

벤치스케일(0.36 m × 22 m) 다단형 기포탑에서 다공판이 기포의 거동 및 기체 체류량에 미치는 영향

양정훈*** · 허영길*,*** · 이호태* · 양정일* · 김학주* · 천동현* · 박지찬* · 정 현*,†

*한국에너지기술연구원 청정석탄센터

305-343 대전광역시 유성구 가정로 152

**한국과학기술원 생명화학공학과

305-701 대전광역시 유성구 대학로 291

***고려대학교 화공생명공학과

136-701 서울특별시 성북구 안암로 145

(2011년 9월 30일 접수, 2011년 12월 5일 채택)

The Effect of Partitioning Porous Plate on Bubble Behavior and Gas Hold-up in a Bench Scale (0.36 m × 22 m) Trayed Bubble Column

Jung Hoon Yang***, Young Gul Hur****, Ho-Tae Lee*, Jung-Il Yang*, Hak-Joo Kim*, Dong Hyun Chun*,
Ji Chan Park* and Heon Jung*,†

*Clean Coal Center, Korea Institute of Energy Research, 152 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Korea

**Department of Chemical and Biomolecular Engineering, KAIST, 335 Gwahangno, Yuseong-gu, Daejeon 305-701, Korea

***Department of Chemical and Biological Engineering, Korea University, 145 Anam-ro, Sungbuk-ku, Seoul 136-701, Korea

(Received 30 September 2011; accepted 5 December 2011)

요 약

기포탑 반응기에서의 기체 체류량은 기포의 크기 분포 및 상승 속도와 밀접한 연관성을 갖는다. 따라서 많은 연구자들에 의하여 기포탑 반응기 내에 기포의 크기를 제어하기 위한 연구들이 진행되어 왔다. 본 연구에서는 스파저 이외의 영역에서도 기포의 거동을 제어하고 기체 체류량을 증진시키기 위하여 다단형 기포탑 반응기를 사용하였다. 특히, 3 종류의 서로 다른 크기의 반응기를 사용하여 다단 다공판이 기포의 유동 특성에 미치는 효과를 확인하였다. 나아가 개별 기포가 다공판을 통과하였을 때의 쪼개짐 빈도수 및 크기 분포 변화에 대하여 관찰함으로써 다공판의 영향에 대한 이해를 넓혔다. 또한 다양한 다공판 배치 형태에 따른 유동 특성을 관찰함으로써 다단형 기포탑 반응기에서의 다공판 설치에 대한 기준을 제시할 수 있었으며, 이를 바탕으로 높이 22 m, 직경 0.36 m의 벤치 스케일 다단형 기포탑 반응기를 제작하여 그 성능을 확인하였다.

Abstract – The gas hold-up has a strong relationship with the size distribution and rising velocities of bubbles in a bubble column. Therefore, many previous researchers have studied on the hydrodynamics focusing on the bubble size variation in bubble column. In this study, the bubble behavior was influenced by partitioning porous plates installed at a certain height in a trayed bubble column. The gas hold-up was increased in non-sparging region ($H/D > 5$) as well as sparging region. We identified the effect of the partitioning porous plate using three trayed bubble columns with different reactor geometries. Furthermore, the bubble break-up frequency and size distribution were observed before and after individual bubbles penetrated through the plate. The arrangement of the plates was also investigated using a 0.15-m-in-diameter bubble column. Based on the result, we applied this design concept to a 0.36-m-in-diameter, 22 m tall trayed bubble column and identified the effect of the partitioning porous plate on the gas hold-up increase.

Key words: Trayed Bubble Column, Gas Hold-up, Bubble Break-up, Bubble Size Distribution, Scale-up

† To whom correspondence should be addressed.

E-mail: jungh@kier.re.kr

*이 논문은 한국에너지기술연구원 조순행 박사의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

1. 서 론

기포탑 반응기는 우수한 열 및 물질전달 특성을 갖으며 운전 및 유지가 비교적 간단하다는 장점을 바탕으로 흡착반응, 생화학반응 및 석탄액화반응과 같은 산업적 공정에 널리 활용되고 있다. 이와 같은 기포탑 반응공정의 장점에도 불구하고 반응기 내부의 기포 거동이 매우 복잡하고 상들 간에 다양한 상호 작용력이 작용하기 때문에 정밀한 반응기 해석에 대해서는 한계를 보인다.

기포탑 반응기의 성능을 특징지을 수 있는 대표 인자로서 기체 체류량을 들 수 있다. 기체 체류량이 중요한 이유는 여러 연구에서 기체 체류량과 물질전달 속도 사이의 밀접한 상관관계가 입증되었기 때문이다. 가령, Letzel 등[1]에 따르면 불균일 흐름 영역에서, 기체 체류량에 대한 물질 전달 속도의 비가 0.5로 일정하다. 기체 체류량은 기체 흐름 영역에 따라, 기포의 크기 분포에 따라 그리고 액체상의 순환 속도에 따라 강하게 영향을 받는다. 기포탑 반응기에서의 기체 흐름 영역은 크게 4 영역으로 구분할 수 있다. Yang 등[2]에 따르면 작은 기포가 균일하게 분산되어 수직 상승 운동을 보이는 균일계 흐름 영역, 큰 기포가 발생하기 시작하는 준균일계 흐름 영역, 강한 와류가 형성되는 불균일계 흐름 영역 그리고 준균일계 흐름 영역에서 불균일계 흐름 영역으로 전이되는 전이 영역 4 종류의 흐름 영역으로 특징지어진다. 일반적으로 균일계 흐름 영역에서 기체 체류량은 기체의 공탑 속도에 대해서 가파르게 상승하는 반면, 준균일계 흐름 영역에서 상승하는 기울기는 다소 감소하게 된다. 그리고 전이 영역에서 최고값을 보인 후, 불균일계 흐름 영역에서 일시적으로 감소한 후 다시 완만하게 상승하는 경향을 보인다. 기체 체류량은 반응기 내에 분산되어 있는 기포들의 절대 크기 및 크기 분포에도 강한 영향을 받는다. 즉 기포의 크기가 클수록 상승 속도가 빨라지고 상승하는 기포의 후단에 형성되는 wake의 영향이 증가하게 된다. 따라서 기체 체류량은 기포의 크기가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타낸다. Clift[3]에 따르면, 개별 기포의 상승 속도는 다음과 같은 식에 의하여 기포의 크기와 상관관계를 갖는다.

$$u = \left[\frac{2.14\sigma}{\rho_l d_b} + 0.505gd_b \right]^{1/2} \quad (1)$$

여기서 u 는 개별 기포의 상승 속도, σ 는 액체상의 표면장력, d_b 는 기포의 직경 그리고 g 는 중력가속도를 나타낸다.

따라서 많은 연구자들에 의하여 반응기 내부의 기포의 크기분포를 제어하고자 하는 시도들이 이루어져왔다. 일부 연구자들은 스파저의 설계 요소에 초점을 맞추어 기포가 형성될 때의 크기 분포에 대하여 연구를 진행하였다[4-6]. 그러나 일반적으로 스파저가 영향을 미칠 수 있는 반응기 높이 범위에는 한계가 존재한다. 즉, 기포의 흐름 및 크기 분포에 대한 스파저의 영향은 $H/D < 5$ 범위에 국한되며, $H/D > 5$ 의 영역에서는 반응기 형태 자체가 보다 큰 영향을 준다고 알려져 왔다. 이 영역에서의 기포 크기 분포는 기포 사이의 쪼개짐 및 뭉침이 반복되는 동적 평형에 의하여 결정된다[6].

이와는 달리, 다단형 기포탑 반응기를 사용하면 H/D 값에 제약을 받지 않으며 기포탑 반응기 전체 높이에 대해서 기포의 크기를 제어할 수 있다. 최근 10년 동안 다단형 기포탑 반응기에 대한 활발한 연구가 진행되고 있다[7-11]. Thaker[7] 그룹은 다단 다공판을 설치함으로써 기체 체류량뿐만 아니라 물질 전달 특성이 개선됨을 확인하였다. Al-Dahhan[8,9] 그룹은 다공판의 구조와 운전 조건에 따른 기

포탑 반응기 특성의 변화를 연구하였다. 그들은 액체상의 역혼합에 대해서는 다공판의 개구 비율과 액체 공탑 속도가, 기체 체류량에 대해서는 다공판의 기공 크기와 공탑 가스 속도가 주요 변수로 작용한다고 보고하였다. 그러나 위 연구 그룹들은 다공판 아래에서 형성되는 gas cap의 존재 가능성에 대해 배제하였다. Pandit[10] 그룹과 Krishna[11] 그룹은 공탑 가스 속도를 증가시킴에 따라서 gas cap이 형성되며 이 층의 두께가 두꺼워짐을 확인하였다. Gas cap은 분리막 아래에서 기포의 형태가 아닌 기체층의 형태로 형성되기 때문에, 겉보기 기체 체류량의 증가에는 크게 기여하지만 실질적인 물질 전달 특성에는 부정적인 영향을 미친다. 따라서 다공판의 영향을 보다 체계적으로 연구하기 위해서는 이러한 gas cap의 형성조건을 확인하고 이를 최소화하는 조건에서 실험을 수행할 필요가 있다. 본 연구에서는 gas cap이 형성되지 않는 조건을 사전에 확인하였으며, 이 결과를 바탕으로 50% 이상의 개구 비율과 0.5 mm 이상의 기공 크기(유체 역학 지름, hydraulic diameter)를 갖는 다공판을 사용하였다.

또한 다단형 기포탑 반응기에 대한 많은 기존 연구 결과들은 기체 체류량 및 액상의 역혼합 등에 대한 현상학적 분석에 초점을 맞추어 왔다. 본 연구에서는 기포가 다공판을 통과하였을 때, 입자의 크기 및 쪼개짐 빈도를 확인함으로써 기포와 다공판 사이의 상호작용에 대한 이해를 넓히고자 한다. 또한, 소형 기포탑 반응기에서 확인된 다단형 기포탑 반응기 설계 개념을 22 m 높이의 벤치 스케일 반응기에 적용하여 다공판의 효과를 확인하고자 한다.

2. 실험

2-1. 기포탑 반응기

본 연구에서는 반응기의 크기에 따라서, 세 종류의 기포탑 반응기를 활용하였으며, 각 반응기에서 일정한 높이 간격으로 설치된 다공판이 기체 체류량에 미치는 영향에 대하여 실험을 수행하였다. 즉, Fig. 1에 나타나듯이 직경 15 cm, 높이 2 m의 아크릴반응기, 직경 34 cm, 높이 5 m의 아크릴 반응기 그리고 직경 36.3 cm, 높이 22 m의 스테인리스 철재질의 기포탑 반응기가 그것이다. 각 반응기 상단은

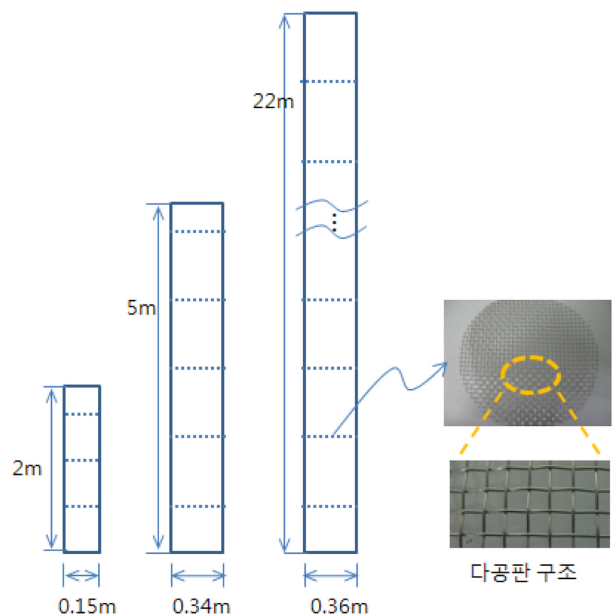


Fig. 1. Three trayed bubble columns with different geometries.

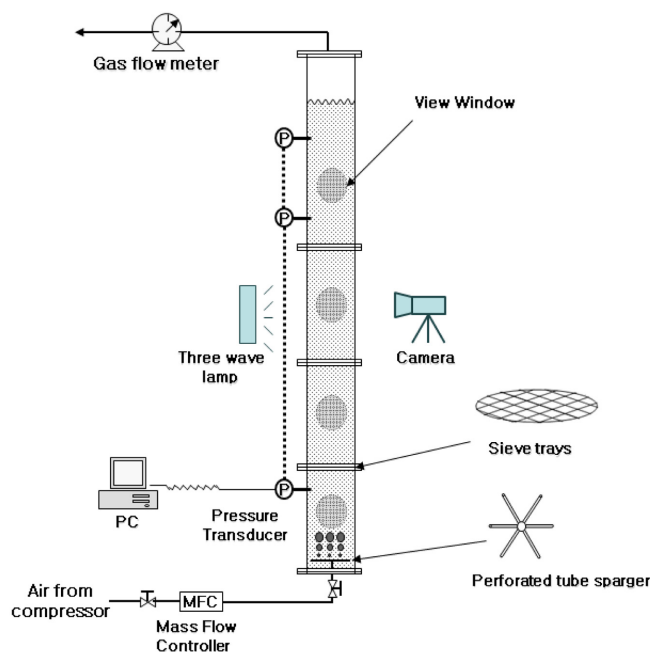


Fig. 2. Experimental set-up.

대기 중에 노출되어 있기 때문에 압력을 대기압으로 일정하게 유지하였으며, 반응기 하단에서는 mass flow controller를 통하여 일정한 유속의 기체를 perforated tube 스파저를 통해서 공급하였다. 직경 15 cm 기포탑 반응기의 경우, 기공크기가 0.7 mm이며 개구비율이 0.10%인 스파저를 적용하였으며, 직경 34 cm와 36.3 cm 기포탑 반응기에는 기공크기 1.8 mm, 개구 비율 0.45%의 스파저를 활용하여 실험하였다. 스파저를 통해 기체를 투입하기 전에, 각 반응기에는 일정한 높이의 static liquid level까지 수돗물을 채움으로써 액체상의 수력학적 압력의 영향을 최소화하였다(15 cm: H/D=7.67, 34 cm: H/D=8.82, 36.3 cm: H/D=43.5). 반응기 하단을 통해서 유입되는 기체 상은 압축공기를 이용하였다.

Fig. 2에 나타나듯이, 각 반응기에는 높이별로 기체 체류량을 측정하기 위하여 일정한 높이 간격으로 압력센서를 장착하였다. 압력센서에서 수집된 압력정보는 실시간으로 기록 및 저장되며 다음과 같은 관계식에 따라서, 해당 높이에서의 기체 체류량을 계산할 수 있다.

$$\varepsilon_g = \frac{(\Delta P_0 - \Delta P_b)}{(\rho_l - \rho_g)g\Delta h} \approx \frac{\Delta P_b}{\Delta P_0} \quad (2)$$

여기서, ε_g 는 해당 높이 구간에서의 기체 체류량이고, ρ_l , ρ_g 는 각각 액체와 기체상의 밀도를 나타내고, Δh 는 해당 높이 구간의 높이 차이이며, g 는 중력 가속도를 의미하며, ΔP_0 , ΔP_b 는 각각 기체를 흘리지 않았을 때와 흘렸을 때의 해당 높이 구간에서의 정압력 차이를 나타낸다.

2-2. 다단 다공판

다단 다공판은 스테인리스 철 재질을 사용하였으며, 이전 연구에서 도출된 최적의 구조를 적용하였다. 즉, 다공판에 연속적으로 형성되어 있는 기공의 구조는 사각 형태를 취하며, 유체역학 반지름이 1.0~1.3 mm의 범위에 있는 것을 특징으로 한다(Fig. 1). 기공과 기공 사이의 간격은 1 mm 이하로 설정하였다. 또한 다공판의 개구 비율

을 $72.0 \pm 5.0\%$ 로 충분히 크게 하였다. 다공판의 두께가 증가할수록 기포의 상승운동에 대한 저항력(drag force)이 커지기 때문에 반응기에서의 기포 거동에 영향을 미친다. 이러한 다공판 두께의 영향을 최소화하기 위하여 본 연구에서는 0.35 mm 이하로 매우 작게 설정하였다.

2-3. 기포 크기 분포

다공판을 투과한 전후의 기포 크기 분포를 확인하기 위하여, 고해상도 디지털 카메라(Cannon, Tokyo, Japan)를 사용하였다. 기포에 대한 이미지를 보다 정밀하게 측정하기 위하여, 카메라의 반대편에 삼파장 램프를 설치하였다. 광원이 카메라의 반대편에 위치하게 되므로 이미지의 배경은 흰색으로, 기포의 가장자리는 검정색으로 관찰되었다. 또한 반응기의 곡면에서의 빛의 굴절에 의한 오차를 최소화하기 위하여 반응기 주변에 육면체 view glass를 설치하였으며 view glass와 반응기 사이에는 반응기 내부의 액체상과 같은 수돗물을 채웠다. 이미지는 30 fps의 속도로 수집되었으며 셔터 스피드는 1/1250으로 조절하였다. 이렇게 수집된 데이터는 이미지 분석 소프트웨어(Zotos, Anyang, Korea)를 사용하여 처리되었다.

기포의 크기분포는 맛먹음 기포 직경(equivalent bubble diameter)에 기초하여 분석되었다. 즉, 실제 측정되는 기포의 형태는 원형, 타원형 및 중형 등으로 다양하지만, 각 기포의 면적과 동일한 면적을 갖는 원형기포를 가정하고 이에 따른 맛먹음 기포 직경을 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 다단 다공판이 기포거동에 미치는 영향

기포탑 반응기에서 다단 다공판의 영향은 지름 15 cm와 34 cm 반응기를 사용하였을 때 분명하게 나타난다. Fig. 3은 지름 15 cm, 높이 2 m의 실린더 반응기와 지름 34 cm, 높이 5 m의 실린더 반응기를 각각 사용했을 때, 다공판이 전체 기체 체류량에 미치는 영향을 보여준다. 균일계 흐름 영역에서, 공탑 가스 속도에 따른 기체 체류량의 상승속도는 반응기 크기와는 무관하며 다단 다공판의 설치유무에 크게 영향을 받는 것을 확인할 수 있다. 즉, 다공판이 설치되지 않은 일반 기포탑 반응기에서는 기체 체류량이 완만하게 증가하는 반면(0.034~0.035 sec/cm), 다단형 기포탑 반응기에서의 기체 체류량 증가 기울기는 0.041~0.044 sec/cm로서 상대적으로 가파르게 증가

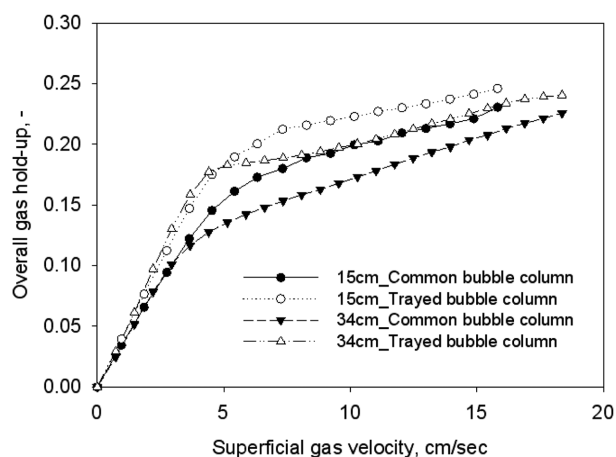


Fig. 3. Effect of the partitioning porous plate on overall gas hold-up.

하였다. 이것은 Alvaré와 Al-Dahhan[9]의 연구 결과와 일치한다. 이 그룹의 연구 결과에 따르면, 다단 다공판을 설치함으로써 20~50%의 범위에서 기체 체류량이 증가하였으며 기체상의 재분산에 의하여 전체적인 기포의 크기가 감소하였다. Thaker와 Rao[7]는 다공판에 의하여 기체의 부피 물질 전달 계수가 약 60%, 기체 체류량이 약 5~10% 증가한다고 보고하였다. 특히 Yang 등[2]에 따르면, 15 cm 일반 기포탑 반응기에서는 공탑 가스 속도, 2.4 cm/sec에서 큰 기포가 형성되기 시작하는 준균일계 흐름 영역으로 전이되고 공탑 가스 속도, 5.6 cm/sec에서 와류가 형성되는 불균일계 흐름 영역으로 전이된다. 본 연구 결과에 따르면, 공탑 가스 속도, 1.85~2.75 cm/sec에서 기포탑 반응기와 다단형 기포탑 반응기 사이의 기체 체류량에서 이격이 나타나기 시작한다. 즉, 큰 기포가 형성되는 시점에서 두 반응기 사이의 성능 차이가 확연하게 나타나기 시작한다. 이것은 다공판에 의한 영향이 주로 큰 기포의 형성 및 거동에 작용한다는 것을 간접적으로 제시한다. Alvaré와 Al-Dahhan[9] 또한, 다단 다공판의 효과가 불균일 흐름 영역에서 두드러지게 나타난다고 보고하고 있어서 이러한 주장을 뒷받침한다.

일정한 높이 간격의 다공판이 기포의 거동에 미치는 영향을 살펴 보기 위하여, 다공판을 전후로 기포의 쪼개짐 빈도수와 크기 분포 변화를 관찰하였다. 상승하는 기포가 다공판을 통과하였을 때, 약 68%의 기포들이 2개 이상의 작은 기포로 분리되었으며, 이 가운데 12%는 한 개의 기포가 3개의 작은 기포로 쪼개지는 것을 관찰할 수 있었다. 즉 다공판을 통과하는 기포에 추가적인 쪼개짐을 유발함으로써 큰 기포의 형성을 억제하고 기포의 상승 속도를 감소시키게 된다. 특히, 기포탑 반응기에 일정한 높이 간격으로 다공판을 설치할 경우, 기포의 쪼개짐과 뭉침 사이에 형성되는 동적 평형에 지속적인 영향을 주기 때문에 전체적인 기체 체류량을 증진시키는 효과가 나타난다.

Fig. 4는 다공판을 통과한 전후의 기포의 크기 분포 변화를 보여준다. 15 cm 반응기의 일정한 높이 위치($H/D=2.7, 5.3$)에 두개의 다공판을 설치하였다. 그리고 각각의 다공판을 통과하기 전후의 기포 크기 분포를 관찰하였다($H/D=1.3, 4.0, 6.7$). 그림에서 보는 바와 같이, 기포의 크기 분포가 확연하게 작은 쪽으로 이동하는 것을 확인할 수 있다. 특히, 첫 번째 다공판을 통과하기 전의 sauter 지름은 4.29 cm 인 반면 통과 후, 3.76 cm로 상당히 감소하였다. 나아가 두 번째 다공판을 통과한 후의 sauter 지름은 3.15 cm로 보다 작아지는 것을 확인할 수 있었다.

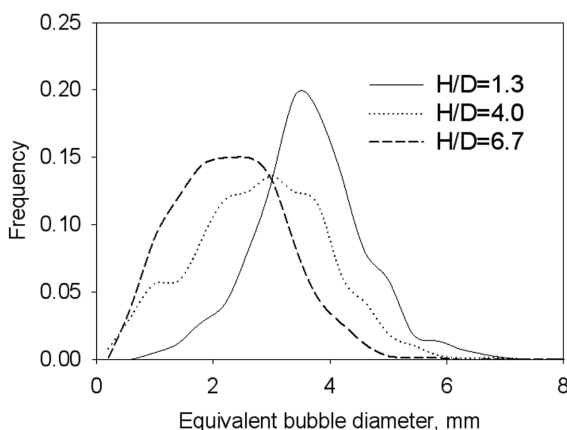


Fig. 4. Bubble size distribution variation after penetrating the porous plates.

다공판의 영향은 불균일 흐름 영역으로의 전이 공탑 가스 속도에서 최대를 보이고 불균일 흐름 영역에서 공탑 가스 속도가 계속해서 증가함에 따라, 그 영향은 점차적으로 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 불균일 흐름 영역에서 형성되는 강한 와류에 의하여 기포 사이의 쪼개짐과 뭉침이 매우 활발하게 일어나기 때문이다. 즉, 다공판에 의하여 일시적으로 기포의 쪼개짐과 뭉침 사이의 동적 평형이 작은 기포 크기 쪽으로 이동하였더라도, 불균일 흐름 영역에서 발생하는 강한 와류는 기존의 동적 평형으로의 빠른 회복을 야기한다. 또한 기체의 공탑 속도가 증가함에 따라 이러한 와류 특성은 보다 두드러지게 나타나기 때문에 다공판의 효과는 감소하게 된다.

3-2. 다공판의 배치방법에 따른 기포탑 반응기의 성능

위에서 살펴본 바와 같이, 다공판은 기포의 형성 및 거동에 강하게 영향을 미친다. 본 절에서는 이러한 다단 다공판의 배치간격에 따라서 높이별 기포탑 반응기의 성능 차이를 확인하였다.

Fig. 5는 15 cm 반응기의 하단으로부터 40, 80, 120 cm의 위치에 각각 다공판을 설치한 L_1, L_2, L_3 그리고 40, 80, 120 cm의 위치 모두에 설치한 L_{123} 에 대한 기체 체류량의 변화를 보여준다. 반응기 상부에 다공판을 설치한 경우(L_2, L_3)에 대해서는 기체 체류량의 변화가 거의 관찰되지 않은 반면, 반응기 하부에 다공판을 설치한 경우(L_1)에는 기체 체류량이 크게 증가하였다. 이것은 스파저 영역($H/D < 5$)에서 대부분의 기체 뭉침이 발생하기 때문인 것으로 보인다. L_1 의 경우, 다공판이 스파저 영역에 설치되기 때문에, 기포 뭉침이 발생하는 과정에서 다공판에 의한 추가적인 쪼개짐이 유발된다. 따라서 L_1 에서는 기포 뭉침을 최소화하고 기포를 작고 균일하게 유지할 수 있었던 반면, L_2, L_3 의 경우에는 이미 큰 기포가 형성된 상황에서 다공판에 의한 기포의 재분산에 한계가 있는 것으로 해석된다. 또한 40 cm의 일정한 간격으로 다공판을 설치한 L_{123} 의 경우에는 L_1 보다도 높은 기체 체류량을 보여주었다. 이것은 다공판에 의해 기포 뭉침을 최소화하고 일정한 크기의 작은 기포를 형성하였더라도, 이후 추가적인 다공판이 없을 경우에는 기포 쪼개짐과 뭉침의 동적 평형에 의하여 기포의 크기가 다시 서서히 증가하는 것을 의미한다. 따라서 기포의 크기 분포를 작고 균일하게 유지시키기 위해서는 일정한 높이 간격으로 다공판을 설치하는 것이 바람직하다.

Fig. 6은 공탑 가스 속도 4.54 cm/sec에서의 높이에 따른 기체 체류량의 변화를 보여준다. 전체적으로 반응기 높이가 증가함에 따라

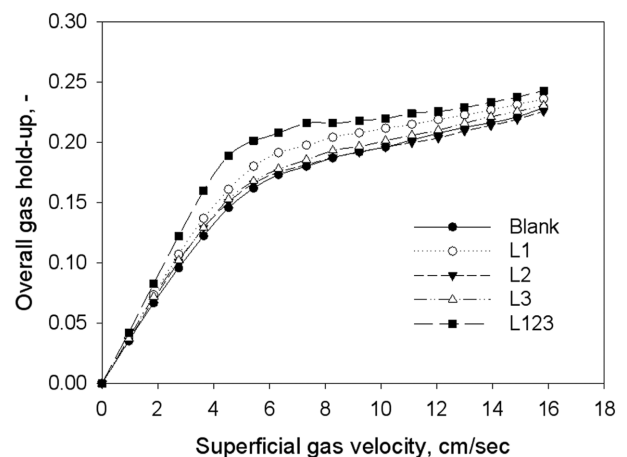


Fig. 5. Overall gas hold-up with different tray arrangements.

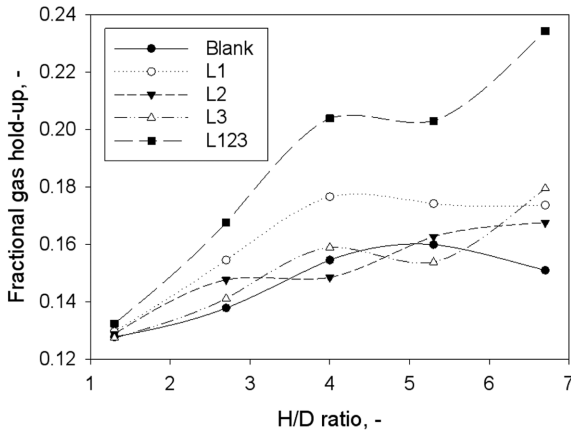


Fig. 6. Fractional gas hold-up with different tray arrangements ($u_G = 4.54$ cm/sec).

기체 체류량이 완만하게 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 반응기의 수두에 의한 압력 영향으로 해석할 수 있다. 즉, 반응기 하단부로 갈수록 반응기 내부의 액상에 의한 수두의 압력을 많이 받게 된다. 즉, 수두 압력에 의하여 반응기를 통과하는 기상에는 부피 수축이 일어나고, 이것은 실제 통과하는 기체의 공탑 속도 및 기체 체류량의 감소로 이어진다. 따라서 수두의 압력에 의한 영향을 최소화하기 위해서는 반응기 높이별로, 수두압력에 대한 보정이 이루어져야한다. 본 연구에서는 분리판의 배치방법에 따른 상대적인 기체 체류량을 비교하기 위한 것이기 때문에 위와 같은 수두압력 보정을 생략하였다. 그림에서 보는 바와 같이, L_{123} 의 높이에 따른 기체 체류량의 상승이 보다 가파르게 나타난다. 이것은 일정한 높이 간격으로 설치된 다단 다공판이 지속적으로 기포의 거동에 영향을 미쳤음을 의미한다. 즉 다공판에 의한 추가적인 기체 쪼개짐이 지속적으로 발생하였기 때문에, 다공판을 통과할 때마다 기포의 크기는 작아지고 기체 체류량은 증가하게 된다. 반면, L_1 의 경우, 초기 다공판이 설치된 위치에서의 기체 체류량은 점진적인 증가를 보이나, 그 이외의 높이에서는 일정한 값으로 수렴하는 것을 확인할 수 있었다.

3-3. 22m-벤치스케일 다단형 기포탑 반응기에서의 실증

본 절에서는 위에서 소개한 다단형 기포탑 반응기 시스템을 22 m 크기의 벤치 스케일 기포탑 반응기에 적용하여 그 효과를 확인하였다. 이를 위하여 지름 36.4 cm, 높이 22 m의 기포탑 반응기에 50 cm의 일정한 높이 간격으로 다공판을 설치하였다. 이 다공판은 유체역학 지름 1.2 mm의 기공 크기와 67.5%의 개구 비율을 특징으로 한다. 개구 비율이 50%보다 낮거나 기공크기가 0.5 mm보다 작을 경우, 다공판 자체가 기체 흐름의 저항체로 작용하기 때문에 다공판 아래에서 gas cap이 형성되는 것을 관찰할 수 있었다. 이러한 gas cap의 형성에 대해서는 Alvaré와 Al-Dahhan[9], Doshi와 Pandit[10], Dreher와 Krishna[11]의 연구 결과들에서도 확인된다. Gas cap은 걸보기 기체 체류량을 높이는 효과를 갖지만, 기체가 기포의 형태가 아닌 하나의 기체층 형태로 형성되기 때문에 실질적인 물질 전달 효율에서의 증진 효과를 기대하기는 어렵다. 따라서 이러한 gas cap의 형성을 최소화하면서 기체 체류량 및 물질 전달 효율을 극대화하기 위하여, 본 실험에서는 기공크기, 1.2 mm와 개구 비율, 67.5%의 스테인리스 철 재질의 다단 다공판을 사용하였다.

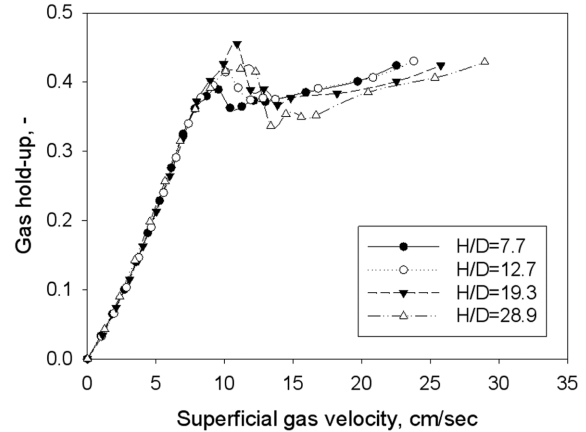


Fig. 7. Gas hold-up variation with various H/D ratios when using a 22 m tall trayed bubble column.

Fig. 7은 본 반응기를 사용하였을 때, 기체 공탑 속도에 대한 기체 체류량의 변화를 보여준다. 본 실험에서의 static liquid level은 약 16 m로서, 반응기 상부와 하부 사이에 수력학적 압력 차이가 1.6 기압에 이른다. 이것은 같은 부피 유속의 기체가 흐르더라도 기체 압축률의 차이에 의하여 반응기 상부에서의 기체 공탑 속도가 하부보다 약 2.6 배 크다는 것을 의미한다. 따라서 Fig. 7에서의 기체 공탑 속도는 액체상의 수력학적 압력에 의한 압축률을 반영하였다. 그림에서 보는 바와 같이, 균일계 흐름 영역에서는 반응기 높이에 따라서 일정한 기체 체류량을 나타내었다. 이것은 반응기 하단부로 갈수록 유체의 수두 압력에 의한 기체 체류량이 더 클 것이라는 일반적인 기대와 차이를 보인다[1]. 즉, 반응기 높이가 증가함에 따라서 기체 체류량이 감소하지 않고, 일정한 값을 보이는 것은 균일한 간격으로 배치되어 있는 다공판에 의하여 기포가 작게 분할되었기 때문으로 추정된다. 또한 전이 흐름 영역에서는 오히려 반응기 높이가 증가함에 따라서 기체 체류량이 보다 높은 값을 보이는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

다단형 기포탑 반응기에서의 다공판은 통과하는 기포에 추가적인 충격 운동량을 전달함으로써 기포를 보다 작게 쪼개는 역할을 한다. 즉, 기존의 기포 쪼개짐/붕괴 사이의 동적 평형에 영향을 줌으로써 다공판을 통과하는 기포의 크기를 감소시킨다. 이는 다공판 전후의 기포에 대한 쪼개짐 빈도수와 크기 분포 변화를 살펴봄으로써 확인할 수 있었다.

또한 세 종류의 다른 크기의 기포탑 반응기에 각각 다단형 다공판을 적용함으로써 반응기의 형태와 관계없이 다공판의 효과가 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 특히, 다공판의 설치 위치를 변화시키면서 유체의 거동을 살펴본 결과, 기포의 붕괴가 활발히 일어나는 스파저 영역에 다공판을 설치하는 것이 보다 효율적이며, 일정한 높이 간격으로 균일하게 배치하는 것이 기체 체류량 증가 측면에서 바람직하였다.

본 연구에서는 높이 22 m 벤치 스케일의 기포탑 반응기에서 다단 다공판의 효과를 확인할 수 있었다는 측면에서 그 의미가 더하다. 즉, 50 cm 간격의 일정한 높이에 다공판을 설치함으로써, 비 스파저 영역($H/D > 5$)에서의 기체 체류량 및 기포 크기를 제어할 수 있었다.

감 사

이 논문은 2011년도 정부(지식경제부) 재원으로 시행하는 석탄이
용 합성석유 제조기술 개발 과제(B1-2410)에 대한 연구 결과입니다.

사용기호

- u : rising velocity of a individual bubble[m/s]
 u_G : gas superficial velocity[m/s]
 σ : surface tension of liquid phase[N/m]
 d_b : bubble diameter[m]
 g : gravitational acceleration[m/s²]
 H : reactor height[m]
 D : reactor diameter[m]
 ε_g : gas hold-up[-]
 ρ_l : liquid density[kg/m³]
 ρ_g : gas density[kg/m³]
 ΔP_0 : pressure difference for constant column height before gas
bubbling
 ΔP_b : pressure difference for constant column height after gas bubbling

참고문헌

- Letzel, H. M., Schouten, J. C., Krishna, R. and van den Bleek, C. M., "Gas Holdup and Mass Transfer in Bubble Column Reactors Operated at Elevated Pressure," *Chem. Eng. Sci.*, **54**, 2237-2246(1999).
- Yang, J. H., Yang, J. I., Kim, H. J., Chun, D. H., Lee, H. T. and Jung, H., "Two Regime Transitions to Pseudo-homogeneous and Heterogeneous Bubble Flow for Various Liquid Viscosities," *Chem. Eng. Process.*, **49**, 1044-1050(2010).
- Clift, R., Grace, J. R. and Weber, M. E., "Bubbles, Drops and Particles," Dover publications, New York(1978).
- Polli, M., Stanislao, M. D., Bagatin, R., Bakr, E. A. and Masi, M., "Bubble Size Distribution in the Sparger Region of Bubble Columns," *Chem. Eng. Sci.*, **57**, 197-205(2002).
- Tsuchiya, K. and Nakanishi, O., "Gas Holdup Behavior in a Tall Bubble Column with Perforated Plate Distributors," *Chem. Eng. Sci.*, **47**, 3347-3354(1992).
- Thorat, B. N., Shevade, A. V., Bhilegaonkar, K. N., Aglawe, R. H., Veera, U. P., Thakre, S. S., Pandit, A. B., Sawant, S. B. and Joshi, J. B., "Effect of Sparger Design and Height to Diameter Ratio on Fractional Gas Hold-up in Bubble Columns," *Chem. Eng. Res. Des.*, **76**, 823-834(1998).
- Thaker, K. and Rao, D. P., "Effects of Gas Redispersion and Liquid Height on Gas-liquid Hydrodynamics in a Multistage Bubble Column," *Chem. Eng. Res. Des.*, **85**, 1362-1374(2007).
- Alvaré, J. and Al-Dahhan, M. H., "Liquid Phase Mixing in Trayed Bubble Column Reactors," *Chem. Eng. Sci.*, **61**, 1819-1835(2006).
- Alvaré, J. and Al-Dahhan, M. H., "Gas Holdup in Trayed Bubble Column Reactors," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **45**, 3320-3326(2006).
- Doshi, Y. K. and Pandit, A. B., "Effect of Internals and Sparger Design on Mixing Behavior in Sectionalized Bubble Column," *Chem. Eng. J.*, **112**, 117-129(2005).
- Dreher, A. J. and Krishna, R., "Liquid-phase Backmixing in Bubble Columns, Structured by Introduction of Partition Plates," *Cataly. Today*, **69**, 165-170(2001).