

## 외부 순환 공기리프트 반응기의 동특성

강 귀 현 · 김 춘 영 · \*정 봉 우

전북대학교 공과대학 화학공학과, \*전북대학교 공과대학 공업화학과

### Dynamic Characteristics of External loop Air-Lift Reactor

Kwee-Hyun Kang, Chun-Yeong Kim, \*Bong-Woo Chung

Dept. of Chemical Engineering, Chonbuk National University

\*Dept. of Chemical Technology, Chonbuk National University

#### ABSTRACT

Hydrodynamics and mixing characteristics such as circulation time, mixing time, circulation velocity and axial dispersion coefficient were investigated using highly viscous pseudoplastic solutions of carboxymethyl cellulose(CMC) in an external circulation loop air-lift reactor with 13 ℓ working volume. The superficial gas velocity was changed from 1.9 to 6.2cm/s and CMC concentration from 0 to 1.0wt%.

The theoretical model based on the pressure balance is developed mathematically to predict liquid circulation velocity.

Gas hold-up, circulation velocity and axial dispersion coefficient of liquid phase increased with increasing gas velocity and decreased slightly with increasing liquid viscosity. Mixing time and circulation time decreased with increasing gas velocity and increased with increasing liquid viscosity. Experimental data on liquid circulation velocity were in good agreement with the predicted values.

#### 서 론

순환식 공기리프트 반응기는 최초로 Lefrancois 등(1)이 특허를 얻은 이래 흡수조작이나 폐수처리공정, 미생물에 의한 단세포 단백질(single cell protein)생산과 식물세포배양에 의한 fine chemicals의 생산, 호기성 발효 등과 같은 분야에서 다양하게 사용되고 있으며, 장치의 특성에 따른 상 체류량(기체, 액체, 고체), 분산계수(축방향, 반경방향, 역혼합), 물질전달계수, 열전달효과 등을 중심으로 반응기의 성능을 향상시키려는 연구가 여러 연구자에 의해 꾸준히 진행되어 왔다.

Chakravarty 등(2)은 회분식 실험을 통하여 기체체류량에 관한 실험식을 제시하였고 Gasner(3)는 기포탑 중앙에 평판으로 된 장애판을 수직으로 설치한 직육면체형 기포탑 반응기를 개발하여 기포의 합체현상을 줄임으로써 물질전달이 증가함을 보였다. Kim과 Park(4)은 유체의 흐름특성을 연속혼합

조흐름과 플러그흐름으로 표시하는 유동모형을 나타내고자 하였으며, Lin 등(5)과 Fields와 Slater(6)는 순환식 공기리프트 반응기의 특성을 축방향분산 모델로 설명하였다. Chisti 등(7)은 상승관에 대한 하강관의 단면적비의 증가로 인해 순환속도가 증가할 때 상승관 내의 기체체류량이 감소함을 보였으며, Choi 등(8)은 수평연결관의 길이가 증가함에 따라 상승관과 하강관 내의 기체체류량이 모두 감소하여 총괄 부피 산소전달계수는 수평연결관이 짧을 때 더 큰값이 얻어진다고 보고하였다.

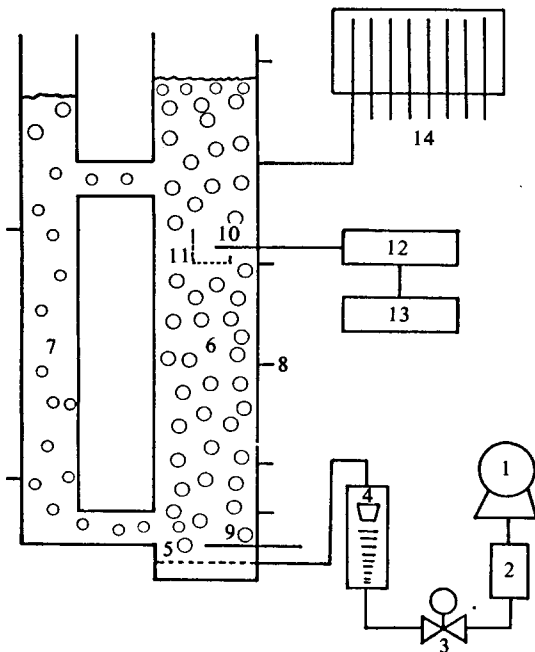
최근에는 mycelial 배양액이나 생물고분자의 생산에 따른 유동학적 성격을 규명하기 위한 연구 또는 반응기 내에서 고체입자를 포함하는 삼상 유동층 조작과 반응물이 슬러리(slurry)인 반응에 관한 연구도 활발히 이루어지고 있다(9-10). 그러나 현재까지의 연구 결과는 대부분이 뉴튼유체인 물을 사용하였으나 실제 산업적인 응용면에서는 고점도의 비뉴튼 유체인 경우가 많다.

본 연구에서는 외부순환식 공기리프트 반응기에서 먼저 액상으로 물을 사용하여 기체 유속 변화(1.9-6.2cm/s)에 따른 기체체류량, 액체의 순환속도 및 혼합 특성을 조사하였으며, CMC(Carboxymethyl cellulose) 용액의 농도를 변화시켜가면서(0-1.0wt%) 액상의 점도 변화에 따른 영향을 함께 조사하여 실제 생물반응기에 응용할 기초 자료를 제시하고자 한다.

## 재료 및 방법

### 재료 및 장치

본 실험에서 사용한 외부순환식 공기리프트 반응기의 개략도는 Fig. 1과 같다. 그 주요 구조는 상승관과 하강관 그리고 두 관의 상, 하를 연결하는 수평 연결관으로 구성된다. 탑 내부에서 일어나는 현상을 관찰할 수 있도록 모든 부분을 투명 아크릴관으로 제작하였으며, 주요부분의 치수는 Table 1에 나



- |                       |                        |
|-----------------------|------------------------|
| 1. Air compressor     | 8. Pressure taps       |
| 2. Air cleaner        | 9. Tracer injector     |
| 3. Pressure regulator | 10. Conductivity probe |
| 4. Rotameter          | 11. Bubble trap        |
| 5. Gas distributor    | 12. Conductivity meter |
| 6. Riser              | 13. Recorder           |
| 7. Downcomer          | 14. Manometer          |

Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

타내었다.

본 실험에서는 기상으로 압축공기를 사용하였고, 액상으로는 증류수를 사용하였으며, 액상의 점도 변화에 따른 영향을 관찰하기 위하여 CMC용액을 사용하였다. Table 2는 CMC용액의 농도변화에 따른 액상의 점도와 밀도의 변화를 나타낸 것이다.

공기배관을 통하여 들어온 공기는 실리카겔이 들어있는 공기여과기를 통과하면서 공기중의 불순물이 정제된 후 압력조절기(regulator)와 로타미터(rotameter)에 의하여 정량적으로 기체분산관을 통하여 상승관 안쪽으로 분산된다. 기체 분산장치는 내경이 5mm인 동관에 0.98mm의 구멍을 35개 뚫어 삼각형 구조로 배열하였다.

반응기 내의 국부 기체체류량을 측정하기 위하여 모두 8개의 압력탭을 설치하였는데, 상승관에는 기체 분산관으로부터 각각 0.22, 0.32, 0.52, 0.72, 0.92, 1.12m 떨어진 위치에 6개를 설치하였고, 하강관에는 0.74m간격으로 위 아래에 두개의 압력탭을 설치하였으며, 그 위치에서의 정압을 측정하기 위하여 마노미터에 연결하였다.

순환 및 혼합시간등 액체의 혼합특성을 조사하기 위하여 추적자를 이용하였고, 기체분산관 상부 5cm 되는 곳에 추적물질의 주입점을 만들었으며, 추적물질의 농도 변화에 따른 전기전도도 변화를 측정하기 위하여 상승관 상부에 전기전도도계(CM-20S, Tokyo Toa electronics)를 설치하였다.

Table 1. Dimensions of the experimental apparatus.

Riser height	1.400m
Riser I. D.	0.092m
Downcomer length	1.170m
Downcomer I. D.	0.054m
Connection pipe length	0.150m
Connection pipe I. D.	0.054m

Table 2. Liquid phase properties.

CMC wt%	viscosity poise $\times 100$	density $\text{kg/m}^3$
pure water	1.0000	1000.000
0.25	3.1472	1001.278
0.50	6.8649	1003.573
0.75	20.4415	1003.854
1.00	75.1380	1004.371

실험은 반회분식으로 액상을 탑 내에 채운 후 공기를 일정한 유속으로 계속 유입하면서 기체체류량과 액상의 순환속도 그리고 혼합특성을 측정하였다. 모든 실험은 대기압 상온에서 실시하였다.

### 기체체류량 실험

액상을 일정한 높이로 탑 내에 채운 후 로타미터에 의하여 정량된 일정한 유량의 압축 공기를 기체분산관을 통하여 상승관 안쪽으로 유입하면서 마노미터를 연결한 라인에서 기포들을 완전히 제거한 후 안정상태에 도달하도록 하였다. 각 부위에 설치한 압력탭에 연결된 마노미터를 사용하여 그 위치에서의 정압을 측정하였으며, 탑높이에 따른 정압의 변화를 측정하여 다음 식 (1)로부터 상승관과 하강관 내의 국부 기체체류량을 계산하였다(11).

$$-\frac{dP}{dH} = (\epsilon_r \sigma_r + \epsilon_l \sigma_l) \frac{g}{g_c} \quad (1)$$

여기에서 H는 높이, P는 그 높이에서의 정압을 나타내고  $\sigma_r$ ,  $\sigma_l$ 는 각각 기체의 밀도와 액체의 밀도를 나타내며,  $\epsilon_r$ 와  $\epsilon_l$ 는 각각 기체체류량과 액체체류량을 나타낸다. 또한 총괄 기체체류량은 공기의 유입밸브를 잠근 후 측정된 액면의 높이와 공기가 분산될 때의 액면의 높이차를 이용하여 다음 식 (2)로부터 구하였다.

$$\epsilon_r = \left[ \left( 1 + \frac{g_c}{\sigma_l g} \right) \frac{dP}{dH} \right] \quad (2)$$

### 혼합특성 실험

Bodenstein number와 순환시간 및 혼합시간은 추적자 실험을 통하여 impulse-response technique에 의한 체류시간 분포곡선을 해석하여 구하였다(5, 6). 추적자로 5몰의 KCl용액 2ml를 사용하였다. 추적자의 주입점은 기체분산관 상부 5cm되는 곳이며, 펄스(pulse)로 주입하였다. 추적자의 농도 변화에 따른 전기전도도 변화는 기포의 영향을 줄이기 위해 bubble trap을 설치하여 기포에 의한 전기전도도의 교란을 방지하면서 전기전도도계로 측정하였으며, 그 응답곡선을 기록계로 기록하였다.

순환시간은 액체가 하나의 loop를 순환하는데 걸리는 시간으로 두개의 인접한 농도 피크 사이의 시간 간격의 평균값으로부터 계산하였으며, 혼합시간은 순환 액체 흐름속에 추적자를 펄스로 주입한 후 반응기 내의 혼합이 충분히 이루어져서 액상의 농도가 거의 균일해지는 시간으로 정의하여 계산하였다.

## 결과 및 고찰

### 기체 체류량 특성

Fig. 2 기체 유속에 따른 상승관 내의 기체체류량의 변화를 나타낸 것이다. 기지의 결과(4, 8, 12)와 마찬가지로 기체유속이 증가함에 따라 상승관 내의 기체체류량이 증가하였다. 또한 기체유속이 5cm/s부근까지는 상승관 내의 기체체류량은 급격히 증가하다가 그 이상에서는 증가율이 감소함을 보였는데, 이것은 기체유속이 5cm/s 이하에서는 상승관 내의 흐름형태는 기포합체가 거의 일어나지 않는 bubbly flow이므로 기체유속이 증가함에 따라 기포 생성빈도수가 증가하기 때문에 기체체류량의 증가가 크지만, 그 이상의 기체유속에서는 기포합체가 일어나 흐름형태가 churn turbulent로 바뀌면서 기포의 크기는 커지고 상승속도가 빨라지기 때문에 기체유속의 증가에 따른 기체체류량의 증가율이 다소 감소하는 것으로 생각된다.

CMC농도가 증가함에 따라 상승관 내의 기체체류량은 완만하게 감소하는 경향을 보였으며, 더 낮은 기체유속에서 기체체류량의 증가율이 감소하는 경향을 보였다.

이러한 현상은 점성유체(viscous fluid)에서 hindered bubble motion에 의해 설명할 수 있는데, 점도가 낮을 때에는 항력(drag force)이 기포의 합체

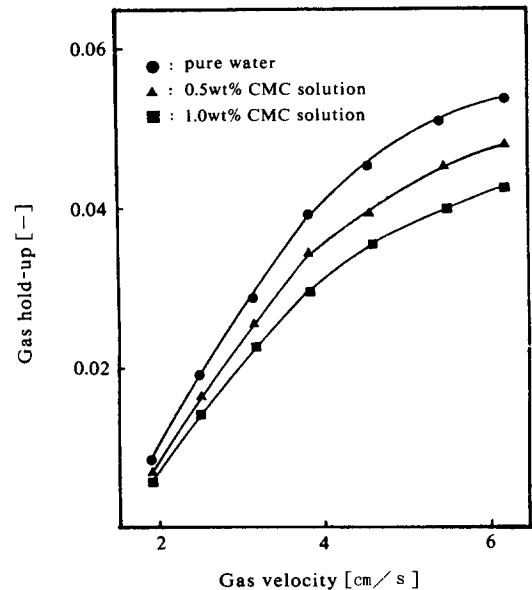


Fig. 2. Effect of the superficial gas velocity on gas hold-up in riser section.

현상이 일어날 만큼 크지 않으므로 기포를 고르게 분산시키지만 점도가 커질 때는 항력이 커지면서 기포의 합체 현상을 촉진시켜 기포의 크기는 커지고 상승속도가 빨라지게 되므로 기체체류량이 감소하게 된다.

Fig. 3은 기체유속에 따른 하강관 내의 기체체류량 변화를 도시한 것으로, 낮은 기체 유속에서는 하강관 내의 기체체류량은 무시할 수 있을 정도로 작은 값을 갖는다. 그러나 기체유속이 어느정도 증가하여 액체의 순환속도가 증가하면 기체유속의 증가에 따른 하강관 내의 기체체류량은 갑자기 증가하였는데, 이는 기체유속이 증가함에 따라 액체의 순환속도가 증가하여 더 많은 기포가 하강관으로 유입되기 때문으로 설명할 수 있다. 또 기체유속이 낮을 때는 CMC농도 변화에 따라서 거의 영향을 받지 않지만 높은 기체유속에서는 CMC농도가 증가함에 따라 하강관 내의 기체체류량은 상당히 감소하였다. 이것은 낮은 기체유속에서는 점도가 높고 낮음에 관계없이 액체의 순환속도가 낮아서 하강관으로의 기포의 유입이 거의 일어나지 않지만 기체유속이 증가하면 점도가 높은 액상에서는 점도가 낮은 액상에서보다 기포의 합체현상이 크게 일어나 큰 기포가 형성되어 하강관으로 유입되는 기포량이 현저하게 감소하기 때문이다.

Fig. 4는 기체 유속의 변화에 따른 각 부분에서

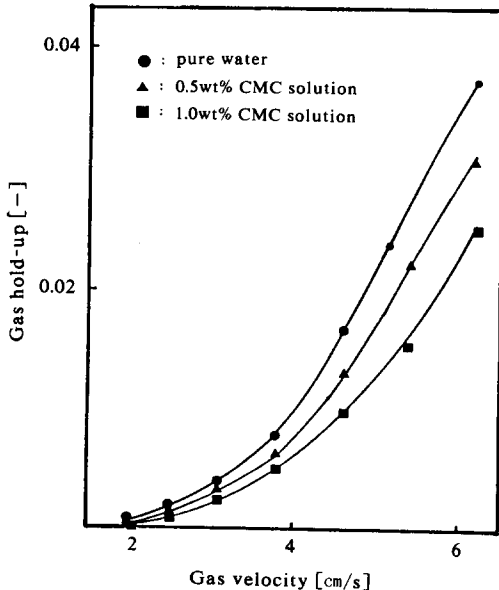


Fig. 3. Effect of the superficial gas velocity on gas hold-up in downcomer section.

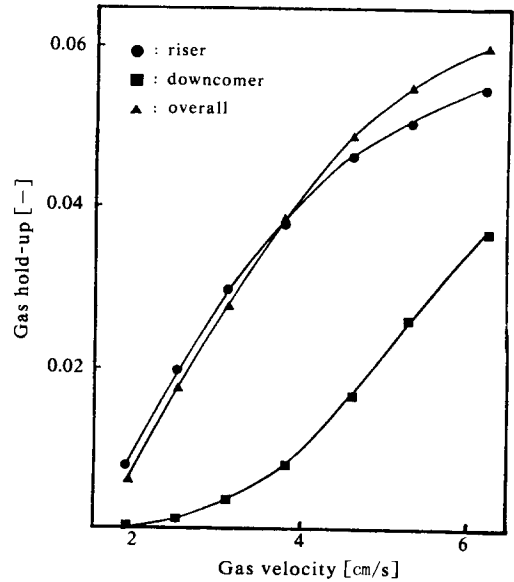


Fig. 4. Effect of the superficial gas velocity on gas hold-up (liquid: pure water).

의 기체체류량의 변화를 같은 그림에 나타낸 것이다. 그림에서 보면 기체유속이 증가함에 따라 어느 부분에서 상승관 내의 기체체류량과 총괄 기체체류량의 값이 역전됨을 알 수 있다. 이것은 공기유량이 증가하면서 총팽창이 일어나 탑상부 (top section)에서의 기체체류량 증가와 함께 탑상부의 부피도 증가해서 전체 기체체류량에 대하여 탑상부에서의 기체체류량이 중요한 비중을 차지하기 때문으로 설명할 수 있다.

#### 순환시간 및 혼합시간

Fig. 5와 6은 각각 기체유속의 변화에 따른 순환시간과 혼합시간을 나타낸 것이다. 기체유속이 증가함에 따라 순환시간은 초기에 급격히 짧아지다가 기체유속이 5cm/s 이상이 되면 그 증가율이 둔화되어 거의 일정한 값을 나타내었다. 이것은 기체유속이 증가함에 따라 상승관 내의 기체체류량은 초기에 급격히 증가하다가 그 증가율이 감소한 반면 하강관 내의 기체체류량은 초기에 서서히 증가하다가 그 증가율이 증가하기 때문에 하강관 내의 기체체류량에 대한 상대적인 상승관내의 기체체류량이 기체유속이 낮은 영역에서는 급격히 증가하여 액체의 순환에 필요한 추진력의 증가율이 커서 순환시간을 급격히 감소시키지만 기체유속이 증가함에 따라 그 증가율이 감소하기 때문으로 해석된다.

혼합시간은 기체유속이 증가함에 따라서 감소하였

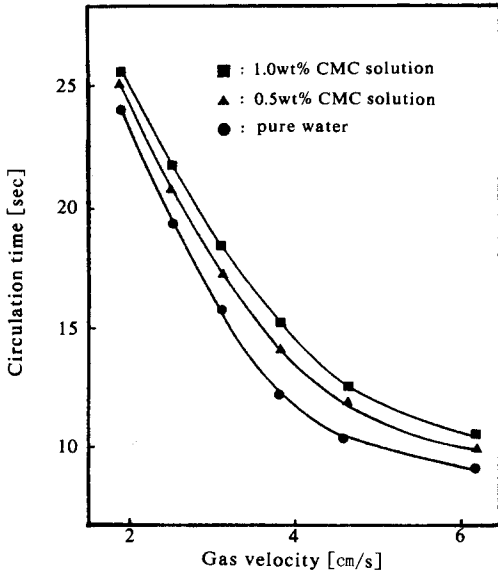


Fig. 5. Effect of the superficial gas velocity on circulation time.

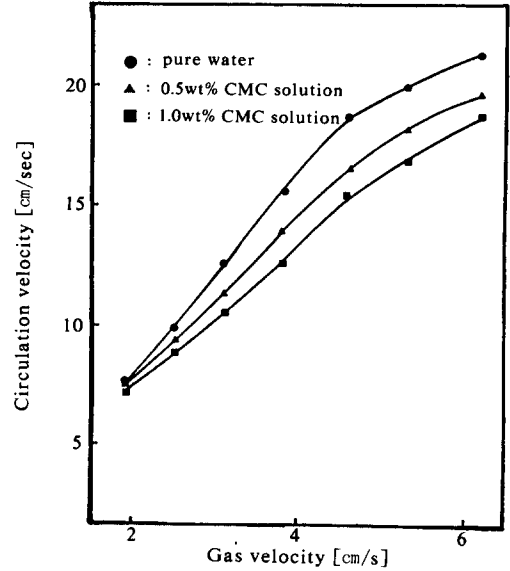


Fig. 7. Effect of the superficial gas velocity on circulation velocity.

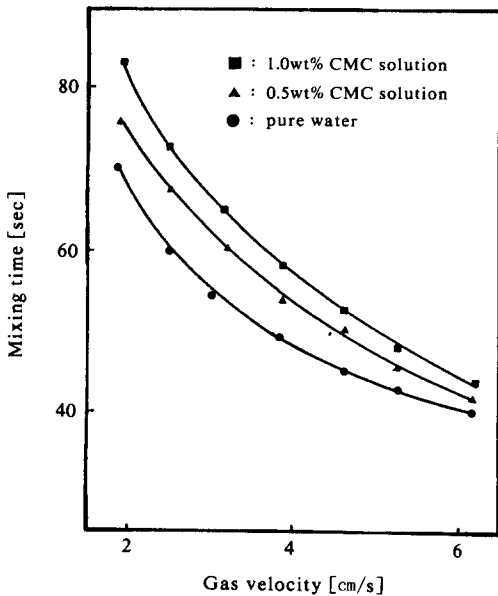


Fig. 6. Effect of the superficial gas velocity on mixing time.

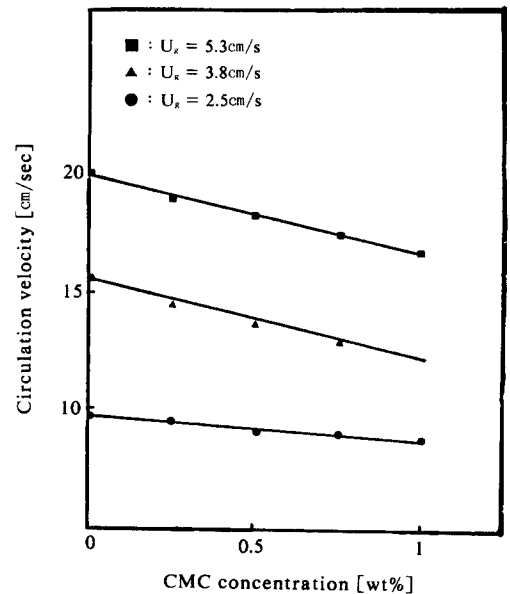


Fig. 8. Effect of the CMC concentration on circulation velocity.

는데, 이는 기체유속이 증가함에 따라 기체체류량이 증가하고 이에 따라 기포들의 상호작용과 액체의 순환속도 증가로 인한 액체 자체에 따른 반응기 내의 난류현상이 증가하기 때문에 혼합시간이 감소한다고 설명할 수 있다.

**액체의 순환속도**

기체가 상승관에 주입되면 밀도차에 의해 액체가 하강관을 통하여 자연스럽게 순환하게 된다. Fig. 7은 기체유속의 변화에 따른 상승관 단면을 기준으로 한 액체의 순환속도를 나타낸 것이며, Fig. 8은

CMC농도가 증가함에 따라서 액체의 순환속도가 약간 감소함을 보여주고 있다. 순환 액체의 속도는 기체의 속도에 따라 초기에 급격히 증가하나 기체속도가 약 5cm/sec 이상이 되면 그 증가율이 감소하였다. 이것은 낮은 기체유속 범위에서는 기체유속이 증가함에 따라 상승관내의 기체체류량은 급격히 증가한 반면 하강관내의 체류량은 서서히 증가하기 때문에 두 부분 사이의 밀도차가 증가하여 순환속도를 증가시키지만 그 이상의 속도에서는 많은 기포가 순환 액체를 따라 상승관으로부터 하강관으로 유입되어 양쪽관사이의 평균밀도차를 감소시키기 때문으로 해석할 수 있다.

Fig. 9는 압력수지식으로 부터 예측한 액체의 순환속도와 실험에서 얻은 자료를 비교한 것이다. 낮은 기체유속 범위에서는 이론값과 실험값이 잘 일치하고 있지만 기체유속이 증가하면 이론값이 상대적으로 큰 값을 갖게됨을 알 수 있다. 이것은 압력수지식을 전개할 때 하강관으로 기포의 유입이 일어나지 않는다고 가정하였기 때문에 나타난 결과이다. 기체유속이 낮을 때는 하강관 내의 기체체류량은 거의 무시할 수 있을 정도로 작기 때문에 위의 가정에 충실하지만 기체유속이 증가하면 하강관으로 유입되는 기포량이 증가하여 액체의 순환을 방해한 것으로 생각된다.

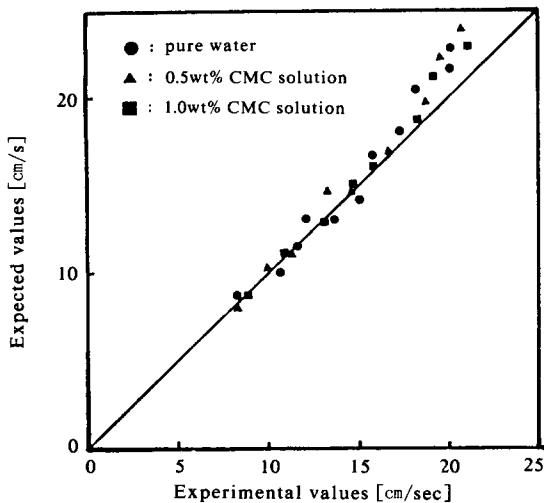


Fig. 9. Comparison of liquid circulation velocity between experimental and expected values.

**축방향 분산계수**

Fig. 10은 기체유속의 증가에 따른 Bodenstein number를 나타낸것으로 기체유속이 증가함에 따라

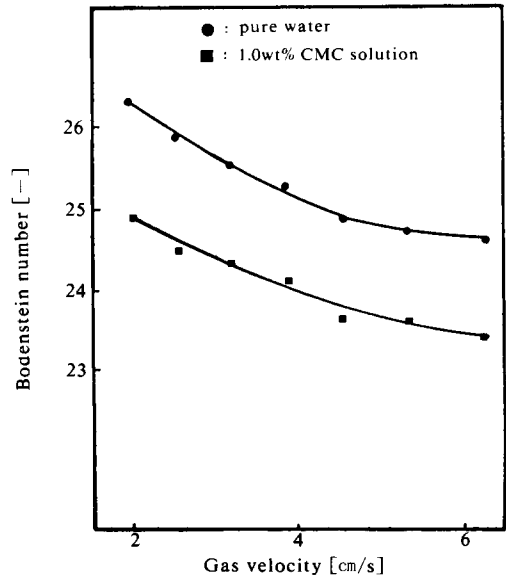


Fig. 10. Effect of the superficial gas velocity on Bodenstein number.

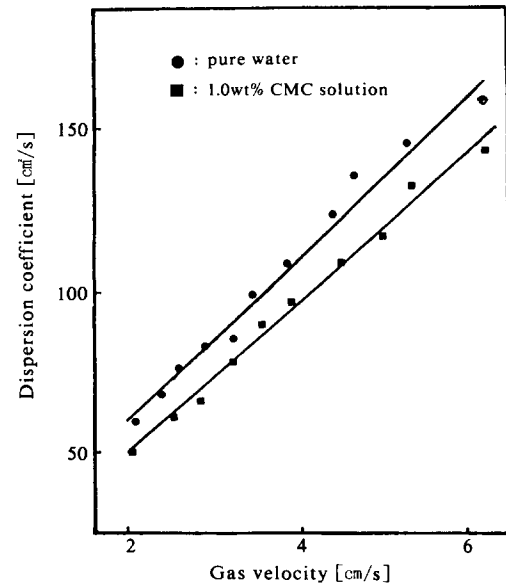


Fig. 11. Effect of the superficial gas velocity on axial dispersion coefficient.

Bodenstein number는 감소하였으며, CMC농도가 증가함에 따라 약간 감소하는 경향을 보였다. Fig. 11은 기체유속 변화에 따른 축방향분산계수의 변화를 나타낸 것으로 기체유속이 증가함에 따라 증가하

였다. 이는 기체체류량의 증가에 따른 기포들의 상호 작용과 액체의 순환속도의 증가로 인한 반응기 내의 난류현상이 증가하기 때문으로 해석할 수 있다.

Levenspiel(13)은 혼합의 정도를 Peclet number의 역수로 나타내었으며,  $Pe^{-1}$ 이 0.2 이상일 때 분산이 많이 일어난다고 하였다.  $Pe$ 는 다음과 같이 계산될 수 있으며,  $B_0$ 는 Bodenstein number이다.

$$Pe = (D/H)Bo \quad (3)$$

본 실험영역에서는  $Pe^{-1}$ 이 1.08에서 1.22의 범위의 값을 갖는데, 이 값은 0.2보다 크므로 많은 분산이 일어나 mixed flow에 근접함을 알 수 있었다.

## 요 약

외부 순환식 공기리프트 반응기에서 기상유속과 액상의 점도를 변수로 하여 기체체류량과 액체의 순환시간, 혼합시간, 순환속도 및 촉방향분산계수를 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 기체체류량은 기체유속이 증가함에 따라 증가하였으며, 점도가 증가함에 따라서는 약간 감소하는 경향을 보였다. 또 기체유속이 증가함에 따라 상승관에서는 기체체류량의 증가율이 감소한 반면 하강관에서는 증가하였다.
2. 기체유속이 증가함에 따라 순환시간 및 혼합시간은 초기에 급격히 짧아지다가 거의 일정한 값을 나타내었으며, 액체의 점도가 증가함에 따라 순환시간과 혼합시간은 모두 증가하였다.
3. 순환 액체의 속도는 기체의 속도에 따라 초기에 급격히 증가하나 기체속도가 약 5cm/sec 이상이 되면 그 증가율이 매우 둔화되었으며, 점도가 증가함에 따라 약간 감소함을 알 수 있었다. 또한 압력수지식으로 예측한 이론값과 실험값은 낮은 기체유속 영역에서는 잘 일치하였으나 기체유속이 증가함에 따라 실험값이 이론값보다 작은 값을 나타내었다.

4. 기체유속이 증가함에 따라 Bodenstein number는 감소하였고, 촉방향분산계수는 증가하였으며, 점도가 증가함에 따라 약간 감소하는 경향을 보였다. 본 실험범위에서 분산이 많이 일어나 mixed flow에 근접함을 알 수 있었다.

## 참고 문헌

1. L. Lefrancois, C. G. Mariller, J. V. Mejane. : Brevet D. Invention, France, No. 1, 102,200(1955).
2. M. Charkravarty, S. Begum, and H. D. Singh, Biotechnol, Bioeng., Symp. No. 4, 363(1973).
3. L. L. Gasner, Biotechnol, Bioeng., **16**, 1179 (1974).
4. H. I. Kim, and J. Y. Park, HWAHAK KONGHAK, **18**, 133(1980).
5. C. H. Lin, B. S. Fang, C. S. Wu, H. Y. Fang, T. F. Kus, and C. Y. Hu, Biotechnol, Bioeng., **18**, 1557(1976).
6. P. R. Fields, and N. K. H. Slater, Chem. Eng. Sci., **38**, 647(1980).
7. M. Y. Chisti, B. Halrard, and M. Moo-Young, Chem. Eng. Sci., **43**, 451(1988).
8. K. H. Choi, B. H. Han, W. K. Lee, HWAHAK KONGHAK, **28**, 220(1990).
9. D. Posarac, and D. Petrovic, Chem. Eng. Sci., **43**, 1161(1988).
10. J. C. Merchuk, and H. Siegel, J. Chem. Tech. Biotechnol., **41**, 105(1988).
11. G. B. Wallis, "One Dimensional Two-Phase Flow", McGraw-Hill, New-York(1969).
12. M. H. Siegel, J. C. Merchuk, K. Schugerl, AICHE J., **32**, 1585(1986).
14. O. Levenspiel, "Chemical Reaction Engineering", John Wiley, New York(1972).