

모사된 GTL공정의 점성액체 매체에서 wake의 특성

임대호 · 장지화 · 강 용[†] · 전기원*

충남대학교 화학공학과
305-764 대전시 유성구 궁동 220
*한국화학연구원, 그린화학연구단
305-600 대전시 유성구 장동 100
(2010년 12월 27일 접수, 2011년 1월 19일 채택)

Characteristics of Wakes in a Viscous Liquid Medium of a Simulated GTL Process

Dae Ho Lim, Ji Hwa Jang, Yong Kang[†] and Ki Won Jun*

School of Chemical Engineering, Chungnam National University, 220 Gung-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-764, Korea
*Green Chemical Technology Division, Korea Research Institute of Chemical Technology,
100 Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-600, Korea
(Received 27 December 2010; accepted 19 January 2011)

요 약

점성 액체를 사용한 모사된 GTL공정(직경 0.102 m × 높이 1.5 m)에서 기포에 의해 발생하는 wake의 특성을 고찰하였다. 기체의 유속(0.04 ~ 0.12 m/s)과 액상의 점도(0.001 ~ 0.050 Pa·s)가 wake의 특성 즉 상승속도, 빈도수, 크기 그리고 체류량에 미치는 영향을 전기저항 탐침법에 의해 결정하였다. 상승하는 단일기포들뿐만 아니라 다중기포의 후면에 형성된 wake 상들도 탐침에 의해 측정된 전기 전도도 요동자료로부터 효과적으로 검출되었다. 유속이 조절되는 압축 여과공기와 CMC 수용액을 각각 분산기체상과 연속액상으로 사용하였다. 실험결과 wake 상의 상승속도와 크기는 기체의 유속 또는 액상의 점도가 증가함에 따라 증가하였다. wake 상의 체류량과 빈도수는 기체의 유속이 증가함에 따라 증가하였는데, 이는 기체유속의 증가에 따라 공정에 유입되는 기체의 양이 증가하기 때문이다. 그러나, 액상의 점도가 증가함에 따라 기포의 크기와 wake의 크기가 증가하기 때문에 wake의 상의 체류량과 빈도수 값은 wake 상의 액상의 점도가 증가함에 따라 감소하였다. Wake 상 체류량의 기체의 체류량에 대한 비율은 0.25~0.48의 범위였으며, 이 비율은 액체점도가 증가함에 따라 증가하였으나 기체의 유속이 증가함에 따라 감소하였다. 본 연구의 실험범위에서 wake 상의 특성들은 운전변수의 상관식으로 잘 나타낼 수 있었다.

Abstract – Characteristics of bubble driven wakes were investigated in a simulated GTL process(0.102 m × 1.5 m in height) with viscous liquid medium. Effects of gas velocity(0.04 ~ 0.12 m/s) and liquid viscosity(0.001 ~ 0.050 Pa·s) on the wake characteristics such as rising velocity, frequency, size and holdup were determined by employing a resistivity probe method. The wake phase formed behind the rising multi-bubbles as well as single bubbles were detected effectively from the conductivity fluctuations measured by the probe. Compressed, filtered and regulated air and aqueous solutions of Carboxy Methyl Cellulose(CMC) were used as a dispersed gas phase and a continuous liquid medium, respectively. It was found that the rising velocity and size of wake phase increased with an increase in gas velocity or liquid viscosity. The holdup and frequency of wake phase increased with increasing gas velocity due to the increase of gas input into the process with increasing gas velocity. However, the values of holdup and frequency of wake phase decreased with increasing liquid viscosity, since the size of bubbles and thus that of wakes increased with increasing liquid viscosity. The ratio of wake holdup to that of gas phase, which was in the range of 0.25 ~ 0.48, increased with an increase in liquid viscosity but decreased with gas velocity. The wake characteristics were well correlated in terms of operating variables within this experimental conditions.

Key words: Bubble Column, Liquid Viscosity, Wake Characteristics, Wake Holdup

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: kangyong@cnu.ac.kr

*이 논문은 고려대학교 홍석인 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

1. 서 론

모사된 GTL 공정에 사용되는 기포탑 반응기는 화학공학, 석유화학, 환경, 식품 그리고 생화학 분야의 접촉공정이나 반응기로 광범위하게 사용되고 있으므로 지난 수십 년 동안 연구자들은 기포 및 기포탑의 실용적인 장점들에 대해 연구해왔다[1-5].

기포탑에서 기포 주변의 전달현상은 주로 상승하는 기포와, 기포와 액체의 계면에서 일어나는 소용돌이 현상에 의해 생성되어 기포의 후면에서 동반상승하는 wake의 역할에 기인하는 것으로 보고되고 있다[1,2,5]. 따라서 기포탑에서 에너지의 소멸은 상당부분 wake 상으로 인한 것으로 여겨지고 있다. 그러나 기포탑 반응기뿐만 아니라 삼상유동층 반응기에서도 기포 현상의 특성에 대한 연구는 많이 진행되었지만 wake 상에 대한 연구는 비교적 관심을 받지 못해왔다[6,7]. Fan 등[8,9]은 유사 wake의 구조를 고려함으로써 wake의 형태 메카니즘과 단일 기포 후면에 형성되는 유사 wake 안에 들어있는 고체의 체류량을 연구했다. Katy와 Meneveau[10]는 기포탑 반응기에서 기포가 상승할 때에 유발된 wake의 상대운동을 연구하였으며, 거의 구모양의 기포 운동은 상대적으로 낮은 Reynolds수 범위의 운전조건에서 일어난다고 보고하였다. 진동하는 기포의 wake에서 소용돌이 흐름은 Zenit와 Magnaudat[11]에 의해 실험되었고, 기포와 wake의 특성과 흐름패턴은 PIV 측정방법을 사용하여 연구되어 왔다[12-14]. 그러나, 이와같은 이전의 대부분의 연구는 단일기포나 Taylor 기포들에 집중되었기 때문에 실제 연속적으로 운전되고 있는 기포탑에서 wake에 대한 실질적인 정보는 희박한 실정이다[15-17]. 연속조작 기포탑 반응기에서 wake 영역의 역할은 기체-액체 물질전달, 액상의 반경방향분산 그리고 불균일계에서의 혼합등에 큰 영향을 미치는 것으로 예견되고 있기 때문에[18,19], 이에 대한 연구는 기포탑 반응기의 특성 해석과 이를 이용한 반응기의 개발에 매우 중요하다하겠다.

본 연구에서는, 따라서 점성 액체 기포탑에서 wake의 상승속도, 빈도수, 크기 및 체류량등 wake의 특성에 대해서 연구하였다. 또한, 이와 같은 wake의 특성들이 기체의 유속과 연속액상의 점도에 대한 의존성을 검토하였다.

2. 실험

본 연구에서 사용한 점성액체 기포탑 공정은 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 내경(ID)이 0.102 m이고 높이(H)가 1.5 m인 스테인리스 강으로 제작하여 사용하였다. 공정 안에서 분산되는 기체상으로는 건조되고 여과된 압축공기를 사용하였으며, 기체 분산판은 주탑의 0.2 m 높이에 설치되었다. 기체의 유속범위는 0.04 ~ 0.12 m/s이었으며 기체유량계, 압력조절기 그리고 여과기에 의해 조절되었다. 액상으로는 물과 CMC(Carboxy Methyl Cellulose) 수용액을 사용하였는데,

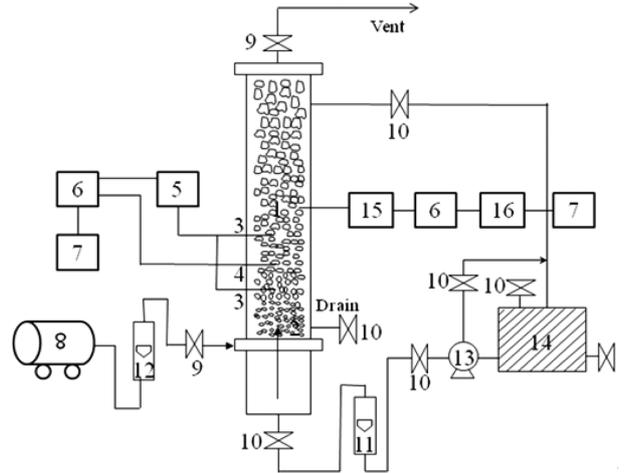


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

- 1. Main column
- 2. Gas distributor
- 3. Pressure probe
- 4. Resistivity probe
- 5. Pressure sensor
- 6. A/D converter
- 7. Computer
- 8. Compressor
- 9. Needle valve
- 10. Valve
- 11. Liquid flowmeter
- 12. Gas flowmeter
- 13. Liquid pump
- 14. Liquid reservoir
- 15. Resistivity circuit
- 16. Data acquisition system

Table 1에서 볼 수 있듯이 점도와 표면장력의 범위는 각각 0.001~0.050 Pa·s과 0.0729 ~ 0.0736 N/m이었다.

상승하는 기포의 후면에 위치한 wake의 특성인 상승속도, 빈도수 그리고 부피상당직경은 이중 전기 저항탐침법에 의해 측정하였다[20-23]. 직류 1.75 V가 공급되는 전기저항탐침으로 공정 안에서 전기 전도도의 차이에 의해서 wake 상을 측정하였다. 기포 영역은 급격한 전기 전도도 강하로 측정되지만, 기포의 후면에 위치한 wake 영역에서는 연속액상과 기체의 접촉이 급격히 발생하기 때문에 기포 영역이 지나간 후에 전도체인 연속액상이 연속적으로 측정되는 것이 아니라 전기전도도가 지연되는 영역이 측정되는데 이 영역을 wake로 측정하였다. 기포탑 공정의 내부에서 전기저항 탐침은 기체 분산판의 영향을 방지하기위해 기체 분산판으로부터 0.4 m 높이에 설치되었다. 전기저항탐침은 직경 7 mm의 stainless steel pipe로 제작하여 에폭시수지로 코팅하였으며 탐침의 tip으로는 0.2 mm의 백금선을 사용하였다[20,21]. 전기저항탐침으로부터 신호는 1000 Hz로 30초간 측정하여 신호자료의 길이는 총 30,000 포인트가 되도록 측정하였으며, 증폭기(amplifier), Low-pass filter를 거친 후, A/D 변환기를 이용하여 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환시켜, 데이터획득장치(data acquisition system, DT-2805 Lab-Board, DT-VEE software)를 사용하여 PC에 저장하였다. 저장된 디지털 신호는 DT-VEE 프로그램 상에서 on-line으로 나타내어 해석하였다[20-22].

Table 1. Physical and rheological properties of liquid phase

| | Apparent Viscosity × 10 ³ (Pa·s) | Surface Tension × 10 ³ (N/m) | Density (kg/m ³) | K (Pa·s ⁿ) | n | Diffusivity × 10 ⁹ (m ² /s) | Kinematic Viscosity (m ² /s) |
|-------------|--|--|---------------------------------|---------------------------|-------|--|--|
| water | 1 | 72.9 | 1000 | 0.001 | 1 | 2.22 | 9.61×10 ⁻⁷ |
| CMC 0.1 wt% | 11 | 73.2 | 1001 | 21.69×10 ⁻³ | 0.882 | 0.48 | 1.10×10 ⁻⁵ |
| CMC 0.2 wt% | 24 | 73.3 | 1002 | 43.82×10 ⁻³ | 0.847 | 0.26 | 2.40×10 ⁻⁵ |
| CMC 0.3 wt% | 38 | 73.6 | 1003 | 71.69×10 ⁻³ | 0.825 | 0.19 | 3.79×10 ⁻⁵ |
| CMC 0.4 wt% | 50 | 73.9 | 1004 | 102×10 ⁻³ | 0.802 | 0.15 | 4.98×10 ⁻⁵ |

한편, 기포탐은 액상과 기체상으로 구성되어있으므로 식 (1)과 같이 나타낼 수 있으며, 기포탐의 시험영역에서 압력강하는 식 (2)와 같으므로 기포와 연속액상의 체류량은 식 (1)과 (2)에 의해 구하였다.

$$\epsilon_G + \epsilon_L = 1.0 \quad (1)$$

$$(\epsilon_G \rho_G + \epsilon_L \rho_L)g = \Delta P/L \quad (2)$$

3. 결과 및 고찰

모사된 GTL 공정인 점성액체 매체의 기포탐에서 기포의 상승에 따라 기포탐 내부에 설치된 전기저항탐침에 의해 측정된 전기저항요동의 전형적인 변화를 Figs. 2와 3에 각각 나타내었다. 점성액체 기포탐에서 상승하는 단일 기포의 경우와 기포의 후반부에 형성되는 wake영역이 측정된 것을 Fig. 2에 나타내었다. 점성액체 기포탐에서 기체는 연속적으로 기포탐 내부에 투입되므로 기포탐 내부에서 상승하는 기포는 단일기포로 분리되어 상승하기도 하지만 여러 개의 기포가 연결되어 상승하는 다중기포의 형태를 나타내기도 한다. 연속액상에서 다중기포의 상승시 기포의 후반부에 형성되는 wake영역이 측정된 예를 Fig. 3에 나타내었다. wake는 상승하는 기포의 하단에서 소량의 가스가 소용돌이 운동하는 액상으로 구성되기 때문에 액상과 가스 상의 시그널이 복합적으로 나타나는 과도현상에 대응하는 시그널로 알려져 있다[8,9]. 이와 같이 측정된 기포와

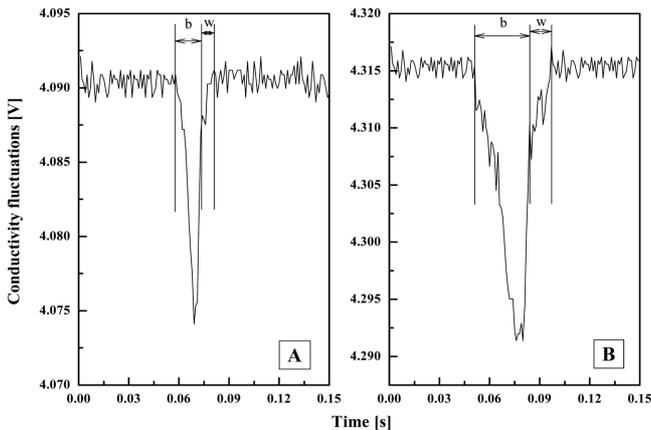


Fig. 2. Typical examples of bubble and wake in a viscous bubble column ($\mu_L=11$ mPa·s). (A: $U_G=0.04$ m/s, B: $U_G=0.08$ m/s).

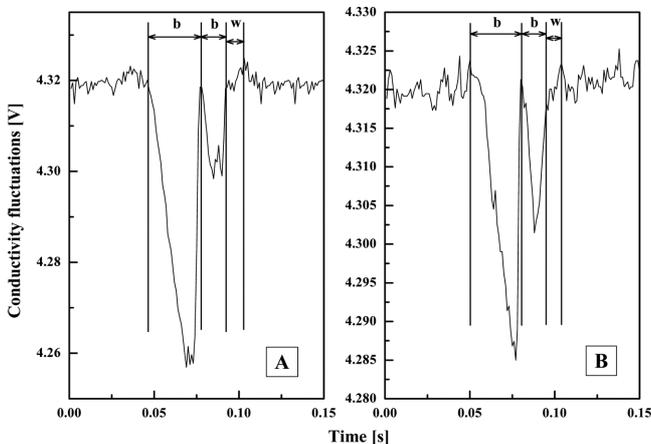


Fig. 3. Typical examples of multi-bubbles and wake in a viscous bubble column ($\mu_L=11$ mPa·s). (A, B: $U_G=0.08$ m/s).

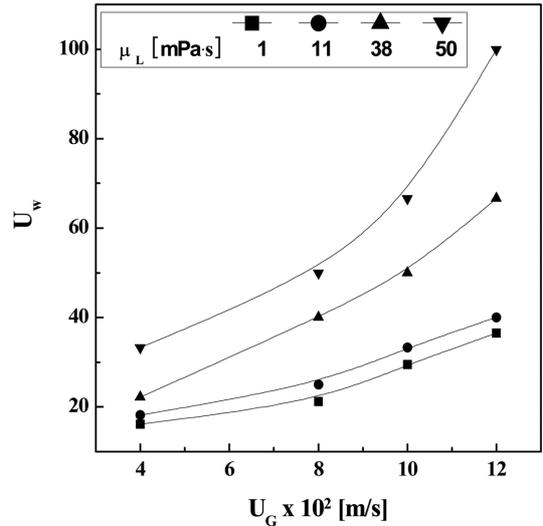


Fig. 4. Effects of gas velocity and liquid viscosity on the wake rising velocity in a viscous bubble column.

wake영역에 대한 자료들로부터 기포탐의 일정한 운전조건에서 wake의 상승속도와 빈도수를 결정하였다[20,21].

점성액체 기포탐에서 기체의 유속과 연속액상의 점도가 wake의 상승속도에 미치는 영향을 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 기체의 유속이나 연속액상의 점도가 증가함에 따라 wake의 상승속도는 증가하는 것으로 나타났다. 기체의 유속이 증가하면 기포탐 내부에 가스 주입량이 증가하고 이에 따라 기포의 크기와 상승속도가 증가하므로[1,2], wake의 상승을 위한 구동력이 증가하여 wake의 상승속도가 증가한다고 할 수 있다. 또한 연속액상의 점도의 증가는 연속액상 내부에서 상승하는 기포들의 합체현상의 증가를 가져와 기포의 크기가 커지고 이에 따라 기포에 작용하는 부력이 증가하게 되어 wake의 상승속도도 연속액상의 점도가 증가함에 따라 증가한다고 할 수 있다. wake의 상승속도에 대한 연속액상의 점도의 영향은 기체의 유속이 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내었다. 이것은 연속액상에서 분산상으로 존재하는 기포들이 기체의 유속이 증가함에 따라 합체현상이 더욱 활발해지기 때문으로 해석할 수 있다[20-22].

점성액체 기포탐에서 기체의 유속과 연속액상의 점도가 wake의 빈도수에 미치는 영향을 Fig. 5에 나타내었다. Wake의 빈도수는 다중기포 뿐만 아니라 반응기 안에서 분리된 단일 기포에 의해서도 측정되었다. Fig. 5에서 wake의 빈도수는 기체의 유속이 증가함에 따라 증가하지만, 연속액상의 점도가 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 기체유속의 증가에 따른 wake 빈도수의 증가는 주입되는 기체양의 증가와 큰 기포의 숫자가 증가하기 때문으로 해석할 수 있다. 액상의 점도의 증가에 따른 wake의 빈도수가 감소하는 이유는 위에서 언급했듯이 연속액상의 점도의 증가는 wake와 기포의 합체현상을 증가시키기 때문에 기포가 합체되면서 wake도 합체되어 wake의 크기는 증가하지만 빈도수는 감소한다고 할 수 있다.

점성 액체 기포탐에서 기체의 유속과 연속액상의 점도가 wake의 부피상당직경에 미치는 영향을 Fig. 6에 나타내었다. 부피상당직경은 타원체 모양의 wake와 같은 부피를 갖는 구의 직경에 의해 결정하였다[16]. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 wake의 크기는 기체의 유속과 액상의 점도가 증가함에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 점성액체

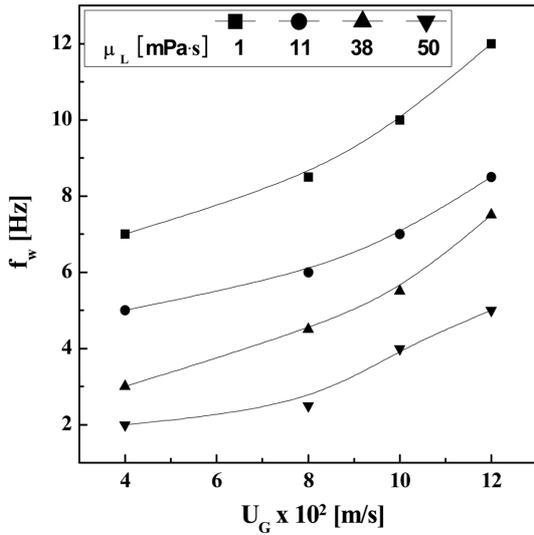


Fig. 5. Effects of gas velocity and liquid viscosity on the wake frequency in a viscous bubble column.

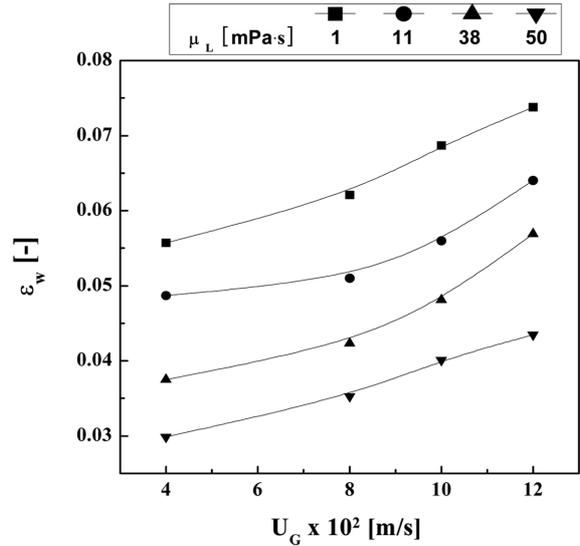


Fig. 7. Effects of gas velocity and liquid viscosity on the wake holdup in a viscous bubble column.

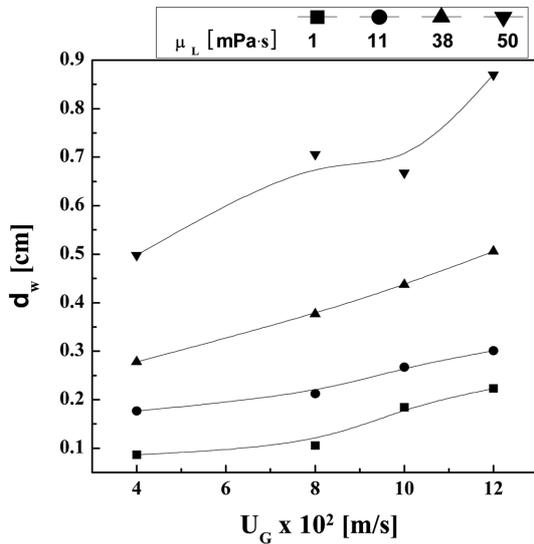


Fig. 6. Effects of gas velocity and liquid viscosity on the equivalent size of wake in a viscous bubble column.

기포탑에서 기체의 유속이나 액상의 점도가 증가하면 기포탑 내부에 존재하는 기포뿐만이 아니라 wake간에도 합체와 접촉확률이 증가하기 때문에 기포의 크기가 증가하는 것처럼 wake의 크기 또한 증가한다고 할 수 있다.

점성액체 기포탑에서 기체의 유속과 액상의 점도가 wake의 체류량(ϵ_w)에 미치는 영향을 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7에서 볼 수 있듯이 wake의 부피와 빈도수 데이터로부터 얻어진 wake의 체류량은 기체의 유속이 증가함에 따라 증가하지만 연속액상의 점도가 증가하면 감소하는 것으로 나타났다. wake의 빈도수와 크기(Fig. 5, 6)는 기체의 유속이 증가함에 따라 증가하기 때문에 기체의 유속이 증가함에 따라 wake의 체류량도 증가하는 것으로 이해된다. 그러나, 액상의 점도가 증가함에 따라 wake의 크기(Fig. 6)가 증가하고 wake의 상승속도가 증가하기 때문에 기포탑 내부에서 wake의 체류 시간은 액상의 점도가 증가함에 따라 감소하여 결국 wake의 체류량도 감소한다고 할 수 있다. 기포와 상승하는 기포의 후면에 위치

한 wake는 기포의 벽면과 접촉하는 연속액상인 액체와 기체의 급격한 혼합이 일어나는 소용돌이 영역이므로 기포의 부피가 증가함에 따라 기포에 작용하는 부력이 증가하여 기포의 상승속도가 증가하며 이에 따라 동반상승하는 wake의 상승속도도 증가한다고 할 수 있다.

wake는 기포의 상승과정에서 기포의 후면에서 액상과 기체상 사이에 격렬하게 접촉과 혼합이 발생하는 소용돌이 흐름이 일어나는 영역이기 때문에 분산상인 기포의 체류량과 비교하여 wake 체류량의 비율은 기포탑의 성능을 결정하는 중요한 인자중의 하나가 될 수 있다. 분산상인 상승기포의 체류량에 대한 wake 상의 비율은 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\epsilon_w = n\epsilon_G \tag{3}$$

Fig. 8에서 볼 수 있듯이 상승기포의 체류량에 대한 wake상의 비율은 기체의 유속이 증가함에 따라 감소하지만, 액상의 점도가 증

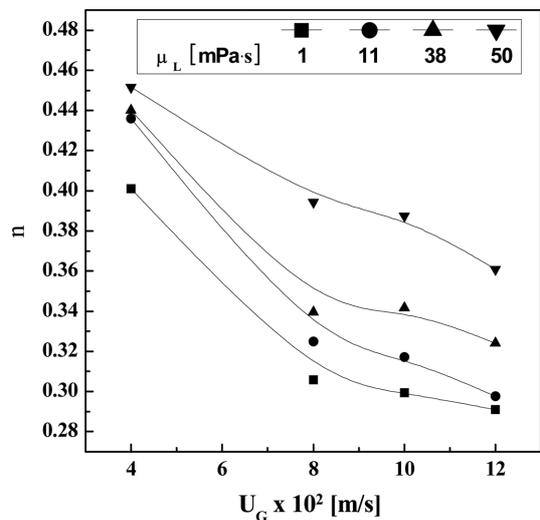


Fig. 8. Effects of gas velocity and liquid viscosity on the ratio of wake region to gas holdup in a viscous bubble column.

가함에 따라 증가하는 것으로 나타났다. wake상 비율의 변화는 비록 wake의 크기가 액상의 점도 또는 기체의 유속이 증가함에 따라 증가하지만 기체 유속 또는 액상의 점도의 증가에 따라 다른 것은 흥미로운 특징이라 할 수 있다. wake는 기포의 크기가 비교적 큰 기포의 후면에서는 형성되지만 기포의 크기가 매우 작은 기포들의 후면에서는 형성이 되지 않는데, 기포탑에서 기체의 유속이 증가하면 큰 기포뿐만 아니라 작은 기포들이 생성된다. 따라서, 기체의 유속이 증가함에 따라 기포의 체류량은 증가하지만, 기포 체류량의 증가에 비례하여 큰 기포가 생성되는 것이 아니며 오히려 기체의 유속이 증가함에 따라 작은 기포들의 생성비율도 높아지므로 큰 기포의 후면에서만 생성되는 wake상의 체류량 비율은 상대적으로 감소한다고 할 수 있다. 그러나, 액체상의 점도가 증가하면 작은 기포들의 합체현상도 일어나지만 큰 기포들의 합체에 의해 기포의 크기가 점점 증가하며 기포의 체류량 자체가 감소하기 때문에 큰 기포의 후면에서만 형성되는 wake상의 체류량의 비율은 증가한다고 할 수 있다. 따라서, Fig. 8에서 기체유속이 증가함에 따라 기포의 크기는 증가함에도 불구하고 wake상 체류량의 기포 체류량에 대한 비율은 감소하나, 액상의 점도가 증가함에 따라서는 wake상의 상대비율이 증가한다고 할 수 있다. 기체의 유속의 증가함에 따라 기포의 크기분포는 흩어지고 확장된다고 보고되고 있다[20-22].

한편, 기포탑이 세가지의 기능 영역 즉, wake와 연속액체 그리고 기포의 영역으로 구성되어 있다는 개념을 기초로 하면 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다[23].

$$\epsilon_B + \epsilon_C + \epsilon_W = 1.0 \quad (4)$$

(4)에서 실험적으로 측정된 기포의 체류량(ϵ_B)과 wake의 체류량(ϵ_W) 자료로부터 연속액상의 체류량(ϵ_C)를 결정하였다. 이렇게 구한 기포의 체류량과 연속액상의 체류량을 기체의 유속과 연속액상의 점도의 변화에 따라 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9에서 볼 수 있듯이 기포의 체류량은 기체의 유속에 따라 증가했지만, 액상의 점도에 따

라 감소하였다. 그러나, 연속액상의 체류량은 기체 유속이 증가함에 따라 감소하였지만, 액상의 점도가 증가함에 따라 증가하였다.

본 연구에서 구한 wake의 상승속도, 빈도수 그리고 부피상당직경 등 wake의 특성들을 실험변수의 상관식으로 식 (5)~(7)과 같이 얻을 수 있었다. 이 식들의 상관계수는 각각 0.916, 0.916 그리고 0.941로 실험값과 잘 맞는 것으로 사료되었다.

$$U_w = 4.122U_G^{0.82} \mu_L^{0.19} \quad (5)$$

$$f_w = 2.740U_G^{0.62} \mu_L^{-0.23} \quad (6)$$

$$d_w = 0.039U_G^{0.57} \mu_L^{0.35} \quad (7)$$

또한, wake와 기포 그리고 연속액상영역의 체류량에 대한 상관식은 식 (8)~(10)과 같이 얻을 수 있었으며, 이들 식의 상관계수는 각각 0.919, 0.941 그리고 0.942로 실험결과와 잘 맞는 것으로 사료되었다.

$$\epsilon_W = 0.037U_G^{0.28} \mu_L^{-0.12} \quad (8)$$

$$\epsilon_B = 0.068U_G^{0.55} \mu_L^{-0.16} \quad (9)$$

$$\epsilon_C = 0.916U_G^{-0.12} \mu_L^{0.04} \quad (10)$$

4. 결 론

모사된 GTL 공정의 점성 액체 기포탑에서 체류량, 부피상당직경, 빈도수 그리고 상승속도 같은 wake의 특성들을 이중 전기 저항탐침법을 이용하여 성공적으로 분석할 수 있었다. wake상의 부피상당직경과 상승속도는 기체의 유속 및 액상의 점도가 증가함에 따라 증가했지만, 액상의 점도가 증가함에 따라 감소하였다. 상승하는 기포의 후면에 위치한 wake상의 기포 체류량에 대한 비율은 액상 점도의 증가에 따라 증가하였지만, 기체의 유속이 증가함에 따라 감소하였다. 본 연구의 실험조건에서 wake 영역의 기포 체류량에 대한 비율은 0.25~0.48의 범위였다. 본 연구의 범위에서 wake 상의 상승속도, 빈도수, 부피상당직경 그리고 체류량은 다음과 같은 운전변수의 상관식으로 나타낼 수 있었다.

감 사

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(3A-3-1).

사용기호

- b : duration time of bubble region[s]
- d_w : equivalent diameter based on volumn[m]
- D : diameter of column[m]
- f_w : wake frequency[Hz]
- K : consistency index in power-law model[Pa s^n]
- k : flow behavior index[-]
- L : length of test section[m]
- n : ratio of wake to gas holdup[-]
- ΔP : pressure drop in the test section[Pa]

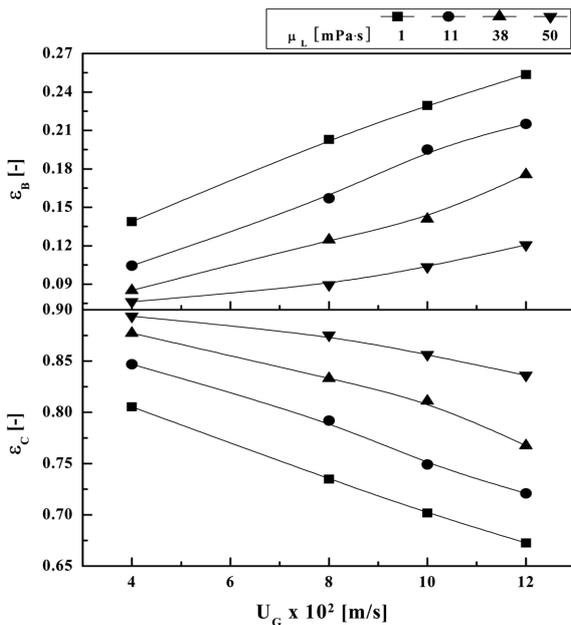


Fig. 9. Effects of gas velocity and liquid viscosity on the holdups of bubble and continuous liquid regions in a viscous bubble column.

t : time[s]
 U_G : gas velocity[m/s]
 U_W : wake rising velocity[m/s]
 w : duration time of wake region[s]

그리스 문자

α : diffusivity[m/s]
 α_B : bubble phase holdup[-]
 ϵ_C : continuous liquid phase holdup[-]
 ϵ_G : gas phase holdup[-]
 ϵ_L : liquid phase holdup[-]
 ϵ_W : wake phase holdup[-]
 μ_L : liquid viscosity[Pas]
 ν : kinematic viscosity[m/s]
 ρ_G : gas density[kg/m³]
 ρ_L : liquid density[kg/m³]
 σ : surface tension[N/m]

참고문헌

1. Fan, L. S. and Tsuchiya, K., *Bubble Dynamics in liquids and liquid-solid suspension*, Stoneham, MA, Butterworth Heinemann (1990).
2. Deckwer, W. D., *Bubble column Reactors*, John Wiley and Sons Ltd., (1992).
3. Krishna, R. and Sie, S. T., "Design and Scale-up of the Fischer-Tropsch Bubble Column Slurry Reactor," *Fuel Processing Technol.*, **64**, 73-105(2000).
4. Van Baten, J. M., Ellenberger, J. and Krishna, R., "Scale-up Strategy for Bubble Column Slurry Reactors Using CFD Simulations," *Catalysis Today*, **79-80**, 259(2003).
5. 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(2002).
6. Chen, R. C., Wang, F. M. and Lim, T. J., "Bubble Wake Dynamics of a Single Bubble Rising in a Two-dimensional Liquid-solid Fluidized Bed," *Chem. Eng. Sci.*, **54**, 4831(1999).
7. Li, Y., Zhang, J. and Fan, L. S., "Numerical Simulation of Gas-liquid-solid Fluidization Systems Using a Combined CFD-VOF-DPM Method: Bubble Wake Behavior," *Chem. Eng. Sci.*, **54**, 5101(1999).
8. Tsuchiya, K. and Fan, L. S., "Prediction of Solid Concentration Profiles in Three-phase Reactors by a Wake Shedding Model," *Chem. Eng. Sci.*, **43**, 1167(1988).
9. Kitano, K. and Fan, L. S., "Near-wake Structure of a Single Gas Bubble in a Two-dimensional Liquid-solid Fluidized Bed : Solid Holdup," *Chem. Eng. Sci.*, **43**, 1355-1361(1988).
10. Katy, J. and Meneveau, C., "Wake-induced Relative Motion of Bubbles Rising in Line," *Int'l. J. Multiphase Flow*, **22**, 239(1996).
11. Zenit, R. and Magnaudet, J., "Measurements of the Streamwise Vorticity in the Wake of An Oscillating Bubble," *Int'l J. Multiphase Flow*, **35**, 195 (2009).
12. Funfschilling, D. and Li, H. Z., "Flow of Non-newtonian Fluids Around Bubbles: PIV Measurements and Birefringence Visualization," *Chem. Eng. Sci.*, **56**, 1137(2001).
13. Sousa, R. G., Riethmuller, M. L., Pinto, A. M. F. R. and Campos, J. B. L. M., "Flow Around Individual Taylor Bubbles Rising In Stagnant CMC Solutions: PIV Measurements," *Chem. Eng. Sci.*, **60**, 1859(2005).
14. Nogueira, S., Riethmuller, M. L., Campos, J. B. L. M. and Pinto, A. M. F. R., "Flow Patterns in the Wake of a Taylor Bubble Rising Through Vertical Columns of Stagnant and Flowing Newtonian Liquids: An Experimental Study," *Chem. Eng. Sci.*, **61**, 7199 (2006).
15. Celata, G. P., Cumo, M., D'Annibale, F. and Tomiyama, A., "The Wake Effect on Bubble Rising Velocity in One-component Systems," *Int'l J. Multiphase Flow*, **30**, 939-961(2006).
16. Lertnuwat, B. and Bunyajitradulya, A., "Effects of Interfacial Shear Condition and Tailing - Corner Radius on the Wake Vortex of a Bubble," *Nuclear Eng. Des.*, **237**, 1526-1533(2007).
17. Chen, R. C. and Chou, I. S., "Wake Structure of a Single Bubble Rising in a Two-dimensional Column," *Expt. Therm. Fluid Sci.*, **17**, 165-178(1998).
18. Kang, Y. and Kim, S. D., "Radial Dispersion Characteristics of Two-and Three-phase Fluidized Bed," *I&EC Process Des. Dev.*, **25**, 717-722(1986).
19. Chang, S. K., Kang, Y. and Kim, S. D., "Mass Transfer Characteristics of Three-phase Fluidized Beds," *J. Chem. Eng. Japan.*, **19**, 524(1986).
20. Shin, I. S., Son, S. M., Kim, U. Y., Kang, Y., Kim, S. D. and Jung, H., "Multiple Effects of Operating Variables on the Bubble Properties in Three-phase Slurry Bubble Columns," *KJChE*, **26**, 587-591(2009).
21. Kang, Y., Cho, Y. J., Woo, K. J., Kim, K. I. and Kim, S. D., "Bubble Properties and Pressure Fluctuations in Pressurized Bubble Columns," *Chem. Eng. Sci.*, **55**, 411-419(2000).
22. Son, S. M., Kang, S. H., Kim, U. Y., Kang, Y. and Kim, S. D., "Bubble Properties in Three-phase Inverse Fluidized Beds with Viscous Liquid Medium," *Chem. Eng. Processing*, **46**, 736-741(2007).
23. Jang, J. H., Lim, D. H., Kang, Y. and Jun, K. W., "Holdup Characteristics of Three Functional Regions in a Slurry Bubble Column," *Korean Chem. Eng. Res.(HWAHAK KONGHAK)*, **48**, 359-364(2010).