

## 경사단면 기포탑에서 기체 체류량 및 기포 특성

연주민 · 조용준 · 강 용<sup>†</sup> · 김상돈\*

충남대학교 화학공학과

\*한국과학기술원 화학공학과

(2000년 5월 17일 접수, 2000년 9월 22일 채택)

## Gas Holdup and Bubble Characteristics in Tapered Bubble Columns

Ju Min Youn, Yong Jun Cho, Yong Kang<sup>†</sup> and Sang Done Kim\*

Department of Chemical Engineering, Chungnam National University, Taejeon 305-764, Korea

\*Department of Chemical Engineering, KAIST, Taejeon 305-701, Korea

(Received 17 May 2000; accepted 22 September 2000)

### 요 약

경사단면 기포탑에서 축방향 및 반경방향의 기체 체류량 분포와 기포의 특성에 대해 고찰하였다. 기포 특성은 전기저항 탐침법을 이용하여 측정하였으며, 조작변수로는 기체와 액체 유량을 선정하였다. 경사단면 구조는 수직과 6°의 경사각을 이루고 있으며, 높이는 0.5 m인데, 탑 하부의 직경은 0.05 m이고 탑 상부의 직경은 0.15 m로 직경이 점점 증가되는 형태로 되어 있다. 기상과 액상으로는 건조된 압축 공기와 상온의 물을 각각 사용하였다. 실험결과, 기체 유량의 증가에 따라 전 영역에서 국부 기체 체류량이 증가했으며, 액체 유량의 증가에 대해서는 거의 영향이 없거나 아주 미세하게 감소했다. 반경방향으로의 기체 체류량 분포는 탑의 중앙에서 최대값을 가지면서 벽면으로 갈수록 선형적으로 감소했으며, 축방향 높이의 증가에 따라서는 평균 기체 체류량은 감소하였으나 국부 기체 체류량은 반경방향으로 점점 균일해지는 분포를 나타냈다. 경사단면 기포탑에서 기포의 크기와 상승속도는 기체유량과 탑의 높이에 따라 증가했으며, 기체의 체류량, 기포의 크기 및 상승속도는 실험변수들의 상관식으로 나타낼 수 있었다.

**Abstract** – Radial and axial distributions of gas holdup and bubble characteristics have been investigated in a tapered bubble column. Bubble characteristics have been measured by using dual electrical resistivity probe method, with the variations of operating variables such as gas and liquid flow rates. Experiments have been conducted with a conical-shaped column of 0.5 m in height, with an apex angle of 12°. The column size has been 0.05 m I.D. and 0.15 m I.D. at the bottom and top, respectively. Compressed air and tap water have been used as a dispersed gas and a continuous liquid phase, respectively. It has been found that the gas holdup has increased with increasing gas flow rate at all test sections, and slightly decreased with increasing liquid flow rate. The radial gas holdup distribution has been found to have maximum value at the centerline of the column and it has decreased as approaching the wall region. The local gas holdup has been more uniform with increasing the height from the distributor. The bubble size and rising velocity have increased with increasing gas flow rate and height in the column, which have been well correlated in terms of operating variables.

**Key words:** Gas Holdup, Bubble, Tapered Bubble Column, Correlation

### 1. 서 론

기포탑의 공업적 응용 범위가 확대됨에 따라 그 구조 및 형태가 변형된 기포탑에 대한 연구들이 최근 다양하게 연구되어지고 있다. 입구 부분이 원뿔형 형태의 구조를 갖는 기포탑에서는 이 입구부에서 작은 기포들이 형성됨으로서 같은 기체 유량에서 기체 체류량이 일반 기포탑보다 큰 값을 갖는다는 사실들이 보고되고 있으며[1, 2], 단일 nozzle를 사용한 기체의 주입은 기포탑에서의 액체순환을 증가시키게 하는 반경방향으로의 체류량 분포를 야기시켜 액체 혼합조건들을 개선시킨다

는 것으로 보고되고 있다[3, 4]. Reese와 Fan[5]은 기포탑의 입구영역이 원뿔형 구조를 갖는 기포탑에서 기체 체류량, 전이영역, 기포거동 등의 특성이 원통형 기포탑과 다르며, 낮은 기체유속에서 기상과 액상의 혼합이 우수하다고 하였다. 그러나, 이들의 연구들은 기포탑의 주영역이 모두 기존의 원통형과 같아서 연속상인 액체의 유속을 기포탑 내부에서 변화시키는 것이 불가능하여 왔다. 따라서 기포탑이 생물반응기나 미세분체합성 반응기 등에 효과적으로 응용되기 위해서는 기포탑의 상승부에서 액체의 유속을 입구부에 비해 현저히 감소시킬 수 있을 뿐만 아니라, 액체가 탑 내부에서 체순환이 가능한 기능을 갖는 기포탑이 절실히 요청되어 왔다. 이와같은 새로운 기능을 갖는 기포탑의 한 형태로 경사단면을 갖는 기포탑을 생각할 수 있는데, 경사단면 ex-

<sup>†</sup>E-mail: kangyong@hanbat.chungnam.ac.kr

ternal-loop airlift 기포탐의 연구결과 혼합효과가 우수하고 탐의 상부에서 액체유속의 현저한 감소가 있었으며[6, 7], 경사단면 유동층에서도 경사진 형태의 층을 형성함으로써 입도와 종류가 다른 고체들을 효과적으로 처리할 수 있어 유동층 공정의 응용에 많은 도움이 될 것으로 예상된다[8].

그러나, 경사단면을 갖는 기포탐에 대한 연구는 국내·외를 막론하고 매우 미흡한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 경사단면을 갖는 기포탐의 수력학적 특성을 해석하기 위해 축방향 및 반경방향에 대한 기체 체류량 분포와 기포 특성을 고찰하였다. 기체 체류량 및 기포 특성은 기포탐에서의 수력학적 특성을 나타내는 가장 중요한 변수로서 기-액 접촉반응기의 설계나 조작에 있어 아주 중요한 변수로 작용하기 때문에[9, 10] 본 연구의 결과는 경사단면 기포탐 반응기의 설계나 운전에 필요한 공학적인 자료를 제공할 수 있을 것으로 사료된다.

## 2. 실험

본 연구에서 사용한 실험장치의 개략도는 Fig. 1에 나타난 바와 같다. 경사단면 기포탐은 수직과 6°의 경사각을 가진 원뿔형 구조를 이루고 있으며, 탐의 높이는 0.5 m이고 직경이 0.05 m(탐 하부)에서 0.15 m(탐 상부)로 증가된 형태로 되어 있다. 기상(gas phase)은 진조된 압축 공기를 사용하였고 액상(liquid phase)으로는 상온의 물을 사용하였으며, 기상과 액상이 효과적으로 잘 분산되도록 perforated plate 형태의 분산판(distributor)을 탐 아래에 설치하여 기상과 액상이 동일면에서 탐내로 주입되도록 하였다. 분산판에서 연속상은 직경 3 mm의 구멍을 삼각피치로 균일하게 배치된 분배기에서 주입되고, 그 사이에 직경 1 mm의 오리피스를 만들어 분산상이 기포탐 내로 주입되도록 설계되었다. 실험 범위는 기체의 유량이 20-466 cm<sup>3</sup>/s이고 액체의 유량은 20-360 cm<sup>3</sup>/s이었다.

경사단면 기포탐에서 기체 체류량, 기포크기 및 상승속도는 전기저항

탐침법(dual electrical resistivity probe method)에 의해서 측정되었다[13]. 기포탐 내부의 탐침은 분산판으로부터 20, 30, 40 cm의 높이에서 반경방향으로 탐의 중앙에서부터 벽쪽으로 각각 4지점( $r/R=0, 0.3, 0.55, 0.8$ )에 설치하였다. 기-액 흐름이 정상상태에 도달된 후 기포특성을 측정하였는데 탐침의 두 tip 사이의 거리는 2 mm 이었다. 탐침으로부터 나오는 신호는 증폭기를 거쳐 A/D converting system을 사용하여 digital 신호로 전환한 후 이를 off-line으로 해석하였다. 신호의 측정속도는 200 Hz로 하였고 측정시간은 15초로 하여 각각의 실험조건에서 3,000개의 data를 수집하였다. 전기저항 탐침에서 나오는 신호로부터 각 측정지점에서의 국부 기체 체류량인( $\epsilon_G$ )은 식 (1)에 의해서 구하였다.

$$(\epsilon_G)_i = \frac{\sum t_i}{T} \quad (1)$$

여기서  $t_i$ 는 각 지점에서 기포가 탐침에 머무르는 시간을 나타내고,  $T$ 는 전체 측정시간을 나타낸다. 한편, 두 탐침 사이의 거리가  $l$ 이고 각각의 탐침에서 나오는 두 신호간의 시간 차이가  $\tau$ 일 경우 기포의 상승속도( $U_b$ )와 수직길이( $l_v$ )는 각각 식 (2)와 (3)으로부터 구하였다[10-12].

$$U_b = \frac{l}{\tau} \quad (2)$$

$$l_v = U_b \times t_i \quad (3)$$

## 3. 결과 및 고찰

### 3-1. 기체 체류량 및 분포

경사단면 기포탐에서 국부 기체 체류량의 축방향 및 반경방향 분포를 Fig. 2에 나타내었다. 이 그림에서 분산판으로부터 20, 30 그리고 40 cm의 높이에서 탐의 중앙선을 기준으로 반경방향으로 4지점에서 측정 한 국부 기체 체류량 분포를 볼 수 있는데, 포물선 형태의 국부 기체 체류량 분포를 보이는 원통형 기포탐의 경우[9-11]와는 조금 다르게 탐의 중앙에서 벽면쪽으로 갈수록 기체 체류량은 선형적으로 감소하였다. 또한, 모든 경우에 기체유량의 증가에 따라 국부 기체 체류량은 증가했으며, 기체 유량이 증가할수록 경사단면 기포탐의 중심영역에서 기포들이 빠르게 상승하므로 벽면영역으로의 분산이 잘 이루어지지 않아 반경방향으로 체류량의 감소율이 커짐을 볼 수 있었다. 또한, Fig. 2에서 탐의 상부로 갈수록 단면적이 넓어져 국부 기체 체류량은 감소하지만 체류량 값의 분포는 반경방향으로 좀더 균일해지는 경향을 나타냈다. 이는 탐의 상부로 갈수록 단면적이 커지면서 액상의 부피가 증가하게 되고, 액상이 탐의 벽면부분을 통해 재순환하는 경향이 나타나기 때문으로 해석할 수 있다[6, 7].

기체 유량이 국부 기체 체류량에 미치는 영향을 Fig. 3에 나타내었다. 이 그림에서 보는 바와 같이 기체 체류량은 기체 유량이 증가함에 따라 증가함을 볼 수 있다. 이는 대부분의 기포탐에서 관찰되는 현상으로, 기체유속이 증가함에 따라 탐 내에 존재하는 기포의 수가 많아짐으로 인해서 기체 체류량이 증가한다고 할 수 있다. 또한, 국부 기체 체류량은 경사단면 기포탐의 경우 탐의 중앙에서 매우 큰 값을 나타내었으며 이와같은 경향은 기체의 유량이 증가함에 따라 더욱 두드러지게 나타났다. 한편, Fig. 3에서 볼 수 있듯이 경사단면 기포탐은 Kim[13]과 Kang 등[14]의 기존의 원통형 기포탐과 비교하여 탐 중심부에서의 기포 체류량이 월등히 많으며 탐의 벽면부에서는 원통형의 경우보다 더 작은 것을 알 수 있다. 그러나, 같은 조건에서 이 그림에 나타난 원통형 기포탐에서의 기포 체류량보다 경사단면 기포탐에서의 기포 체류량의 평균값은 더 큰 것을 알 수 있다.

여기서 원통형 기포탐과 동일한 조건에서의 비교를 위해 경사단면 기포탐의 전체 부피를 탐의 높이로 나눈 평균단면적  $A_m (=V_C/H)$ 을 기초

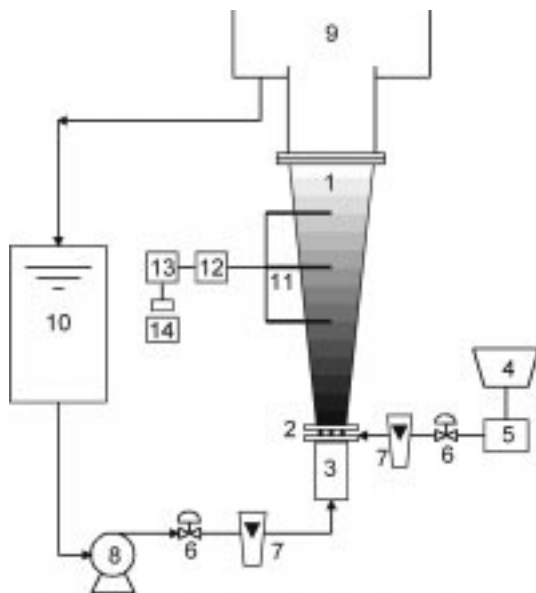


Fig. 1. Experimental apparatus.

- |                    |                                  |
|--------------------|----------------------------------|
| 1. Tapered column  | 8. Pump                          |
| 2. Distributor     | 9. Weir                          |
| 3. Calming section | 10. Liquid reservoir             |
| 4. Compressor      | 11. Electrical resistivity probe |
| 5. Regulator       | 12. Amplifier                    |
| 6. Valve           | 13. A/D converter                |
| 7. Rotameter       | 14. Computer                     |

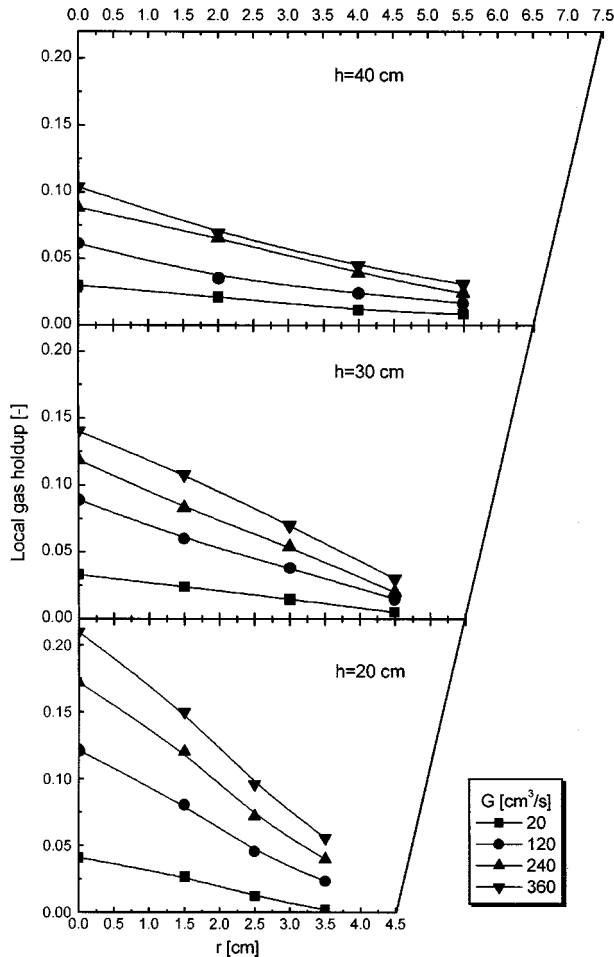


Fig. 2. Radial and axial distributions of local gas holdup ( $L=240 \text{ cm}^3/\text{s}$ ).

로 하여 식 (4)와 (5)로 정의된 기체와 액체의 평균공급속도를 사용하여 원통형 기포탑의 공급속도와 대조시켰다[7].

$$U_{Gm} = \frac{G}{A_m} \quad (4)$$

$$U_{Lm} = \frac{L}{A_m} \quad (5)$$

식 (4), (5)에서  $G$ 와  $L$ 은 각각 기체와 액체의 부피유량을 나타낸다.

경사단면 기포탑에서 연속상인 액체 유량이 국부 기체 체류량의 반경 방향분포에 대한 영향을 Fig. 4에 나타내었다. 기포탑에서 액체유속의 증가는 탑 내부의 난류현상의 증가로 인해 기포를 깨주는 작용과 기포에 대한 drag를 증가시켜 기포의 상승속도를 증가시켜 주는 서로 상반되는 영향 때문에 액체 유속이 기체의 체류량에 미치는 영향은 기포탑의 구조와 크기, 분산판의 형태 등에 따라 다르게 나타나는 것으로 알려져 있다[11-15]. 본 실험에 사용된 경사단면 기포탑의 경우 core 영역에서는 액체유속의 증가로 인한 기체 체류량의 미세한 감소가 일어났으나, annulus 영역에서는 난류현상의 증가로 인한 기포의 측방향 분산이 잘 일어나 기체 체류량이 조금 증가하는 것으로 나타났으나 결과적으로 액체유량의 증가에 따라 기체 체류량은 거의 영향이 없거나 아주 미세하게 감소했다고 할 수 있다. 이러한 현상은 Fig. 4에서 압력강하방법으로 구한 Kang 등[14]의 액체유속에 대한 기체 체류량 결과와 유사한 경향을 나타냈다.

본 연구의 결과를 원통형 기포탑에서의 총괄 기체 체류량과 비교하기 위하여, Fig. 5에 기체 유량의 변화에 따른 압력강하방법으로 구한 총괄 기

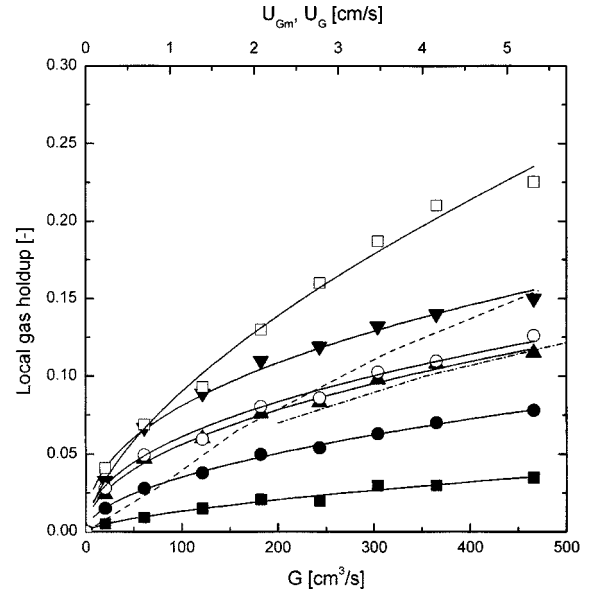


Fig. 3. Effects of gas flow rate on the local gas holdup at various radial positions ( $L=240 \text{ cm}^3/\text{s}$ ).

$r/R$	0	0	0	0.3	0.55	0.8	0	measured by pressure
$h(\text{cm})$	20	40	30	30	30	30	35	drop method
$D_c(\text{m})$				0.05-0.15			0.15	0.1
column	Tapered column						Vertical column	
	present study						Kim[13] Kang et al.[14]	

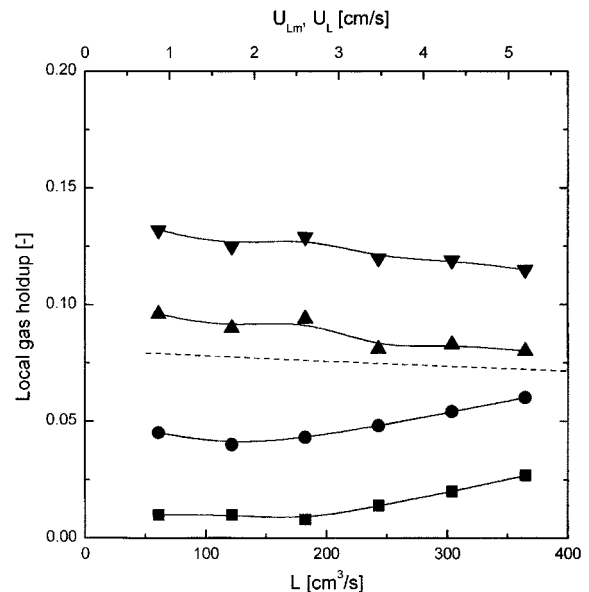


Fig. 4. Effects of liquid flow rate on the local gas holdup at various radial positions ( $h=30 \text{ cm}$ ,  $G=240 \text{ cm}^3/\text{s}$ ).

$r/R$	0	0.3	0.55	0.8	measured by pressure
$D_c(\text{m})$			0.05-0.15		0.1
column	Tapered column				Vertical column
	present study				Kang et al.[14]

포 체류량을 나타내었다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 경사단면 기포탑에서의 기포 체류량이 같은 조건의 원통형 기포탑보다 큰 것을 알 수 있다.

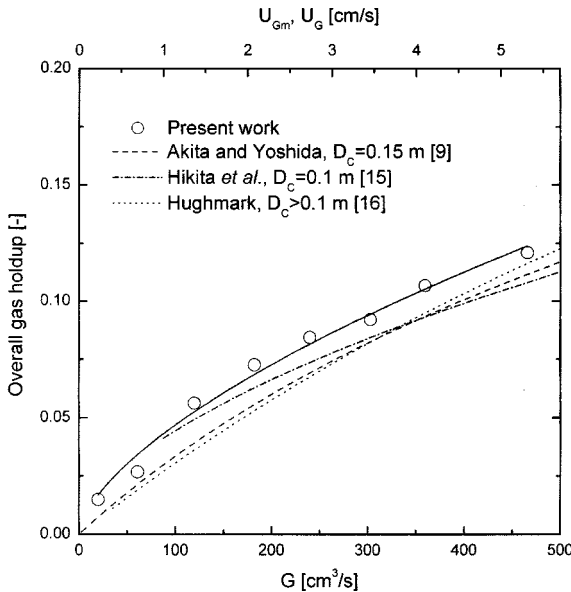


Fig. 5. Effects of gas flow rate on the overall gas holdup in tapered bubble columns( $L=0$ ).

### 3-2. 기포특성

기포의 특성은 기포탑의 수력학적 특성을 결정하는 중요한 요소이므로, 본 연구에서 측정한 기체 유량의 변화에 따른 기포의 크기 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 이 그림은 기체-액체 분산판으로부터 각각 20, 30 그리고 40 cm의 높이에서 측정된 기포의 평균 수직길이를 이 그림에서 보듯이 기체유량이 증가함에 따라서 낮은 유량에서는 기포 크기가 급격히 증가하나 높은 유량에서는 거의 일정해지는 경향을 나타냈으며 slugging 현상은 나타나지 않았다. 이와같은 현상은 기포크기의 증가는

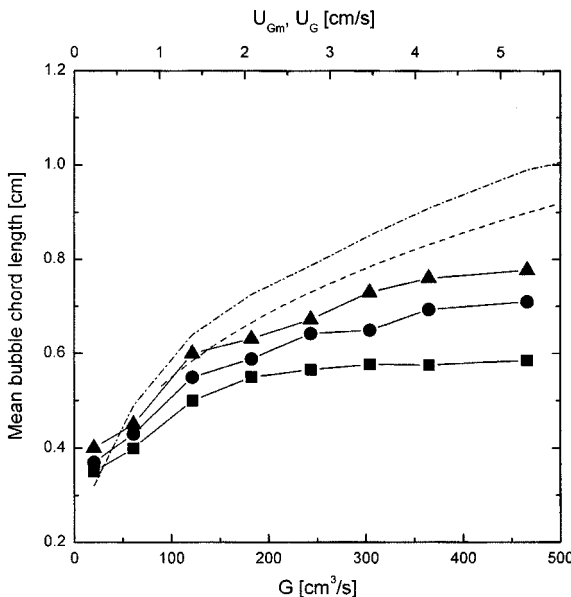


Fig. 6. Effects of gas flow rate on mean bubble chord length in tapered bubble columns( $L=240 \text{ cm}^3/\text{s}$ ).

	▲	●	■		
$h[\text{cm}]$	40	30	20	47.5	40
$D_c[\text{m}]$	0.05-0.15			0.25	0.15
column	Tapered column			Vertical column	
	present study			Yu and Kim[12] Kim[13]	

탑 내의 기포의 합체현상에 의해 일어나는데, 기체유량의 증가는 이러한 기포의 합체현상을 증가시키기 때문으로 해석할 수 있다. 그러나 어느 정도 안정한 기포크기가 되면 다시 기포의 분쇄현상이 일어나서 결국 기포는 일정한 크기로 접근하게 된다고 할 수 있다[10]. 또한 탑의 상부로 올라갈수록 기포의 합체가 일어날 확률이 증가하므로 기포의 수직길이가 증가하게 된다고 할 수 있다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 경사단면 기포탑의 경우는 원통형의 기포탑에 비하여 기포의 수직길이가 작게 나타났는데 이는 기체의 유입부분에서 액체와의 접촉에 의한 난류현상의 증가로 기포의 크기가 원통형에 비하여 작게 되었기 때문으로 해석할 수 있다[6, 7]. 따라서, 경사단면 기포탑의 경우 기포의 크기가 작으므로 원통형 기포탑과 비교하여 같은 운전조건에서 기포의 체류량이 증가한다고 할 수 있다(Fig. 5).

경사단면 기포탑에서 기포의 상승속도는 연속상인 액체의 상승속도와 순환현상에 의해 영향을 받으므로 기포탑 내의 수력학적 특성 규명에 매우 중요한 인자가 된다 할 수 있다. 특히, 기포탑의 단면을 경사면으로 한 이유중의 하나가 기포탑에 유입된 액체의 상승속도를 탑의 높이가 증가함에 따라 점점 감소시켜서 탑 내에 존재하는 기포나 부유물의 탑내 체류시간을 증가시키자는 데 있으므로, 본 연구의 실험결과와 측정된 기포의 평균 상승속도를 기체 유량의 변화에 따라 Fig. 7에 나타내었다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 탑내 유입되는 기체 유량의 증가에 따라서 기포의 평균 상승속도가 증가함을 볼 수 있는데, 낮은 유량범위에서는 기포상승속도의 급격한 증가와 함께 탑 전체에 걸쳐 거의 균일한 값을 보였으나, 높은 유량범위에서는 기포의 상승속도가 완만한 증가를 보였다. 특히 유입되는 기체의 유량이 큰 범위에서는 분산판으로부터의 높이가 증가함에 따라 기포들 간의 합체현상이 나타나서 기포의 합체로 인한 기포크기의 증가와 탑의 단면적이 커지면서 기포에 작용하는 벽면효과(wall effect)가 감소함으로 인해서 기포상승속도가 더욱 증가하는 것을 알 수 있다[17].

### 3-3. 상관식

경사단면 기포탑에서 얻은 국부 기체 체류량과 기포탑 전체에 대한 총괄 기체 체류량을 기체와 액체의 유량, 분산판으로부터의 높이 그리고 반경방향의 위치 등의 상관식으로 식 (6), (7)과 같이 얻을 수 있었는데, 이 식들의 상관계수는 각각 0.927, 0.946이었으며, 적용범위는  $20 \leq G[\text{cm}^3/\text{s}] \leq 466$ ,  $20 \leq L[\text{cm}^3/\text{s}] \leq 360 \text{ cm}^3/\text{s}$ 이다.

$$(\varepsilon_g)_i = 0.638 \left( \frac{G}{L} \right)^{0.512} h^{-0.380} [1 - (r/R)] \quad (6)$$

$$\varepsilon_g = 0.003 G^{0.605} L^{-0.012} \quad (7)$$

한편, 기포의 평균 수직길이( $\bar{l}_v$ )와 평균 상승속도( $\bar{U}_b$ )도 기체 및 액체의 유량과 분산판으로부터 높이의 상관식으로 식 (8), (9)와 같이 나타낼 수 있었으며 이들 각각의 상관계수는 0.932, 0.940으로 실험결과와 잘 일치하였다.

$$\bar{l}_v = 0.07 G^{0.211} L^{-0.11} h^{0.281} \quad (8)$$

$$\bar{U}_b = 0.675 G^{0.397} L^{0.018} h^{0.466} \quad (20 \leq G[\text{cm}^3/\text{s}] \leq 466, 20 \leq L[\text{cm}^3/\text{s}] \leq 360 \text{ cm}^3/\text{s}) \quad (9)$$

이들 상관식들은 Fig. 3-7에서도 볼 수 있듯이 경사단면 기포탑의 수력학적 특성에 대한 영향이 기체 유량과 탑의 높이에 의해 많이 좌우되며 액체유량에 대해서는 거의 영향을 없음을 나타내주고 있다.

## 4. 결 론

경사단면 기포탑에서 기체 체류량 분포 및 기포거동에 대한 특성을

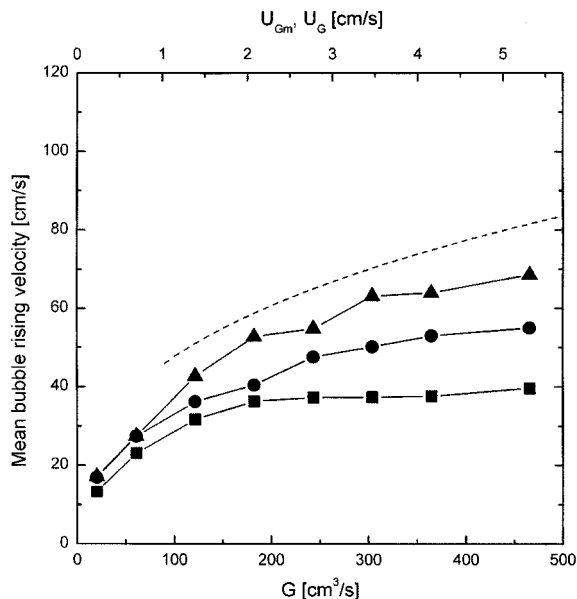


Fig. 7. Effects of gas flow rate on mean bubble rising velocity in tapered bubble columns ( $L=240 \text{ cm}^3/\text{s}$ ).

	▲	●	■	-----
$h[\text{cm}]$ :	40	30	20	47.5
$D_c[\text{m}]$ :		0.05-0.15		0.25
column :	Tapered column			Vertical column
	present study			Yu and Kim[12]

고찰한 본 연구의 결과 다음과 같은 몇 가지 결론을 얻을 수 있었다. 즉, 기체 유량의 증가에 따라 경사단면 기포탑 전체에서 기체 체류량은 증가했으나, 액체 유량의 증가에 따라서는 거의 영향이 없거나 약간 감소했다. 국부 기체 체류량의 반경방향에 대한 분포는 탑의 중앙선( $r/R=0$ )을 따라서 최대값을 갖고 벽면으로 갈수록 선형적으로 감소했다. 축방향에 대해서는 낮은 기체 유량을 제외하고는 탑의 상부로 갈수록 기체 체류량 값이 작아지면서 좀더 균일한 반경방향 분포를 나타냈다. 또한 기포 수직길이와 상승속도는 기체유량과 기포탑의 높이에 따라 증가했으며 높은 기체유량에서 거의 일정해졌고 *slugging* 현상은 보이지 않았다. 경사단면 기포탑에서 측정된 총괄 기체 체류량은 원통형의 기포탑에서보다 증가된 값을 나타냈으며, 기포의 수직길이와 상승속도는 원통형 기포탑에서보다 감소하였다. 경사단면 기포탑에서 기체 체류량과 기포의 수직길이 그리고 상승속도를 주요실험 변수들의 상관식으로 나타낼 수 있었다.

### 사용기호

$A_m$	: mean cross-sectional area [ $\text{cm}^2$ ]
$D_c$	: column diameter [m]
$G$	: volumetric gas flow rate [ $\text{cm}^3/\text{s}$ ]
$h$	: height from the distributor [cm]

$H$	: total column height [cm]
$l$	: distance between two elements of probe [m]
$l_v$	: bubble chord length [cm]
$L$	: volumetric liquid flow rate [ $\text{cm}^3/\text{s}$ ]
$r$	: radial location [m]
$R$	: radius of the column [m]
$t_i$	: exposure time of the probe to bubble [sec]
$T$	: total record time [sec]
$U_b$	: bubble rising velocity [cm/s]
$U_{Gm}$	: mean superficial gas velocity [cm/s]
$U_{Lm}$	: mean superficial liquid velocity [cm/s]
$V_C$	: total volume of tapered column [ $\text{cm}^3$ ]

### 그리스 문자

$\epsilon_G$	: overall gas holdup [-]
$(\epsilon_G)_i$	: local gas holdup [-]
$\tau$	: time shift between two elements of probe [sec]

### 참고문헌

1. Nishikawa, M., Yonezawa, Y., Kayama, T., Koyama, K. and Nagata, S.: *J. Chem. Eng. Japan*, **9**, 214(1976).
2. Nishikawa, M., Shiino, K., Kayama, T., Nishioka, S. and Hashimoto, K.: *J. Chem. Eng. Japan*, **18**, 496(1985).
3. Anabtawi, M. Z., Uysal, B. Z., Jumah, R. Y. and Abdel-Jalil, N. K.: *Chem. Eng. J.*, **47**, 135(1991).
4. Anabtawi, M. Z.: *J. Chem. Eng. Japan*, **28**, 684(1995).
5. Reese, J. and Fan, L.-S.: *Chem. Eng. Sci.*, **52**, 1553(1997).
6. Kawagoe, M., Yoshida, S., Ishii, Y. and Naoe, K.: *Can. J. Chem. Eng.*, **77**, 811(1999).
7. Kawagoe, M. and Maeoka, T.: *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **22**, 629 (1996).
8. Peng, Y. and Fan, L. T.: *Chem. Eng. Sci.*, **52**, 2277(1997).
9. Akita, K. and Yoshida, F.: *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, **12**, 76 (1973).
10. Sarrafi, A., Jamialahmadi, M., Müller-Steinhagen, H. and Smith J. M.: *Can. J. Chem. Eng.*, **77**, 11(1999).
11. Kang, Y., Cho, Y. J., Woo, K. J., Kim, K. I. and Kim, S. D.: *Chem. Eng. Sci.*, **55**, 411(2000).
12. Yu, Y. H. and Kim, S. D.: *Chem. Eng. Sci.*, **46**, 313(1991).
13. Kim, J. O.: Master Thesis, KAIST(1986).
14. Kang, Y., Lim, W. M. and Kim, S. D.: *HWAHAK KONGHAK*, **25**, 460 (1987).
15. Hikita, H., Asai, S., Tanigawa, K., Segawa, K. and Kitao, M.: *Chem. Eng. J.*, **20**, 59(1980).
16. Hughmark, G. A.: *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, **6**, 218(1967).
17. Krishna, R., Urseanu, M. I., van Baten, J. M. and Ellenberger, J.: *Chem. Eng. Sci.*, **54**, 171(1999).