

Rectangular Chamber에서 수평 흐름 기체 분산 장치의 실험계획법에 의한 체류량 측정

김옥신, 이동현*, 김상돈¹
 성균관대학교 화학공학과, ¹한국과학기술원 생명화학공학과
 (dhlee@skku.edu*)

Measurement of Gas Phase Holdup by the Experimental Design in the Rectangular Chamber with a Horizontal flow Gas-Distributor

Kim Og Sin, Lee Dong Hyun*, Kim Sang Done¹
 Department of Chemical engineering, Sungkyunkwan University
¹Department of Chemical & Biomolecular engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology
 (dhlee@skku.edu*)

서론

오늘날 많은 산업 현장에 액체-기체, 액체-기체-고체의 직/간접적인 반응 내지는 액체-기체, 액체-기체-고체간의 효율적인 접촉에 대한 요구가 지속적으로 증가하고 있다. Co-current 흐름 시스템인 이젝터는 높은 계면적과 물질 전달속도를 제공하는 장치로서 다상간의 접촉 효율을 증가시키는 장치이며 현재 다상 시스템의 화학 공정 및 생화학 공정에서 그 사용이 점점 증가하고 있다[1]. 이젝터는 연속상인 고압의 액체 제트의 힘을 이용하여 분산상인 저압의 기체를 비말동반 함으로써 기체를 분산시키는 장치이다. 이젝터는 전형적으로 노즐부, 기체 흡입부, throat 부, 혼합부와 확산부로 구성된다. 이러한 이젝터들을 화학산업에 적용하기 위해서는 수력학적인 특성을 파악하여야 하며 특히 기체 흡입 속도와 기체상 체류량 (gas phase holdup) 등은 중요한 요소이다.

기포탑에서 이젝터 분산장치의 수력학적인 특성에 관한 많은 연구들이 있다 [1~6]. 그러나 이전의 많은 연구들은 기체 분산 장치로써 수직 방향 흐름을 가진 이젝터에 관한 연구들이 대부분이었다. 수평흐름 이젝터에서의 수력학적 특징들에 관한 몇몇의 연구가 있었지만 [7~9] 수직 방향 흐름 이젝터와 비교하여 상대적으로 적게 연구되어 왔다.

본 연구에서는 수평 방향 흐름 이젝터 형태의 기체 분산장치를 가진 0.0672m^2 ($0.28 \times 0.24 \times 1.2$ m)의 rectangular chamber에서 노즐 직경, 혼합부 길이와 같은 이젝터 geometry, 고압 제트인 물의 부피 유량, chamber 내 존재하는 물의 양이 기체상 체류량에 미치는 영향에 관하여 통계학적으로 설계된 실험 계획법에 근거하여 실험하였다. 또한 실험 변수에 따른 기체상 체류량의 결과를 이용하여 실험 변수와 기체상 체류량과의 상관관계식을 제시하였다.

실험

Fig. 1은 본 연구를 위해 제작된 수평흐름 이젝터를 가진 rectangular chamber의 개략도이다. 하단부가 rectangular 형태인 chamber로써 $0.24 \times 0.28 \times 1.2\text{m}$ 크기의 투명한 PC (polycarbonate)로 제작되었다. 불투명한 테프론으로 제작된 기체분산 장치인 이젝터는 chamber 하단부에 수평하게 설치하였다. 이젝터로 흘러 들어가는 액체 유량은 펌프의 주파수 (Hz)로 조절되며 전자유량계(electro magnetic flowmeter)로 측정된 유량은 컴퓨터에 저장된다. 펌프는 일본 Iwaki Co.의 magnet gear pump (Model; MDG-R15C100)를 사용하였고 전자유량계는 일본 Toshiba Co.의 LF-600 모델을 사용하였다. 기체상 체류량 (gas phase holdup)을 구하기 위해 차압계 (Omega Co., PX-154)를 이용하였으며 압력 tap은

chamber 하단부에서 각 10cm 간격으로 설치되었다. 기체상 체류량에 미치는 실험 변수들의 상호 영향 및 각 변수의 효과를 밝히기 위해 실험계획법에 의하여 실험을 실시하였다. 실험은 상온과 대기압에서 수행되었고 액체로 물을 사용하였다. 실험 변수와 범위, 실험 계획법을 위한 설계영역은 Table 1에 나타내었다. 실험계획법에 의하여 4가지 실험변수에 대해 2가지 수준(+1, -1 level)으로 요구되는 총 실험의 횟수는 16번이나 공정 자료 확보를 위해 실험계획을 포함하여 추가적으로 더 많은 실험을 실시하였다. 실험 시 발생하는 오류 측정을 위해 운전 변수의 영점(zero level)에서 5번 반복 실험하였다. 계승 설계 분석에서 모델식은 선형식으로 간주하며 ϵ_g 와 운전 변수사이의 모델식의 적합성을 확인한다. 4가지 요소에 대한 일반적인 선형식은 다음 식 (1)과 같다.

$$Response = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{14}x_1x_4 + b_{23}x_2x_3 + b_{24}x_2x_4 + b_{34}x_3x_4 + b_{123}x_1x_2x_3 + b_{124}x_1x_2x_4 + b_{134}x_1x_3x_4 + b_{234}x_2x_3x_4 + b_{1234}x_1x_2x_3x_4 \quad (1)$$

이때, Response; ϵ_g , b; regression 계수, x; Table 1에 정의된 요소들의 수준이다.

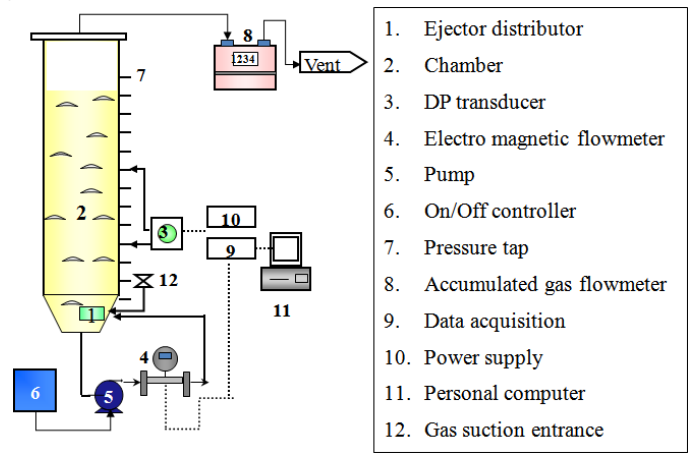


Fig. 1. Schematic diagram of experiment apparatus.

Table 1 Experimental variables, ranges, and scopes of the factors

variable		range	Symbol	Design Symbol	-1 level	+1 level	Zero level
Volumetric flow rate (m ³ /h)		0.65 ~ 0.90	G	a	0.82	0.90	0.86
Water content in a chamber (L)		15, 25, 30, 35	Q	b	15	35	25
Ejector geometry	Nozzle diameter (mm)	3, 4, 5, 6	N	c	4.0	6.0	5.0
	Mixing tube length(mm)	0, 6, 9, 12	M	d	6.0	12.0	9.0

$$a = x_1 = \frac{G - 0.86}{0.04}, \quad b = x_2 = \frac{Q - 25}{10}, \quad c = x_3 = \frac{N - 5.0}{1.0}, \quad d = x_4 = \frac{M - 9.0}{3.0}$$

결과 및 토론

본 연구의 기체상 체류량(ϵ_g)은 차압계에 의해 측정된 차압(ΔP)으로부터 식 (2)에 의해 계산된다.

$$-\frac{\Delta P}{L} = (\epsilon_l \rho_l + \epsilon_g \rho_g)g - \rho g \quad (2)$$

L = 두 압력 tap 사이 거리, ρ_g = 기체의 밀도, ρ_l = 액체의 밀도, g = 중력가속도 이다. y는 각 실험의 결과 ϵ_g 이고 N은 총 실험 횟수(=16), x_{ji} 는 요소별 조합 수준이라고 하였

을 때, 식 (1)의 regression 계수, b 는 다음과 같이 계산한다.

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ji} y_i}{N} \quad (3)$$

얻어진 regression 계수값은 $b_0=0.026$, $b_1=0.016$, $b_2=-0.001$ 등이었으며, 이렇게 얻어진 regression 계수의 중요성은 $t_j = \frac{|b_j|}{S_{b_j}}$ (S_{b_j} : j 번째 계수의 표본 표준 편차)의 식으로 t-test를 실시하여 판단하였다. 판단 기준인 $t_{0.05,3}=2.35$ 를 초과하는 regression 계수만을 유효하다고 하였을 때 실험 계획법의 factorial design에 의해 개발된 ϵ_g -모델식은 식(4)과 같다.

$$\epsilon_g = 0.026 + 0.016x_1 - 0.001x_2 + 0.009x_3 + 0.002x_4 + 0.003x_1x_3 + 0.002x_1x_4 + 0.005x_2x_3 - 0.004x_3x_4 + 0.009x_1x_2x_3 - 0.003x_1x_2x_4 - 0.005x_1x_3x_4 + 0.009x_2x_3x_4 + 0.005x_1x_2x_3x_4 \quad (4)$$

이때, x_1 = 물의 유량, x_2 = chamber 내 물의 양, x_3 = 노즐 직경, x_4 = 혼합부 길이를 나타낸다. 식 (4)에서 계수값은 변수의 영향력을 가리키며 계수의 기호는 변수의 방향을 나타낸다. Table 1의 실험 영역에서 ϵ_g 는 각각의 실험 변수들의 상호 작용에 의해 영향을 받고 있음을 알 수 있으며, 양수(+)는 운전 변수의 증가에 따라 ϵ_g 가 증가하는 것을 의미하며 음수(-)는 ϵ_g 가 감소하는 것을 의미한다. 식 (4)의 모델식으로부터 다른 변수와 비교하여 물의 유량이 최대 영향 변수임을 알 수 있다.

Fig. 2 (a),(b),(c)는 수평흐름 이젝터를 가진 rectangular chamber에서 ϵ_g 에 미치는 고압 제트 물의 부피 유량, chamber 내 물의 양, 노즐 직경의 영향을 나타낸다. 각 실험에서 확산부(diffuser)의 길이는 60mm로 고정하였는데 이전 Kim 등[10]의 실험으로부터 확산부의 길이 변화는 수력학적 특성에 큰 영향을 미치지 않았기 때문에 실험 변수에서 제외하였다. 고압 제트인 물의 유량이 증가함에 따라 ϵ_g 는 증가하나 chamber 내의 물의 양과 노즐 직경이 증가함에 따라 ϵ_g 는 감소한다. 그러나 혼합부 길이 변화는 ϵ_g 에 영향력이 적었으며 다른 실험 변수들에 비해 무시할 만했다. 기체상 체류량인 ϵ_g 는 기포 흡입 속도와 관계가 있으며 이 둘은 비례관계에 있다[10]. 기포 흡입 속도는 고압 제트의 유량이 증가할수록 증가하고 chamber 내의 물 양과 노즐 직경이 감소할수록 증가하므로[10] ϵ_g 도 기체 흡입 속도 증가에 따라 증가하게 된다.

또한 Kandakure 등 [11]은 기체 흡입 속도는 이젝터의 기체 흡입 입구와 throat 출구 사이 압력 차이에 영향을 받는다고 하였고 액체 제트가 고압으로 이젝터를 통과할수록 압력 차이는 커지게 된다. 동일한 조건에서 유량이 빠를수록 이젝터 내에 기체 흡입 입구와 throat 출구 사이 압력 차이는 커지게 된다. Chamber 내의 물의 양이 증가하면 이젝터 외부의 압력이 커지므로 기체 흡입을 위한 압력은 줄어들게 된다. 동일한 조건에서 노즐 직경이 작을수록 압력차이는 커지게 된다.

식 (5)는 Table 1의 실험 범위 내에서 실험 변수에 관해 구해진 상관관계식이다. 식의 regression 계수는 0.98이며 표준편차는 0.007이다.

$$\epsilon_g = (1.517 \times 10^4) G_I^{4.477} Q_I^{-1.638} D_N^{-5.015} L_M^{-0.016} \quad (5)$$

식 (5)에서 각 변수의 차수로부터 기체상 체류량에 가장 크게 영향을 미치는 변수는 고압 제트의 유량임을 알 수 있고 이는 식 (4)의 결과와도 일치하였다. 이와 달리 식 (5)에 표현되어 있듯이 혼합부의 길이는 다른 변수와 비교하였을 때 거의 무시할 만함을 알 수 있다.

Fig. 2(d)는 식 (5)에 의한 기체상 체류량의 예측값과 실험값을 비교하기 위한 그림이다. 그림에서 보듯이 실험값과 예측값이 대체로 잘 맞음을 알 수 있다.

참고문헌

1. Havelka, P., V. Linek, J. Sinkule, J. Zahradnik and M. Fialova, *Chemical Engineering*

- Science*, **52**, 1701 (1997).
- Nagel, O., H. Kürten and R. Sinn, *Chrmie-Ingenieur-Technik*, **42**, 474 (1970).
 - Zehner, P., *Chrmie-Ingenieur-Technik*, **47**, 209 (1975).
 - Bhutada, S. R. and V. G. Pangarkar, *Chemical Engineering Commnication*, **61**, 239 (1987).
 - Havelka, P., V. Linek, J. Sinkule, J. Zahradnik and M. Fialova, *Chemical Engineering Science*, **55**, 535 (2000).
 - Elgozali, A., V. Linek, M. Filalova, O.Wein and J. Zahradnik, *Chemical Engineering Science*, **57**, 2987 (2002).
 - Bhat, P.A., A.K. Mitra and A.N. Roy, *Canadian Journal of Chemical Engineering*, **50**, 313 (1975).
 - Biswas, M.N. and A.K. Mitra, *Canadian Journal of Chemical Engineering*, **59**, 634 (1981)
 - Henzler, H., *Germ. Chem. Eng.*, **6**, 292 (1983).
 - 김옥신, 이동현, 김상돈, *2007년도 화학공학회 봄 학술대회 발표*, **13** (2007).
 - Kandakure M. T., V.G. Gaikar and A.W. Patwardhan, *Chemical Engineering Science*, **60**, 6391 (2005).

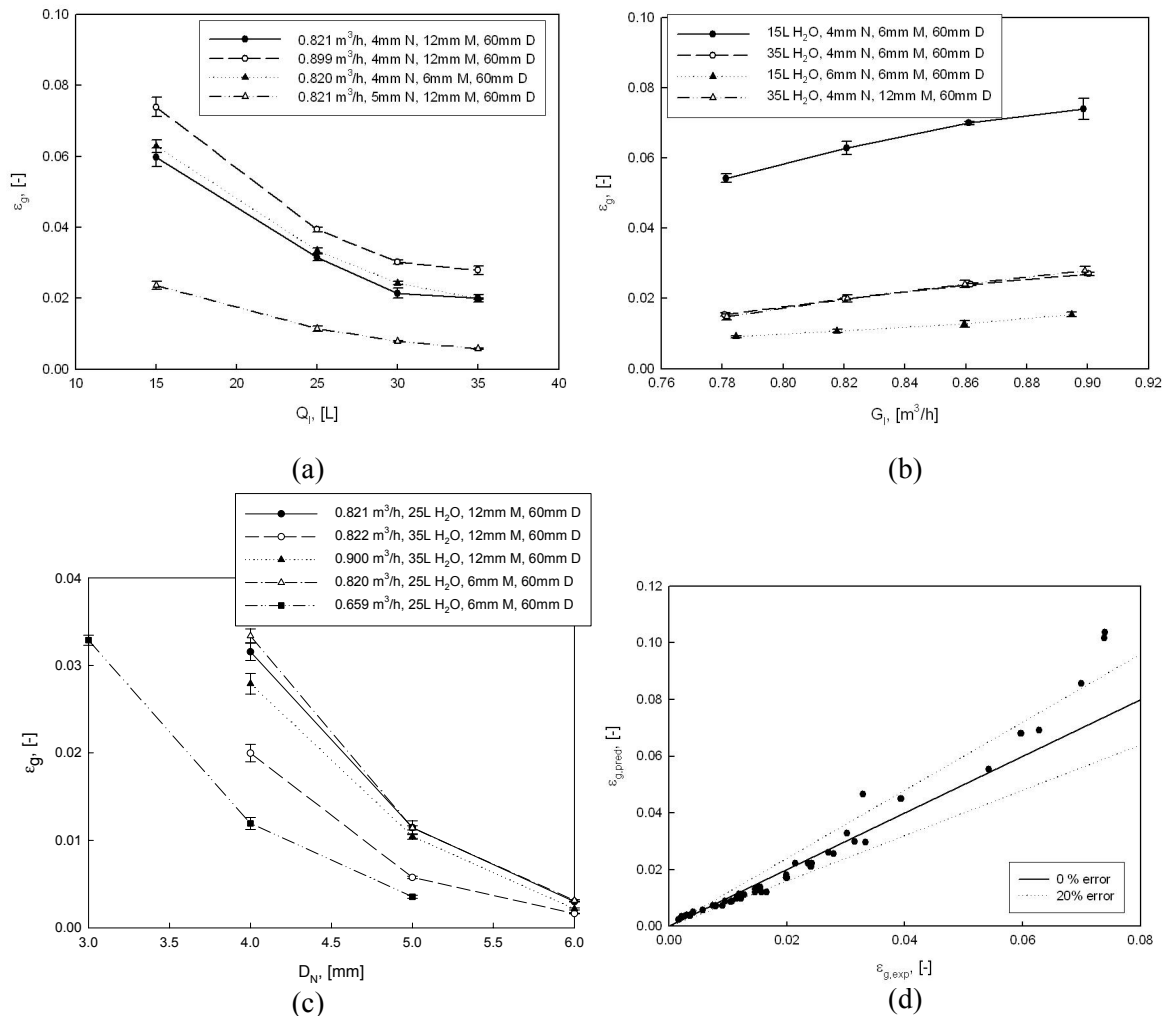


Fig. 2. variations of the gas phase holdup with increasing (a) volumetric flow rate of liquid, (b) water content in the chamber, and (c) nozzle diameter. (d) the plot of predicted values and experimental values of ϵ_g .