

호기성 삼상 역 유동층에서 압력 요동의 Chaos 해석

김상우, 김현태, 송평섭, 이찬기, 강 용[†]

충남대학교 화학공학과

Chaos analysis of pressure fluctuation
in aerobic Three-Phase Inverse Fluidized BedsSang-Woo Kim, Hyun-Tae Kim, Pyung-Sub Song, Chan-Gi Lee, Yong Kang[†]Department of Chemical Engineering, Chungnam National University,
Taejeon 305-764, Korea**서론**

삼상 역 유동층은 전통적인 삼상 유동층의 장점인 삼상간의 접촉 효과가 좋고, 열 및 물질 전달 효과가 탁월하다는 장점을 그대로 유지하면서도 유동 입자에 작용하는 중력이 아닌 부력에 대하여 유동화 시키는 역 유동화의 특성을 이용할 수 있으므로 유동 입자의 밀도가 액체보다 작은 경우나 다공성의 입자 그리고 미소입자 등의 사용에도 그 용도를 확장시킬 수 있으며 에너지 소비가 낮으며, 고체 입자의 마모를 최소화 할 수 있다는 장점도 있다 하겠다. 또한 삼상 역 유동층은 기체 유속만으로도 유동화가 가능하기 때문에 발효공정 등의 생물 공학, 폐수처리 등의 환경공학, 생화학 그리고 다른 주변산업에도 그 응용성은 더욱 확대 될 수 있을 것으로 예견된다[1-5]. 특히, 삼상 역 유동층은 유동입자의 둘레에 형성되는 생물학적 필름(biofilm)의 두께를 미세하게 조절할 수 있기 때문에 생물학적 폐수처리 및 반응, 효소고정화 등에 매우 유동하게 응용될 수 있다 하겠다.

그러나, 삼상 역 유동층에 대한 연구는 현재 매우 미흡하며 국내·외적으로 이제 시작단계에 있는 실정이라 하겠다[6-8]. 다만, 기체-액체상이나 액체-고체상의 접촉을 다루는 이상 역 유동층(Two-Phase Inverse Fluidized Bed)이나 난류 접촉 등에 대한 연구들이 지금까지 꾸준히 이루어지고 있는 정도이다.

삼상 역 유동층이 그 산업적 응용분야인 폐수처리나 생물공학 및 생화학 분야의 반응기나 접촉공정으로 사용되기 위해서는 이들 반응기나 접촉공정의 설계나 scale-up·운전조건의 결정 및 처리량의 결정 등에 대한 공학적 정보가 매우 필요하다 하겠다.

삼상 역 유동층을 해석하고 모델링하려는 시도는 deterministic 방법보다 효과적이며 실제 systems의 현상에 좀더 접근할 수 있는 통계학적 해석방법들(stochastic, spectral, fractal 해석 등)에 대한 연구는 이 분야의 연구에 획기적인 정보제공을 할 수 있으리라 판단된다.

따라서, 본 연구에서는 삼상 역 유동층에서 기체-액체-고체의 접촉과 흐름현상에 의해 나타나는 고유의 동력학적(dynamic) 특성을 복합적으로 고찰하기 위해서 기포와 유동고체 입자의 무작위적 거동과 기체-액체-고체의 접촉 및 상호작용을 직접 측정할 수 있는 삼상 역 유동층 내부에서의 압력변동 특성을 통계학적 처리방법을 사용하여 해석함으로써 삼상 역 유동층의 복합적 동특성을 보다 효과적으로 규명하고자 하였다.

이론**상공간투영(Phase space portraits)**

다차원 상공간투영은 시간지연 방법을 이용한 압력요동의 time series로 설명되어 질 수

있다. 시간의 변화에 따른 압력변동 series $X(t)$ 로부터 다차원 상공간투영을 구성할 수 있는데 이는 다음과 같이 나타낼 수 있다[9, 10].

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

이 portrait를 p -차원 공간에 투사하면 $X(tk)$, $X(tk+\hat{\delta})$, \dots , $X[tk+(p-1)\hat{\delta}]$ 의 point를 지나게 되는데, 여기서 p 는 embedding 차원을 말하며 $\hat{\delta}$ 는 time delay이다. 이들 위상-공간(phase-space) portraits를 이용하여 시계열(time series)의 sequence가 나타나는 strange attractor를 찾아낼 수 있으며, 이들 자료들의 chaos거동 특성을 해석할 수 있다.

Shannon entropy

Shannon entropy는 계의 불확실성에 대한 좋은 척도가 된다 즉, 어떤 계의 앞으로 발생될 사건에 대해서 확실히 알 수 있다면 확률은 최대가 되고 따라서 Shannon entropy값은 최소값을 가지게 되며 반대로, 모든 확률이 모두 동일하게 $P(x_i)=1/N$ 이라면 $H(X)=\log_2(N)$ 이 되어 Shannon entropy는 최대값을 가지게 된다. 만약, $x(t)$ 가 시간지연으로 표현된 $x^*(t)$ 와 무관하다면, 이러한 2가지의 시계열에 대한 average joint entropy는 다음의 식(2)로 나타낼 수 있다[11, 12].

$$H(X, X^*) = -\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M P(x_i, x_j^*) \log_2 P(x_i, x_j^*) \quad (2)$$

실험

본 연구에서 사용된 실험장치는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 직경이 0.152 m ID이고 높이가 2.5 m인 아크릴 관을 사용하였다.

유동 고체입자로써 밀도가 877.3kg/m^3 이고 직경이 4mm인 구형의 폴리프로필렌 입자와 밀도가 966.6kg/m^3 이고 직경이 4mm인 구형의 폴리에틸렌 입자를 사용하였으며, 여기서 밀도값은 실험에 의해 구한 평균 밀도값을 사용하였다. 또한 연속액상(continuous liquid phase)으로는 물을, 기체분산상(dispersed phase)으로로는 여과된 압축공기를 사용하였다.

유동입자의 역 유동을 위해 연속액상을 유동층의 상부에서 하부로 일정유속으로 균일하게 흐르게 하기 위해 다공판 형태의 액체 분산판을 사용하였는데, 액체 분산판은 직경 3 mm의 구멍을 삼각피치로 균일하게 배치하였다. 한편, 기체분산상은 유동층의 하부에서 주입되어 상부로 상승하도록 하였다.

본 연구의 주요 실험변수로는 본 연구의 조업범위는 액체유속이 0-7 cm/s, 기체유속이 0.2-1.0 cm/s를 넘지않은 범위에서 실험하였다. 이 때, 축방향높이에 따라 20cm 간격으로 압력측정 탭을 설치하고 압력센서(Coppel Electronics)를 이용하여 각 위치에서 정압력강하를 측정하였다. 삼상 역 유동층에서 각 상(phase)들에 의해 나타나는 고유의 동력학적(dynamic) 특성을 복합적으로 고찰하기 위해서 기포 및 고체유동입자의 무작위적 거동과 기체-액체의 접촉 및 상호작용을 직접 예측할 수 있는 압력요동을 측정하였다. 삼상 역 유동층 내부에서 시간의 변화에 따라 변화하는 압력요동을 동압력센서를 사용하여 측정하였으며 측정된 반응기 내부에서 pressure fluctuation은 통계적 해석 방법을 사용하여 처리하였다. 반응기 내부에서의 동압력측정 센서로는 반도체 형태의 Coppel Electronics 제품을 사용하였으며, 압력센서를 분산판으로부터 0.2, 0.4, 0.8 그리고 1.0m에 설치하였다. 이와 같이 측정된 삼상 역 유동층의 내부에서의 압력요동(pressure fluctuations)은 압력변환기(pressure transducer)를 사용하여 pressure-time 신호를 volt-time 신호로 바꾸어 증폭기를 거쳐 A/D 변환기를 사용하여 디지털 신호로 변화하였으며 A/D 변환기를 거친 자료들은 자료수집계(data aquisition system, SC-1 SpectraCARD, Acton Reserch Co.)에 의해 PC에 입력시킨 후, RD-Card softwardfmd 이용하여 off-line process로 통계

적으로 처리하여 해석하였다. 각 실험조건에서 data sample의 크기는 3,000 points 이었으며, 이들 자료를 얻기 위한 sampling rate는 500Hz이었으며, sampling time은 6초로 하여 6초 동안 압력요동 자료를 수집하였는데, 이들 자료 크기와 자료채취 속도의 Combination은 각 조건에서 반응기 내부의 압력요동 특성을 나타내는 전체 스펙트럼을 해석하는데 충분하였다.

결과 및 고찰

호기성 삼상 역 유동층 내부에서 기체-액체-고체의 흐름 및 접촉 특성을 고찰하기 위해 이들 3개의 상들의 흐름에서 파생되는 층 내부에서 압력변동 특성을 고찰하고자 하였다.

삼상 역 유동층 내부에서 측정된 압력변동신호의 전형적인 예를 Fig. 2에 나타내었다. 이들 그림에서 볼 수 있듯이 압력변동신호의 진폭과 주파수는 유동층에서 다상의 흐름과 접촉현상과 밀접한 관계를 나타낼 수 있다. 이와 같은 압력요동의 시간의 변화에 따른 자료를 통계적 방법을 사용하여 재구성함으로써 system에 내재된 특성을 규명하고자 하였다.

삼상 역 유동층 내부에서 압력변동의 시간의 변화에 따른 자료들을 위상공간(phase space)에 재구성하여 나타낸 attractor를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서, 위상공간에 투영된 attractor는 기체의 유속이 증가함에 따라 자료는 점점 더 흩어지게 나타났으며 attractor의 반경이 증가한다는 것을 알 수 있다. 이는, 기체 유속이 증가함에 따라 유동층 내부에서 다상간들의 흐름이나 접촉거동이 점점 더 불규칙해지며 무작위적으로 되어간다고 볼 수 있다. 이와같은 결과는 기체의 유속이 증가함에 따라 유동층내에 기체의 체류량이 증가하며 그 흐름거동도 매우 불규칙해지고 유동층 내부에서의 난류현상도 증가되기 때문으로 해석할 수 있다.

반응기 내에 흐름 거동을 더욱 시각적이고 정량적으로 보여 주기 위해 압력요동의 Shannon entropy를 계산하였다. Fig. 4에 기체의 유속의 증가에 따른 PP와 PE의 Shannon entropy의 값들을 나타내었고, Fig. 5에 액체 유속의 증가에 따른 PP와 PE의 Shannon entropy의 값들을 나타내었다. Figs. 4와 5에서 보는 바와 같이 삼상역유동층에서 기체 및 액체의 유속이 증가함에 따라 Shannon entropy의 값이 증가함을 알 수 있다. 이는 기체유속 및 액체유속의 증가가 반응기내의 거동을 더욱 복잡하게 만든다는 것을 알 수 있다. Shannon entropy의 증가는 가능한 평균확률함수의 불확실성의 증가를 의미하기 때문에 높은 Shannon entropy의 값은 확실성의 감소를 가져온다. 더욱 높은 Shannon entropy의 값은 발생된 사건의 예측이 더욱 낮은 확률을 갖게 되는 것이다.

참고문헌

1. Garcia-Calderon, D., Buffiere, P., Moletta, R. and Elmaleh, S. : *Wat. Res.* **32**, 3593 (1998).
2. Tang, W.T. and Fan, L.S. : *Ind. Eng. Chem. Res.*, **29**, 128 (1990).
3. Chern, S.H., Muroyama, K. and Fan, L.S. : *Chem. Eng. Sci.*, **38**, 1167 (1983).
4. Choi, H.S. and Shim, M.S. : *KJChE*, **16**, 670 (1999).
5. Buffiere, P. and Moletta, R. : *Chem. Eng. Sci.*, **54**, 1233 (1999).
6. Nikolov, V., Farag, I. and Nikov, I. : *Bioprocess Eng.*, **23**, 427 (2000).
7. Lee, D.H., Epstein, N. and Grace, J.R. : *Korean J. Chem. Eng.*, **17**, 684 (2000).
8. Park, H.Y., Cho, Y.J., Lee, C.K. and Kang, Y. : Proc. of International Symposium on Chemical Engineering, pp. 305-311, Feb. 8-11, Cheju Island (2001).
6. Roux, J.C., Simoyi, R.H., Swinney, H.L. : *Physica*, **8D**, 257-261 (1983).
7. Huilin, L., Gidaspow, D. and Bouillard, J.X. : *AIChE Symp. Series*, **91**(308), 103-111 (1995).
8. Packard, N.H., Crutchfield, J.P., Garmer, J.D., Shaw, R.S. : *Phys. Rev. Lett.*, **45**, 712-716 (1980).
9. Hillborn, R.C. : *Chaos & Nonlinear Dynamics*; Oxford university Press, N.Y. 1994.

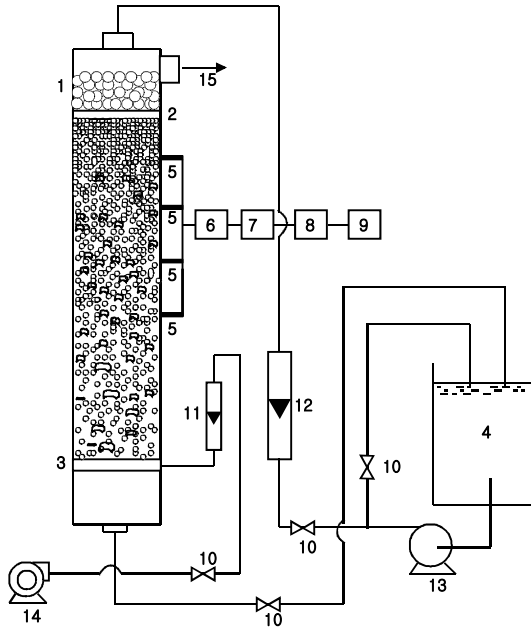


Fig.1. Experimental apparatus:

- | | |
|------------------------|-----------------------|
| 1. Calming section | 9. Computer |
| 2. Liquid distributor | 10. Valve |
| 3. Gas distributor | 11. Gas flow meter |
| 4. Reservoir | 12. Liquid flow meter |
| 5. Pressure Transducer | 13. Pump |
| 6. Amplifier | 14. Air Compressor |
| 7. Low-pass filter | 15. Vent liner |
| 8. A/D converter | |

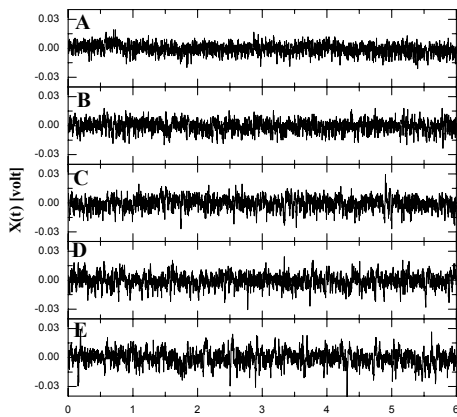


Fig. 2. Typical example of the pressure fluctuation in the inverse fluidized-bed ($U_L = 0.02 \text{ m/s}$).
 A; $V_G = 0.002 \text{ m/s}$ B; $V_G = 0.004 \text{ m/s}$
 C; $V_G = 0.006 \text{ m/s}$ D; $V_G = 0.008 \text{ m/s}$
 D; $V_G = 0.010 \text{ m/s}$

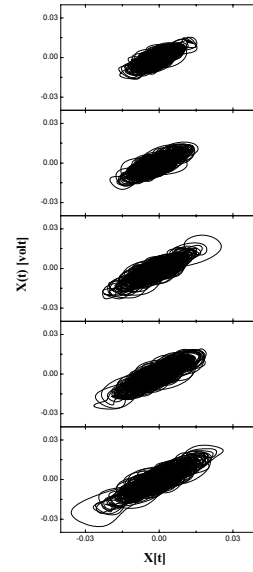


Fig. 3. Typical example of phase space portraits of the pressure fluctuation in the inverse fluidized-bed ($U_L = 0.02 \text{ m/s}$).
 A; $V_G = 0.002 \text{ m/s}$ B; $V_G = 0.004 \text{ m/s}$
 C; $V_G = 0.006 \text{ m/s}$ D; $V_G = 0.008 \text{ m/s}$
 D; $V_G = 0.010 \text{ m/s}$

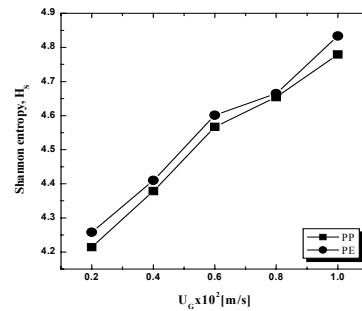


Fig. 4. Effects of U_G on the Shannon entropy in three-phase inverse fluidized beds. ($U_L = 0.02 \text{ m/s}$)

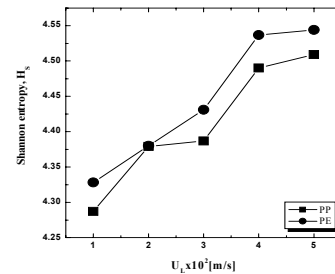


Fig. 5. Effects of U_L on the Shannon entropy in three-phase inverse fluidized beds. ($U_G = 0.004 \text{ m/s}$)