다. 기포탑 내부의 열원주위에서 매우 작은 소용돌이(microeddies)들의 평균 접촉 시간은 매우 작은 소용돌이들의 크기(길이)와 속도 규모에 의해 식 (6)과 같이 쓸 수 있는데[1,8], 이 유체요소의 속도는 기포탑에서 액체의 흐름만 있는 경우보다 기체가 유입됨으로 인해 매우 증가하게 되므로 기체유속이 증가함에 따라 유체요소인 매우 작은 소용돌이의 속도규모가 증가하여 이들 소규모 소용돌이들의 평균접촉 시간은 감소한다고 할 수 있다. 즉, 기포탑에서 액체의 흐름만 있는 경우보다 기체가 유입되면 기체는 기포탑 내부에서 분산상인 기포로 존재하면서 액체와의 접촉과 흐름 현상을 유발할 뿐만 아니라 기포들끼리 합체와 분쇄가 일어나며, 기체가 유입되는 기체분산판에서 jetting 현상 등이 일어나므로 기포탑 내부에 난류현상은 크게 증가하게 된다고 해석할 수 있다.

액체의 흐름만 있는 계에 기체를 유입한 경우의 총괄열전달계수의 변화를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 기체의 흐름이 존재하는 기포탑에서의 열전달계수는 액체의 흐름만 있는 경우보다 1.5~4.0 배의 증가를 가져왔으며 기체의 유입에 따른 총괄열전달계수의 증가는 기체의 유속이 증가함에 따라 점진적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 이와같은 기포탑 내부에서 생성되는 난류현상은 기포탑 내부에 많은 작은 소용돌이(micro eddy) 현상을 유발하게 되는데, 이들 난류현상을 정량적으로 나타내는 요소의 하나로 에너지소멸 속도를 도입할 수 있다[6,7,14-17]. 즉, 기포탑에서 매우 작은 소용돌이(micro eddy) 현상이나 유체요소의 속도

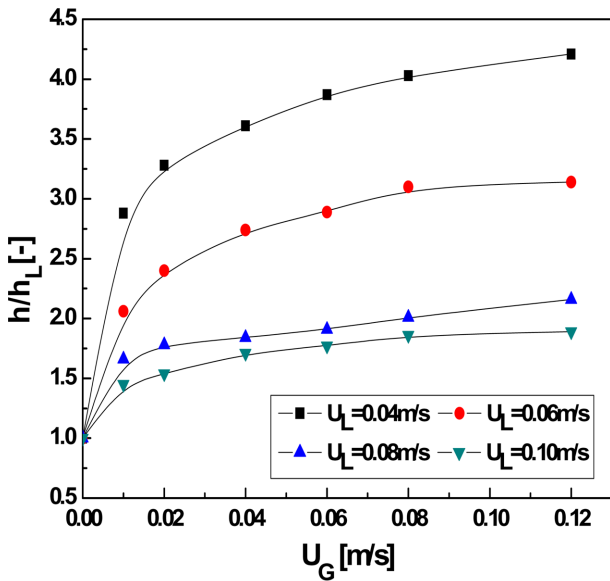


Fig. 4. Effects of U_G on h/h_L in bubble columns with continuous operation.

변화는 기포탑 내부에서 이들 매우작은 소용돌이 현상에 의한 에너지 소멸속도로 검토될 수 있다. 기포탑 내부에서 생성되는 매우작은 소용돌이 현상의 규모나 속도는 Kolmogorov의 이론에 의하면 식 (7)와 (8)과 같이 기포탑 내부에서 에너지의 소멸속도(E_D)의 함수로 나타낼 수 있으므로 식 (6), (7) 및 (8)들을 이용하여 연속조작 기포탑의 각 운전조건에서 소용돌이 현상에 의한 에너지 소멸속도 값을 구할 수 있다.

연속조작 기포탑에서 기포탑에 유입되는 연속상인 액체의 유속과 분산상인 기체의 유속 변화가 기포탑 내부에서 비정상상태 열전달 모델에 의한 에너지 소멸속도에 미치는 영향을 Fig. 5에 나타내었다. 앞에서 언급하였듯이 기포탑 내부에서 매우 작은 소용돌이의 거동에 의한 에너지 소멸속도는 기체의 유속이 증가함에 따

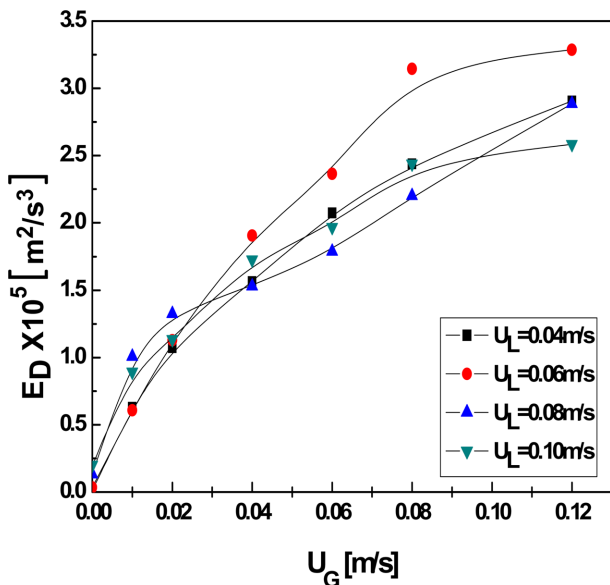


Fig. 5. Effects of U_G and U_L on E_D based on the unsteady state heat transfer model.

라 증가하는 것을 알 수 있으며 기체의 유속변화가 액체의 유속변화보다 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. Fig. 2에서, 기체의 유속변화가 기포탑 내부에서의 소용돌이 현상에 의한 열전달계수에 미치는 영향이 액체유속의 변화보다 크게 나타나는 이유도 기체유속 변화가 액체유속 변화보다 기포탑 내부에서 소용돌이 현상에 의한 에너지 소멸속도에 미치는 영향이 크기 때문으로 해석할 수 있다. 비정상상태 열전달 모델에 의한 에너지 소멸속도는 실험변수 U_G 와 U_L 에 의해 식 (13)과 같이 상관식으로 나타낼 수 있었으며 상관계수(R^2)는 0.96이었다.

$$E_D = 1.58 \times 10^{-4} U_G^{0.57} U_L^{0.14} \tag{13}$$

한편, 기포탑이 일정한 기체의 유속과 액체유속의 운전조건에서 정상상태로 운전되고 있을 때 기포탑에는 기체와 액체의 유입으로 역학적 에너지가 공급되고, 이 공급된 에너지 중 액체를 기포탑의 상단에서 흘러나가게 함으로써 역학적 에너지로 회수되는 에너지를 제외하고는 모두 기포탑 내부에서 기포와 기포, 액체와 기포, 액체와 액체의 접촉 및 흐름현상에 의해 소멸된다고 가정하면 기포탑 내부에서 연속상인 액체의 단위질량 당 역학적 에너지 소멸속도(hydrodynamic energy dissipation rate, P_v)를 식 (14)와 같이 나타낼 수 있다[6,7].

$$P_v = [(U_G + U_L)(\epsilon_G \rho_G + \epsilon_L \rho_L) - U_L \rho_L] g / \epsilon_L \rho_L \tag{14}$$

즉, 기포탑의 일정영역에서 단위길이 당 측정된 압력강하인, ΔP 를 사용하여 정상상태에서 운전되는 기포탑에서 기체와 액체의 각 상들에 대한 체류량(holdup)을 구할 수 있으므로 식 (14)에 의해 기포탑 내부에서 연속액상의 단위질량 당 에너지 소멸속도를 구할 수 있다. 연속조작 기포탑에서 역학적 에너지 소멸속도 값은 Fig. 6에서 보는 바와 같이 기체유속에는 큰 영향을 받지만 액체 유속에는 큰 영향을 받지 않는 것은 소용돌이 현상에 의한 에너지 소멸속도의 경우와 유사하였다. 기포탑에서 각 상의 체류량에 기초한 역학적 에너지 소멸속도는 식 (15)와 기체 및 액체유속의 상관식으로 나타낼 수 있었으며 이 식의 상관계수(R^2)는 0.97이었다.

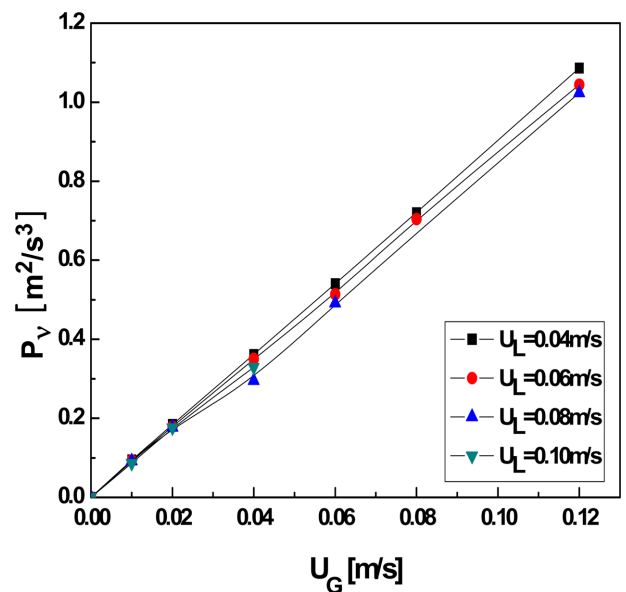


Fig. 6. Effects of U_G and U_L on P_v in bubble columns with continuous operation.

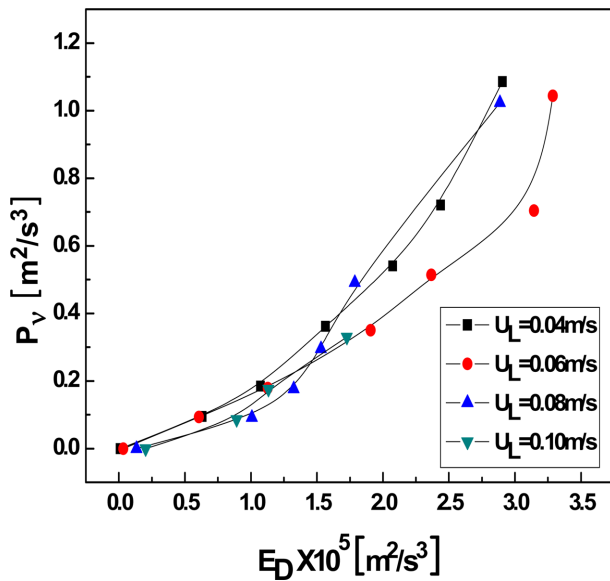


Fig. 7. Comparison of P_v and E_D in bubble columns with continuous operation.

$$P_v = 5.85 U_G^{0.97} U_L^{-0.11} \quad (15)$$

연속조작 기포탑에서 연속액상의 단위질량 당 역학적에너지 소멸속도 P_v 값과 비정상상태 열전달 모델로부터 유도된 소용돌이 현상에 의한 에너지 소멸속도 E_D 값은 식 (13)과 (15)에서 볼 수 있듯이 서로 상당한 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 이들 두 값의 관계를 Fig. 7에 나타내었는데, P_v 값은 E_D 값의 10^5 배 이상 큰 값을 나타냄을 알 수 있다. 또한, P_v 값은 E_D 값이 증가함에 따라 증가하였으나 두 종류의 에너지 소멸속도 값은 서로 선형적으로 증가하거나 감소하지는 않았다. 연속조작 기포탑에서 기체의 유속 변화가 (E_D/P_v)의 비에 미치는 영향을 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8에서 볼 수 있듯이 소용돌이 현상에 의한 에너지 소멸속도 값은 역학적 에너지 소멸속도 값에 비하여 0.012% 이하의 작은 값을 나

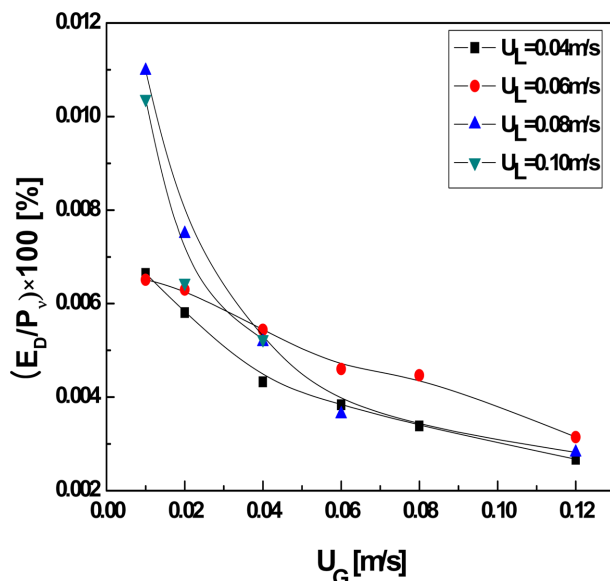


Fig. 8. Effects of U_G on the ratio of (E_D/P_v) in bubble columns with variations of U_G .

타내었으며 이 비는 기체의 유속이 증가함에 따라 0.004% 이하로 감소하였다.

본 연구의 실험에서 측정된 내부열원과 기포탑 간의 총괄 열전달계수를 식 (16)에 의해 에너지 소멸속도로 소용돌이 현상에 의한 에너지 소멸속도 값을 사용하여 상관식을 구하면 식 (16)과 같으며

$$h = 1.13 \{k_L \rho_L C_{PL} [E_D / \nu_L]^{0.5}\}^{0.5} \quad (16)$$

에너지 소멸속도로 역학적 에너지 소멸속도 값을 사용하여 상관식을 구하면 식 (17)을 얻을 수 있다.

$$h = 0.0957 \{k_L \rho_L C_{PL} [P_v / \nu_L]^{0.5}\}^{0.5} \quad (17)$$

식 (16)과 (17)의 상관계수는 각각 0.95와 0.97이었다. 총괄열전달계수와 에너지 소멸속도의 상관성을 나타내는 식 (16)과 (17)에서, 연속조작 기포탑에서 매우 작은 소용돌이의 운동에 의한 에너지 소멸속도인 E_D 와 역학적 에너지 소멸속도 값의 비가 10^5 이상의 차이가 나는데도 비정상상태 열전달 모델에 의한 열전달계수의 상관식에 P_v 값이 사용될 수 있었던 것은 이들 상관식에서 볼 수 있듯이 총괄열전달계수 값에 비례하는 역학적 에너지 소멸속도의 지수가 0.25이어서 두 종류 에너지 소멸속도 값의 차이가 현저히 줄어들 수 있었을 뿐만 아니라, 식 (17)의 상관식에서의 계수가 0.0957로 식 (16)의 에너지 소멸속도 값으로 사용한 경우인 1.13에 비하여 매우 작으므로 P_v 값에 의한 영향을 크게 줄일 수 있었기 때문에 총괄열전달계수값인 h 와 상관식으로 나타낼 수 있었다고 사료된다.

실제로, 본 연구에서 측정된 총괄열전달계수와 마이크로 eddy의 소용돌이 현상에 의한 에너지 소멸속도는 $h \propto E_D^{0.25}$ 으로 상관되지만, 측정된 총괄열전달계수와 수력학적 에너지 소멸속도와의 관계는 $h \propto P_v^{0.14}$ 으로 상관되는 것으로 나타나 P_v 값을 비정상상태 열전달 모델에 사용하는 것은 매우 신중을 기할 필요가 있는 것으로 나타났다. 따라서, E_D 와 P_v 의 두 종류의 에너지 소멸속도는 각각의 메카니즘도 상이한 개념이므로 구별해서 사용하여야 할 것으로 사료된다.

5. 결 론

연속조작 기포탑에서 내부수직열원과 기포탑 간의 열전달 모델의 적용성을 에너지소멸 속도를 사용하여 검토할 수 있었다. 표면 갱신이론에 기초한 비정상상태 열전달 모델에 의한 매우 작은 유체소들의 소용돌이 현상에 기인된 에너지소멸 속도(E_D)는 기포탑에서 기체, 액체의 흐름과 접촉거동에 의한 체류량과 유체속도에 의한 역학적 에너지 수지에 의해 계산된 역학적 에너지소멸 속도(P_v)와 비교하여 0.012% 이하로 매우 작았으며 이 비율은 기체의 유속이 증가함에 따라 점차 감소하였다.

연속조작 기포탑에서 마이크로 소용돌이 현상에 의한 에너지 소멸속도는 표면갱신 이론에 기초한 비정상상태 열전달 모델로부터 유도된 메카니즘에 의해 총괄열전달계수와 $E_D^{0.25}$ 으로 비례하였으나, 역학적 에너지수지에 의해 계산된 역학적에너지 소멸속도는 총괄열전달계수와 $P_v^{0.14}$ 으로 비례하여 표면갱신이론의 메카니즘 적용이 되지 않는 것으로 나타났다.

사용기호

- C_{PL} : liquid heat capacity [cal/kgK]
 D : column diameter [m]
 E_D : energy dissipation rate based on the motion of microeddies [m²/sec³]
 h : overall heat transfer coefficient [J/m²·sec·K]
 k_L : liquid thermal conductivity [cal/msK]
 L_e : length scale of micro eddy [m]
 \dot{m} : mass flow rate [kg/sec]
 Nu : Nusselt Number [-] $\left[= \frac{hD}{k_L} \right]$
 P_v : energy dissipation rate based on the overall hydrodynamic energy balance [m²/sec³]
 Q : heat flux [cal/m²sec]
 q : heat flow [cal/sec]
 Re : Reynolds Number [-] $\left[= \frac{DU_f\rho_L}{\mu_L} \right]$
 r : radial position [m]
 t : time [sec]
 T : temperature [K]
 T_b : temperature at column proper [K]
 T_h : temperature at heater surface [K]
 U_E : fluid element velocity [m/sec]
 U_f : volumetric flux of fluid [m/sec]
 U_G : gas velocity [m/sec]
 U_L : liquid velocity [m/sec]
 V_e : velocity scale of micro eddy [m/sec]

그리스 문자

- ε : phase holdup [-]
 θ : mean contact time between fluid element and heater surface [sec]
 μ_L : liquid viscosity [kg/msec]
 ρ_G : gas density [kg/m³]
 ρ_L : liquid density [kg/m³]

감 사

본 연구는 한국에너지기술연구원의 지원으로 이루어졌으며(A7-2802) 귀 기관에 감사드립니다.

참고문헌

1. Deckwer, W. D., Bubble Column Reactors, John Wiley & Sons, Chichester, England(1992).

2. Fan, L. S., Gas-Liquid-Solid Fluidization Engineering, Butterworths, Boston(1989).
3. Son, S. M., Kang, S. H., Lee, C. G., Jung, S. H., Kang, Y. and Kim, S. D., "Characteristics of Bubble Flow Behavior in a Gas-Liquid Countercurrent Bubble Column Bioreactor," *Korean Chem. Eng. Res.*, **43**, 272-277(2005).
4. Kang, Y., Lee, K. I., Shin, I. S., Son, S. M., Kim, S. D. and Jung, H., "Characteristics of Hydrodynamics, Heat and Mass Transfer in Three-phase Inverse Fluidized beds," *Korean Chem Eng. Res.*, **46**, 451-464(2008).
5. Deckwer, W. D., "On the Mechanism of Heat Transfer in Bubble Column Reactors," *Chem. Eng. Sci.*, **35**, 1341-1346(1980).
6. Suh, I. S., Jin, G. T. and Kim, S. D., "Heat Transfer Coefficients in Three-Phase Fluidized Beds," *Int. J. Multiphase Flow.*, **11**, 255-259(1985).
7. Suh, I. S. and Deckwer, W. D., "Unified Correlation of Heat Transfer Coefficients in Three-Phase Fluidized Beds," *Chem. Eng. Sci.*, **44**, 1455-1458(1989).
8. Lewis, D. A., Field, R. W., Xavier, A. M. and Edwards, D., "Heat Transfer in Bubble Columns," *Trans. IChemE.*, **60**, 40-47(1982).
9. Kang, Y. and Kim, S. D., "On the Heat Transfer Mechanism in Three Phase Fluidized Beds," *KJChE.*, **5**, 154-163(1988).
10. Cho, Y. J., Kim, S. J., Nam, S. J., Kang, Y. and Kim, S. D., "Heat Transfer and Bubble Properties in Three-Phase Circulating Fluidized Beds," *Chem. Eng. Sci.*, **56**, 6107-6115(2001).
11. Kang, Y., Fan, L. T. and Kim, S. D., "Immersed Heater-to-Bed Heat Transfer in Liquid-Solid Fluidized Beds," *AIChE J.*, **37**, 1101-1106(1991).
12. Verma, A. K., "Heat Transfer Mechanism in Bubble Columns," *Chem. Eng. J.*, **42**, 205-208(1989).
13. Ouyoung, P. K., Chisti, M. Y. and Moo-Young, M., "Heat Transfer in Airlift Reactors," *Chem. Eng. Res. Des.*, **67**, 451-456(1989).
14. Kang, S. H., Son, S. M., Kim, U. Y., Kang, Y., Cho, Y. J. and Kang, H. K., "Heat Transfer Resistances in Three-Phase Circulating Fluidized Beds," *J. Ind. Eng. Chem.*, **13**, 33-39(2007).
15. Son, S. M., Lee, K. I., Kang, S. H., Kang, Y. and Kim, S. D., "Heat Transfer Coefficient in Viscous Three-Phase Inverse Fluidized Beds," *AIChE J.*, **53**, 3011-3016(2007).
16. Cho, Y. J., Woo, K. J., Kang, Y. and Kim, S. D., "Dynamic Characteristics of Heat Transfer Coefficient in Pressurized Bubble Columns with Viscous Liquid Medium," *Chem. Eng. Processing.*, **41**, 699-706(2002).
17. Kim, S. D., Kang, Y. and Kwon, H. K., "Heat Transfer Characteristics in Two-Phase and Three-Phase Slurry-Fluidized Beds," *AIChE J.*, **32**, 1397-1400(1986).