

내부 순환 장치의 크기 및 유속 변화에 따른 혼합특성

최윤찬 · 김동석 · 나영수 · 추석열 · †송승구

부산대학교 공과대학 화학공학과

Effect of Geometric and Dynamic Parameters on Mixing Characteristic in an Internal-Loop Apparatus

Yoon-Chan Choi, Dong-Seog Kim, Young-Soo Na
Suek-Yuel Choo, and Seung-Koo Song[†]

Dept. of Chem. Eng., College of Engineering, Pusan National Univ., Pusan 609-735, Korea

ABSTRACT

This paper discussed the dispersion effect according to the geometrical variation of an internal-loop apparatus by the method of pulse injection of a tracer. The Bodenstein number, which is the dimensionless group characterizing the effect of dispersion, was decreased with increasing the superficial gas velocity in the 50L and the 500L apparatus. But, in the 5L apparatus, the Bodenstein number was increased with increasing the superficial gas velocity in the range of 0 to 2cm/sec but above that range the rate of increase was dropped down to give a constant value because of the phenomenon of gas disengagement. The principle of similarity based on dimensional analysis was applied to design a pilot scale internal-loop apparatus. The effect of dispersion was examined in three different internal-loop apparatus to give the following correlation with major geometric and fluid dynamic properties as variables.

$$Bo = 4.014 Re_c^{0.117} Re_L^{-0.0065} (Hr/Dr)^{0.76} (Dd/Dr)^{-0.027}$$

서 론

내부 순환 장치(internal-loop apparatus : ILA)는 air-lift 장치의 일종으로, 내부에 설치된 포기관(draft tube)내로 유입된 기체에 의해 반응관(annular tube)에서의 유체 흐름이 하향으로 일어난 후 계속적으로 유체가 순환되는 장치이다. 이때, 반응관 내에 물보다 가벼운 입자가 사용되어져, 이 입자들이 하향으로 팽창된 층을 가지는 것을 역 유동층 반응기(inverse fluidized-bed reactor : IFBR)라고

한다. 즉, 역 유동층 반응기는 기체를 반응기내로 직접 분사하여 유동 현상을 발생시키는 air-lift 반응기와 부유상태로 유지시키는 유동층 반응기의 혼합 형태로 화학반응, 발효 및 생물학적 폐수 처리 등에 광범위 하게 응용될 수 있을 것으로 사료된다. 역 유동층 반응기를 생물학적 폐수처리에 사용할 경우 최적 설계 및 운전을 위하여 설계 변수와 운전 변수에 대한 정확한 정보가 요구된다. Chisti와 Moo-Young (1)은 기-액-고 3상 air-lift 반응기의 설계와 성능의 평가를 위한 기본 변수로서, gas hold-up, 기-액 계면적, 총괄 물질전달 계수, 액체의 혼합시간, 액체 순환 속도, 기·액상의 축 방향 분산 계수, 열전달

† Corresponding Author

계수 등이 요구된다고 보고하였다. 특히, 역 유동층 반응기와 같은 air-lift 형태의 반응기의 모델링과 대규모화는 앞에서 열거한 기본 변수들이 복합적으로 작용하므로 매우 힘든 경우가 대부분이고, 이를 위한 기본 변수들의 상관 관계는 아직 발표된 바가 없다. 이와 같은 변수들 중에서 축 방향의 액체 혼합은 상간의 물질전달과 반응물의 농도 분포 및 전하율에 영향을 많이 미치므로 반응기의 설계 및 공정 최적화에 필수적으로 고려되어야 한다. 생물학적 공정에서 미생물의 최대 성장 속도와 대사 생성물의 최대 생산량은 완전한 혼합상태에서 이루어지므로, 혼합 특성을 이해하는 것은 매우 중요하다. 실험실 규모의 air-lift 반응기에서는 2상 및 3상 반응기에 대한 혼합 특성을 규명한 연구보고(2, 3)는 있으나, 대규모화에 따른 혼합 과정을 설명한 경우는 없으므로, 본 연구는 역 유동층 반응기에 대해 물보다 가벼운 입자가 사용되기 전의 내부 순환 장치에 대하여 장치의 크기, 유입기체속도, 및 액체순환속도를 변화시키면서 파이롯 규모 내부 순환 장치의 기-액 혼합 현상을 고찰하고자 추적자 분산 실험을 행하였으며, 비 포기 순환 반응기에서 단일 순환 과정을 해석한 Blenke(2) 모델의 Bodenstein number(Bo)를 구하여 내부 순환 장치의 대규모화에 따른 혼합 특성의 변화에 대한 상관 관계를 고찰하였다.

재료 및 방법

실험장치

추적자 실험에 사용된 장치도는 Fig. 1과 같다. 장치의 하부에서 포기관으로 유입된 공기에 의해 넘친 액체는 반응관으로 흐르게 되어 연속적으로 순환하게 된다. 반응관 상부에 pH 미터를 장착하고 추적자로서 2N 황산을 순간적으로 투입한 후, 이때의 감도를 X-Y 기록계(Yokogawa, model 308951, Japan)로 기록하였다. 장치는 5L, 50L, 500L의 크기로 세 가지 종류가 사용되었고, 각 장치의 제원은 Table 1과 같다. 유입 기체 유량은 로타미터(Dwyer, USA)로 조절하였고, 동일한 유입 기체 유량하에서 반응기내 액체 수위를 변화시키면서 액체순환속도의 변화를 유도하였다. 사용된 기체는 공기이며, 액체는 20°C의 수도수이다.

차원해석

축 방향 분산 계수 D 는 장치의 기하학적 변수(반응관의 직경, Dr , 높이, Hr , 포기관의 직경, Dd),

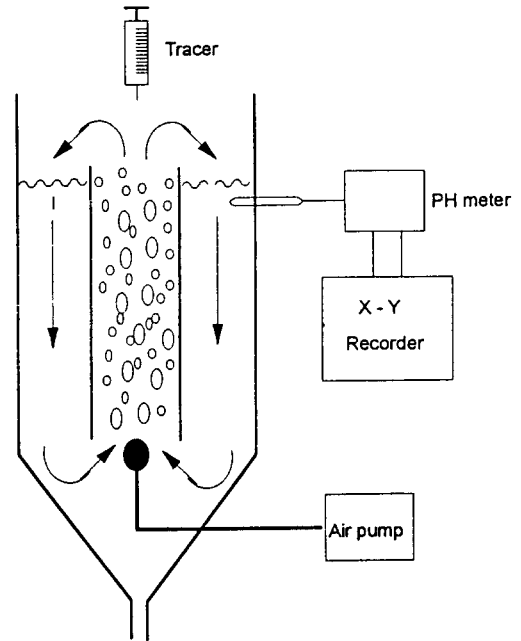


Fig. 1. Schematic diagram for the experiment of tracer dispersion.

동역학적 인자(공탐기체속도, V_s , 액체순환속도, U) 및 기·액체의 물성(기체와 액체의 동점도, ν_1 , ν_2) 변화에 영향을 받으므로 이들 변수들을 차원해석을 통하여 다음과 같은 무차원 상관 관계식을 얻었다.

$$D = f(Dr, Hr, Dd, Vs, U, \nu_1, \nu_2) \quad (1)$$

Buckingham의 π 정리에 따라 (1)식을 무차원 변수들의 항으로 나타내면 (2)식과 같으며,

$$Bo = A Re_c^a Re_l^b (Hr/Dr)^c (Dd/Dr)^d \quad (2)$$

여기서, $Bo = \frac{U \times L}{D}$ 이고, L 은 순환에 있어서의 특성 길이를 나타낸다. Re_c 는 기체상에서의 Reynolds 수이고, Re_l 은 액체상에서의 Reynolds 수이며, 이들은 공탐기체속도(V_s)와 액체순환속도(U)를 기체 및 액체의 동점도에 대한 항으로 표현되며, Re_c 에서는 포기관의 직경이, Re_l 에서는 반응기의 직경을 사용하였다. 기하학적 인자들의 비는 대규모화가 기하학적 상사성(geometric similarity)에 바탕을 둔을 의미한다. 또한, A 는 상수이며, a , b , c 그리고 d 는 지수항이다.

Table 1. Geometric specification of each apparatus.

Apparatus volume (L)	Apparatus height (cm)	Apparatus diameter (cm)	Draft tube height (cm)	Draft tube diameter (cm)	Apparatus height to diameter (Hr/Dr)	Draft tube diameter to Apparatus diameter (Dd/Dr)
5	100	8	90	2.4	12.5	0.3, 0.45, 0.6
				3.6		
				4.8		
50	100	30	100	15	3.33	0.5
500	400	40	280	20	10	0.5

분석방법

식(2)의 계수를 구하기 위하여 SAS/STAT 다중 회귀 분석법(5)을 이용하였다.

결과 및 고찰

내부 순환 장치내에서의 추적자 분산

내부 순환 장치내로 유입된 추적자는 액체 순환으로 인한 역혼합, 포기관과 반응관(annular region)에서의 축방향 분산(axial dispersion), 기체가 분산되는 곳에서의 난류 혼합 등의 형태로 분산된다. 이때의 혼합 특성은 축 방향 분산 모델로 해석되며, 축방향 분산계수, D 는 무차원 변수인 Bodenstein number(Bo)의 형태로 나타낼 수 있다. Bo 수는 확산 전달속도(diffusive transport rates)에 대한 대류 전달속도(convective transport rates)의 비로서, 역 혼합(back mixing)이 증대되면 그 값은 감소하고, 그 값이 증가되면 혼합의 경향은 프러그 흐름으로 접근하게 된다(3, 4). Fig. 2는 5L와 500L 장치에서 공압 기체 속도가 각각 2.01cm/s, 2.65cm/s 일때 시간의 경과에 따른 추적자의 농도 변화를 나타내고 있다. Fig. 2에 사용한 추적자의 상대 농도란 기록계상의 검출 농도 최대점 및 최소점을 각각 100%, 0%로 환산한 농도를 의미한다. 추적자는 장치내를 순환하며, 한번의 순환과정에서 10~20% 정도씩 peak가 감소되어 6~10회 정도의 순환에서 거의 분산되었다. Bo 수는 Blenke의 연속 순환 표현식을 사용하여 계산되었다(4). Fig. 3에 기체 속도에 따른 Bo 수의 변화를 나타내었다. 이때 각 장치의 액체순환속도를 일정하게 조절하였으며, 5L 장치에서는 포기관의 직경과 반응관의 직경비(Dd/Dr)를 0.45로 하였고, 50L, 500L 장치에서의 Dd/Dr 은 0.5로 하였다. Fig. 3에서 5L 장치는 기체 속도

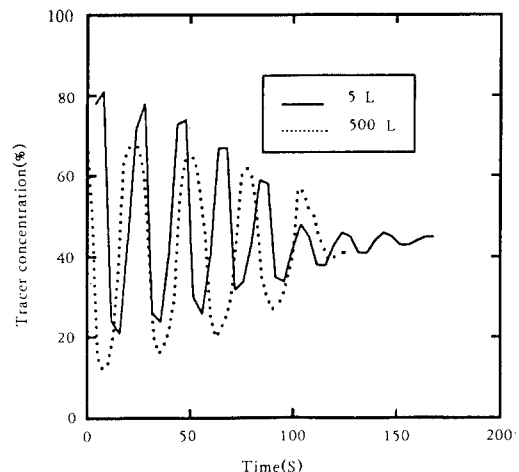


Fig. 2. Impulse response of the circulation flow in a bench and a pilot-scale ILA. Superficial gas velocity(cm/s): solid line; 2.01, dashed line; 2.65.

의 증가에 따라, Bo 수는 증가하는 경향을 나타내고 있으나, 기체 속도가 2cm/s 이상에서는 증가폭이 둔해지고 있는데, 이는 높은 기체 속도에서는 포기관 내에서 발생한 기포들이 반응관을 통과하여 다시 재순환 됨으로써 동반 기포에 의한 액체혼합, 즉 가스 해리(gas disengagement) 현상으로 사료되었다. 50L와 500L 장치는 모두 기체 속도가 증가함에 따라 Bo 수는 감소하고 있는데, 이는 반응관 직경의 증대에 따라 가스 해리 현상의 영향은 미미하고 기체 속도의 증가에 따른 액체순환속도의 증가로 역 혼합이 증대됨으로 Bo 수는 감소하는 것으로 생각되었다. 또한 500L 장치에서의 Bo 수는 50L 장치에서 보다 기체 속도가 훨씬 낮은 영역에서 감소

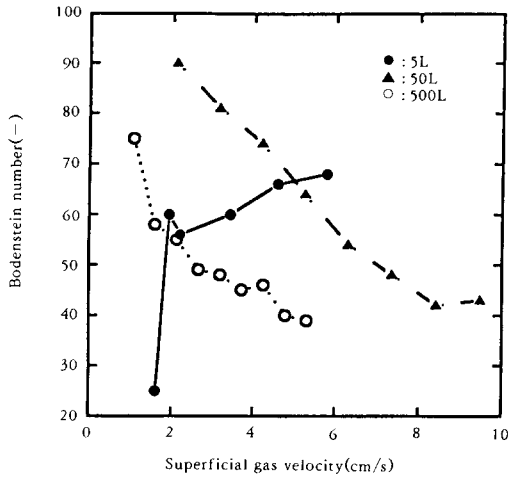


Fig. 3. The variation of Bodenstein number with the superficial gas velocity for three different sizes ILAs.

하는 것으로 보아 대규모화에 의하여 혼합 강도는 더욱 증대되는 것으로 사료되었다.

혼합 특성의 무차원 상관관계
 기상 Re_G 수가 Bo 수에 미치는 영향

Fig. 4는 Bo 수에 대한 기상 Re_G 수의 영향을 알기 위하여 일정한 액체순환속도에서 세가지 크기의 장치에 대해 공탐기체속도를 달리하여 Re_G 의 변화에 대한 Bo 수의 변화를 나타내었다. 액체순환속도는 공탐기체속도, 반응관과 포기관의 직경비(Dd/Dr), 장치내 액체수위 등의 기하학적 인자에 영향을 받으므로 액체순환속도는 각 장치별로 Dd/Dr , 액체수위, 공탐기체속도의 변화에 따라 결정되므로 5L 장치에서는 Dd/Dr 을 0.45로, 50L, 500L 장치에서는 0.5로 두고, 공탐기체속도에 따른 액체순환속도를 구하였다. 세가지 크기의 장치에서 액체순환속도가 동일하게 나타나는 점에서 Bo 수를 계산하여야 되지만, 액체순환속도가 모든 장치에서 동일하게 나타나게 할 수 있는 조건을 찾기는 매우 어려웠다. Fig. 4의 각점은 각 장치에서 액체순환속도가 5.6~5.8cm/s, 8.2~8.5cm/s, 9.8~10cm/s 사이의 범위에서 Re_G 가 Bo 수에 미치는 영향을 나타내었다. Re_G 가 증가함에 따라 Bo 수는 증가하다 감소하는 경향을 보이고 있는데, 즉, 공탐기체속도가 증가함에 따라 앞서 설명한 가스 해리 현상과 역혼합의 효과가 작용하기 때문으로 판단되었다. 또한, 액체순환속도가 5.6~5.8cm/s인 영역과 9.8~10cm/s인 영역에서 기

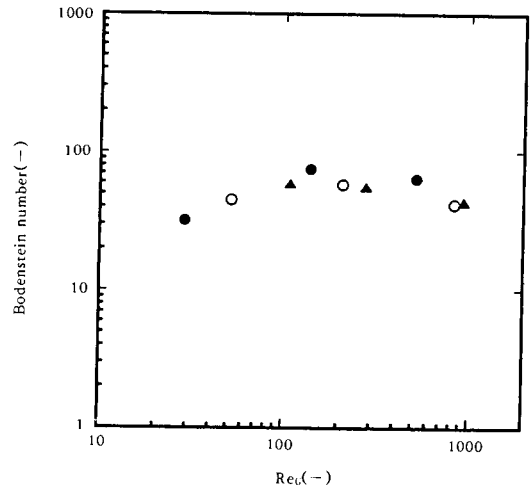


Fig. 4. Effect of gas phase Reynolds number(Re_G) on Bodenstein number in ILAs.
 Liquid circulation velocity(cm/s): ●; 5.63-5.83; ○; 8.23-8.5; ▲; 9.08-10.

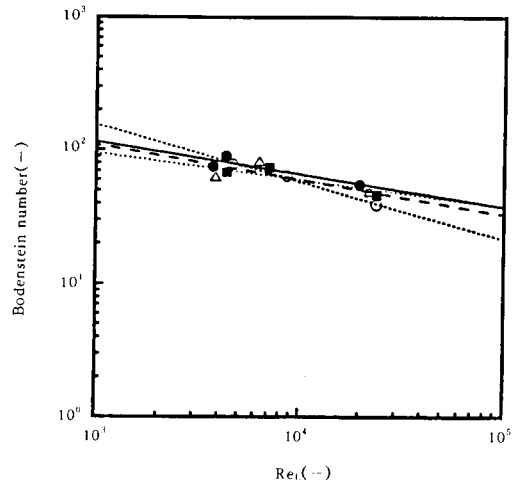


Fig. 5. Effect of liquid phase Reynolds number (Re_L) on Bodenstein number in ILAs.
 Superficial gas velocity(cm/s): ●; 2.1-2.21; ■; 4.25-4.5; ○; 5.3-5.7; △; 3.1-3.44.

울기가 양에서 음으로 변화하고 있는데, 액체순환속도가 큰 영역에서는 공탐기체속도가 증가하면 역 혼합의 증가폭이 커져 Bo 수가 감소하는 것으로 사료되었다.

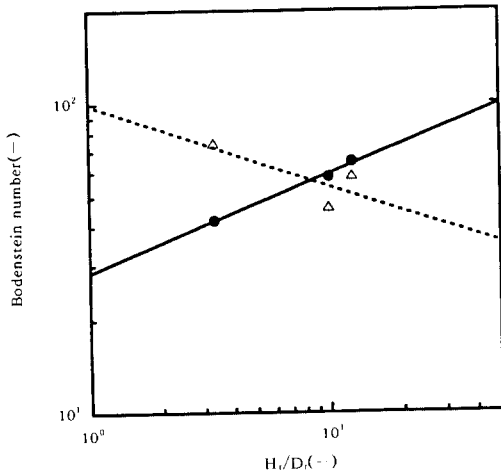


Fig. 6. Effect of ratio of reactor height and diameter(H_r/D_r) on Bodenstein number.

액상 Re_L 수가 Bo 수에 미치는 영향

Fig. 5에 각 장치에서 공탐기체속도가 2.1~2.2cm/s, 4.2~4.5cm/s, 5.3~5.7cm/s, 3.2~3.4cm/s인 범위에서 Re_L 의 변화에 대한 Bo 수의 변화를 나타내었다. 직선은 각 점들을 직선화한 것이며, 기울기는 $-0.24, -0.25, -0.42, -0.2$ 로 구해졌다. 전체적으로 Re_L 의 증가에 따라 Bo 수가 감소하는 것은 액체순환속도가 증가되면 역 혼합의 증대로 인한 Bo 수가 감소하기 때문이며, 공탐기체속도가 낮은 영역보다 높은 영역에서 기울기가 음의 방향으로 커지는 것으로 보아, 공탐기체속도가 큰 영역에서 액체순환속도의 영향이 훨씬 증가됨을 알 수 있었다.

포기관 직경에 대한 높이비(H_r/D_r)의 영향

포기관의 직경에 대한 높이비가 Bo 수에 미치는 영향을 고찰하기 위해서는 다른 변수들은 모두 일정하게 유지시켜야 하지만 액체순환속도는 반응관과 포기관의 직경비와 공탐기체속도에 의해 결정되므로 Re_c 와 Re_L 을 동시에 일정하게 유지시킬 수는 없었다. 그러나, Re_c 와 Re_L 이 각각 동일하게 나타나는 두 경우로 분리하여 Bo 수에 미치는 H_r/D_r 의 영향을 나타낼 수는 있었으므로 각각의 경우에 대한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6의 실선은 액체순환속도가 5L, 50L, 500L 장치에서 각각 8.023, 8.286, 8.235cm/s일 때 H_r/D_r 에 대한 Bo 수의 변화

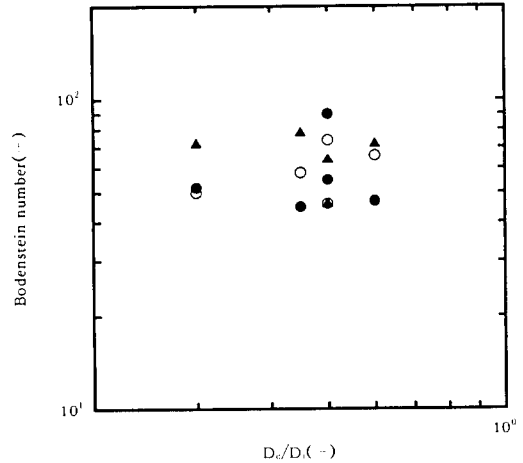


Fig. 7. Effect of ratio of reactor diameter and draft tube diameter(D_d/D_r) on Bodenstein number.

를 나타내었으며, 점선은 공탐기체속도가 4.59, 4.21, 4.244cm/s일 때의 결과를 나타내고 있다. Re_L 이 일정할 때 H_r/D_r 의 증가에 따라 Bo 수는 증가하고 있으나, Re_c 가 일정할 때는 H_r/D_r 의 증가에 따라 Bo 수가 감소하고 있는데, 이는 고찰 1)항과 2)항에서 같이 Bo 수에 미치는 Re_c 와 Re_L 의 영향과 동일한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있었다.

포기관의 직경에 대한 반응관 직경비(D_d/D_r)의 영향

Fig. 7은 반응관과 포기관의 직경비(D_d/D_r)에 따른 분산현상을 나타내고 있다. 5L 장치는 D_d/D_r 을 0.3, 0.45, 0.6으로 변화시켰고, 50L와 500L에서는 0.5로 하여 Fig. 7의 각점들을 구하였으며, 이때 Re_c 를 일정하게 유지시켰다. 각점들의 분산정도가 크게 나타나고 있어 그 영향을 정확하게 판단하기는 어려우며, Re_L 을 일정하게 유지시켰을 때도 분산의 정도가 일정한 경향을 나타낸다고 판단하기는 어려웠다.

최종결과식의 고찰

본 실험의 98개의 자료를 적용한 결과, 유의 확률값을 나타내는 $Prob>F$ 의 값이 0.05보다 극히 작은 0.0001로서 (2)식의 회귀 모형이 자료에 잘 적합되고 있음을 나타내고 있었다. 회귀선의 적합성 여부를 시사하는 또 다른 정보인 결정 계수 R-square의

요 약

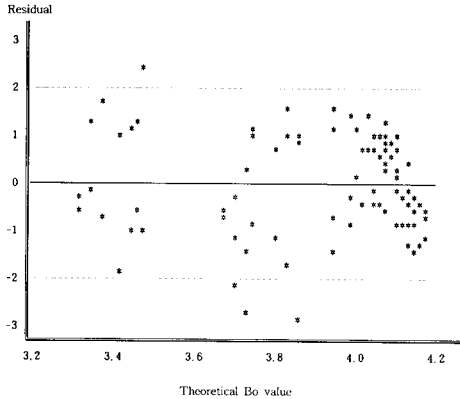


Fig. 8. Relationship between theoretical Bo values and residual.

값은 0.3453으로 낮게 나타났다. 결정 계수값이 1에 가까울수록 회귀선의 적합도가 크게 되나, 단순 선형 회귀 분석에서는 결정 계수의 값이 1에 가깝게 나타나는 경우가 많으며, 다중 회귀 분석에서 결정 계수의 값이 0.5 이하로 나타나도 모델에 잘 적용되는 경우가 매우 많은 것으로 알려져 있다(5). 변수들 사이의 상관관계를 고찰하기 위하여 Pearson 상관계수를 고찰한 결과, Bo 수에 가장 큰 영향을 미치는 기하학적 인자는 포기관의 높이에 대한 직경비 (Hr/Dr)로 판단되었다. 또한, Re_c 와 Re_L 의 상관관계는 0.68로 나타나고 있어, 이들 두 변수의 의존성은 매우 높았고, Re_c 에는 Dd/Dr 이, Re_L 에는 Hr/Dr 이 가장 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다. 추정된 계수들의 값을 (2)식에 대입하여 최종식을 얻었다.

$$Bo = 4.014 Re_c^{0.117} Re_L^{-0.0065} (Hr/Dr)^{0.76} (Dd/Dr)^{-0.027} \quad (3)$$

잔차 검증

식 (3)의 결과에서 계산된 Bo 수와 실험에서 구한 Bo 수를 비교하여 그 잔차를 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8의 잔차도는 곡선 모형이 필요함을 시사하거나, 상수 분산 가정이 어긋남을 나타내지 않는 이상적인 잔차도 형태(5)를 나타내고 있어 구하여진 회귀선이 적합함을 나타내고 있었다.

내부 순환 장치를 대규모화함에 따른 혼합특성의 변화를 추적자의 분산실험을 통하여 고찰하였다. 분산특성을 나타내는 무차원수 Bodenstein 수를 5L, 50L, 500L 규모의 세 장치에서 공탐기체속도, 액체 순환속도, 포기관의 높이에 대한 직경비의 변화, 및 반응관의 직경에 대한 포기관의 직경비의 영향에 따라 나타내었다. 5L 규모의 장치에서 Bo 수는 공탐기체속도의 증가에 따라 증가하다 가스 해리 현상의 발생으로 증가폭이 둔해지는 경향을 나타내었으며, 50L와 500L 장치에서는 공탐기체속도의 증가에 따라 Bo 수가 감소하였는데, 이는 역혼합의 영향이 크게 나타난 것으로 판단되었다. 또한, 500L 규모 장치에서 Bo 수의 변화는 50L 장치에서 보다 낮은 공탐기체속도하에서 변화하는 것으로 보아 대규모화에 따라 혼합이 더욱 빨리 발생함을 알 수 있었다. 차원 해석을 통하여 각 변수들간의 상관관계를 구하였고, 회귀분석을 통하여 다음과 같은 결과식을 구하였다.

$$Bo = 4.014 Re_c^{0.117} Re_L^{-0.0065} (Hr/Dr)^{0.76} (Dd/Dr)^{-0.027}$$

감 사

본 연구는 “아파트 생활오수처리를 위한 역 유동층 생물막 반응기의 연구” 과제에 대한 1994년도 학술진흥재단의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 이에 깊이 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. M. Y. Chisti and M. Moo-Young(1987), *Chem. Eng. Comm.*, **60**, 195.
2. H. Blenke(1979), “Loop Reactors”, *Adv. Biotech. Eng.*, **13**, 121.
3. P. R. Fields and K. H. Slater(1983), *Chem. Eng. Sci.*, **38**, 647.
4. 최윤찬, 서정호, 박영식, 추석렬, 송승구(1995), *화학공학, 투고중*.
5. 성내경(1994), “SAS/STAT-회귀분석”, 자유아카데미, SAS 해설 제 3권.