

가압기포탑에서 기-액 흐름의 Chaos 해석 및 물질전달 특성

우광재 · 조용준 · 김기인 · 강 용[†] · 김상돈*

충남대학교 화학공학과

*한국과학기술원 화학공학과

(1998년 6월 3일 접수, 1998년 9월 11일 채택)

Chaos Analysis of Gas-Liquid Flow and Mass Transfer Characteristics in Pressurized Bubble Columns

Kwang Jae Woo, Yong Jun Cho, Ki In Kim, Yong Kang[†] 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 3 June 1998; accepted 11 September 1998)

요 약

가압기포탑에서 기체-액체 흐름의 복합적인 현상에 의해 유발되는 압력변동 특성을 측정하고 이를 최근의 새로운 개념인 chaos 해석방법을 도입하여 통계적으로 해석하였다. 즉, 가압기포탑에서 얻은 시간의 변화에 따른 압력변동자료들로부터 위상공간투영을 구성하여 계의 특성에 맞는 최적의 시간 lag를 결정하여 자료에 의해 표현되는 strange attractor를 찾아내고 거동의 특성을 분석하였으며 이를 파라미터화하고자 상관차원(correlation dimension)을 구하였다. 또한, 가압기포탑에서 기체-액체 부피물질전달 계수를 축방향 분산모델을 적용하여 구하였으며, 이를 수력학적 특성과 연관하여 검토하였다. 본 연구결과, 가압기포탑에서 압력변동의 상관차원은 기체의 유속(0.02-0.25 m/s)이 증가함에 따라 증가하였으나, 압력(0.1-0.6 MPa)이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내어 가압기포탑내의 기체-액체흐름의 불균일성 정도와 동적거동특성을 잘 나타낼 수 있었다. 또한, 기체-액체 부피물질전달계수는 기체의 유속과 압력이 증가함에 따라 증가 경향을 나타냈으며, 기체-액체 계면에서의 물질전달특성을 기체-액체 흐름현상의 특성을 나타내는 통계학적 파라미터에 의해 정량적으로 해석될 수 있었다.

Abstract— Since the gas-liquid flow behavior in the pressurized bubble column is highly irregular, random and stochastic, it has been analyzed by resorting to somewhat noble chaos analysis; the resultant pressure fluctuations describing the complex flow behavior of gas-liquid in the system have been manipulated to form the multidimensional phase-space portraits from which the strange attractor can be obtained. The chaos behavior of pressure fluctuations has been represented by means of correlation dimension. The volumetric gas-liquid mass transfer coefficient in the pressurized bubble column has been determined by adopting the axial dispersion model, and the relation between the hydrodynamic characteristics and the mass transfer coefficient has been also discussed. As a result of this study, the correlation dimension of pressure fluctuations has increased with increasing gas velocity(0.02-0.25 m/s), but it has decreased with an increase in the pressure(0.1-0.6 MPa) in the column, representing the dynamic gas-liquid flow behavior in the column. The volumetric gas-liquid mass transfer coefficient has increased with increasing gas velocity and pressure. The gas-liquid mass transfer has been well predicted by means of chaotic behavior of gas-liquid flow in the pressurized bubble column.

Key words: Pressurized Bubble Column, Phase Space Portrait, Correlation Dimension, Chaos Analysis, Volumetric Mass Transfer Coefficient

1. 서 론

지금까지 기포탑에 대한 연구는 일반적으로 기포탑에서 기포의 체류량이나 혼합도 등 수력학적 특성에 대한 연구나 열전달, 물질전달

등에 대한 연구들이 주종을 이뤘는데 이들 연구들의 대부분은 상압 하에서 이루어져 왔다[1-3]. 그러나, 석탄의 액화공정, 폐수처리공정, 탈황공정, 비료제조공정 및 미생물 배양공정 등 실제 반응이 일어나는 system에서는 반응압력이 상압으로 유지되는 것 보다는 반응압력이 상압보다 높은 경우가 대부분인데, 이와 같은 경우 반응압력이 반응기의 조작성능에 미치는 영향에 대한 검토는 필수적이라 할 수

[†]E-mail : kangyong@hanbat.chungnam.ac.kr

있다.

가압의 상태에서 조작되는 기포탑에서는 기체의 압력 증가에 따른 기체밀도의 증가를 가져올 뿐만 아니라 기체 체류량의 팔목할 만한 증가를 가져와 기체-액체 계면에서의 물질전달을 매우 증가시킬 수 있을 것으로 판단되며[4-8], 계를 가압의 상태로 운전하므로 장치나 공정의 부피를 감소시킬 수 있으며 반응의 효율을 증가시킬 수 있을 것으로 예견된다. 또한, 가압기포탑은 계에 압력이 가해지므로 상압의 경우와 비교하여 운전, 조작변수의 조화, 제어(control) 및 설계 등의 조건과 특성들이 매우 다를 것으로 판단된다. 따라서, 가압기포탑 내부에서 분산상으로 존재하며 기포탑의 특정 결정에 중요한 역할을 하는 기포의 흐름거동에 대한 정보는 가압기포탑의 공업적 응용에 매우 중요한 자료가 된다고 하겠다.

최근 가압기포탑 계에서 기체의 체류량이나 기-액 물질전달 특성에 대한 연구들이 선진외국에서 수행되고 있고 또 일부 보고되고 있으나, 가압기포탑의 수력학적 특성이나 기포의 흐름거동에 대한 연구나 복잡한 가압기포탑계의 해석에 대한 연구들은 아직 외국에서도 보고된 바가 없는 실정이다[4-12].

가압기포탑을 다상 반응기나 다상의 접촉 및 수송공정 등에 공업적으로 응용할 경우 효과적인 조작변수의 조절 및 제어, 그리고 정상적인 공정운용의 이상여부를 감지하고 공정의 특정 이상이 어떤 조작변수에서 기인된 것인지의 판단을 용이하게 할 뿐만 아니라 이들 가압기포탑 반응기나 접촉공정의 성공적인 설계를 위해서는, 가압기포탑의 거동 특성을 system내에 존재하는 각 상들에 대한 부분적인 해석에서 일보 진진하여 가압기포탑을 전체적으로 해석하고 그 거동을 모델링하는 것이 매우 중요한 일이며 또 당면과제라 할 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 가압상태의 기포탑에서 기체와 액체의 무작위적 접촉 및 비선형적 흐름거동에 대한 기초자료들을 실험적으로 구하여 확보하고자 하였으며, 이 거동을 chaotic 방법을 사용하여 종합적이며 총체적으로 해석하고자 하였다. 또한, 기포탑의 주요 특성 중의 하나인 기체-액체간의 물질전달 특성을 가압상태에서 규명하고자 하였으며, chaotic 해석에 의한 수력학적 특성과 기체-액체 물질전달 특성간의 연관성을 검토하여서 가압기포탑(pressurized bubble column) 반응기나 접촉공정의 설계, 운전 그리고 제어 등에 필수적인 공학적 자료를 제공하고자 하였다.

2. 해 석

2-1. 위상공간투영(Phase Space Portraits)

가압기포탑에서 얻은 압력변동 data인 시계열(time series) $X(t)$ 의 해석에서는 다음과 같은 chaos 해석방법을 도입하여 사용하였다[13-25]. 즉, 시간의 변화에 따른 압력변동 시계열 $X(t)$ 로부터 다차원 위상공간투영을 구성할 수 있는데 이는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{X(t_k); t_k = k\Delta t, k = 1, 2, \dots\} \quad (1)$$

이 portrait를 M-차원 공간에 투사하면 $X(t_k), X(t_k + \tau), \dots, X(t_k + (M-1)\tau)$ 의 point를 지나게 되는데, 여기서 M은 매립차원(embedding dimension)을 말하며 τ 는 지연시간(time delay)이다.

여기서, system의 특성에 맞는 최적의 time delay τ 를 결정하여야 하는데 이때에는 다음 식과 같이 정의되는 상호정보함수(mutual information function)를 사용할 수 있다[25].

$$I = \iint P(V, W) \log_2 [P(V, W) / P(V)P(W)] dV dW \quad (2)$$

본 연구의 system에서 $P(V) = X(t)$ 이고 $P(W)$ 는 $X(t + \tau)$ 가 되며, $P(V)$ 와

$P(V, W)$ 는 각각 확률밀도와 joint 확률밀도를 나타낸다. 따라서, 이들 위상-공간(phase-space) portraits를 이용하여 가압기포탑에서 얻어진 압력변동 신호들의 sequence가 나타나는 strange attractor를 찾아낼 수 있으며, 이들 자료들의 chaos 거동특성을 해석할 수 있다.

2-2. 상관차원(Correlation Dimension)[16-25]

가압기포탑에서 기체-액체의 흐름특성을 해석하기 위해서는 압력변동특성의 해석과 이의 파라미터화가 매우 중요한데 이를 위해서 본 연구에서는 압력변동 신호를 chaos 이론을 도입하여 통계적으로 처리하여 상관차원(correlation dimension)을 구하였다. 즉, 실험적으로 측정된 압력요동의 시간에 따른 변화자료인 $X(t)$ 를 재구성하여 벡터자료로 만들면 다음 식과 같이 표현된다.

$$Z_i(t) = [X(i \cdot \Delta t), X(i \cdot \Delta t + \tau), \dots, X(i \cdot \Delta t + (p-1)\tau)] \quad (4)$$

$$i = 0, 1, 2, \dots, [m - (p-1)k]$$

여기서, $\tau = k \cdot \Delta t$, $k = 1, 2, 3, \dots$ 이며, p 는 벡터 $Z(t)$ 의 차원이 된다.

이와 같은 자료로부터 자료의 p-차원 투영을 나타내는 p-차원 벡터의 시간의 변화에 따른 자료를 구할 수 있는데, 이때 p 는 투영된 재구성된 자료의 위상공간차원을 나타낸다. 따라서, 압력변동 신호의 위상상관함수(space correlation function)를 나타내는 상관적분(correlation integral)인 $C(r)$ 은 다음과 같이 표현될 수 있으므로

$$C(r) = \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{1}{m^2} [\text{number of pairs } (i, j) \text{ whose distance } |Z_i(t) - Z_j(t)| < r] \quad (5)$$

이를 수식화하면 다음 식으로 표현된다.

$$C(r) = \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{1}{m^2} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m H[r - |Z_i(t) - Z_j(t)|] \quad (6)$$

식 (6)에서 m 은 처리하는 자료의 수를 나타내고 H 는 다음 식으로 표시되는 Heaviside 함수이다.

$$H[r - |Z_i(t) - Z_j(t)|] = \begin{cases} 1 & \text{if } r > |Z_i(t) - Z_j(t)| \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

통계적으로 처리하여 얻은 상관적분 $C(r)$ 을 hypersphere의 반경 r 에 대해 다음과 같은 상관식으로 나타낼 수 있는데,

$$C(r) = kr^{D_c} \quad (8)$$

식 (8)에서 k 는 상수를 나타내고 D_c 는 상관차원(correlation dimension)을 나타낸다.

3. 실 험

본 연구에서 사용한 가압기포탑(pressurized bubble column)은 Fig. 1에서 볼 수 있는 바와 같은 직경 0.051 m이고 높이 1.5 m인 stainless steel로 제작된 system을 주탑으로 하였다[15]. 실험이 진행되는 동안 기포탑 내부에서 주어진 운전조건에 맞는 일정압력을 유지하기 위하여 가압기포탑 장치의 sealing을 하였다. 실험 변수로는 기체의 유속과 운전압력을 선정하였으며, 액체로는 물을, 기체로는 filtering 이 된 압축공기를 사용하였고, 기포탑계내에서 가압의 정도는 0.1-0.6 MPa이었다.

3-1. 압력변동특성

기포흐름 현상의 chaos 해석을 위해, 각 운전 조건에서 정상상태

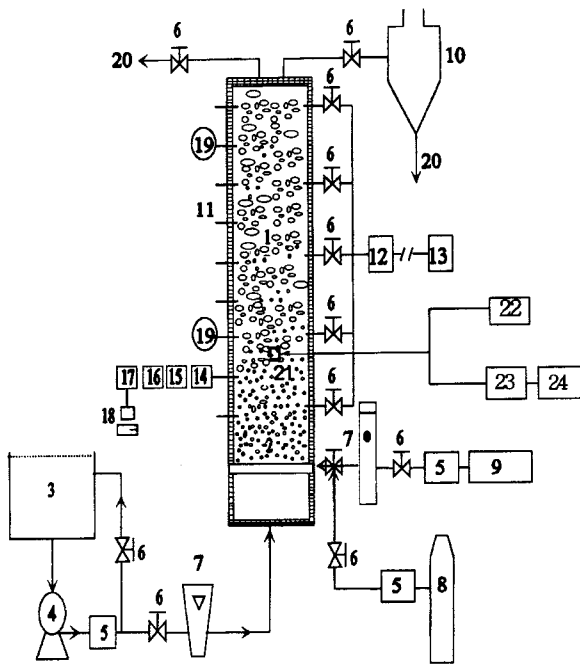


Fig. 1. Experimental apparatus.

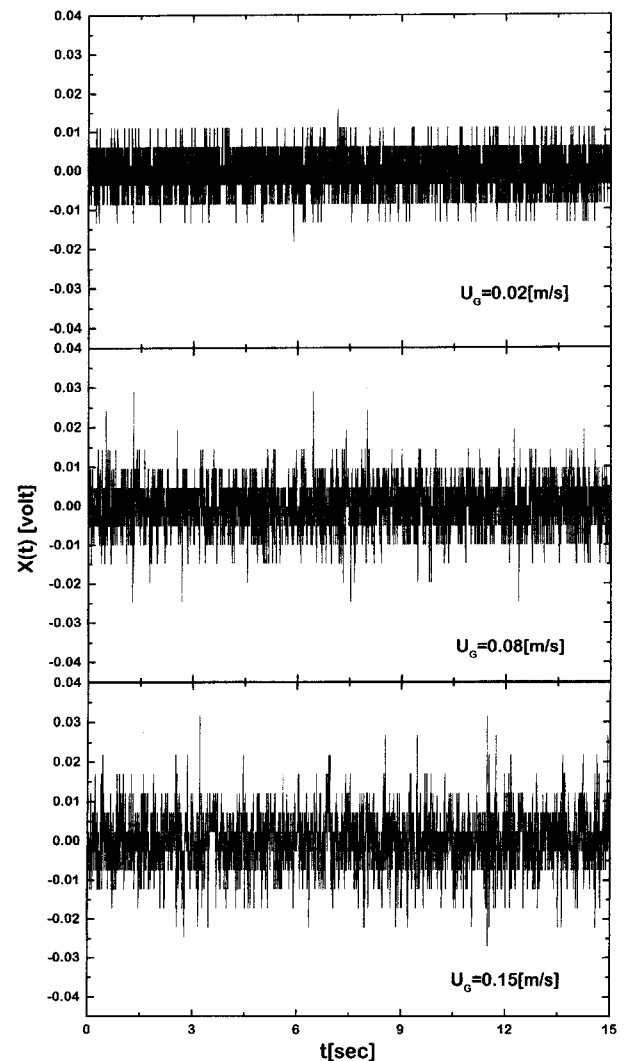
- | | |
|------------------------|-------------------------|
| 1. Main column | 13. DO meter |
| 2. Distributor | 14. Pressure transducer |
| 3. Liquid reservoir | 15. Amplifier |
| 4. Pump | 16. Low-pass filter |
| 5. Filter & regulator | 17. A/D converter |
| 6. Valve | 18. Computer |
| 7. Flowmeter | 19. Pressure gauge |
| 8. N ₂ tank | 20. Drain line |
| 9. Compressor | 21. Resistivity probe |
| 10. Separator | 22. Power supply |
| 11. Pressure taps | 23. Lab card |
| 12. Sampling vessel | 24. Computer |

에 도달된 다음 가압기포탑내의 압력변동(pressure-time signal)을 측정하였다. 압력변동의 측정은 압력센서에서 감지된 압력변동을 압력 변환기를 사용하여 volt-time signal로 바꾸고 이를 증폭기와 Oscilloscope 및 Filter를 거쳐 A/D converting system을 사용하여 digital signal로 바꾸어 personal computer에 입력시킨 다음 이를 off-line process로 통계적 처리를 하였다. 압력변동 신호의 측정에 사용한 압력변환기는 Valcom Co.사의 VPRQ-A4-5K-5C를 사용하였으며, 압력변동 신호의 측정속도는 200 Hz로 하였고 측정시간은 각 조건에서 15초로 하여서 압력변동 신호의 크기는 3,000개로 하였다. 압력변동 신호의 처리에는 data acquisition system인 DT2801 Lab Board를 사용하였다.

가압기포탑 내부의 동적 압력변동(dynamic pressure fluctuation)을 측정하기 위해서 pressure tap을 기포탑 벽면에 설치하였는데, 설치 위치는 기체-액체 분산관으로부터 0.1 m 간격으로 10개 설치하였다.

3-2. 물질전달특성

가압기포탑에서 기체-액체 부피 물질전달계수는 가압기포탑내에서 연속상의 축방향 용존산소량을 측정하여 축방향 분산모델을 적용하여 구하였다[1]. 가압기포탑내에서 액상의 축방향 용존산소량의 변화를 측정하기 위하여 가압기포탑의 벽면에 0.1 m 높이에 따라 10개의 sampling tap을 설치하였으며, 일정실험 조건에서 액상의 시료채취는 기-액 분리기를 사용하여 동시에 하였다. 채취된 시료의 용존산소량 측정은 상온에서 교반되는 Do-meter계를 사용하여 측정

Fig. 2. Effects of U_G on the pressure fluctuations in pressurized bubble columns ($P=0.1$ MPa).

하였다.

본 연구에서 적용한 축방향 분산 모델은 정상상태에서 용존산소의 물질수지로부터 얻을 수 있는 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다[1, 11].

$$\frac{1}{Pe} \frac{d^2C}{dx^2} - \frac{dC}{dx} + St(C^* - C) = 0 \quad (9)$$

$$\text{at } x=0, C = C_0 + \frac{1}{Pe}$$

$$\text{at } x=1, \left. \frac{dC}{dx} \right|_{x=1} = 0$$

여기서, Pe 는 Peclet 수, St 는 Stanton 수를 나타내며 x 는 무차원 길이, 그리고 C^* 는 용존산소의 평형농도를 나타낸다.

4. 결과 및 고찰

4-1. 기-액 흐름의 Chaos 해석

가압기포탑에서 각 운전변수의 변화에 따라 얻은 압력변동 신호 자료의 전형적인 예를 Fig. 2와 3에 나타내었다. Fig. 2는 압력이 0.1 MPa일 때에 기체의 유속을 0.02-0.15 m/s로 변화하여 가면서 측정한 신호자료이며, Fig. 3은 기체유속이 0.08 m/s일 때 기포탑 내부의 압력이 0.1-0.6 MPa로 변화할 때의 신호자료이다. 이들 그림에서 볼 수

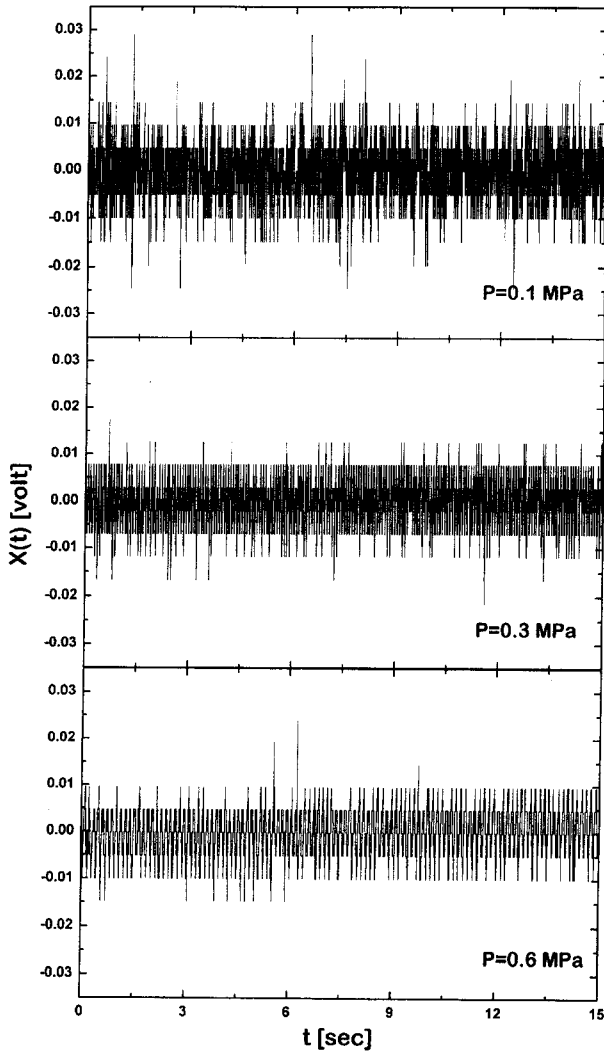


Fig. 3. Effects of P on the pressure fluctuations in pressurized bubble columns ($U_b=0.08$ m/s).

있듯이 가압기포탑에서 기체의 유속이 증가하면 압력변동 신호의 진폭이 증가하며 복잡해지는 반면, 가압기포탑내의 압력이 증가하면 압력변동 신호의 진폭이 감소하며 복잡도가 줄어드는 것을 알 수 있다.

가압 기포탑계를 좀더 효과적으로 해석하기 위한 방법의 하나로 계(system)의 특성을 나타내는 정보를 기하학적 attractor로 재구성할 수 있다. 가압기포탑에서 기체-액체 흐름 시스템에 내재한 정보의 특성을 기하학적 형태의 attractor로 재구성하기 위해서는 적절한 time-lag의 선정이 우선이라 할 수 있는데, 이를 위해서는 τ 의 변화에 따른 attractor의 기하학적 형태를 고려해야 할 뿐만 아니라 attractor의 수치해석이 필요하다 하겠다. 따라서 본 연구에서는 Fraser와 Kang 등[15, 25]이 사용한 상호정보함수(mutual information function)를 도입하여 시간의 변화에 따른 정보상호간의 상호정보함수가 최초로 최소가 되는 때의 τ 값인 0.005 sec를 time-lag로 선정하였다.

한편, 가압기포탑에서 압력변동 신호자료들을 재구성하여 얻은 위상공간투영(phase space portrait)의 전형적인 결과를 Fig. 4와 5에 나타내었다. Fig. 4의 위상공간투영은 기포탑의 압력이 0.1 MPa일 때 기체의 유속이 0.02, 0.08, 0.15 m/s로 각각 증가될 때 측정된 압력변동 신호로부터 얻은 attractor이다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 위상공간투영은 기체의 유속이 증가함에 따라 점점 분산되어 가는 것을 알 수 있다. 반면, Fig. 5에서 위상공간투영은 기포탑내의 압력이 증가

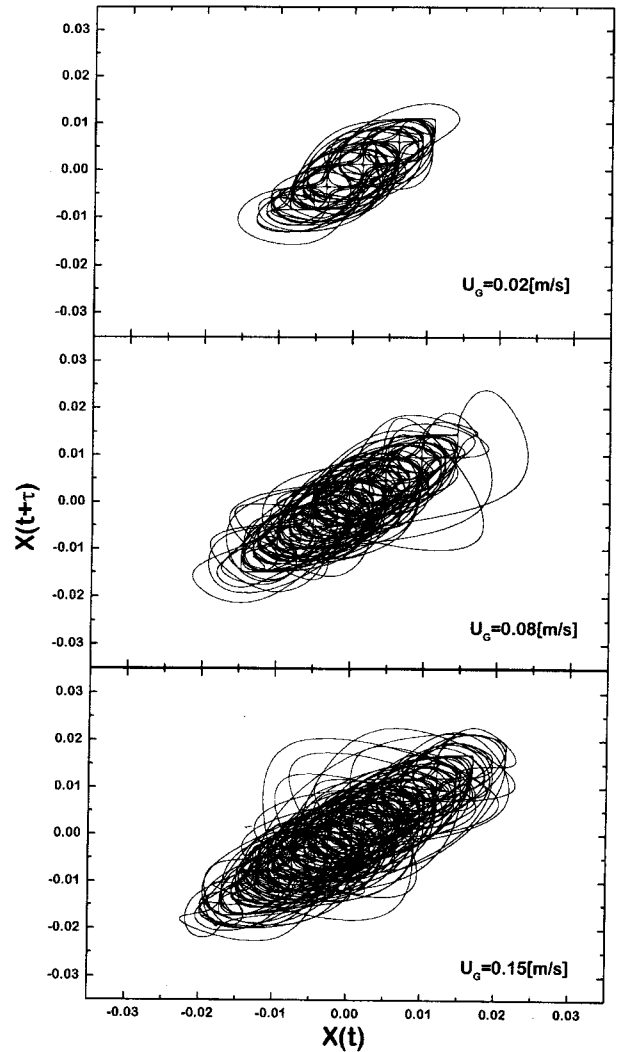


Fig. 4. Effects of U_b on the strange attractor in pressurized bubble columns ($P=0.1$ MPa).

할수록 점점 단순해져가는 것을 알 수 있다. 따라서, 이와 같은 재구성된 attractor의 전형적인 형태로부터 가압기포탑내의 기체-액체 흐름의 특성을 도식적으로 볼 수 있다. 즉, 2차원 위상공간(phase space) 상에 나타난 attractor가 기체유속이 증가함에 따라 점점 분산되며 무질서하게 나타나는 반면, 가압기포탑의 압력이 증가함에 따라서는 같은 기체유속의 조건에서 점점 더 안정화되어 가는 양상을 나타내고 있다.

이와 같은 결과는 다음과 같은 원인 때문으로 분석할 수 있다. 즉, 가압기포탑에서 기체의 유속이 증가하면 기포탑내부의 난류현상이 증가할 뿐 아니라 기포의 크기도 증가하여서 기체-액체의 흐름거동 자체가 매우 무질서하고 불균일해지기 때문이다. 그러나, 가압 기포탑의 압력이 증가하면, 같은 기체의 유속조건에서 기포의 크기가 상대적으로 감소하게 되며 이는 연속액상에 분산상으로 존재하는 기포의 상대적 균일분산을 유도하여 결과적으로 기체-액체 흐름의 균일도가 증가된다고 볼 수 있다. 또한, 기포탑에서 압력이 증가하면 기포의 크기는 감소하는 것으로 보고되고 있다[6-8, 15].

가압기포탑에서 기-액 흐름 및 접촉현상을 좀더 정량적으로 나타내기 위해 압력변동 신호자료들을 상관차원의 개념을 도입하여 해석하고 파라미터화하고자 하였다. 즉, 가압기포탑에서 얻은 압력변동 신호로부터 상관적분 $C(r)$ 을 구하였으며, 이를 hypersphere의 반경 r

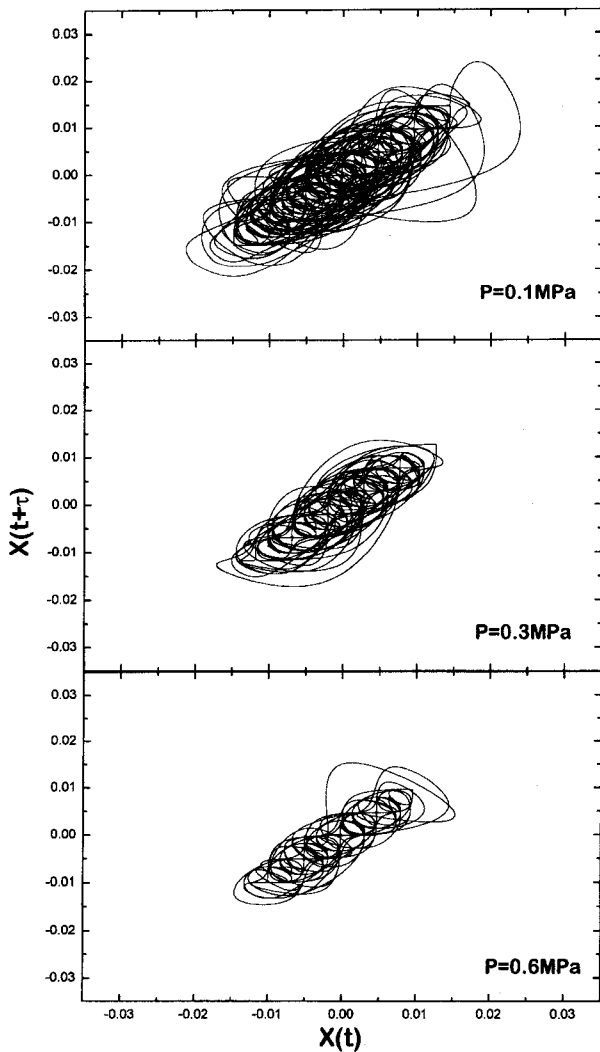


Fig. 5. Effects of P on the strange attractor in pressurized bubble columns ($U_G=0.08$ m/s).

에 대해 도식한 전형적인 결과를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 압력변동 신호를 위상공간에서 재구성하여 얻은 상관적분이 hypersphere의 변화에 따라 변화하는 양상은 위상공간의 차원 p 값이 4-5 정도면 일정하게 수렴하여가는 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과들로부터 가압기포탐에서 압력변동자료의 상관차원(correlation dimension)을 구하였다.

Fig. 7은 가압기포탐에서 기체의 유속이 압력변동자료의 상관차원에 미치는 영향을 나타낸 것인데, 이 그림에서 볼 수 있듯이 압력변동자료의 상관차원 D_c 는 기체유속이 증가함에 따라 점점 증가하였으며, 그 증가 양상이 가압기포탐의 압력의 변화에 따라 다르게 나타났다. Fig. 8은 가압기포탐에서 압력의 변화가 압력변동자료의 상관차원(D_c)에 미치는 영향을 나타낸 것인데, 이 그림에서 볼 수 있듯이 압력변동자료의 상관차원은 기포탐내의 압력이 증가할수록 점점 감소하는 것을 알 수 있다. 따라서, 이들 실험결과로부터 가압기포탐 내부에서 기체와 액체의 흐름현상은 기체의 유속이 증가함에 따라 점점 더 무질서하고 규칙성을 잃어가나, 압력이 증가함에 따라서는 무질서의 정도가 줄어들며 기체-액체 흐름의 균일도가 증가한다고 해석할 수 있다[15].

압력변동자료의 상관차원 값은 가압기포탐내에서 기체-액체 흐름의 무질서도나 균일도 등의 정도를 수치로 나타내는 결과를 가져오

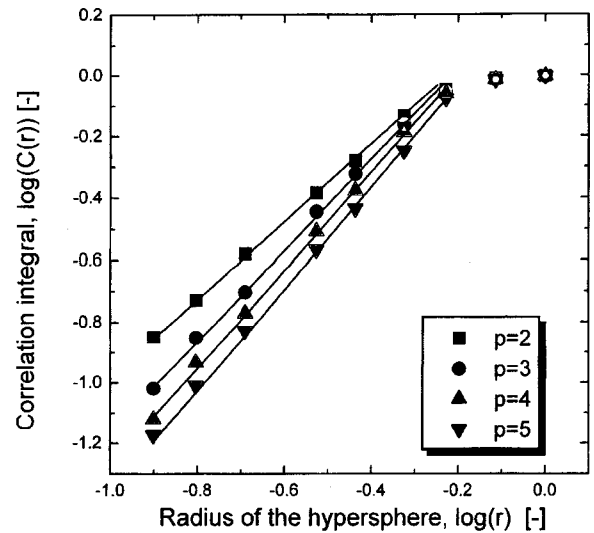


Fig. 6. Typical example of correlation analysis of pressure fluctuations in pressurized bubble columns ($P=0.3$ MPa, $U_G=0.08$ m/s).

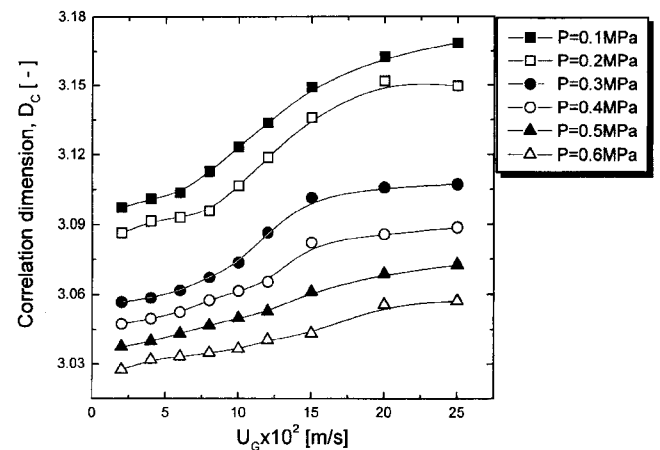


Fig. 7. Effects of U_G on the correlation dimension in pressurized bubble columns.

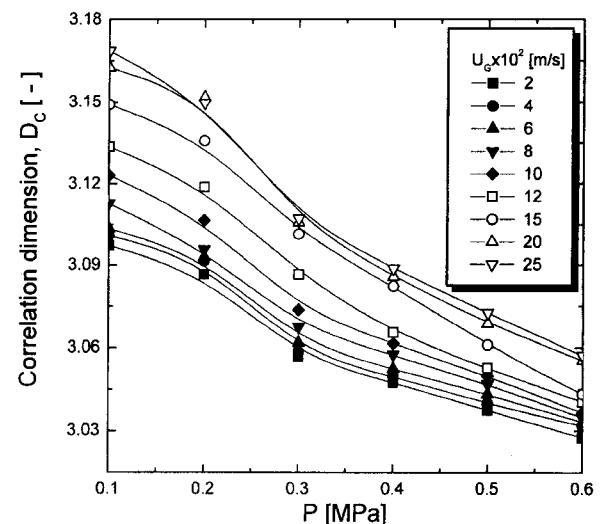


Fig. 8. Effects of P on the correlation dimension in pressurized bubble columns.

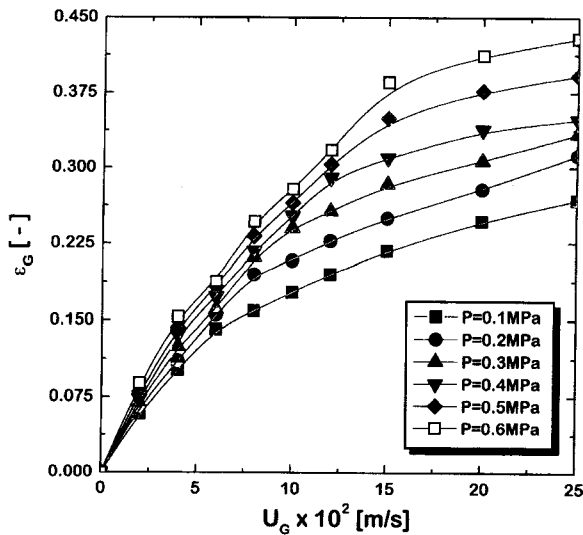


Fig. 9. Effects of U_G on the gas holdup in pressurized bubble columns.

므로 이와 같은 동적계(dynamic system)의 제어나 결점진단(fault diagnosis) 그리고 최적 조업조건 결정 등에 매우 중요한 정보를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

4.2. 물질전달 특성

가압기포탑에서 기체-액체간의 물질전달 특성은 연속상인 액상에 존재하는 기체의 체류량과 밀접한 관계가 있다. 따라서, 본 연구에서는 가압기포탑에서의 기체 체류량 특성을 해석하기 위해 각 실험 조건에서 기체 체류량을 측정하였다. 가압기포탑에서 기체유속과 압력이 기체 체류량 ϵ_G 에 미치는 영향을 Fig. 9에 나타내었다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 가압기포탑에서 기체 체류량은 기체유속 U_G 가 증가함에 따라 또한 가압기포탑내의 압력이 0.1 MPa에서 0.6 MPa까지 증가함에 따라 기체 체류량은 증가하는 경향을 나타내었는데, 압력이 기체 체류량에 미치는 영향은 기체유속이 0.02 m/s나 0.06 m/s 정도까지 낮은 경우보다는 비교적 높은 0.10 m/s나 0.15 m/s의 경우에 더욱 두드러지게 나타났다. 기체유속이 증가함에 따라 가압 기포탑에서 기체 체류량이 증가하는 것은 기체유속의 증가에 따라 기포탑내에 유입되는 기체의 양에 비해 기포탑내에서 기체와 액체의 접촉현상 때문에 기포를 빠져 나가는 기체의 양이 적기 때문으로 해석할 수 있다. 또한, 가압 기포탑의 압력이 증가하면 기포탑내에 존재하는 기포의 크기가 상대적으로 작아지고 기포탑내 기체의 밀도가 증가되기 때문에 당연히 기체의 체류량의 증가를 가져온다고 볼 수 있다.

가압기포탑에서 기체의 유속이 기체-액체 부피 물질전달계수인 $K_L a$ 에 미치는 영향을 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10에서 볼 수 있듯이 기체-액체 부피 물질전달계수($K_L a$)는 모든 실험조건에서 기체의 유속이 0.02 m/s에서 0.20 m/s까지 증가함에 따라 점점 증가해 가는 경향을 나타내었다. Fig. 11은 가압기포탑에서 압력의 변화가 기체-액체 부피 물질전달계수에 미치는 영향을 나타내었다. Fig. 11에서 볼 수 있듯이 기체-액체 부피 물질전달계수는 가압기포탑내의 압력의 증가에 따라 증가하는 경향을 나타내었으며, 이 증가하는 경향은 기체의 유속에 따라 다른 양상을 띠고 있는 것을 알 수 있었다. 가압기포탑에서 기체-액체간의 물질전달 현상도 기체체류량과 유사한 내용으로 설명할 수 있다. 즉, 가압기포탑에서 기체유속과 압력이 증가하면 기체 체류량 및 기체-액체 접촉면적이 증가하여 기체-액체 부피 물질전달계수는 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이와 같이 각 실험변수가 기체-액체 부피 물질전달계수에 미치는 영향도 각 실험변수가 기

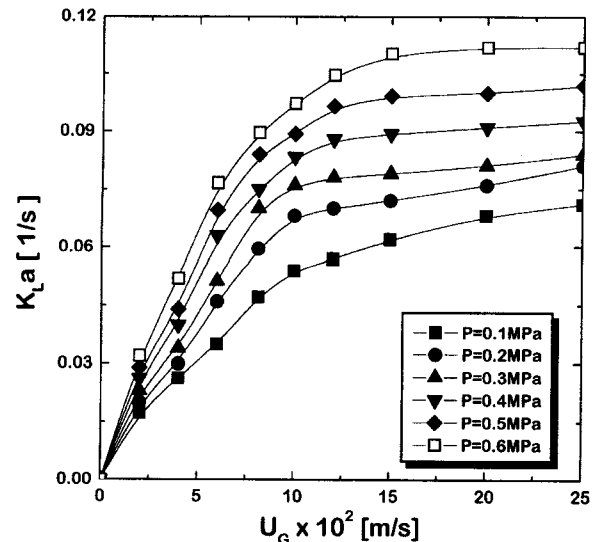


Fig. 10. Effects of U_G on $K_L a$ in pressurized bubble columns.

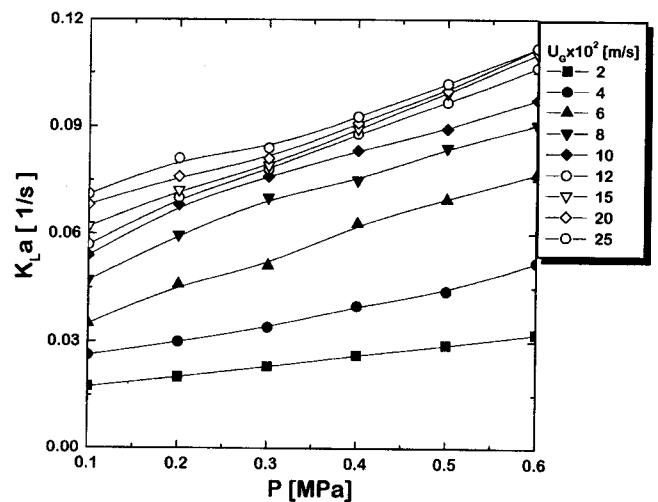


Fig. 11. Effects of P on $K_L a$ in pressurized bubble columns.

체 체류량에 미치는 현상과 매우 유사하며, 그 이유로 기포의 크기와 분포 그리고 체류량에 기인되기 때문으로 분석된다[15].

한편, 가압기포탑에서 기체-액체 흐름의 동특성을 나타내는 압력변동의 상관차원(correlation dimension)과 기체-액체 물질전달계수와와의 관계를 살펴보면 다음과 같이 설명할 수 있다. 즉, 가압기포탑에서 기체의 유속이 증가하면 기포탑내의 난류현상이 증가하고 기체 체류량도 증가하여 기체-액체 흐름은 무차원적이며 불균일흐름으로 되어 상관차원은 증가하게 되나, 이때의 기체-액체의 물질전달계수도 증가된다. 그러나, 기포탑 내부의 압력이 증가하면, 기포탑 내부의 기체-액체의 흐름은 균일하여지고 기포의 크기는 작아져 압력변동의 상관차원은 감소하게 되며 기포탑내 기체의 체류량이 증가하여 기체-액체 접촉효과가 증진되어서 기체-액체 부피 물질전달계수는 증가한다고 할 수 있다.

4.3. 상관식

가압기포탑에서 얻은 압력변동 자료의 상관차원과 기체의 유속 및 기포탑 내부에서의 압력과 상관식을 나타내고자 무차원군 Froude 수를 다음과 같이 정의하여 사용하였다.

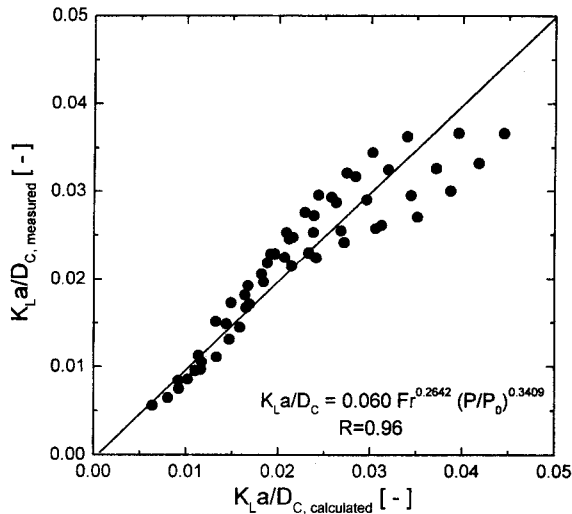


Fig. 12. Comparison of $K_L a / D_C$ between calculated and the measured values.

$$Fr = \frac{U_G^2}{gL} \quad (10)$$

본 연구의 실험범위내에서 압력변동자료의 상관차원(correlation dimension)과 기체 체류량 그리고 부피 물질전달계수는 식 (10)과 같이 정의된 무차원군 Froude 수와 무차원압력(P/P_o)으로 다음과 같은 상관식으로 나타낼 수 있었다.

$$D_C = 3.190 Fr^{0.0030} (P/P_o)^{-0.0167} \quad (11)$$

$$\varepsilon_G = 0.209 Fr^{0.0113} (P/P_o)^{0.2322} \quad (12)$$

$$K_L a = 0.057 Fr^{0.0109} (P/P_o)^{0.3203} \quad (13)$$

식 (11)-(13)의 상관계수는 각각 0.98, 0.90, 0.92이었다. 또한, 가압기포탑에서 압력변동 신호의 상관차원과 기체 체류량과 부피 물질전달계수와의 관계는 다음의 상관식으로 나타낼 수 있었다.

$$\frac{\varepsilon_G}{D_C} = 0.272 Fr^{0.3067} (P/P_o)^{0.2588} \quad (14)$$

$$\frac{K_L a}{D_C} = 0.060 Fr^{0.2642} (P/P_o)^{0.3409} \quad (15)$$

식 (14), (15)에서 상관계수는 각각 0.94, 0.96이었다, 가압기포탑에서 기체-액체 물질전달계수와 상관차원의 관계는 Fig. 12에서 볼 수 있는 바와 같이 실험결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

(1) 가압기포탑에서 기체-액체의 흐름현상을 통계학적인 새로운 개념인 chaos 이론을 도입하여 해석하였으며, 압력변동자료의 위상 공간에서의 attractor와 상관차원(correlation dimension)으로 매우 효과적이며 정량적으로 나타낼 수 있었다.

(2) 가압기포탑에서 압력변동의 상관차원은 기체의 유속이 증가함에 따라 증가하였으나 압력이 증가함에 따라 감소하였다.

(3) 가압기포탑에서 기체-액체 부피 물질전달계수는 기체의 유속과 압력이 증가함에 따라 증가하였다.

(4) 가압기포탑에서 기체-액체 흐름현상의 특성을 나타내는 통계적 해석의 파라미터들은 기체 체류량과 기체-액체 부피 물질전달

계수와 밀접한 상관성을 나타내었으며, 기체 체류량과 물질전달 특성을 기체-액체 흐름현상의 특성을 나타내는 정량적인 파라미터로 해석할 수 있었다.

감 사

본 연구는 한국과학재단의 연구비지원(961-1110-058-2)에 의해 수행되었으며 귀 재단에 감사드립니다.

사용기호

C	: concentration of oxygen [mol/m ³]
C [*]	: saturated concentration of oxygen [mol/m ³]
C ₀	: initial concentration of oxygen [mol/m ³]
C(r)	: correlation integral
D _C	: correlation dimension
Fr	: Froude number
g	: gravitational acceleration [m/s ²]
H	: Heavyside function defined as Eq. (7)
I(V, W)	: mutual information function [bit]
k	: constant in Eq. (8)
k _L a	: volumetric mass transfer coefficient [1/s]
L	: distance from the distributor [m]
M	: embedding dimension
m	: number of data point
P	: pressure [MPa]
P _o	: atmospheric pressure [MPa]
Pe	: Peclet number
P(V), P(W)	: probability corresponding to V and W
P(V, W)	: joint probability
r	: radius of hypersphere
St	: Stanton number
t	: time [s]
U _G	: superficial gas velocity [m/s]
X(t)	: time series of pressure fluctuations [Volt]
Z _i , Z _j	: the vector time series defined as Eq. (4)

그리스 문자

τ	: time delay [s]
--------	------------------

참고문헌

- Deckwer, W. D. and Schumpe, A.: *Chem. Eng. Sci.*, **48**, 889(1993).
- Allen, D. G. and Robinson, C. W.: *Biotech. Bioeng.*, **34**, 731(1989).
- Joshi, J. B.: *Trans. Instn. Chem. Engrs.*, **58**, 155(1980).
- Jiang, P., Lin, T. J., Luo, X. and Fan, L. S.: *Trans. I ChemE*, **73**, 269(1995).
- Wilkinson, P. M., Spek, A. P. and Dierendonck, L. L.: *AIChE J.*, **38**, 544(1992).
- Wilkinson, P. M., Haringa, H. and Stokman, F. P. A.: *Chem. Eng. Sci.*, **48**, 1785(1993).
- Olowson, P. A., Wiman, J. and Almstedt, A. E.: *Chem. Eng. Sci.*, **50**, 581(1995).
- Idogawa, K., Ikeda, K., Fukuda, T. and Morooka, S.: *Int. Chem. Eng.*, **26**, 468(1986).

9. Kang, Y., Lim, W. M. and Kim, S. D.: *HWAHAK KONGHAK*, **25**, 460(1987).
10. Kang, Y., Min, B. T., Nah, J. B. and Kim, S. D. : *AIChE J.*, **36**, 1255(1990).
11. Kang, Y., Min, B. T., Nah, J. B. and Kim, S. D.: *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, **51**, 235(1991).
12. Kang, Y., Shim, J. S., Cho, S. H., Choi, M. J., Lee, K. W. and Kim, S. D.: *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, **63**, 225(1995).
13. Kang, Y. and Kim, S. D.: *Chem. Ind. Technol.*, **13**, 27(1995).
14. Kwon, H. W., Kang, Y., Kim, S. D., Yashima, M. and Fan, L. T.: *I & EC Research*, **33**, 1852(1994).
15. Kang, Y., Cho, Y. J., Woo, K. J., Kim, K. I. and Kim, S. D.: *Chem. Eng. Sci.*, in press(1999).
16. Yashima, M., Nassar, R., Fan, L. T. and Kang, Y.: *AIChE J.*, **38**, 629(1991).
17. Priestler, M. B.: *Spectral Analysis and Time Series*, Vol. I & II, AP Inc.(1981).
18. Schumwang, R. H.: "Applied Statistical Time Series Analysis," Prentice Hall, NJ(1988).
19. Hillborn, R. C.: "Chaos and Nonlinear Dynamics", Oxford University Press, N.Y.(1994).
20. Sigeti, D. and Horsthermke: *Physical Review A*, **35**, 2276(1987).
21. Schroeder, M. R.: "Fractals, Chaos, Power Laws", Freeman and Company, N.Y.(1991).
22. Greenside, H. S., Ahlers, G., Hohenberg, P. C. and Walden, R. W.: *Physica D*, **5**, 322(1982).
23. Brandstater, A. and Swinney, H.: *Phys. Rev. A.*, **35**, 2207(1987).
24. Fan, L. T., Kang, Y., Nicogi, D. and Yashima, M.: *AIChE J.*, **39**, 513(1993).
25. Fraser, A.: *Physica*, **D34**, 391(1989).