

## 외부순환형 이중기포탑내의 기체체류량과 총괄부피 산소전달계수에 대한 수평연결관 길이의 영향

최근호 · 한봉희 · 이원국

한국과학기술원 화학공학과  
(1989년 10월 11일 접수, 1990년 1월 22일 채택)

### Effect of Horizontal Connection Pipe Length on Gas Holdup and Volumetric Oxygen Transfer Coefficient in External-Loop Airlift Reactor

K. H. Choi, B. H. Han and W. K. Lee

Korea Advanced Institute of Science and Technology  
(Received 11 October 1989; accepted 22 January 1990)

#### 요 약

공기-물 혼합물로 조업되는 외부순환형 이중기포탑의 행동에 대한 보다 많은 정보를 얻기 위하여 기체 체류량과 총괄부피 산소전달계수 그리고 기포의 수직길이와 속도를 연구하였다. 위의 변수들에 대한 기상 유속 (0.02-0.18 m/s)와 수평연결관 길이 (0.1-0.5 m)의 영향을 조사하였다. 외부순환형 이중기포탑의 경우, 수평연결관의 길이는 중요한 설계변수였다. 수평연결관 길이의 증가에 따라서 상승관내의 기포의 상승속도와 하강관내의 기포의 하강속도는 순환액체속도의 증가로 인하여 증가하였다. 수평연결관의 길이가 증가함에 따라서 하강관내의 기체체류량과 기포의 수직길이는 상부 연결부위의 기-액 분리능력의 증가 때문에 감소하였다. 수평연결관의 길이가 짧을 때의 외부순환형 이중기포탑내의 총괄부피 산소전달계수가 수평연결관의 길이가 길 때의 값보다 큰 것은 기체체류량이 크기 때문이다.

**Abstract**—In order to obtain information on the behavior of the external-loop airlift reactor operating with air-water mixtures, the gas holdup, overall volumetric oxygen mass transfer coefficient, vertical bubble length and bubble velocity were studied. The effects of gas velocity (0.02-0.18 m/s) and the length of horizontal connection pipe (0.1-0.5 m) with respect to the above mentioned parameters have been investigated. The results showed that the length of the horizontal connection pipe was a key design parameter for the external-loop airlift reactor. The bubble rising velocity in the riser and bubble downcoming velocity in the downcomer increased due to increase of the circulation liquid velocity as the horizontal connection pipe length was increased. The downcomer gas holdup and vertical bubble length in the downcomer decreased due to increase in gas-liquid separating abilities of upper connection section as the horizontal connection pipe length was increased. The overall volumetric oxygen transfer coefficient in the external-loop airlift reactor with a short connection length was higher than that with a long one due to higher gas holdup.

## 1. 서 론

이중기포탑 (airlift reactor)은 일반 기포탑의 내부에 흡출관(draft tube) 혹은 수직의 방해관이 설치됐거나 외부에 별도의 관(external-loop)이 설치된 형태로서, 기체가 분산되는 부분과 분산되지 않는 부분간의 기체체류량 차이로 생긴 밀도 차이와 기체 상승작용에 의해 안정된 순환흐름이 얻어지는 기-액 접촉기를 의미한다. 이 때 순환에 필요한 일은 기체가 액체 내부를 상승할 때 작용하는 부력에 의해 공급되며, 이 일이 액체를 더 높이 상승(lift)시키므로써 유체의 순환이 가능하게 된다. 기포가 분산되어 기포가 풍부한 상향흐름을 갖는 관을 상승관(riser)이라 하고 기체가 분산되지 않아 기-액 혼합액체 또는 액체만의 하향흐름을 갖는 관을 하강관(downcomer)이라 한다.

운용면에 있어서 이중기포탑과 기포탑의 중요한 차이점은 액체속도이다. 생물반응기에서는 일반적으로 긴 체류시간이 필요한데, 유체의 재순환이 없는 기포탑에서는 이 제한 때문에 한꺼번에 많은 액체의 유입이 불가능한 반면 이중기포탑은 안정된 순환류가 있으므로 더 큰 액체속도가 가능하게 되고, 이로써 유체와 벽면간의 열전달도 향상되며 액상에 일어난 거시혼합 때문에 반응기내의 유체의 성질이 보다 균일하게 되며 또한 쉽게 유동화도 가능하게 된다. 이러한 이중기포탑은 초기에는 주로 단세포 단백질(single cell protein)의 생산같은 대규모 미생물 공정이나 폐수처리에 이용됐으나, 근년에는 생물배양 특히 2차 metabolites의 생산뿐만 아니라 고체가 촉매인 삼상공정과 반응물이 슬러리(slurry)인 반응에도 이용되고 있다[1].

이중기포탑은 간단한 구조로서 적은 투자비와 조업비로 필요한 산소전달, 혼합, 분산 및 열전달을 얻을 수 있는 장점이 있으나, 먼저 개발된 기포탑에 비해서 성능에 맞는 반응기를 설계하거나 조작하는데 필요한 자료가 부족한 형편이다. Lefrancois 등[2]이 최초로 특허를 얻은 이후로 이중기포탑의 성능을 향상시키려는 연구가 여러 연구자에 의해 꾸준히 진행되어 왔는데 특히 설계변수에 관한 연구를 살펴보면, Chakravaty[3]가 흡출관의 직경과 분산장치의 구멍크기에 의한 영향을, McManamey 등[4]은 가스분사 장치의 구조에 의한 영향을, Koide 등[5]은 흡출관의 길이에 의한 영향을, Bello 등[6]은 상승관에 대한 하강관의 단면적 비율에 의한 영향을, Sigel 등[7]은 시각을 달리하여 기액분리기의 구조와 치수에 의한 영향을 제각기 알아

보았다.

하지만 외부순환형 이중기포탑(external-loop airlift reactor)의 경우에는 수평연결관(horizontal connection pipe)의 길이가 중요한 변수인데도 아직 문헌에 이에 관해 보고된 것이 없으므로, 본 연구에서는 기상유속과 수평연결관 길이의 변화가 각 부분의 기체체류량과 총괄부피 산소전달제수에 미치는 영향을 알아보았으며, 아울러 상승관과 하강관내에서의 기포의 수직 길이와 기포의 상승 또는 하강속도를 함께 조사하였다.

## 2. 실 험

본 실험에 사용된 외부순환형 이중기포탑의 개략도는 Fig.1과 같다. 장치는 크게 상승관과 하강관, 그리고 두 관의 상하를 연결하는 2개의 수평연결관으로 구성되어 있으며, 탑내부에서 일어나는 현상을 관찰할 수 있도록 모든 부분은 투명한 아크릴 원통으로 제작되었는데, 주요부분의 치수는 Table 1과 같다. 탑내의 각 부위에서의 기체체류량을 측정하기 위해 압력 탭을 상승관에 2개 ( $H=0.38, 1.08\text{m}$ ), 하강관에 2개 ( $H=0.34, 0.84\text{m}$ )를 각각 설치하였다.

본 실험에서는 기상으로 압축공기를 사용하였고, 액상으로는 수돗물을 사용하였다. 공기배관을 통해 들어온 공기는 공기 여과기를 통과하면서 공기 중의 불순물이 정제된 후 압력조절기에서  $4\text{ kg/cm}^2$ 로 조절되며, 유량제로 유량이 측정된 후 기체분산장치를 통해 상승관 안쪽으로 분산된다. 기체분산장치는 동을 재질로 하는 바닥판에 평행하게 부착되어 있는 6개의 튜브로 구성되어 있는데, 각 튜브에 수개의 1mm 크기의 구멍을 뚫어서 전체 30개 구멍은 한 변이 21mm인 삼각형 배열을 이루게 제작하여 사용하였다[8]. 실험은 반회분식으로 액상인 수돗물로 탑내를 채운 후 공기를 일정한 유속으로 계속 유입시키면서 기체체류량과 기포특성치 그리고 산소전달제수를 측정하였다. 모든 실험은 액상의 온도를  $15^\circ\text{C}$ 로 유지하면서 대기압하에서 실시하였다.

### 2-1. 기체체류량

이중기포탑내의 총괄기체체류량은 기상의 우입밸브를 잠근 후 측정된 액면의 높이와 기체가 분사될 때의 액면높이로부터 구하였다. 상승관과 하강관내의 기체체류량은 각 부위의 상하에 설치한 두 개의 압력 탭에 연결된 수주마노미터의 압력차를 두 개의 압력 탭간의 거리로 나눈 값으로 구하였다.

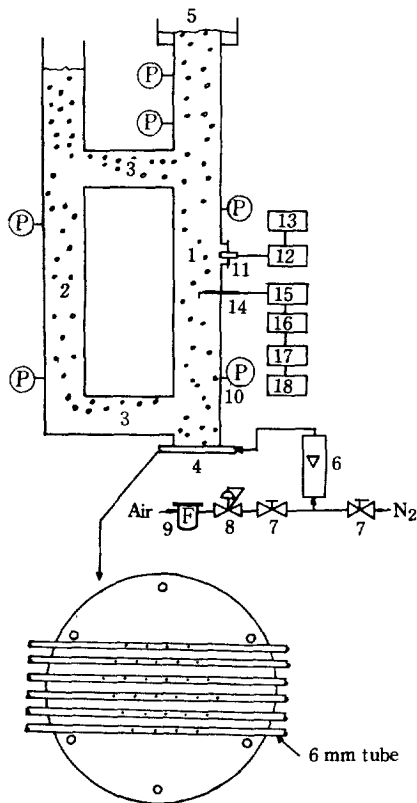


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

- |                               |                               |
|-------------------------------|-------------------------------|
| 1. riser                      | 2. downcomer                  |
| 3. horizontal connection pipe | 4. sparger                    |
| 5. weir box                   | 6. rotameter                  |
| 7. valve                      | 8. pressure regulator         |
| 9. air filter                 | 10. pressure tap              |
| 11. D.O. probe                | 12. D.O. meter                |
| 13. Data 6000                 | 14. electro-resistivity probe |
| 15. comparator circuit        | 16. oscilloscope              |
| 17. A/D converter             | 18. computer                  |

## 2-2. 기포의 특성

기포의 특성은 기-액계에서 일반적으로 많이 이용되어온 저항탐침법으로 구했다. 본 실험에 사용된 저항탐침과 이로부터 얻은 전형적인 신호의 형태는 Fig. 2와 같다. 저항탐침은 상승관의  $H=0.80\text{m}$  지점과 하강관의  $H=0.72\text{m}$  지점의 중심에 탐침의 끝이 흐름방향과 같게 설치되었다. 저항탐침에서 얻은 신호는 측정저항 회로를 통과하면서 액상에 있으면  $2.5\text{V}$ 의 전압을 갖고 기상속에 있으면  $0\text{V}$ 의 낮은 전압을 갖도록 조정되었으며, 이를 오실로스코프로 확인하였다. 이 신호는 다시 A/D 변환기(Analog Design Laboratory Co.,

Table 1. Dimensions of the experimental apparatus

Riser height	1.770 m
Riser I.D.	0.148 m
Downcomer I.D.	0.108 m
Connection pipe I.D.	0.108 m
Downcomer length	1.100 m
Length of connection pipe	0.10-0.50 m

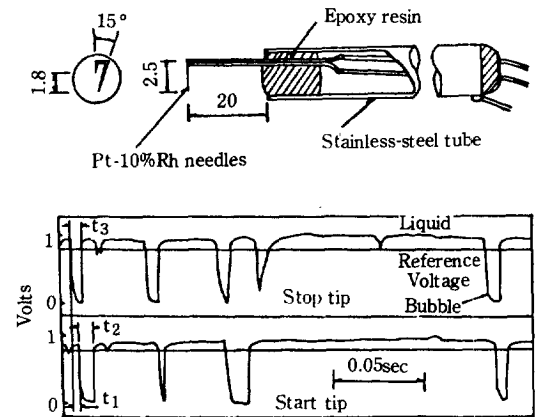


Fig. 2. Details of electro-resistivity probe and typical probe signals.

ADL-1000 M)를 통과하면서, 상승관 측정시  $200\mu\text{sec}$ , 하강관 측정시  $400\mu\text{sec}$ 에 한번씩 숫자화되어 모두 24만개가 받아들여졌으며, 컴퓨터를 사용하여 기포의 수직길이와 속도를 계산하였다[9]. 기포는 앞선 기포의 웨이크의 영향으로 속도가 3-4배 가속될 수 있기 때문에 기포속도의 상한선을  $2.5\text{m/s}$ 로 잡았으며, 탐침의 끝을 수직으로 통과하지 않은 기포를 제외시키기 위해 각 탐침을 통과하는데 걸린 시간의 비율이 10%를 초과하는 신호는 계산에 포함하지 않았다.

## 2-3. 산소전달계수

산소전달계수는 물리흡수방법(physical absorption method)를 이용하여 구했다. 먼저 질소를 사용하여 수돗물속의 용존산소농도를  $0.3\text{ppm}$ 까지 떨어뜨린 후 공기를 일정속도로 공급하면서 시간에 따른 용존산소의 농도의 변화를 상승관의 내부에 설치된 용존산소전극(Yellow Spring Inst. model 5739)과 용존산소계(Yellow Spring Inst. model 58)로 연속적으로 측정하고, 그 신호를 동시에 Data 6000(Division of Analogic Co., model 611)를 통해 저장한 후 분석하였다.

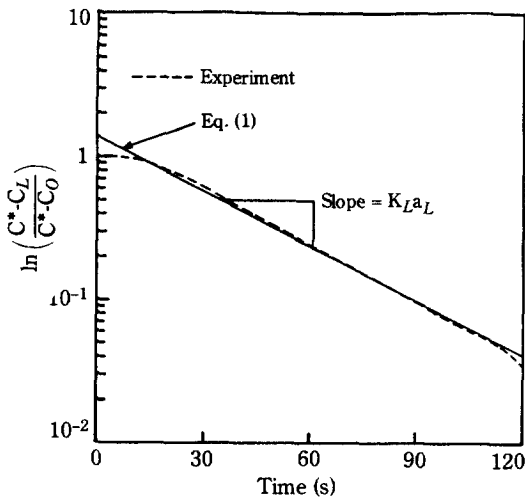


Fig. 3. Graphical procedure for finding volumetric overall mass transfer coefficient at  $U_G = 0.05$  m/s,  $L_C = 0.2$  m.

Chisti와 Moo-Young[10]은 기상의 조성은 일정하며 액상에 대해서는 완전혼합이라는 가정하에 용존산소전극의 응답이 1차 지연되는 것으로 하여 (1)식을 유도하였다. 여기서 앞의 가정은 용해도가 낮은 산소인 경우 합당하며, 뒤의 가정은 반응기내의 수개의 위치에서 동시에 용액을 채취하여 용존산소농도를 측정해 본 결과 거의 차이가 없었기 때문에 타당한 것으로 확인되었다.

$$\frac{C^* - C_L}{C^* - C_0} = \frac{\exp(-K_L a_L t)}{1 - K_L a_L S} \quad (1)$$

본 연구에서는 위 식을 Powell regression 방법으로 실험적으로 구한 시간에 따른 용존산소농도 곡선에 맞추므로써 (Fig. 3) 산소전달제수를 구하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3-1. 기체체류량

기체체류량은 계면적을 결정하는 평균 기포크기와 관련이 있기 때문에 기-액간의 물질전달에 있어서 중요한 역할을 하는 수력학적 특성 중의 하나다. 한편 기체체류량은 이중기포탑의 각 부분에서 각기 다른 분포를 갖게 되며 이로 인해 액체순환속도와 혼합시간에 큰 영향을 미치게 된다.

기상유속이 0.02m/s에서 0.18m/s로 증가할 때 상승관내의 기체체류량의 변화를 수평연결관의 길이에 따라서 도시하면 Fig. 4와 같다. 기존의 연구와 마찬가지로

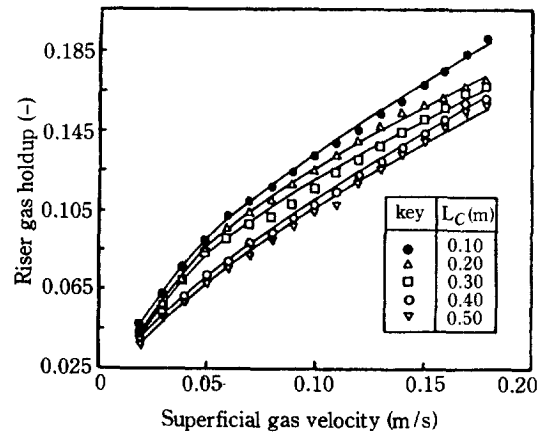


Fig. 4. Effect of gas velocity on riser gas holdup as a function of connection pipe length.

로 기상유속의 증가에 따라 상승관내의 기체체류량이 증가했다. 또한 수평연결관의 길이에 관계없이 공통적으로 0.06m/s 부근까지 상승관내의 기체체류량은 급격히 증가하다가 그 이상에서는 증가율이 감소함을 보였다. 기상유속이 0.06m/s 이하에서는 상승관내의 흐름 형태는 기포합체가 거의 일어나지 않는 bubbly flow 이므로 기상유속의 증가에 따른 기체체류량의 증가가 크지만, 그 이상의 기상유속에서는 기포합체가 일어나면서 흐름형태가 churn turbulent로 바뀌기 때문에 기상유속의 증가에 따른 기체체류량의 증가율이 다소 감소하는 것으로 생각된다[10]. 한편 상승관의 기체체류량은 수평연결관 길이의 증가에 따라서는 감소하였는데, 이는 상부 수평연결관에서의 기포분리의 증가로 순환 액체속도가 증가하므로써 상승관내에서 기포체류시간이 감소했기 때문이다[9]. Chisti 등[11]은 상승관에 대한 하강관의 단면적비의 증가로 인해 순환액체속도가 증가할 때 상승관내의 기체체류량이 감소함을 보고한 바 있다.

Fig. 5는 기상유속에 따른 하강관내의 기체체류량 변화를 도시한 것인데, 기체유속의 증가에 따라 하강관내의 기체체류량은 수평연결관의 길이에는 상관없이 모두 증가하였는데, 이는 기상유속이 증가함에 따라 순환액체유속이 증가하여서[9] 하강관으로의 기포유입이 증가했기 때문으로 설명할 수 있다. 수평연결관의 길이가 증가함에 따라서 하강관내의 기체체류량은 감소하였는데, 이는 수평연결관의 길이가 증가함에 따라 순환액체속도는 증가하지만 상부 수평연결관에서의 기포분리보다 효과적으로 이루어져서 순환 기상유량이 감소하기

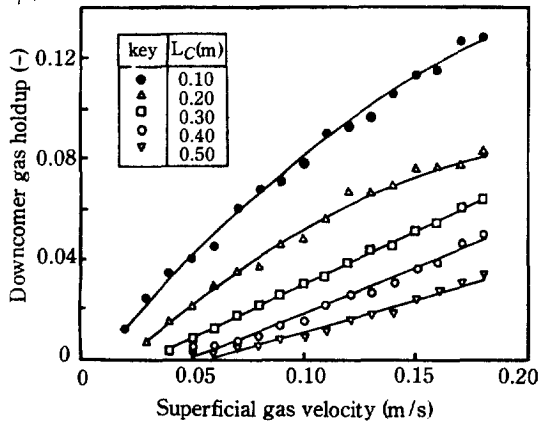


Fig. 5. Effect of gas velocity on downcomer gas holdup as a function of connection pipe length.

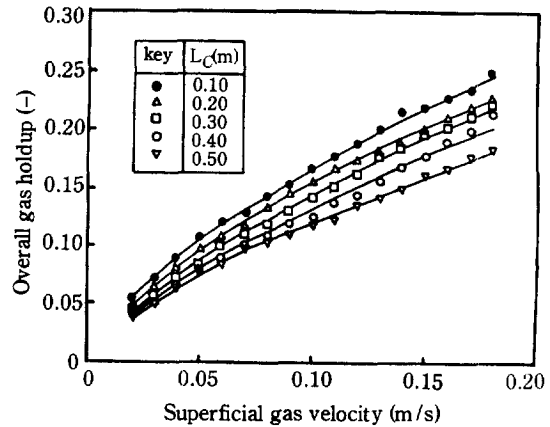


Fig. 6. Effect of gas velocity on overall gas holdup as a function of connection pipe length.

때문이다.

그리고 수평연결관의 길이가 비교적 짧은  $L_c=0.1-0.2$  m 일 때는 낮은 기상유속에서 상대적으로 기포밀도가 큰 반면 순환액체속도가 느려서 기포함체로 생긴 큰 기포들이 하강관의 상부로 재상승하는 경우가 많다가 기상속도가 증가하면 이러한 기포들의 수가 줄어들기 때문에 하강관내의 기체체류량 증가율의 변화가  $0.12$  m/s 부근에서 약간 일어났으나, 수평연결관의 길이가 더욱 길어지면 상대적으로 기포밀도가 작아지고 순환액체속도도 빨라져서 이러한 기포들이 거의 없기 때문에 기상속도에 따른 하강관내의 기체체류량 증가율에서의 변화는 뚜렷하지 않은 것으로 생각된다. 한편 본 연구에서도 하강관에서의 기포밀도가 상승관보다 낮기 때문에 상승관이 churn turbulent 영역에 있을 때도 하강관은 bubbly flow 영역에 있는 것을 관찰할 수 있었다[15].

Fig. 6은 총괄기체체류량의 변화를 같은 실험조건과 범위에 대하여 나타낸 것이다. 기체유속의 증가에 따라서는 수평연결관의 길이에 관계없이 총괄기체체류량은 모두 증가추세를 보였으며, 수평연결관의 길이가 증가함에 따라서는 감소하였는데, 이는 각 부분에서의 기체체류량의 변화와 일치하는 경향이다. 한편 Bello 등 [6]과 Chisti 등[12]은 상승관에 대한 하강관의 단면적비의 변화에 관계없이 하강관과 상승관의 기체체류량 사이에 선형관계가 존재한다고 발표했으나, 본 실험에 의하면 수평연결관 길이의 영향으로 선형관계가 얻어지지 않았다.

본 실험에서 구한 상승관과 하강관내의 기체체류량 그리고 총괄기체체류량에 대한 실험식을 기상속도와

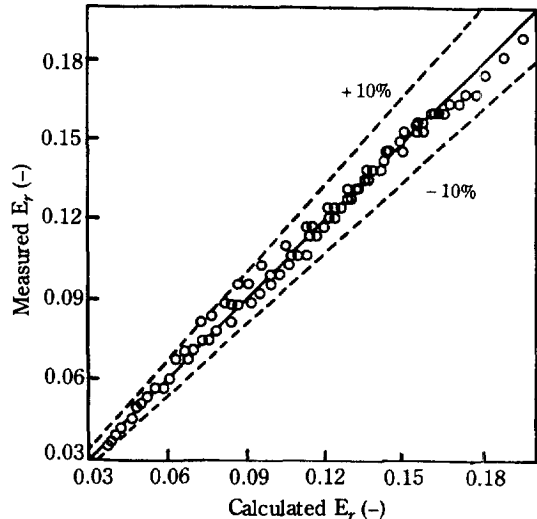


Fig. 7. Comparison of riser gas holdups calculated by Eq. (2) with the experimental data.

수평연결관의 길이를 변수로 하여 구하였더니 각각 식 (1), 식 (2), 식 (3)과 같았다. Fig. 7-9에 실험값과 각 식으로부터 구한 계산치를 비교하여 보았다.

$$E_r = 0.43 U_c^{0.88} (L_c/L_{co})^{-0.15} \quad (2)$$

(S. D. = 0.004, R. C. = 0.996)

$$E_d = 0.09 U_c^{1.01} (L_c/L_{co})^{-0.92} \quad (3)$$

(S. D. = 0.007, R. C. = 0.981)

$$E_t = 0.66 U_c^{0.73} (L_c/L_{co})^{-0.19} \quad (4)$$

(S. D. = 0.005, R. C. = 0.995)

### 3-2. 기포의 수직길이 및 속도

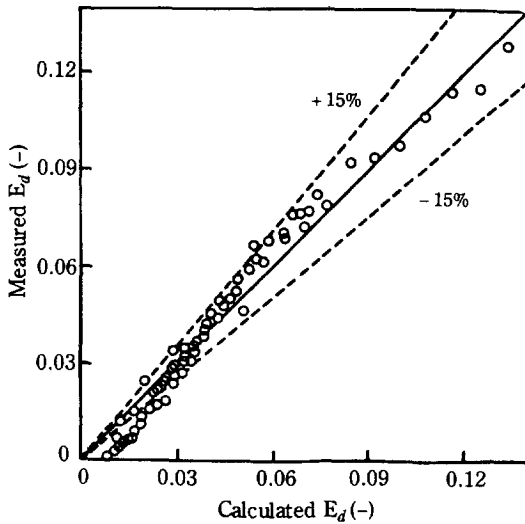


Fig. 8. Comparison of downcomer gas holdups calculated by Eq. (3) with the experimental data.

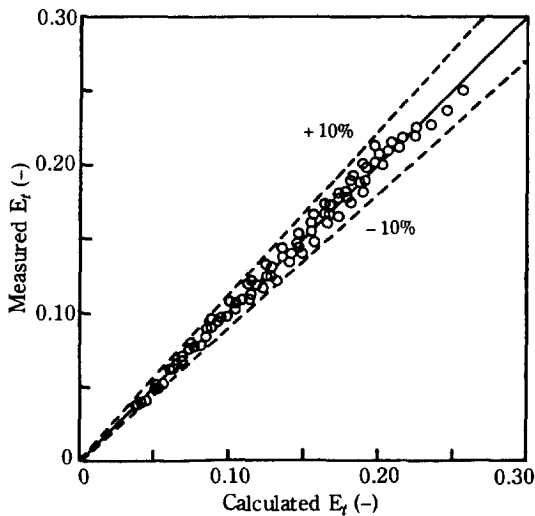


Fig. 9. Comparison of overall gas holdups calculated by Eq. (4) with the experimental data.

기포의 크기와 상승속도 등의 기포특성은 이중기포탑의 성능을 좌우하는 혼합 및 물질전달 등에 직접 관계되는 것으로서 많은 사람의 연구대상이 되어왔다[13, 14]. Fig. 10은 상승관에서 기상속도 증가에 따른 기포의 수직길이 변화를 수평연결관의 길이 변화와 함께 나타낸 것이다. 기상속도 증가에 따라 수평연결관의 길이에 관계없이 기포 수직길이가 모두 증가함을 보이는데,

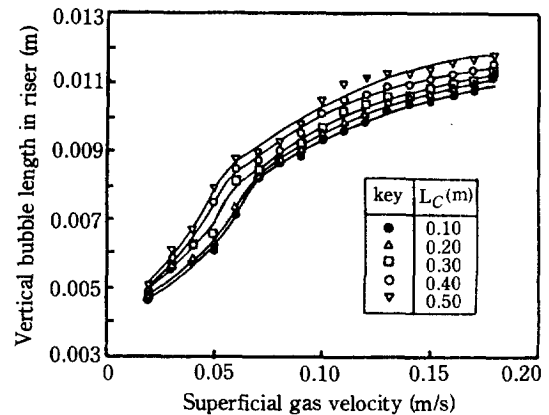


Fig. 10. Effect of gas velocity on vertical bubble length as a function of connection pipe length in riser.

이는 기상유속이 증가할수록 공기분산장치의 오리피스에서 생성되는 초기 기포의 크기가 증가할 뿐만 아니라 단위부피당의 기포수의 증가에 따라 기포합체가 점점 커지기 때문이다[13]. 특히 기상속도가 낮을 때는 기포 수직길이의 증가율이 크지 않았는데, 이는 bubbly flow 영역에서는 기상유속 증가가 기포합체에 영향이 적기 때문이다. 그러나 0.06 m/s 부근에서 기포크기의 급격한 상승이 나타났는데, 이는 이 부근에서 churn turbulent로 바뀌면서 격렬한 기포합체가 일어났기 때문이다. 하지만 이 부근을 지나면서 기상유속 증가에 따른 기포크기의 증가는 완화되었는데, 이는 기포크기가 어느 정도 커지면 오히려 액상의 난류에 의해 다시 분쇄되기 쉬우므로 기상유속이 더 커지면 기포합체 뿐만 아니라 기포분쇄 또한 커지기 때문이라고 생각된다.

본 실험의 경우 공기분산장치가 상승관의 바닥에 설치되었기 때문에 하부 수평연결관이 연결된 상승관의 하부에서는 항상 기포흐름의 channeling 현상[15]이 관찰되었는데, 수평연결관의 길이가 증가할수록 channeling 현상이 액체순환속도의 증가로 더욱 심해져서 이 부분에서의 기포합체가 증가하기 때문에 수평연결관의 길이의 증가에 따라 상승관내의 기포의 수직길이는 증가하였다.

Fig. 11은 하강관에서 기상유속 증가에 따른 기포의 수직길이 변화를 수평연결관의 길이에 대하여 나타낸 것이다. 기상속도 증가에 따라 수평연결관의 길이에 관계없이 기포의 수직길이가 모두 증가하는 것은 순환류 속도의 증가로 인해 더 큰 기포가 하강관으로 비말동반되기 때문이다.

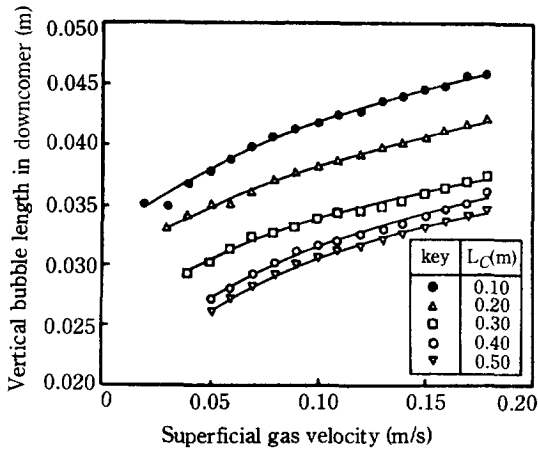


Fig. 11. Effect of gas velocity on vertical bubble length as a function of connection pipe length in downcomer.

한편 수평연결관의 길이가 증가하면 순환액체유속이 증가하는데도 하강관내에 존재하는 기포의 수직길이가 감소하는 것은 수평연결관의 길이가 증가함에 따라 상부 연결관내에서의 기포의 체류시간의 증가로 이 부분에서의 기포가 보다 효과적으로 분리되기 때문이다. 수평연결관의 길이가 0.3m 이상에서는 수평연결관 길이의 증가에 대한 하강관내의 기포의 수직길이의 감소되는 폭이 줄어들었는데, 이는 수평연결관의 길이가 0.3m 이상에서는 수평연결관 길이의 증가에 따르는 기포 분리효율이 점차 감소함을 의미한다. 또한 하강관에서의 기포는 전 영역에 걸쳐 상승관내의 기포보다 적은데, 이는 모든 형태의 이중기포탐에서 일반적인 현상으로 상승관으로 상승한 기포 중 큰 기포는 탐부분과 수평관에서 분리되고 종말속도가 순환액체속도보다 작은 기포들만이 하강관으로 비말동반되기 때문이다.

기포의 상승속도는 기포의 크기와 순환류 속도에 직접 연관성이 있고, 기체가 반응기내에 체류하는 시간을 좌우하므로써 기체체류량과 밀접한 관계에 있다. 또한 기체체류량이 증가하면 앞선 기포의 행로를 따름으로 인한 저항력 감소와 기포합체 증가로 인해 단일기포보다 빠른 상승속도를 갖는 것으로 알려져 있다. 그리고 같은 수직길이를 갖는 기포라도 그것들이 처한 상황에 따라 각각 다른 상승속도를 가질 수 있다.

Fig. 12는 상승관에서 기포의 상승속도를 기상속도가 0.02 m/s에서 0.18 m/s로 변할 때 수평연결관의 길이에 따라 도시한 것이다. 기상속도 증가에 따라 상승관내의 기포의 상승속도는 수평연결관의 길이에 관계없이 모두 증가함을 보여주고 있다. 이는 기상유속이 증가함

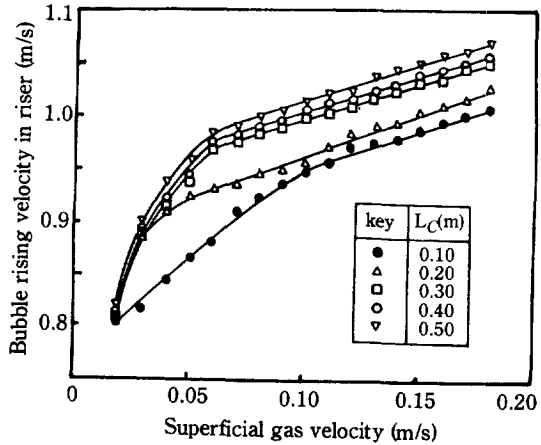


Fig. 12. Effect of gas velocity on bubble rising velocity as a function of connection pipe length in riser.

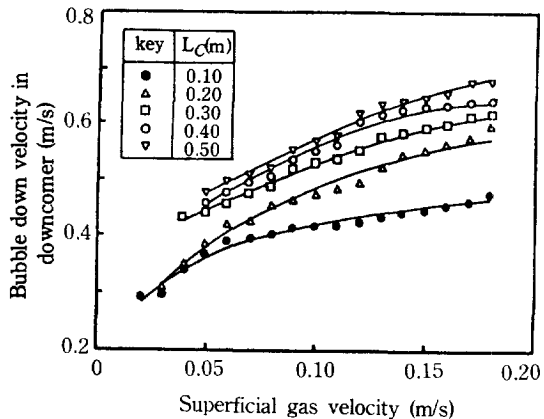


Fig. 13. Effect of gas velocity on bubble down velocity as a function of connection pipe length in downcomer.

에 따라 순환액체유속과 상승관내의 기포의 수직길이가 함께 증가하기 때문이다. 한편 수평연결관의 길이 증가에 따라서도 상승관내의 기포의 상승속도가 증가하고 있는데 이것 역시 기포 수직길이와 액체순환속도 모두가 수평연결관의 길이가 증가할수록 증가하기 때문이다.

Fig. 13은 하강관에서 유체의 흐름과 같은 방향인 기포의 하강속도를 동일 실험범위와 조건에서 얻어내어 도시한 것이다. 수평연결관의 길이에 관계없이 기상유속이 증가함에 따라 하강관내의 기포의 하강속도는 모두 증가함을 보여주고 있다. 하강관내의 기포의 하강속도 역시 순환액체유속과 하강관내의 기포의 크기에 좌우되는데, 여기에 나타난 결과를 살펴보면 기포수직길

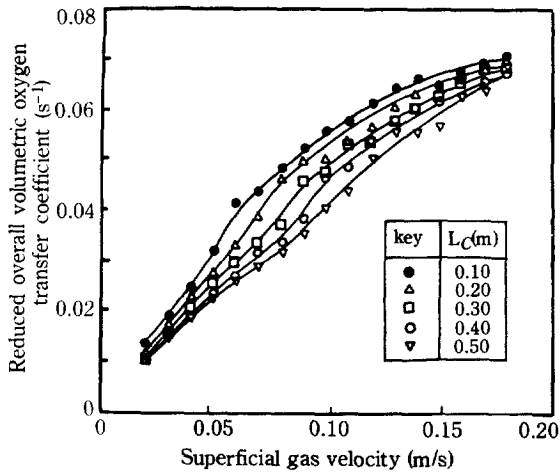


Fig. 14. Effect of gas velocity on reduced overall oxygen transfer coefficient as a function of connection pipe length.

이가 작고 순환액체속도가 클 때 기포가 빠르게 이동됨을 알 수 있다. 이는 기포 수직길이가 작으면 부력이 적게 작용되어 액체에 작용하는 항력이 감소되므로써 순환액체의 흐름에 쉽게 동반되기 때문이다. 한편, 수평연결관의 길이에 따른 하강관내의 기포의 하강속도는 수평연결관 길이의 증가에 따라 증가현상을 보였다. 이 역시 기포의 수직길이가 순환액체의 속도에 의한 영향으로 수평관의 길이가 증가할수록 하강관내에 존재하는 기포의 수직길이는 작아지는 한편 순환액체속도는 더욱 증가하기 때문이다.

### 3-3. 산소전달계수

Fig. 14는 기상속도가 0.02 m/s에서 0.18 m/s로 변할 때 수평연결관의 길이에 따라 환산 총괄부피 산소전달계수( $K_La$ )의 변화를 나타낸 것이다. 여기서 환산 총괄부피 산소전달계수는 수평연결관의 길이가 0.5m인 반응기의 체적을 기준으로 구하였다. 기상유속의 증가에 따라 환산 총괄부피 산소전달계수 값이 증가함을 보였다. 그런데 기상속도에 따른 환산 총괄부피 산소전달계수의 증가율에도 변화가 나타났다. 이 변화도 역시 bubbly flow에서 다른 흐름영역으로 전이가 일어남을 나타내는 것으로 판단된다. Bubbly flow에서 기체유속의 증가는 기체체류량의 증가에 직접 기여하면서 유효 기액 접촉면적을 증가시키므로써 물질전달을 증가시키는 반면에 churn turbulent 지역에서는 기체유속의 증가가 기포함체에도 작용하므로써 기체체류량과 유효 기액 접촉면적의 증가율이 감소되는 것으로 생각된다.

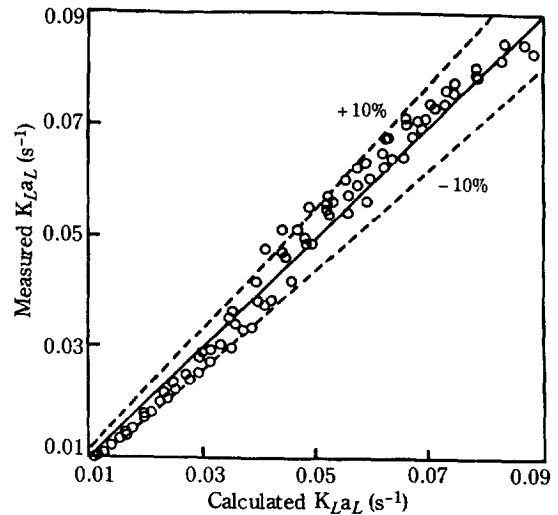


Fig. 15. Comparison of overall volumetric oxygen transfer coefficients calculated by Eq. (5) with the experimental data.

Andrew[16]는 단위체적 물질전달계수가 기체체류량과 밀접한 관계가 있다고 제안을 했는데 이를 McManamy와 Wase[17]가 확인을 하였다. 한편 기포탑에 유입되는 에너지는 기상과 액상의 흐름에 의한 것이며 벽면마찰, 기액의 접촉 그리고 기포 후면의 웨이크에 의하여 소멸된다. 이 에너지 소멸속도에 의해서 기포탑내의 기액 물질전달이 큰 영향을 받는다. Lamont와 Scott[18]의 eddy cell 모델에 의하면 기액계면의 물질전달은 작은 eddy에 의하여 지배된다고 하였다. 따라서 에너지 소멸이 증가하면 작은 eddy가 많이 형성되어 액상 물질전달계수가 증가한다. Jin[19]에 의하면 기상유속이 증가함에 따라 에너지 소멸속도가 증가하였다. 따라서 기상유속의 증가에 따른 산소전달계수의 증가는 기체체류량의 증가에 의한 유효계면적의 증가와 작은 크기의 eddy 형성이 증가함에 따른 액상 물질전달계수의 증가로 볼 수 있다. 수평연결관의 길이 증가에 따른 변화를 보면 물질전달기능이 떨어지는 하부 연결관의 체적이 증가할 뿐만 아니라 상승관내의 기체체류량의 감소에 따라 환산 총괄부피 산소전달계수는 감소되는 현상을 보이고 있다. 본 실험에서 구한 총괄부피 산소전달계수에 대한 실험식을 기상속도와 수평연결관의 길이를 변수로 하여 구하였더니 식 (5)와 같았다. Fig. 15에 실험으로부터 구한 총괄부피 물질전달계수와 식 (5)로 구한 값을 비교하여 보았다.

$$K_La_L = 0.24 U_G^{0.84} (L_c/L_{c0})^{-0.24} \quad (5)$$

(S. D. = 0.003, R. C. = 0.989)



## 4. 결 론

1. 수평연결관의 길이는 외부순환형 이중기포탑의 경우 중요한 설계인자임을 확인했다. 즉, 외부순환형 이중기포탑내의 기체체류량과 총괄부피 산소전달계수 그리고 기포특성은 기상유속 뿐만 아니라 수평연결관의 길이에 크게 의존하였다.

2. 외부순환형 이중기포탑의 경우, 수평연결관의 길이에 관계없이 상승관과 하강관내의 기체체류량과 기포의 수직길이와 속도 그리고 총괄부피 산소전달계수는 기상유속의 증가에 따라 증가하였다.

3. 수평연결관의 길이가 증가함에 따라 상부 연결부 위에서의 기포분리가 향상되므로 하강관내의 기체체류량과 기포 수직길이는 감소하였으나, 이에 따라 상승관과 하강관내의 유체간의 밀도차가 커져서 순환액체유속이 증가하기 때문에 상승관내의 기체체류량은 감소하나 상승관내에서의 기포 상승속도와 하강관내에서의 기포의 하강속도는 증가하였다. 한편, 상승관내의 기포수직 길이는 상승관의 하부에서 일어나는 기포합체의 증가로 수평연결관의 길이가 증가할수록 증가하였다.

4. 수평연결관의 길이가 증가함에 따라 상승관과 하강관내의 기체체류량이 모두 감소하기 때문에 총괄부피 산소전달계수는 긴 수평연결관보다는 짧은 수평연결관일 때 더 큰 값이 얻어졌다.

5. 기상속도와 수평연결관의 길이를 변수로 하여 외부순환형 이중기포탑의 설계에 유용하게 사용할 수 있는 총괄기체체류량, 상승관과 하강관내의 기체체류량 그리고 총괄부피 산소전달계수에 대한 실험식을 제시하였다.

## NOMENCLATURE

- $C_o$  : initial concentration of oxygen in liquid [kgmol/m<sup>3</sup>]  
 $C_L$  : liquid phase oxygen concentration [kgmol/m<sup>3</sup>]  
 $C^*$  : liquid phase oxygen concentration in equilibrium with gas phase oxygen [kgmol/m<sup>3</sup>]  
 $E$  : gas holdup [-]  
 $H$  : height from gas sparger [m]  
 $K_{LaD}$  : overall volumetric mass transfer coefficient based on dispersion liquid volume [s<sup>-1</sup>]  
 $K_{LaL}$  : overall volumetric mass transfer coefficient based on liquid volume [s<sup>-1</sup>]  
 $KLA$  : reduced mass transfer coefficient, ( $= K_{LaD} V/$

- $V_o$ ) [s<sup>-1</sup>]  
 $L_c$  : length of horizontal connection between riser and downcomer [m]  
 $R.C.$  : regression coefficient [-]  
 $S$  : electrode time lag [s]  
 $S.D.$  : standard deviation [-]  
 $t$  : time [s]  
 $U_G$  : superficial gas velocity based on the riser cross sectional area [m/s]  
 $V$  : liquid volume in reactor [m<sup>3</sup>]

## Subscripts

- $d$  : downcomer  
 $o$  : for  $L_c = 0.5$  m  
 $r$  : riser  
 $t$  : overall

## REFERENCES

- Merchuk, J.C. and Siegel, H.: *J. Chem. Tech. Biotechnol.*, **41**, 105 (1988).
- Lefrancois, L., Mariller, C.G. and Mejane, J.V.: Brevet D'Invention, France, No. 1,102,200, Delivree le 4 Mai, 1955.
- Charkravarty, M., Begum, S., Singh, H.D., Baruah, J.N. and Iyengar, M.S.: *Biotechnol. Bioeng. Symp.*, **4**, 363 (1973).
- McManamey, W.J., Wase, D.A.J., Raymahasay, S. and Thaynithy, K.: *J. Chem. Tech. Biotechnol.*, **34B**, 151 (1984).
- Koide, K., Sato, H. and Iwamoto, S.: *J. Chem. Eng. Japan*, **16**, 407 (1983).
- Bello, R.A., Robinson, C.W. and Moo-Young, M.: *Biotechnol. Bioeng.*, **27**, 369 (1985).
- Siegel, M.H., Merchuk, J.C. and Schugerl, K.: *AIChE J.*, **32**, 1585 (1986).
- Choi, K.H.: M.S. Dissertation, KAIST, Seoul, Korea (1986).
- Han, B.H.: M.S. Dissertation, KAIST, Seoul, Korea (1989).
- Chisti, M.Y. and Moo-Young, M.: *Biotechnol. Bioeng.*, **31**, 487 (1988).
- Chisti, M.Y., Halard, B. and Moo-Young, M.: *Chem. Eng. Sci.*, **43**, 451 (1988).
- Chisti, M.Y., Fujimoto, K. and Moo-Young, M.: "Hydrodynamic and Oxygen Mass Transfer Studies in Bubble Columns and Airlift Bioreactors", Paper presented at the AIChE Meeting, Miami, Nov., (1986).
- Choi, K.H., Kim, J.W. and Lee, W.K.: *Korean J. Chem. Eng.*, **3**, 127 (1986).

14. Glasgow, L.A., Erickson, L.E., Lee, C.H. and Patel, S.A.: *Chem. Eng. Commun.*, **29**, 311 (1984).
15. Chisti, M.Y. and Moo-Young, M.: *Chem. Eng. Commun.*, **60**, 195 (1987).
16. Andrew, S.P.S.: *Trans. Inst. Chem. Eng.*, **60**, 3 (1982).
17. McManamey, W.J. and Wase, D.A.J.: *Biotechnol. Bioeng.*, **27**, 1446 (1986).
18. Lamont, J.C. and Scott, D.S.: *AIChE J.*, **16**, 513 (1970).
19. Jin, G.T.: Ph.D. Dissertation, KAIST, Seoul, Korea (1985).