

단일노즐을 사용한 내부순환 공기리프트 반응기에서 수력학과 액체의 흐름특성

김 종 철 · 장 서 일 · 손 민 일 · 김 태 옥

명지대학교 공과대학 화학공학과
(1997년 7월 2일 접수, 1997년 9월 12일 채택)

Hydrodynamics and Liquid Flow Characteristics in an Internal Circulation Airlift Reactor using a Single Nozzle

Jong-Chul Kim, Sea-Il Jang, Min-II Son, and Tae-Ok Kim

Dept. of Chem. Eng., Myong Ji Univ., Yong in 449-728, Korea

(Received July 2, 1997, Accepted September 12, 1997)

요약 : 기체분산기로 단일노즐을 사용한 내부순환 공기리프트 반응기에서 수력학과 액체의 흐름특성을 해석하였다. 실험은 공기-물계에서 기체속도와 반응기의 높이를 변화시키면서 국부지역의 기체체류량과 추적자의 충격-응답곡선을 측정하였다. 실험결과, 약 8 cm/s이상의 기체속도에서 상승관은 기포가 강한 합체를 일으키는 난류흐름을 나타내었고 하강관에서는 균일한 크기의 큰 기포들이 분산된 지역까지의 축방향 높이가 기체속도의 증가에 따라 감소하였다. 그리고 국부지역과 반응기 전체의 평균 기체체류량은 기체속도가 증가할수록 증가하였고 반응기 상부지역의 높이가 증가할수록 감소하였다. 또한 혼합시간은 기체속도보다 반응기 상부지역의 높이에 크게 영향을 받으며 이들이 증가할수록 감소하였다. 상승관과 하강관에서 액체의 흐름은 플리그흐름에 근접하였고 완전혼합흐름으로 볼 수 있는 반응기 상부지역의 크기에 따라 반응기 전체의 액체흐름특성이 크게 변화하였다. 이때 액체의 순환속도는 기체속도가 증가할수록 증가하였고 다른 기체분산기에서 보다 상당히 큰 값을 나타내었다.

Abstract : The hydrodynamics and the liquid flow characteristics were investigated in an internal circulation airlift reactor with a single nozzle as a gas distributor. In an air-water system, the gas holdup in the individual flow zone and the impulse-response curve of tracer were measured at various gas velocities and reactor heights. Experimental results showed that for the higher gas velocity(>about 8 cm/s), the flow behavior of bubbles in the riser was turbulent flow due to strong bubble coalescences and the axial height of dispersion zone of large bubbles having uniform sizes in the downcomer was decreased with increasing gas velocity. And mean gas holdups in the individual flow zone and the reactor were increased with increasing gas velocities and were decreased with increasing heights of the top section of the reactor. Also, the mixing time was larger effected by the height of the top section of the reactor and it was decreased with increasing the height of the top section and gas velocity. Flow characteristics of liquid in the riser and the downcomer was tend to access to plug flow and the overall flow behavior of liquid was mainly varied with the size of the top section which it was assumed to be perfect mixing zone. In these conditions, liquid circulation velocities were increased with increasing gas velocities and they were higher than those by using other gas distributors.

1. 서 론

기포의 상승에 따라 액체가 순환되는 공기리프트 반응기(ALR)는 기포탑과 유사하게 기계적 교반장치가 없는 기-액접촉장치로써 생물화학공정과 폐수처리공정 등의 다양한 분야에서 응용되고 있다[1, 2]. ALR는 기체체류량의 차이에 의한 유체순환으로 유체혼합이 우수하고 열전달속도와 물질전달속도가 크며 조업범위가 넓을 뿐만 아니라 동력소비가 적다. 또한

반응열의 제거와 조절이 용이하며 체류시간을 신축성 있게 조절할 수 있는 등의 많은 장점이 있어서 특히 생물반응기로 유용하다[3, 4].

ALR의 성능을 해석하고 설계자료와 조업조건을 결정하기 위하여 기-액흐름특성, 압력강하, 기체체류량, 순환시간, 혼합시간, 그리고 액체의 순환속도 등의 수력학 특성, 유체의 흐름 및 혼합 특성, 열 및 물질전달 특성, 그리고 반응특성 등에 관한 연구가 많이 진행되어 왔다. 이를 특성에 미치는 인자로는

기체속도와 기체분산방법, 유체의 물리적 성질, 반응기의 형태와 구조, 즉 상승관과 하강관의 직경비 또는 단면적비, 반응기의 직경과 높이에 대한 반응기 상부지역의 높이비 등이 있다.

지금까지 ALR의 특성에 관한 연구는 국내에서도 많이 연구되어 왔으나[5-7] 고점도 유체계나 3상계에서 유체혼합을 증대시키거나 슬러리 또는 고체입자를 유동화시키기 위해서는 높은 에너지의 공급이 필요하다[8]. 따라서 이를 개선하기 위하여 기체분산기로 운동량이 큰 단일노즐을 사용하는 경우에는 유체순환이 우수하고 고체입자의 유동화가 용이하며 연속계에서도 편리하다고 보고되어 있다[9]. 그러나 ALR에서 단일노즐을 사용한 연구결과는 거의 보고되어 있지 않은 실정이다.

본 연구는 기체분산기로 단일노즐을 사용하고 draught tube로 된 내부순환 공기리프트 반응기로 다상 반응기로 활용될 수 있도록 하기 위한 연구의 일환으로 수행되었다. 이를 위하여 공기-물계에서 기체속도와 반응기의 높이를 변화시키면서 국부 흐름지역의 기체체류량과 추적자의 충격-응답곡선을 측정하고 평균 기체체류량, 혼합시간, 그리고 액체의 순환속도를 산출하여 수력학과 액체의 흐름특성을 해석하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 실험장치

사용된 내부순환 ALR는 내경이 14 cm이고 높이가 195 cm인 하강관(downcomer)과 내경과 외경이 각각 6, 7 cm이고 높이가 150 cm인 상승관(riser), 유체가 하강관에서 상승관으로 순환하는 높이가 3.5 cm인 clearance, 그리고 상승관에서 나오는 기포가 분리되어 외부로 방출되고 하강관으로 기-액흐름이 순환하는 반응기 상부지역(top section of reactor)으로 구성되었다. 그리고 기체분산기는 직경이 0.5 cm인 단일노즐을 사용하여 반응기의 하부에서 2 cm의 높이가 되도록 하였으며 실험장치는 Fig. 1과 같다.

2.2. 실험방법

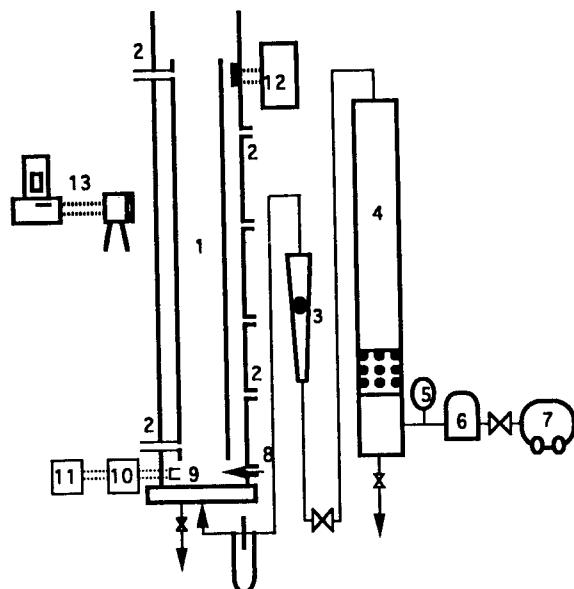
실험은 공기-증류수계에서 반응기 상부지역의 높이, 즉 상승관으로부터 기-액분산 높이를 16.5~38.5 cm로, 그리고 기체속도를 6.050~16.292 cm/s로 변화시키면서 $28 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 의 온도범위에서 국부 흐름지역의 기체체류량과 추적자의 충격-응답곡선을 측정하였다.

상승관과 하강관에서 평균 기체체류량(ε_G)은 정상상태에서 각 흐름지역에 설치된 2개의 압력탭과 연결된 역마노미터의 수두(head, h)를 읽고 식 (1)에 의해 산출하였다.

$$\varepsilon_G = \frac{\rho_L}{\rho_L - \rho_G} \frac{dh}{dx} \quad (1)$$

여기서 x 는 압력탭 사이의 거리이고 ρ_L 과 ρ_G 는 각각 액체 및 기체의 밀도이다.

반응기 상부지역에서의 기체체류량은 2상 공극률 측정기(two phase void measurement meter)에 의해 각 상이 공극센서(void sensor)를 통과하는 시간을 표준화하여 기상이 통과하는 시간분율이 디지털 기록계에 나타낸 값을 일정한 시간동안



- | | |
|-----------------------------|----------------------------------|
| 1. Airlift reactor | 8. Tracer injection point |
| 2. Pressure tap/sample port | 9. Conductivity cell |
| 3. Rotameter | 10. Conductivity meter |
| 4. Air humidifier | 11. Recorder |
| 5. Pressure gauge | 12. Two phase flow meter |
| 6. Holding tank | 13. Flow visualization equipment |
| 7. Air compressor | |

Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

여러 번 측정한 다음에 평균하여 산출하였다.

추적자의 충격-응답곡선은 실험조건을 정상상태에 도달시킨 다음 3.5 cm 높이의 하강관에 설치된 추적자 주입점에서 주사기로 약 0.5 cc이하의 포화소금 수용액을 순간적으로 주입하고 반대편의 하강관에 설치된 전도도센(0.5 cm × 0.5 cm)에서 추적자의 농도변화에 따라 발생되는 전위차를 증폭하여 연속 기록기에 기록하였다. 그리고 하강관과 반응기 상부지역에서 기포의 형태와 크기는 유선가시화 장치(flow visualization equipment)를 사용하여 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 기-액흐름특성

상승관에서 기포의 흐름형태는 반응기의 높이에 거의 무관하게 노즐출구에서부터 강한 기포합체를 갖는 기포흐름(bubble flow) 또는 슬러그흐름(slug flow)이 관찰되었다. 이것은 내부순환 ALR에서는 약 6 cm/s이상의 기체속도에서 강한 난류를 형성하는 churn-turbulent 흐름으로 전이된다는 Chisti 등[10]과 반응기 직경이 5~10 cm인 기-액계에서 기포흐름으로부터 슬러그흐름으로 전이되는 기체속도가 약 4~6 cm/s라고 보고한 Wiswanthan[11]의 결과와 일치된다.

그러나 반응기 상부지역에서와 하강관에서 기포의 흐름특성은 조업조건에 따라 상당히 변화하여 약 6 cm/s의 낮은 기체속도에서는 상승관에서 나온 기포들이 하강관으로 순환하지 않고 반응기 상부지역에서 수직으로 상승하였다. 이때 액체흐

름은 반응기 상부지역의 하부에서 하강관으로 순환되고 상부는 액체혼합이 거의 이루어지지 않음을 염료($KMnO_4$) 추적자와 주입에 의해 관찰되었다. 이와 같이 기포가 하강관으로 순환되지 않는 경우에 반응기 상부지역은 Sternard 등[12]과 Russell 등[13]의 결과와 같이 혼합정도가 다른 두 흐름지역으로 나뉘어지며 반응기의 높이가 높을수록 액체혼합 정도가 감소되었다. 그러나 기체속도가 증가됨에 따라 하강관으로 순환되는 액체흐름의 증가로 기포가 하강관으로 순환되어 반응기 상부지역에서는 기포의 상승속도 감소에 의한 기체체류량의 증가로 기포는 분산과 합체현상을 나타내었으며 액체혼합이 증가되었다.

따라서 약 8 cm/s 이상의 기체속도에서 하강관에서는 약 0.3 ~ 0.5 cm 직경의 큰 기포들이 비교적 균일한 분포를 유지하며 합체와 분산이 되지 않는 상부지역과 직경이 약 0.1 cm 이하의 매우 작은 기포들이 소량 존재하는 하부지역으로 구분할 수 있었다. 이때 하강관에서 반응기 바닥에서부터 큰 기포들이 분산된 지역까지의 축방향 높이는 Fig. 2에서와 같이 기체속도가 증가할수록 액체의 재순환 흐름의 증가로, 그리고 반응기의 높이가 증가할수록 정수압의 증가에 의한 기포의 크기감소로 급격히 감소하였다. 특히 반응기의 높이가 180 cm 이상인 경우, 즉 반응기 상부지역의 높이가 상승관 길이의 20% 이상인 경우에는 큰 기포가 분산된 지역까지의 높이가 반응기의 높이에 거의 무관하였을 뿐만 아니라 약 16 cm 이상의 기체속도에서는 하강관의 전 지역에서 기포가 축방향분포를 유지하였다.

Clearance에서는 액체의 정수압이 커서 기포들이 반응기의 하부까지 도달되는 경우에도 기포들의 직경이 약 0.1 cm 이하로 매우 작아서 기체체류량을 무시할 수 있었다. 또한 염료 추적자를 사용하여 관찰한 결과, 액체흐름은 180°로 순환할 뿐만 아니라 이동거리가 다양하여 체류시간이 분포되기 때문에 완전혼합흐름에 근접함을 알 수 있었다.

3.2. 기체체류량

상승관과 하강관에서 기체체류량은 Fig. 3에서와 같이 기체속도가 증가할수록 증가하며 낮은 기체속도에서는 반응기 상부지역의 높이에 거의 무관하지만 높은 기체속도에서는 일정한 상승관의 높이에서 반응기 상부지역의 높이가 증가할수록 감소하고 있다. 이것은 3.1절의 결과와 같이 반응기의 높이가 증가함에 따라 상승관에서는 약 6 cm/s의 낮은 기체속도에서 기포의 흐름특성이 거의 일정한 기포흐름을 갖지만 강한 난류를 형성하는 높은 기체속도에서는 정수압의 영향으로 기포의 크기가 감소하고 반응기 상부지역의 높이가 약 25 cm 이상에서는 큰 기포가 거의 종말속도에 근접하기 때문으로 보인다[14]. 또한 하강관에서는 기체속도와 반응기의 높이가 증가할수록 작은 기포들의 하강이 증가하여 상승관에서보다 반응기 상부지역의 높이증가에 의한 정수압의 영향이 증가되었다.

따라서 국부 흐름지역의 기체체류량은 Fig. 3과 같은 경향을 가지며 반응기 상부지역 > 상승관 > 하강관의 크기순서를 나타내었고 상승관, 하강관, 반응기 상부지역에서 각각 공탑 기체속도의 약 1.14, 3.10, 0.93 승에 비례함을 알 수 있었다. 이 결과는 기체분산기로 다공판이나 multiple sparger 등을 사용하여 얻은 결과, 즉 상승관에서 Bello 등[15]의 0.56승, Chakravarty

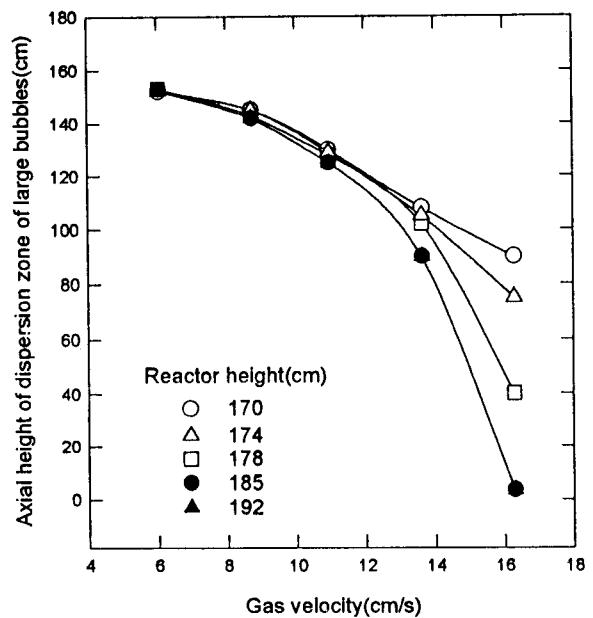


Fig. 2. Axial heights of dispersion zone of large bubbles from the reactor bottom in the downcomer.

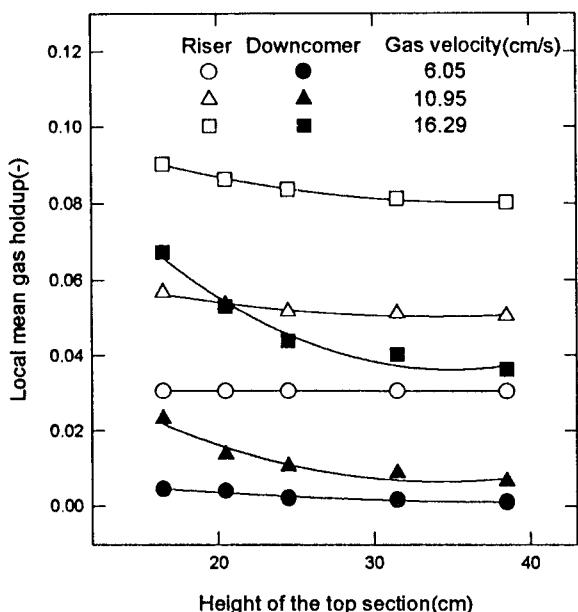


Fig. 3. Effects of heights of the top section on the riser and the downcomer mean gas holdups.

등[16]의 0.88승, Merchuk[14]의 0.87승과 하강관에서 Merchuk[14]의 1.3승, Chakravarty 등[16]의 0.88승보다 상당히 큰 기체속도의 영향을 나타내고 있는데 단일노즐에서는 낮은 기체속도에서 생성기포경이 커서 기체체류량이 매우 적고 높은 기체속도에서는 노즐에서의 운동에너지에 의한 기포의 와류(vortex) 형성으로 기체의 체류시간이 길어지고 기포의 분산효과가 크기 때문에 생각된다.

각 흐름지역의 부피와 기체체류량으로부터 산출한 반응기

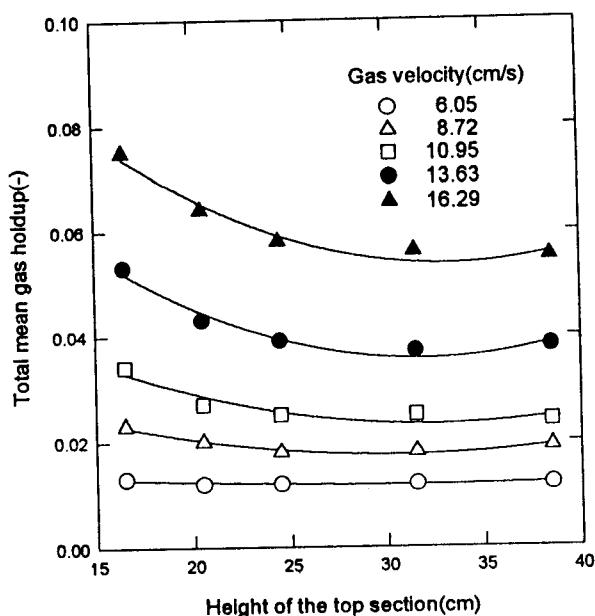


Fig. 4. Effects of heights of the top section on total mean gas holdups.

전체에 대한 평균 기체체류량은 Fig 4에서와 같이 반응기의 높이가 높을수록 기체속도의 영향이 다소 감소하였으나 기체 속도에 대해 약 1.6승에 비례하였고 국부 기체체류량의 변화와 같이 반응기 상부지역의 높이증가에 따라 약 25 cm이하에서는 기체속도가 높을수록 급격히 감소하였고 기체속도가 낮거나 높은 반응기 높이에서는 거의 일정하였다. 이와 같은 결과는 내부순환 ALR의 경우에 각 흐름지역의 기체체류량과 혼합특성이 다를 뿐만 아니라 특히 단일노즐에서는 조업조건에 따른 기포분산과 액체의 순환속도 등이 다른 기체분산기와 다르기 때문으로 보인다.

Fig. 5는 본 실험에서 얻은 평균 기체체류량과 이중관을 사용한 ALR에서 얻은 연구자들의 결과를 비교한 것으로 실험범위내에서는 본 실험값이 다른 기체분산기를 사용한 결과보다 상당히 낮은 기체체류량을 나타내고 있다. 이것은 상승관의 직경을 11 cm와 21.6 cm를 사용한 Merchuk[14]과 15.2 cm와 21.1 cm를 각각 사용한 Fields 등[17]과 Russell 등[13]보다 직경이 작아서 반응기의 벽에 의한 기포합체가 증가되었을 뿐만 아니라 기체체류량이 각 흐름지역의 크기에 따라 변화되기 때문이다. 또한 단일노즐에서는 기체속도가 높을수록 기체체류량이 급격히 증가하는 경향을 갖기 때문에 높은 기체속도에서는 기체분산기의 종류와 반응기의 크기영향이 감소하여[18] 기체체류량이 크게 차이가 나지 않을 것으로 판단된다.

3.3. 혼합시간

혼합시간은 반응기내의 pH조절에서 국부지역의 농도증가로 인한 반응물이나 촉매의 손상을 막기 위하여 조업조건의 결정과 장치설계에서 중요한 인자이다[3]. 따라서 본 연구에서는 추적자의 충격-응답곡선에서 균일한 농도의 $\pm 5\%$ 이내에 도달되는 최초 시간으로 정의하고 산출하였다.

Fig. 6에서와 같이 혼합시간은 기체속도가 증가할수록 기체

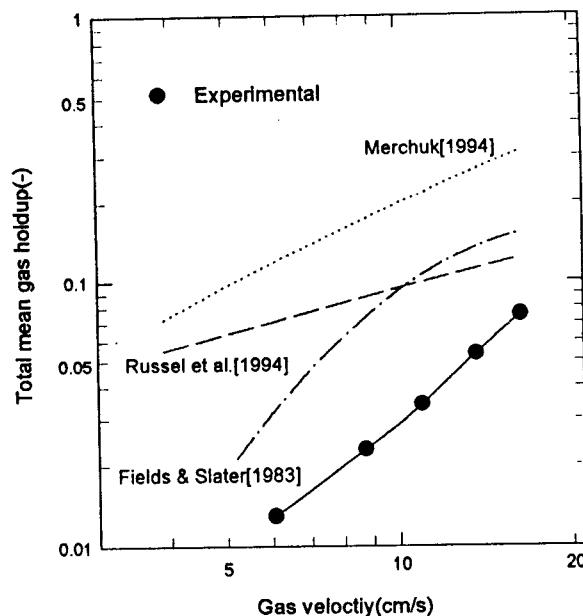


Fig. 5. Comparisons of total mean gas holdups with literature data : reactor height = 170 cm.

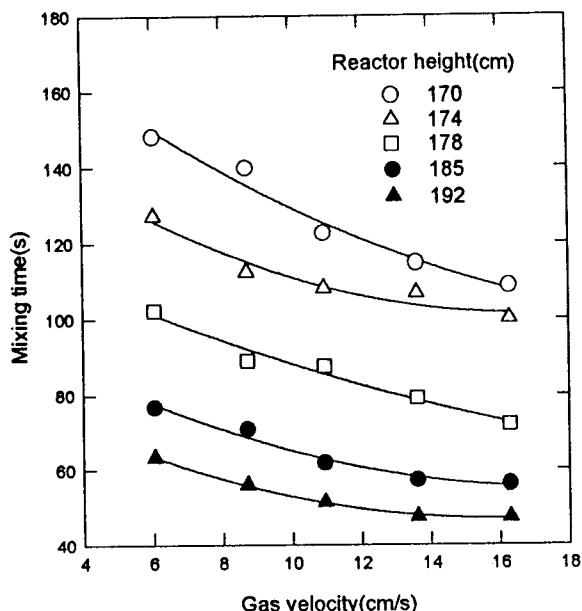


Fig. 6. Effects of gas velocities and reactor heights on mixing times.

체류량의 증가에 의한 액체의 순환속도 증가로 감소하고 있다. 그러나 반응기의 높이에 따라 평균 기체체류량과 액체의 순환시간은 크게 변화하지 않았으나 혼합시간이 급격히 감소하고 있다. 이것은 3.1절의 결과와 같이 기포의 강한 합체로 기-액 흐름특성이 난류현상을 일으켜서 액체혼합이 증가될 뿐만 아니라 다른 흐름지역에 비해 액체의 혼합정도가 큰 반응기 상부지역의 크기가 증가되기 때문이며 일정한 반응기 상부지역의 크기에서 상승관의 높이가 증가할수록 혼합시간이 증가된다는 Rousseau 등[19]과 Russell 등[13]의 실험결과와 일치된다.

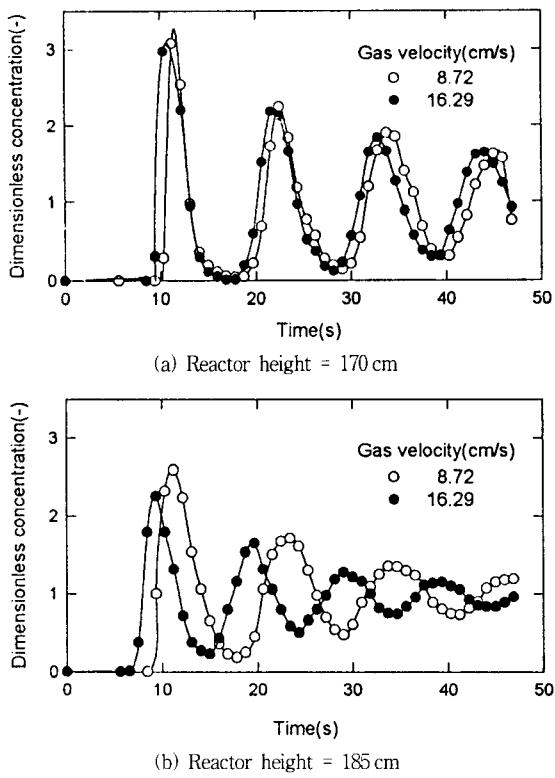


Fig. 7. Variations of impulse-response curves with superficial gas velocities.

3.4. 액체의 흐름특성

다상 반응기에서 액체의 혼합특성은 반응전화율과 생성물의 선택도에 영향을 미치며 난류형성의 정도에 따라 수력학적 열전달 및 물질전달 속도가 변화하기 때문에[3, 4] 반응기의 성능해석에 매우 중요한 인자이다. 특히 ALR는 흐름지역이 여러 개이고 각 흐름지역에서 혼합정도가 다르기 때문에 반응기 전체에 대한 흐름특성을 해석할 필요가 있다.

Fig. 7은 일정한 반응기 높이에서 기체속도의 변화에 따른 추적자의 충격-응답곡선을 나타낸 대표적인 그림이다. 반응기 상부지역의 크기가 작은 경우, 즉 반응기의 높이가 170 cm인 경우(Fig. 7의 a)에는 1회 순환에서의 피크가 급격한 기울기와 매우 좁은 폭을 나타내며 1회 순환후의 농도가 거의 영에 접근하여 대부분의 추적자가 분산되지 않고 있다. 이것은 혼합정도가 큰 clearance와 반응기 상부지역의 크기가 매우 작아서 주 흐름지역인 상승관과 하강관이 플러그흐름(plug flow)에 근접하기 때문으로 생각된다. 따라서 기체속도가 증가할수록 기체체류량의 증가에 의한 액체의 실제속도 증가로 곡선이 다소 빠르게 나타나고 기포의 와류형성에 의한 액체혼합의 증가로 정점이 다소 낮아지지만 비슷한 곡선형태를 나타내고 있다.

그러나 반응기 상부지역의 크기가 큰 경우인 185 cm의 반응기 높이에서는(Fig. 7의 b) 곡선의 정점이 낮고 폭이 넓으며 기체속도가 증가할수록 혼합시간이 매우 짧아지고 있다. 이것은 반응기 상부지역에서의 혼합정도가 상승관과 하강관에서보다 매우 크며 높은 기체속도에서는 Merchuk 등[20]과 같이 완전혼합흐름으로 볼 수 있기 때문이다.

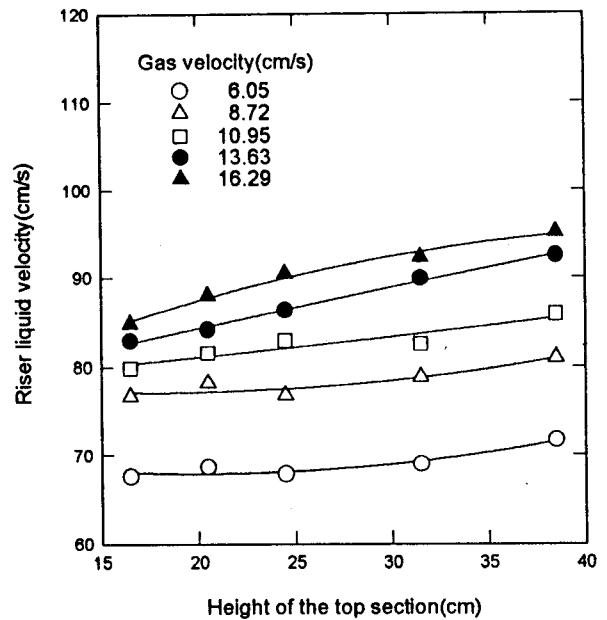


Fig. 8. Effects of heights of the top section on riser liquid velocities for various gas velocities.

따라서 내부순환 ALR에서 액체의 흐름특성은 완전혼합흐름에 근접하는 반응기 상부지역의 크기에 따라 크게 변화하며 상승관과 하강관은 플러그흐름에 근접함을 알 수 있었다.

액체의 흐름특성에서 매우 중요한 액체의 순환속도는 산출방법에 따라 차이가 있으므로 본 연구에서는 Fig. 7과 같은 추적자의 응답곡선에서 인접한 두 곡선간의 시간을 평균하여 순환시간을 산출하고 순환시간이 각 흐름지역의 평균 체류시간을 합한 것과 동일하다고 가정하여 각 흐름지역의 크기와 기체체류량으로부터 액체의 순환속도를 산출하였다.

상승관에서 액체의 순환속도는 Fig. 8에서와 같이 기체속도의 증가에 따라 기체체류량의 증가에 의한 실제속도의 증가와 상승관과 하강관에서의 기체체류량의 차이에 의한 정수압 차이의 증가로 증가하고 있으며 상승관에서의 공탑 기체속도에 대하여 약 0.266승에 비례하였다. 이 결과는 multiple sparger를 사용한 El-Gabbani[21]의 0.237승과 거의 일치하고 있으나 Bello 등[22]의 이론값인 $\frac{1}{3}$ 승과 Russell 등[13]의 0.44승과는 다소 차이가 있다. 또한 반응기 상부지역의 높이가 증가할수록 액체의 순환속도는 다소 증가하였는데 이것은 평균 기체체류량의 감소와 유체의 이동거리의 증가로 순환시간이 다소 증가하지만 Fig. 3에서와 같이 상승관보다 하강관에서 기체체류량의 감소가 크고 Russell 등[13]의 결과와 같이 정수압의 영향이 증가되기 때문에 생각된다.

따라서 액체의 순환속도(U_{Lr})에 대한 상관식은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있었다.

$$U_{Lr}(\text{cm/s}) = 50.45 U_G^{0.266} (H_i/H_r)^{0.086} \quad (2)$$

여기서 U_G 는 상승관에서 공탑 기체속도이고 H_i 와 H_r 은 각각 반응기 상부지역과 상승관의 높이이다.

Fig. 9는 상승관에서 액체의 공탑 순환속도를 단일노즐을 사용한 본 실험결과와 내부순환 ALR에서 기체분산기로 다공관

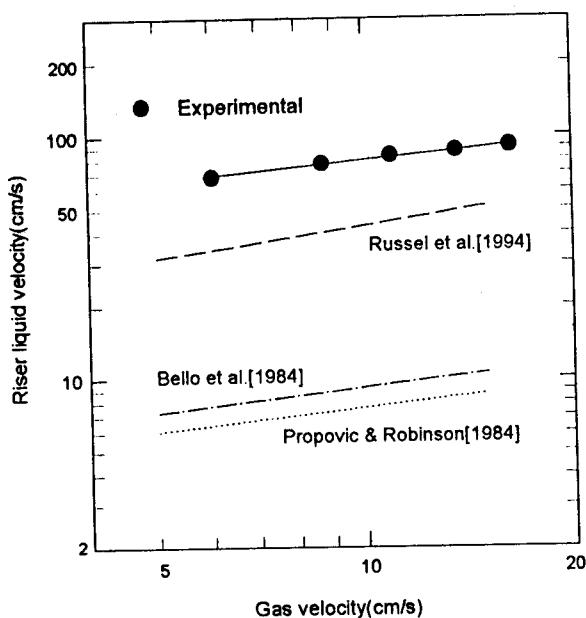


Fig. 9. Comparisons of liquid circulation velocities with literature data : reactor height = 178 cm.

이나 multiple sparger 등을 사용하여 얻은 다른 연구자들의 결과를 비교한 것으로 본 실험범위에서 Bello 등[22]과 Propovic 등[23]의 결과는 본 실험값보다 약 1/10 이하의 값을, 그리고 Russell 등[13]은 약 1%의 매우 낮은 순환속도를 나타내고 있다. 이것은 다른 기체분산기보다 단일노즐에서의 생성기포경이 커서 재순환되는 액체흐름의 흡입효과가 크고 노즐에서의 운동에너지에 의해 기포의 상승속도가 크기 때문으로 보인다.

따라서 단일노즐을 사용한 내부순환 ALR는 다른 기체분산기에서보다 액체의 순환속도가 상당히 큰 값을 갖기 때문에 혼합시간이 짧을 뿐만 아니라 고체입자나 슬러리가 존재하는 3상계의 ALR에서 유용함을 알 수 있었다.

4. 결 론

단일노즐을 사용한 내부순환 공기리프트 반응기에서 수력학과 액체의 흐름특성을 해석한 결과는 다음과 같다.

- 1) 상승관에서 기포의 흐름은 기체속도가 낮은 경우에는 기포흐름을, 그리고 약 8 cm/s 이상의 기체속도에서는 기포가 강한 합체를 일으키는 난류흐름을 각각 나타내었다. 또한 약 8 cm/s 이상의 기체속도에서 하강관에서는 균일한 큰 기포들이 분산된 지역까지의 축방향 높이가 기체속도의 증가에 따라 감소하였다.
- 2) 각 흐름지역과 반응기 전체에 대한 평균 기체체류량은 기체속도가 증가할수록 증가하였고 기체속도가 높은 영역일수록 반응기 상부지역의 높이증가에 따라 감소하였으나 상승관 길이의 약 1/6 이상의 높이에서는 거의 일정하였다.
- 3) 혼합시간은 기체속도보다 반응기 상부지역의 높이에 크게 영향을 받으며 기체속도와 반응기 상부지역의 높이가 증가할수록 감소하였다.
- 4) 상승관과 하강관은 플리그흐름에 균접하였고 완전혼합흐름에 균접하는 반응기 상부지역의 크기에 따라 액체의 흐름특

성이 크게 변화하였다. 이때 산출된 액체의 순환속도는 기체속도가 증가할수록 증가하며 다른 기체분산기에서보다 매우 큰 값을 유지하였다.

감 사

본 연구는 명지대학교 부설 산업기술연구소의 '97 교내 연구비에 의해 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. T. Keshavarz, R. Eglin, E. Walker, C. Bucke, E. Holt, A. T. Bull, and M. D. Lilly, *Biotech Bioeng.*, **36**, 763(1990).
2. M. H. Siegel and C. W. Robinson, *Chem. Eng. Sci.*, **47**, 3215(1992).
3. M. Y. Chisti, "Airlift Bioreactors", Elsevier Applied Science, New York(1989).
4. J. C. Merchuk, "Hydrodynamics and Hold-up in Airlift Reactors", in Encyclopedia of Fluid Mechanics(Edited by N. P. Cheremisinoff), Gulf Publ. Co., Houston, 1485-1511 (1986).
5. 이성희, 최호상, 박영태, 도갑수, *화학공학*, **27**, 472(1989).
6. 박찬진, *화학공학*, **33**, 177(1995).
7. 최일곤, 백진호, 한승완, 김상열, *화학공학*, **35**, 225(1997).
8. J. Philip, M. Proctor, K. Niranjan, and J. F. Daividson, *Chem. Eng. Sci.*, **45**, 651(1990).
9. M. Zlokarnik, *Chem. Eng. Sci.*, **34**, 1265(1979).
10. M. Y. Chisti and M. Moo-Young, *Biotech Bioeng.*, **31**, 487(1988).
11. K. Wiswanathan, "Flow Patterns in Bubble Columns", in Encyclopedia of Fluid Mechanics(Edited by N. P. Cheremisinoff), Gulf Publ. Co., Houston, 1180-1215(1986).
12. W. Sternard and H. Blenke, *Chem. Ing. Tech.*, **61**, 479(1989).
13. A. B. Russell, C. R. Thomas, and M. D. Lilly, *Biotech Bioeng.*, **43**, 69(1994).
14. J. C. Merchuk, *AIChE J.*, **40**, 1105(1994).
15. R. A. Bello, C. W. Robinson, and M. Moo-Young, *Biotech Bioeng.*, **27**, 369(1985).
16. M. Chakravarty, S. Begum, H. D. Singh, and M. S. Iyengar, *Biotech Bioeng. Symp.*, No. 4, 363(1973).
17. P. R. Fields and N. K. H. Slater, *Chem. Eng. Sci.*, **38**, 647(1983).
18. M. Y. Chisti and M. Moo-Young, *Chem. Eng. J.*, **38**, 149(1988).
19. I. Rousseau and J. D. Bullock, *Biotechnol. Lett.*, **2**, 475(1980).
20. J. C. Merchuk and R. Yunger, *Chem. Eng. Sci.*, **45**, 2973(1990).
21. D. H. El-Gabbani, "Oxygen Mass Transfer in a Bubble Column Bioreactor Containing Lysed Yeast Suspensions", MASc Thesis, University of Waterloo, Ontario(1977).
22. R. A. Bello, C. W. Robinson, and M. Moo-Young, *Can. J. Chem. Eng.*, **62**, 573(1984).
23. M. Popovic, and C. W. Robinson, "Estimation of Some Important Design Parameters for Non-Newtonian Liquids in Pneumatically Agitated Fermenters", *Proceedings of the 34th Canadian Chemical Engineering Conference*, Quebec City, 258-263(1984).