

축 방향 분산 모델의 해석적 방법에 관한 연구

정일현* · 전해수

*단국대학교 공과대학 화학공학과
고려대학교 공과대학 화학공학과

(1986년 10월 13일 접수, 1987년 2월 26일 채택)

A Study on the Discrimination of Analytical Method in Dispersion Model

Il-Hyun Jung* and Hai-Soo Chun

* Department of Chemical Engineering, College of Engineering, Dankook University
Department of Chemical Engineering, College of Engineering, Korea University, Seoul 136, Korea
(Received 13 October 1986; accepted 26 February 1987)

요 약

반응기 내 유체를 전기화학 반응시켜 만든 추적자를 이용하여 반응기를 해석하였다. 주입점 전역에서 추적자가 균일하게 발생되도록 분산판을 이용하여 이상적인 단계 함수를 주입하여 이때 얻어진 응답만으로 고정층 반응기에 대한 단일 매개 변수(one parameter) 모델식의 축 방향 분산 계수 산출의 여러 방법을 비교 검토하였다. 그 결과 분포 곡선의 최대치는 실험 값보다 모두 크게 나타났으며, 오차가 가장 작은 방법(method) III는 1.04% 이내의 오차를 나타내었다. 이 방법으로 부터 구한 축 방향 분산 계수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D_L = 0.824 U_s^{0.933} d_p^{0.933}, (\text{cm}^2/\text{sec})$$

Abstract—The reactor was analysed by a tracer, which was made by electrochemical reaction out of fluid. Tracer was injected as a step of idealized shape in distributor, which evenly made the tracer. Axial dispersion coefficients are estimated from various methods of parameters model in inert fixed bed reactor by the analysis of the ideal step function technique. As a result, maximum values of distribution curves are higher than experimental value, and the response signals predicted are then compared with the measured signal; Method III agrees well with the measured signal; Method IV is very close to the measured signal, but Method II deviates significantly from the measured signal; Method IV is found to give parameter values close to those of the Method III analysis, from which the most reliable values are obtained. Next to the Method IV are, in order of Method IV fitting, the Method V and Method I and Method II. The experimental error of Method III is 1.04 %. Using the axial dispersion coefficient estimated from Method III, we could obtained the following relationship.

$$D_L = 0.824 U_s^{0.933} d_p^{0.933}, (\text{cm}^2/\text{sec})$$

1. 서 론

고정층 반응기는 충전물의 영향으로 반응물질 간의

접촉 면적을 크게 하고 반응 체류 시간 조절이 용이한 장점이 있어 암모니아 합성공업, 무수프탈산 합성 등 대단위 공업에 이용되고 있다. 이러한 반응기의 이력을

이해하는 데는 실제 단순한 모델이 보통 요구되며 이의 하나가 단일 매개 변수 모델인 분산플러그흐름(dispersed plug flow) 모델이다.

반응기의 비이상성을 나타내주는 축 방향 분산 계수를 산출하기 위해 단일 매개 변수 모델인 분산플러그흐름 모델로부터 여러 방법들이 제안되었다. 그중 처음 제시되었던 분산법(variance method)은 그 산출 방법이 비교적 간편하여 이제까지 많이 사용되어 왔다. 그러나 이 방법에 의해 구한 C-curve와 실측 C-curve를 비교해 보면 상당한 오차가 있고 특히 곡선의 꼬리 부분에서 더욱 큰 오차가 있다. 그래서 실측 C-curve에 좀더 접근하기 위하여 가중 모멘트법(weighted moment method)과 전달 함수법(transfer function method) 등이 제안되었으며 이들 방법들은 가중치(weighting factor; t^n , e^{-st} , $t^n e^{-st}$)를 실험치에 가중시켜 꼬리 부분에서 오차를 줄이려고 하였다. 이들 방법 모두 입력곡선(input curve)과 응답곡선(response curve)을 동시에 해석해야 하므로 대단히 복잡하여 실험 오차가 발생된다.

본 연구에서는 입력곡선(input curve)과 응답곡선(response curve)을 동시에 해석해야 하는 번거로움을 없애기 위해서 분산판(전극 역할을 할 수 있는 다공판)에 전류를 공급하여 그 표면 전역에서 생성된 물질이 추적자 역할을 할 수 있도록 만들어서 주입점 전역에서의 추적자 농도가 균일하게 되도록 하는 이상적인 추적자 주입 방법을 이용하였다. 이와 같은 추적자 주입 기법에 의하여 얻은 응답 자료를 앞에 언급한 여러 방법(method)에 적용하여 각 방법(method)에서의 분산 산출 계수를 비교하고, 실제 C-curve와 각 방법으로 부터 나타내어진 C-curve의 비교로부터 모델의 특성을 해석하고 오차가 가장 적게 나타나는 방법으로 부터 정확한 분산 계수를 구하고자 한다.

2. 이 론

충진층 반응기 내 흐름 현상을 단일 매개 변수인 축 방향 분산 계수로 나타낸 분산 모델식은 다음과 같다.

$$D_L \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - U \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{\partial c}{\partial t} \quad (1)$$

식(1)의 해를 구하기 위해서 다음과 같은 초기조건과 경계조건을 고려할 수 있다.

$$\text{초기조건: } c(x, 0) = 0 \quad \text{at } t = 0$$

$$\text{경계조건: } c = c_0(t) \quad \text{at } x = 0, t \geq 0$$

$$c = \text{finite at } x = \infty$$

식(1)을 라플라스 변환(Laplace transform)으로 정리한 후 위의 초기조건과 경계조건을 이용하여 해를 구하면 다음과 같다.

$$\ln \frac{\int_0^\infty c e^{-st} dt}{\int_0^\infty c_0 e^{-st} dt} = \frac{Ux}{2D_L} (1 - \sqrt{1 + 4D_L s/U^2}) \quad (2)$$

식(2)에서 변수 x 를 실제 반응기 길이 L 로 표시하고 무차원항군(dimensionless group)인 $Pe (= UL/D_L)$ 와 평균 체류 시간, $\tau (L/U)$ 를 이용하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \ln \Psi(s) &= Pe/2 (1 - \sqrt{1 + 4\tau s/Pe}) \\ \Psi(s) &= \int_0^\infty c e^{-st} dt / \int_0^\infty c_0 e^{-st} dt \end{aligned} \quad (3)$$

2-1. 모멘트법과 분산법(Moment method and Variance method)

식(3)을 1 차 모멘트로 표시하면

$$\frac{\int_0^\infty t(c - c_0) dt}{\int_0^\infty c_0 dt} = L/U \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\int_0^\infty t^2(c - c_0) dt}{\int_0^\infty c_0 dt} + \frac{(\int_0^\infty t c_0 dt)^2 - (\int_0^\infty t c dt)^2}{(\int_0^\infty c_0 dt)^2} \\ &= 2D_L \cdot L/U^3 \end{aligned} \quad (5)$$

평균 체류 시간과 분산(variance)의 정의로부터 식(5)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma^2 - \sigma'^2 = 2D_L \cdot L/U^3 \quad (6)$$

여기서 분산은 실측곡선 $c(t)_{exp}$ 로부터 얻을 수 있으므로 식(6)을 이용하면 D_L 의 값을 산출할 수 있다. 일반적으로 n 차 모멘트는 다음과 같이 표시된다.

$$\Phi(n, 0) = \int_0^\infty t^n c(t) dt \quad (7)$$

또한 라플라스 변환에 t^n 를 가중시키면 그 일반적인 수식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Phi(n, s) = \int_0^\infty c(t) t^n e^{-st} dt \quad (8)$$

식(8)에서 가중치(weighting factor) $t^n \cdot e^{-st}$ 는 s 값이 증가함에 따라 짧은 시간안에 그 값이 영으로 접근되며 이는 이론농도 $c(t)_{theo}$ 가 실측농도 $c(t)_{exp}$ 에 비하여 장시간에 걸쳐 긴 꼬리가 나타나는 것을 실측치에 접근시키기 위해서 부가시킨 것이다. 또한 식(7)은 식(8)

에서 s 가 영인 경우에 해당된다.

2-2. 가중 모멘트법(weighted moment method)

모멘트에 가중치를 부가시킨 가중 모멘트를 일반적으로 표시하면 다음과 같다.

$$\Phi(n, s) = \int_0^\infty c(t) t^n e^{-st} dt = (-1)^n \frac{d^n}{ds^n} [\bar{c}(s)] \quad (9)$$

식(9)의 수학적 처리 방법에 따라 매개 변수를 산출하는 여러 방법이 얻어진다.

$$\ln \Psi(s) = \ln \Phi(0, s) = Pe/2 (1 - \sqrt{1 + 4\tau s/Pe}) \quad (10)$$

$$\Psi'(s)/\Psi(s) = \Phi(1, s)/\Phi(0, s) = \tau (1 + 4\tau s/Pe)^{-1/2} \quad (11)$$

$$\Psi''(s)/\Psi(s) - [\Psi'(s)/\Psi(s)]^2 = \Phi(2, s)/\Phi(0, s) - [\Phi(1, s)/\Phi(0, s)]^2 = 2\tau^2/(Pe + 4\tau s) \quad (12)$$

$s=0$ 일 때 식(11)과 식(12)는 각각 τ 와 $2\tau^2/Pe$ 의 값을 가지며, 수식을 간략하게 표시하기 위해서 식(10), (11), (12)를 각각 Π_0 , Π_1 , Π_2 로 놓는다. 이상의 수식들로부터 매개 변수를 산출하기 위한 여러 방법도 출되는 것은 모멘트 차수의 조합 방법에 따라 그리고 s 값에 따른 직접적인 산출 방법이 가능하기 때문이다.

2-3. 방법 I [고정된 s 값을 이용 $\Phi(0, s)$ 와 $\Phi(1, s)$ 계산]

식(3), (10), (11)로부터

$$\tau = -\frac{\Pi_0 \Pi_1}{\Pi_0 + 2s \Pi_1} \quad (13)$$

$$Pe = \frac{\Pi_0 (\Pi_0 + 2s \Pi_1)}{\Pi_0 + s \Pi_1} \quad (14)$$

2-4. 방법 II [고정된 s 값을 이용, $\Phi(0, s)$, $\Phi(1, s)$, $\Phi(2, s)$ 의 계산]

식(3), (11), (12)로부터

$$\tau = -\Pi_1 (1 - 2s \cdot \Pi_2/\Pi_1)^{-1/2} \quad (15)$$

$$Pe = 2\Pi_1^2/\Pi_2 (1 - 2s \cdot \Pi_2/\Pi_1)^{1/2} \quad (16)$$

2-5. 방법 III [Transfer function method]

식(3)과 식(10)으로부터

$$-1/\Pi_0 = -1/Pe + \tau \cdot s/\Pi_0^2 \quad (17)$$

s/Π_0^2 와 $-1/\Pi_0$ 을 도시하여 직선을 이루는 범위에서 직선의 기울기와 절편으로부터 축 방향 분산 계수를 구한다.

2-6. 방법 IV [여러 s 값에서 $\Phi(0, s)$, $\Phi(1, s)$ 계산]

식(3)과 식(11)로부터

$$\Phi \Pi_1^{-2} = \tau^{-2} + 4s/\tau \cdot Pe \quad (18)$$

s 와 Π_1^{-2} 를 도시하여 직선을 이루는 범위에서 기울기와 절편으로부터 축 방향 분산 계수를 구한다.

2-7. 방법 V [여러 s 값에서 $\Phi(0, s)$ 계산]

식(3)과 식(10)으로부터 얻어진 전달 함수법에서 오른쪽 항을 이항 정리하여 3번째항 이하를 생략하면 축 방향 분산 계수와 평균 체류 시간을 구하는 방법은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Pi_0/s = -\tau + \tau^2/Pe \cdot s \quad (19)$$

3. 실험

3-1. 실험장치

본 연구의 실험에서 사용된 반응기는 내경 10cm, 높이 220cm인 원통형의 구조를 이루고 있으며 아크릴로 제작되었다. 반응기 내의 분산판은 가로, 세로 15cm, 두께가 0.1cm인 두 개의 백금판으로 만들었으며 음극이 윗면에, 양극이 아랫면에 오도록 설치하였다. 또한 단락(short)을 방지하기 위해 0.5cm의 간격을 두었다. 백금판은 유체가 잘 통과하도록 하기 위해서 가능한 한 공간없이 직경 0.3cm가 되게 천공을 하고 작은 입자가 떨어지지 않게 하기 위해서 나일론 천을 씌웠으며 충전물의 하중을 유지하기 위하여 백금판 밑에 0.1cm 두께의 아크릴판을 설치하였다.

분산판에 일정한 직류 전기를 (7V, 1.5V) 공급하기 위해 potentiostat를 연결시켰다. 가열기(Heating element)가 설치된 저장조에서 전해액의 온도는 24.5-25.5°C로 일정하게 유지시켰으며 화학 펌프를 이용하여 반응기로 보내지는데 이때 유체를 일정한 유속으로 흐르게 하기 위하여 유량계(flow meter)를 설치하였다.

반응기 밖으로 나오는 유체를 자동적으로 수집하기 위해 반응기와 연결된 PVC 튜브 끝에 자동 sampler를 설치하고, sampler에 의해서 채집된 용액의 흡광도 측정을 위해서 설치된 자외선 분광기(UV spectrophotometer)를 흡광도와 농도의 상관관계로부터 보정(calibration)한 데이터가 입력된 컴퓨터와 연결시켜서 농도를 산정할 수 있게 하였으며 이의 기록을 위해 컴퓨터에 디지털 프린터를 부착시켰다. 위와 같은 실험 장치를 Fig. 1에 나타내었다.

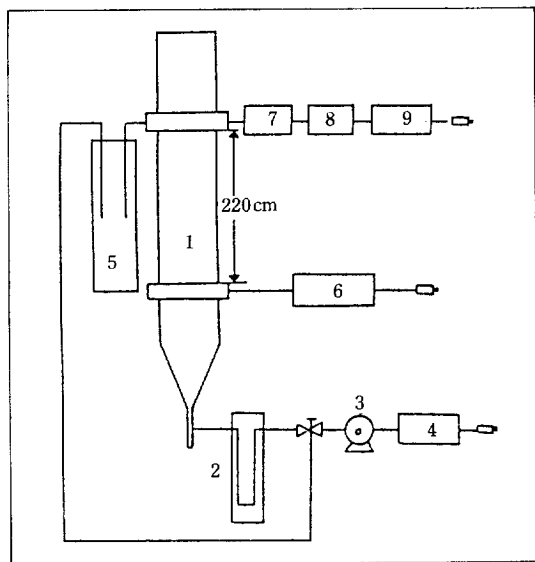


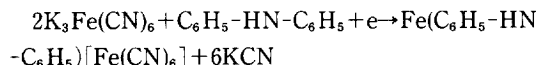
Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

- | | |
|-------------------------------|-----------------|
| 1. Reactor | 2. Flow meter |
| 3. Chemical pump | 4. Reservoir |
| 5. Reservoir | 6. Power supply |
| 7. Automatic sample apparatus | |
| 8. U.V. Spectrophotometer | 9. Recorder |

3-2. 실험방법

반응기에 사용된 충전 입자의 직경은 0.1 cm에서 0.9 cm까지의 9종의 구형 stainless steel을 사용하였으며 유체의 물성은 potassium ferrocyanide [0.5N-K₄Fe(CN)₆], potassium hydroxide (0.1 N-KOH)와 소량의 diphenylamine을 혼합하여 만들었다. 각 입자의 크기 변화에 대해 유체 유속을 2,000 ml/min에서 4,000 ml/min로 변화시켜 가면서 반응기 내로 주입시켰다. 이때 유체내에 포함된 Fe(CN)₆⁻³ 이온이 전기

화학 반응으로 Fe(CN)₆⁻⁴ 이온으로 변화하면서 diphenylamine과 반응하여 미색에서 진푸른색으로 변하는데 이때 Fe(CN)₆⁻⁴ 이온이 추적자로써 작용하는 변색 기구는 다음과 같다.



이상적인 주입 방법으로 주입점 전역에서 추적자의 농도가 균일하게 이루어지며, 정상 상태에서 어느 순간 공급되는 직류를 중단시켜 추적자 공급을 끊어주면 반응기 출구 지점에서 추적자의 농도는 계속 감소되는 하강 단계 함수의 형태로 나타난다. 따라서 일반적인 농도 상승 단계 함수 F(t)로 바꾸기 위해서는 실측한 하강 단계 함수를 정규화(normalization)시킨 후 1에서 빼면 그 값을 얻을 수 있다.

4. 결과 및 고찰

4-1. 각 모델에서 축 방향 분산 계수의 산출과 비교

분산점에서 1 초 간격으로 얻은 F(t)로부터 미분한 형태의 c(t)를 얻기 위해서 F(t)에 three point method를 적용시켰다. 이렇게 구한 c(t)로부터 분산법(variance method)에서의 축 방향 분산 계수를 직접 산출할 수 있으나, 가중 모멘트법(weighted moment method)과 전달 함수법(transfer function method)로부터 축 방향 분산 계수를 구하기 위해서는 먼저 Π_0 , Π_1 , Π_2 의 값을 알아야하므로 c(t)에 사다리꼴 법칙(trapezoidal rule)을 적용하여 s의 값을 s=0에서 0.002 간격으로 10까지 변화시켜 그 값을 얻었다. 방법 I과 방법 II에서 축 방향 분산 계수를 산출하기 위해서는 라플라스 전달 매개 변수(Laplace transfer parameter), s값을 먼저 선정해야 하는데 이 s의 범위가 너무

Table 1. Axial dispersion coefficient estimated by various methods (dp: 0.9 cm).

(unit: cm ² /sec)							
Flow rate (ml/min.)	N_{Re}	Method I D_1	Method II D_2	Method III D_3	Method IV D_4	Method V D_5	Variance method D
2,000	35.345	0.2916	0.2916	0.2938	0.3031	0.2938	0.2497
2,400	42.416	0.3526	0.3499	0.3526	0.3667	0.3553	0.2990
2,800	49.486	0.4133	0.4198	0.4146	0.4278	0.4146	0.3517
3,200	56.557	0.4738	0.4701	0.4738	0.4929	0.4700	0.4004
3,600	63.619	0.5289	0.5246	0.5371	0.5544	0.5371	0.4533
4,000	70.689	0.5875	0.5829	0.5968	0.6161	0.5922	0.5025

넓기 때문에 상대분산(relative variance; R.V.)을 이용하여 s 의 값에 대해 $R.V./\sigma$ 값이 최저가 되는 s 의 범위가 0.0001-0.01임을 알았다. 식 (3)에 s 값과 그 s 값에 해당되는 축 방향 분산 계수의 값 그리고 평균 체류 시간을 대입하여 좌변과 우변의 차가 최소가 되는 s 의 값을 시행오차법에 의하여 찾았으며, 그때의 s 값을 최적 s 값으로 정하고 그 값에서 축 방향 분산 계수를 구하였다. 방법 III, IV, V는 식 (17), (18), (19)에 앞서 구한 Π_0, Π_1, Π_2 를 대입하여 기울기와 절편으로부터 축 방향 분산 계수를 산출하였다. 각 모델에서 유속의 변화에 따른 축 방향 분산 계수를 Table I에 나타내었다. 분산법(variance method)은 다른 방법보다 작은 축 방향 분산 계수를 나타내었는데 이는 앞부분과 꼬리 부분에서 큰 오차를 갖기 때문이라고 생각된다. 방법 IV에서 가장 큰 축 방향 분산 계수를 갖는 것으로 나타났으며, 방법 I과 방법 II에서는 약간 작은 축 방향 분산 계수를 갖는 것으로 나타났는데 이는 Anderssen[4]이 주장한 바와 같이 가중 모멘트에서 고차 모멘트(higher moment)는 오차가 크게 발생한다.'하는 내용과 일치한다.

4-2. 이론 값과 실험 값의 해석적 비교

각 방법으로 구한 N_{pe} 값과 그 해당 조건을 식 (2)에 대입하여 이론 곡선을 얻어 이를 실험 곡선과 비교 검토하였다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 가장 아래쪽의 작은 곡선이 실험치 곡선(g)이며, 그 다음으로 곡선(g)과 비슷한 것이 방법 III(f)이고 크기 순서대로 방법 IV(e), 방법 V(d), 방법 I(c), 방법 II(b)이며 가장 큰 곡선이 분산법(a)에 의해 구한 값을 나타낸 곡선이다. 이를 볼 때 곡선이 커지면 이론 값과 실험 값의 오차에 비례하여 커지는 특성을 보이고 있다. 방법 III는 실험치 곡선과 거의 일치함을 볼 수 있다. 이는 가중치가 s 의 증가에 따라 짧은 시간 안에 그 값이 영으로 접근하기 때문이다. 방법 III, 방법 IV에 비하여 방법 V가 오차가 큰 것은 가중치에 의하여 가중되는 성질이 계산상의 편리를 도모하기 위하여 사용한 이항 정리에서 3 번째항 이하를 생략했기 때문에 일어나는 현상으로 생각된다. 우리가 많이 사용하고 있는 분산법은 가중치가 $c(t)$ 에 부가되지 않음으로써 이 이론 농도 $c(t)_{theo}$ 는 실험치 $c(t)_{exp}$ 에 비하여 장시간에 걸쳐 긴 꼬리(tail)가 나타나서 그 오차가 엄청나게 크게 일어나고 있음을 알 수 있었다. 유체 자체의 전기 화학 반응으로써 이상적인 추적자 주입 방법에 의하여 무한 이론 값은 실험치 곡선과

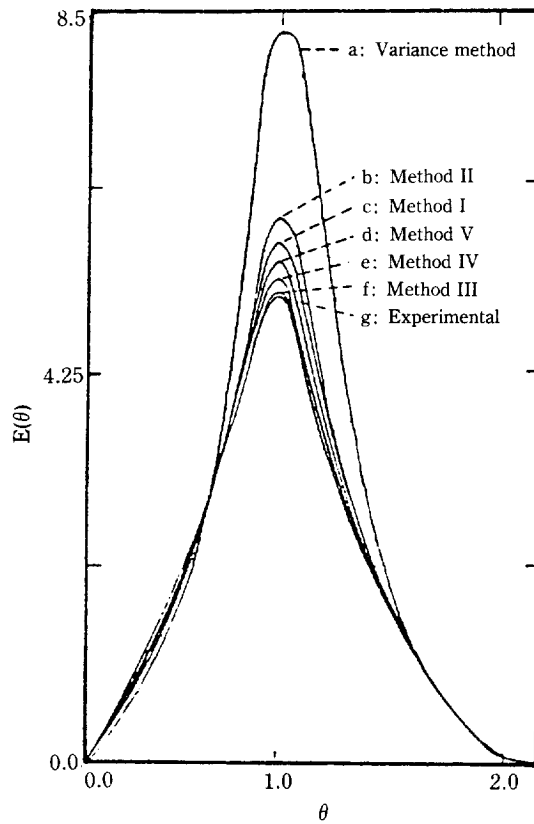


Fig. 2. Comparison of the theoretical and experimental data for various methods with the flow rate of 4,000 ml/min and dp of 9 mm.

비교하여 이론 곡선이 크면 클수록 그 최고점이 높아지는 특성에 의하여 곡선의 넓이가 커진다는 사실을 알았다. 오차의 측정은 실험 곡선이 나타내는 넓이에서 각 이론 곡선이 벗어난 넓이 차의 비로 구했다. 이때 각 방법의 오차 범위는 다음과 같다.

Method	오차의 범위
Variance method	17.8- 29.33%
Method I	1.10- 6.44%
Method II	0.08- 9.41%
Method III	0.01- 1.04%
Method IV	0.30- 4.20%
Method V	0.07- 4.34%

4-3. 유속입자 변화가 축 방향 분산 계수에 미치는 영향

축 방향 분산 계수는 유속이 증가함에 따라, 입자 크

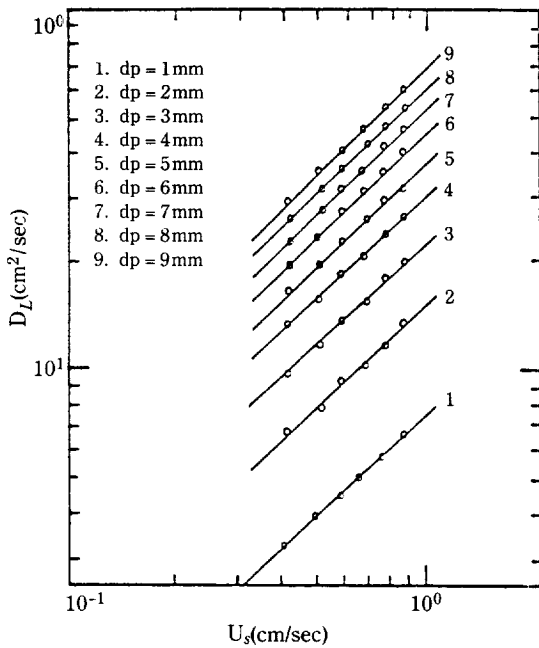


Fig. 3. Relationship between fluid superficial velocity and axial dispersion coefficient.

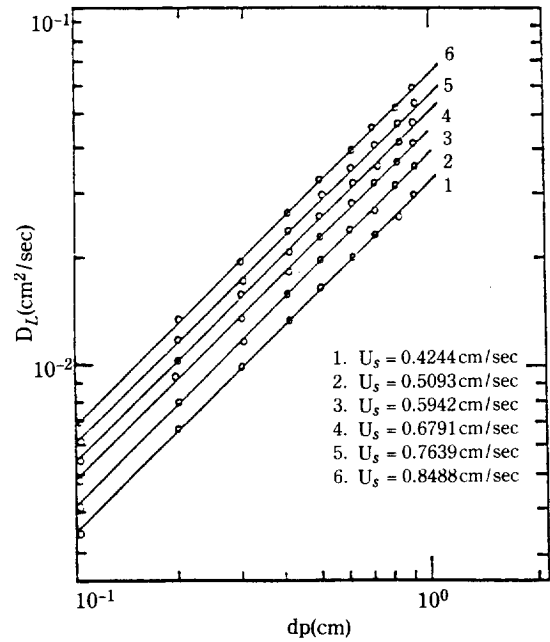


Fig. 4. Relationship between particle diameter and axial dispersion coefficient.

기가 커짐에 따라 증가하며 이는 Ebach와 White [11], Miller와 King[12] 그리고 Nakanish[13] 등이 나타낸 결과와 같다. 이는 충전층이 무수히 많은 입자로 이루어져 있는 경우 입자가 클수록 충전공물이 커져 미소 혼합 반응기 역할을 하는 빈 공간이 커지기 때문이며, 또한 유속이 증가함에 따라 어느 구간 사이에서 순간적으로 유체의 역류 현상이 나타나기 때문에 축 방향 분산이 증가한다고 생각된다. 실험치에 가장 잘 일치하는 전달 함수인 방법 III로 부터 구한 축 방향 분산 계수로 부터 유속변화, 입자 크기 변화에 대한 축 방향 분산 계수의 상관관계는 다음과 같으며 Fig. 3, 4, 5에 나타내었다.

$$D_L \propto U_s^{0.983}$$

$$D_L \propto dp^{0.9933}$$

$$D_L = 0.824 U_s^{0.983} dp^{0.9933}$$

4-4. Peclet number ($\epsilon \cdot N_{pe}$)와 Reynold number와의 관계

방법 III로 부터 구한 축 방향 분산 계수를 이용하여 Fig.6에 ϵN_{pe} 와 N_{re} 와의 상관관계를 도식화하였다. $\epsilon \cdot N_{pe}$ 와 N_{re} 와의 상관관계에서 대체로 일정한 1.3의 값을 가졌으며 이는 Caberry와 Bretton[14], Chung과 Wen[15], Strang[16], Liles와 Geanko-

plis[18], Hennico[17] 등이 나타낸 연구 결과 보다 약간 큰 값이었다. 이는 유체의 물성과 충전층의 차이 그리고 이상적인 추적자 주입 방법으로 주입시 유체에 영향을 미치지 않기 때문에 나타나는 현상으로 생각된다.

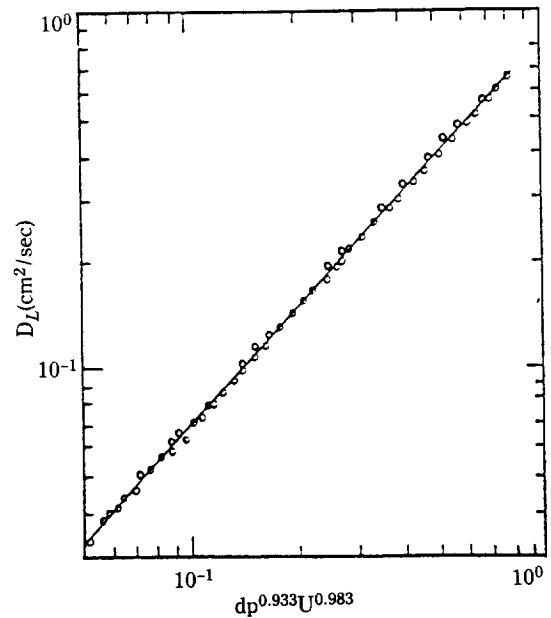


Fig. 5. Plot of D_L vs. $dp^{0.9933} U_s^{0.983}$.

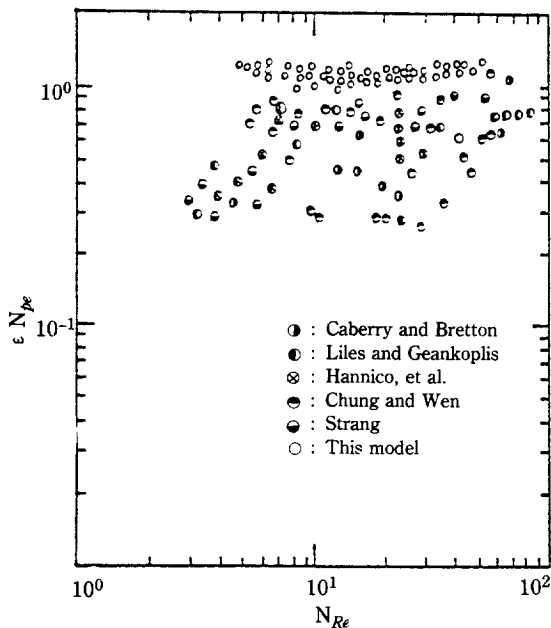


Fig. 6. A correlation of axial dispersion coefficient of liquid phase fixed beds in terms of Peclet number.

5. 결 론

고정층 반응기의 분산판 전역에서 추적자가 균일하게 발생되도록 하는 이상적인 단계 함수 주입을 시도하여 그 응답만을 해석하는 방법으로 단일 매개 변수 모델식 중 축 방향 분산 계수 산출의 여러 방법을 비교 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 각 방법에 의하여 구한 이론 곡선은 실험치 곡선과 비교하여 곡선의 최고점이 높으면 높을수록 그 넓이는 커지고 이에 비하여 오차가 비례적으로 커지는 특성이 있다.

2. 방법 III는 그 오차 범위가 1.04% 이내로 다른 방법에 비해 정확함을 알 수 있었고 분산법은 가장 큰 오차(17.8%-29.3%)를 나타내는 방법임을 확인하였다.

3. 본 실험 판별법에 의해 가장 오차가 적은 방법 III에 의해서 분석한 자료의 결과를 차원적으로 표시하면 다음과 같다.

$$D_L = 0.824 U_s^{0.933} dp^{0.933}, \text{ (cm}^2/\text{sec)}$$

4. 무차원 상관관계식으로 나타냈을 때 N_{Re} 의 증가에 따른 ϵN_{Pe} 의 값은 일정하였고 그 값은 1.3이었다.

감 사

본 연구는 1986년도 한국학술진흥재단 연구 조성 지원에 의하여 이루어진 것이며 이에 감사를 드린다.

NOMENCLATURE

\bar{c}	Laplace transform of volumetric concentration
c	Volumetric concentration (ppm)
c_0	Laplace transform of initial volumetric concentration
$C(t)_{exp}$	Experimental concentration
$C(t)_{theo}$	Theoretical concentration
D_L	Axial dispersion coefficient (cm ² /sec)
$F(t)$	Tracer concentration with respect to time
L	Reactor length (cm)
n	Order of moment
$N_{pe}(=Pe)$	Peclet number (particle diameter), (Udp/D_L)
N_{Re}	Reynolds number (dpU_s/μ)
R.V.	Relative variance
s	Laplace parameter
t	Time(sec)
U	Linear flow velocity (Interstitial velocity), (cm/sec)
U_s	Superficial velocity (cm/sec)
x	Distance in axial direction (cm)

Greek Letters

θ	Dimensionless time (t/\bar{t})
$E(\theta)$	Distribution curve based on dimensionless time unit ($\bar{t}E$)
$\Psi(s)$	Laplace transfer function
Π_0	Logarithmical derivative of transfer function
Π_1	Logarithmical derivative of 1st order transfer function
Π_2	Logarithmical derivative of 2nd order transfer function
$\Phi(n, s)$	Nth order moment for Laplace domain
ϵ	Voidge, void fraction of packing
τ	Mean residence time (sec)
ρ_s	Fluid density (g/cm ³)
σ	Variance of output tracer curve (sec ²)
σ^2	Variance of input tracer curve (sec ²)

REFERENCES

1. Abbi, Y.P. and Gunn, D.F.: Tran. Instn. Chem. Engrs., 54 (1976).

2. Anderssen, A.S. and White, E.T.: *Can. J. Chem. Eng.*, **47**, 288 (1969).
3. Anderssen, A.S. and White, E.T.: *Chem. Eng. Sci.*, **25**, 1015 (1970).
4. Anderssen, A.S. and White, E.T.: *Chem. Eng. Sci.*, **26**, 1203 (1971).
5. Michelsen, M.L. and Ostergaard, K.: *Chem. Eng. Sci.*, **25**, 583 (1970).
6. Michelsen, M.L. and Ostergaard, K.: *Can. J. Chem. Eng.*, **47**, 107 (1969).
7. Kafarov, V.V., Voygon, V.G. and Gordeev, L.S.: *Theoret. Found. Chem. Eng.*, **2**, 228 (1968).
8. Clements, W.G.: *Chem. Eng. Sci.*, **24**, 957 (1969).
9. Andrieu, J. and Smith, J.M.: *Chem. Eng. J.*, **20**, 211 (1980).
10. Hiby, J.W.: *Chem. Ingenieur Technique*, **51**, 7, (1981).
11. Ebach, E.A. and White, R.R.: *AIChE. J.*, **4**, 161 (1958).
12. Miller, S.F. and King, G.J.: *AIChE. J.*, **12**, 767 (1966).
13. Nakanishi, K.: Th. D. Dissertation, Tohoku Univ. Send., Japan, (1976).
14. Caberry, J.J. and Bretton, R.H.: *AIChE. J.*, **4**, 367 (1958).
15. Chung, S.F. and Wen, C.Y.: *AIChE. J.*, **14**, 857 (1968).
16. Strang, D.A. and Geankoplis, C.J.: *Ind. Eng. Chem.*, **50**, 1305 (1958).
17. Hennico, A., Jacques, G. and Vermeulem, T.: UCRL, 10696 (1963).
18. Liles, A.W. and Geankoplis, C.J.: *AIChE. J.*, **6**, 591 (1961).