

Annular 유동층 반응기에서 최소유동화 속도 및 압력요동 특성

손성모 · 김옥영 · 신익상 · 강 용[†] · 최명재*

충남대학교 화학공학과
305-764 대전시 유성구 궁동 220
*한국화학연구원, 신화학연구원
305-343 대전시 유성구 장동 100
(2008년 4월 29일 접수, 2008년 5월 7일 채택)

Characteristics of Minimum Fluidization Velocity and Pressure Fluctuations in Annular Fluidized Beds

Sung-Mo Son, Uk-Yeong Kim, Ik-Sang Shin, Yong Kang[†] and Myung-Jae Choi*

School of Chemical Engineering, Chungnam National University, 220 Gung-dong, Yuseong-ku, Daejeon 305-764, Korea

*Advanced Chemical Technology Division, Korea Research Institute of Chemical Technology, 100 Gung-dong, Yuseong-ku, Daejeon 305-600, Korea

(Received 29 April 2008; accepted 7 May 2008)

요 약

직경이 0.102 m이고 높이가 2.0 m인 annular 유동층에서 최소유동화 속도 및 압력 요동 특성을 고찰하였다. 기체유속(U_G), 고체 입자의 크기(d_p) 그리고 유동층 온도가 최소유동화 속도 및 압력 요동 특성에 미치는 영향을 검토하였다. 본 연구 결과, annular 유동층 내의 압력 요동 자료로부터 구한 상관차원을 유동층 내부의 기체 및 유동 입자의 복합적인 거동을 정량적으로 나타내는 파라미터로 쓸 수 있었으며, 이 상관차원의 값은 기체의 유속, 유동 입자의 크기 그리고 반응기의 온도가 증가함에 따라 증가하였다. 유동층에서 유동입자의 최소유동화 속도를 유동층에서 압력 강하 및 압력 요동자료의 표준 편차를 사용하는 방법뿐만 아니라 압력 요동 자료의 상관차원을 이용하여서도 구할 수 있었으며 이들 각기 다른 방법으로 구한 최소 유동화 속도 값은 서로 매우 유사하였다. Annular 유동층에서 유동 입자의 최소유동화 속도는 유동 입자의 크기가 증가할수록 증가하였으나 유동층의 온도가 증가함에 따라 감소하였다. 본 연구의 범위 내에서 annular 유동층에서 최소 유동화 속도를 압력 요동 자료의 상관 차원과 무차원군의 함수로 나타낼 수 있었다.

Abstract – Characteristics of minimum fluidization velocity and pressure fluctuations were investigated in an annular fluidized bed whose diameter was 0.102 m and 2.0 m in height. Effects of gas velocity, particle size and bed temperature on the minimum fluidization velocity and pressure fluctuations were examined. The values of minimum fluidization velocity obtained by means of three different methods were very similar each other. The correlation dimension could be a quantitative parameter for expression the resultant complex behavior of gas and solid mixture in the annular fluidized bed. The value of correlation dimension increased with increasing gas velocity, fluidized particle size and temperature in the bed. The minimum fluidization velocity could be determined by means of correlation dimension of pressure fluctuations as well as pressure drop in the bed and standard deviation of pressure fluctuations. The minimum fluidization velocity increased with increasing particle size but decreased with increasing bed temperature in annular fluidized beds. The minimum fluidization velocity was well correlated in terms of correlation dimension as well as operating variables within experimented conditions of this study.

Key words: Annular Fluidized Bed, Minimum Fluidization Velocity, Pressure Fluctuations, Correlation Dimensions

1. 서 론

페플라스틱은 고분자 물질로 쉽게 분해되지 않기 때문에 매립이나 소각 등의 일반적 처리에 수반되는 많은 문제점으로 인해 열분

해에 의한 처리가 환경적인 측면이나 경제적인 측면에서 두각을 나타내고 있다. 즉, 페플라스틱의 열분해 처리는 폐기물의 저공해 처리와 원료의 회수라는 두 가지 과제를 하나의 기술로 해결한다는 취지로 개발이 진행되어 왔다[1, 2]. 페 폴리스티렌이나 스티렌 폼은 열분해를 통하여 부가가치가 높은 스티렌 단량체의 회수가 용이하며 그 외 성분은 가솔린 등 다른 유효 화학물질로 회수되어 사용될 수 있어 다른 종류의 플라스틱 폐기물보다 경제성 확보 측면에서

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: kangyong@cnu.ac.kr

[‡]이 논문은 인하대학교 정성택 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

큰 관심의 대상이 되고 있다[1-5].

최근에는 페PS(polystyrene)를 이용하여 오일의 수율과 스티렌 단량체의 선택도를 높이기 위한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 고체와 유체(기체나 액체)의 접촉을 향상시키고, 효과적인 열전달, 연료 선택의 유연성, 향상된 고체혼합과 물질전달과 같은 특성을 갖고 있는 유동층 반응기를 사용하여 페 폴리스티렌을 열분해 하기 위한 연구가 진행되고 있다. 또한, 현재까지 페플라스틱의 열분해는 주로 회분식 반응기를 사용하여 왔으나 회분식 반응기는 연속 조작의 어려움이 있을 뿐만 아니라 많은 양의 플라스틱 폐기물을 처리하기 위해선 그 부피가 매우 커져야 하는 설계상의 문제점도 안고 있다[6, 7]. 또한 회분식 반응기에서 페 플라스틱을 열분해 할 경우 생성되는 고체 성분의 잔사는 촉매의 활성을 급격히 감소시켜 오일의 회수율과 스티렌 단량체의 회수를 위한 선택도에 심각한 영향을 미쳐왔다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 회분식반응기에서 1차로 열분해 된 잔사를 유동층 반응기를 사용하여 효과적으로 열분해 하는 연구결과도 보고된바 있다. 유동층반응기에서 잔사의 열분해는 스티렌 단량체와 유용한 화학 물질들을 일부 얻지만, 반응기내의 층물질 표면에 잔사의 일부분이 타르(tar)로 남아있게 된다. 이러한 타르의 효과적인 처리는 유동층 반응기 내부에서 촉매의 활성화 유지에 매우 중요한 반면 탄소 성분인 타르를 잘만 활용하면 열분해 공정의 에너지원으로 사용하는 것이 효과적일 수 있다. 즉, 페PS의 열분해 공정에서 남은 타르 성분을 연소하면 많은 양의 열이 발생하므로 이때 발생하는 열을 활용하여 페PS의 열분해 반응에 사용하면 매우 경제적일 수 있다. 이와 같은 점에 착안하여 타르 성분의 연소에서 발생하는 열은 매우 효과적으로 회수하여 페PS의 열분해 반응에 사용하고자 annular형 반응기가 제안되고 있다[8, 9]. 그러나, 지금까지 이에 대한 연구는 매우 미흡한 실정이다.

Annular 유동층에서 기포(bubble) 상과 에밀전(emulsion) 상의 접촉 및 상호 작용 뿐만 아니라 기포 자체들의 합체, 분산, 분쇄 그리고 흐름특성 등은 annular 유동층 고유의 동적 거동특성을 나타내므로, 이와 같은 기포의 거동에 의한 annular 유동층의 비선형 동력학적인 측면에서의 수력학적 특성은 annular 형태의 반응기를 사용할 경우 반응기의 내부에서 열전달, 물질 전달 뿐만 아니라 반응 전환율에도 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다. 그러므로 annular 유동층 고유의 특성을 복합적으로 고찰하기 위해선 기포의 거동에 의한 유동층 내부에서의 압력요동(pressure fluctuation) 특성을 해석하는 것이 매우 효과적이라 할 수 있으며, 압력요동은 여러 다상반응기의 조업상태를 대표할 수 있는 지표로서 최근에 각광 받아오고 있다[10-12].

따라서, 본 연구에서는 annular 유동층반응기의 수력학적 특성에 대하여 고찰하였다. 즉, annular 유동층반응기내의 온도변화와 층물질인 모래의 입자 크기가 최소유동화속도에 미치는 영향을 고찰하였으며, 반응기내의 압력요동이 수력학적 특성에 미치는 영향을 검토하였다. 본 연구에서 얻어진 annular 유동층반응기에서 기체와 고체의 거동에 관한 압력요동은 주요 실험변수에 대한 상관차원과 무차원군의 상관식으로 표현함으로써 annular 유동층을 설계안전하고 공업적으로 대형화(scale-up)하는데 필수적인 공학적 자료를 제시하고자 하였다.

2. 실험

본 연구에서 사용한 annular 유동층반응기는 Fig. 1에서 볼 수 있

듯이 페PS 열분해를 위한 내부 반응기는 높이가 2.0 m이고 직경이 0.0508 m인 SUS 316을 사용하였으며, 페PS의 열분해 후 남은 잔사(타르)의 연소를 위한 외부 반응기는 높이가 2.0 m이고 직경이 0.102 m인 SUS 316을 사용하였다. 기체는 건조 예열된 압축공기를 사용하였고, 고체 입자는 평균 입경이 0.220, 0.400, 0.625, 0.765 mm 이고 진밀도가 2600 kg/m³인 모래 입자를 사용하였으며 유동고체 입자의 물성은 Table 1에 나타내었다. 반응기의 온도는 673, 773, 873, 973 K 등 4종류로 변화하였다.

Annular 유동층 내부반응기의 분산판은 perforated plate를 사용하였으며, 외부반응기는 ring nozzle 형태의 분산판을 사용하여 반응기 내부에 기체를 유입하였다. 반응기내 압력요동을 측정하기 위해 분산판으로 부터 0.3 m와 0.4 m의 위치에 차압변환기(differential pressure transmitter, Validyne, Model P24D)를 설치하였으며, 일정 반응 조건에서 annular 유동층이 정상상태에서 도달하였을 때 압력강하 및 압력차 요동을 측정하였다. 유동층 내부의 압력신호를 측정하는데 사용한 tube는 유동층 벽면에 부착되어 끝이 반응기의 중앙까지 가도록 설치하였으며, tube의 끝은 층 물질의 유입을 막기 위하여 400 mesh의 망으로 막아 사용하였다. 압력 변환기로부터 유입된 유동층 내에 압력신호는 A/D converter(Real Time Devices Inc., Model AD2110)에 의해 디지털 신호로 바뀌어 computer에 저장되었다. 일정실험조건에서 압력요동 data는 300 Hz의 속도로 측정하였으며, 측정 시간을 20 sec로 하여 sample data의 길이는 6000 개로 하였다.

측정된 압력 변동 신호의 특성 해석을 위하여 압력 변동신호 자료를 통계학적으로 처리하였다[11, 12]. 즉, 압력변동 신호 자료를

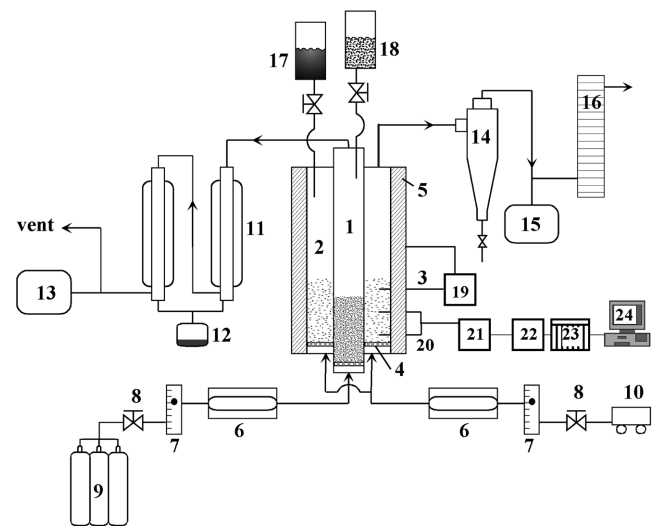


Fig. 1. Experimental apparatus.

- | | |
|-----------------------|----------------------------------|
| 1. Inner Reactor | 13. G.C. |
| 2. Outer Reactor | 14. Cyclone |
| 3. Thermocouple | 15. Flue Gas Analyzer |
| 4. Distributor | 16. Dust Filter |
| 5. Heater | 17. Feed Hopper for Combustion |
| 6. Preheater | 18. Feed Hopper for Pyrolysis |
| 7. Flowmeter | 19. Temperature controller |
| 8. Control Valve | 20. Differential Pressure Sensor |
| 9. N ₂ Gas | 21. Amplifier |
| 10. Air Compressor | 22. Low Pass Filter |
| 11. Condenser | 23. A/D Converter |
| 12. Receiver | 24. Computer |

Table 1. Properties of fluidized solid particles

Particle	Mean size, \bar{d}_p (mm)	ρ_p (kg/m ³)	U_{mf} (cm/s) at 298 K
Sand	0.220	2600	3.70
Sand	0.400	2600	11.65
Sand	0.625	2600	20.12
Sand	0.775	2600	21.18

위상상관함수로 나타내기 위해 상관적분(correlation function)을 사용하였는데 통계적 자료의 상관적분, $C(r)$ 은 다음 식으로 표현될 수 있다[13, 14].

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

여기서, m 은 처리하는 자료의 수를 나타내고 H 는 다음 식으로 표시되는 Heavyside 함수이다.

$$H[r - |Z_i(t) - Z_j(t)|] = \begin{cases} 1 & \text{if } r > |Z_i(t) - Z_j(t)| \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

통계적으로 처리하여 얻은 상관적분 $C(r)$ 을 hypersphere의 반경 r 에 대해 식 (3)과 같은 상관식으로 나타낼 수 있는데, 식 (3)에서 D_C 는 처리하는 통계자료의 상관차원을 나타내므로 식 (3)으로부터 주어진 실험 조건에서 압력 변동 자료의 상관 차원을 구하였다.

$$C(r) = kr^{D_C} \quad (3)$$

3. 결과 및 고찰

Annular 유동층에서 측정된 기체 유속의 변화에 따른 전형적인 압력요동의 신호를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 기체 유속의 증가에 따라 압력 요동의 진폭은 커지고 진동수는 증가하는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 기체의 유속이 증가함에 따라 기포의 크기가 증가하고 또한 기포의 갯수가 증가하기 때문으로 설명할 수 있다. 압력요동 신호에서 진폭은 파동의 에너지를 나타내는데, 유동층 내부에서 기포의 크기가 증가함에 따라 기포에 작용하는 부력이 증가하여 기포의 상승 속도가 빨라지므로 기포의 운동 에너지는 증가하게 되어 압력 요동의 에너지를 나타내는 진폭은 증가한다고 설명되고 있다. 또한, 기체의 유속이 증가하면 유동층 내부에 투입되는 기체의 양이 증가하게 되는데 기체는 유동층 내부 에너지 분산상인 기포상으로 존재하게 되므로 기포의 개수가 증가하게 되어 압력 요동의 진동수가 증가하게 된다[15, 16].

Annular 유동층에서 기체의 유속이 유동층 내부 시험 영역에서의 압력 강하에 미치는 영향을 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 기체의 유속이 낮은 고정층 범위에서는 기체 유속의 증가에 따라 annular 유동층의 압력 강하가 거의 선형적으로 증가하지만 기체의 유속이 점점 증가하여 어느 정도 이상 되면 유동층 내부에서의 압력 강하는 기체 유속의 증가에도 불구하고 거의 일정해지는 것을 알 수 있다. 이와 같은 압력 강하변화를 이용하여 각 유동 조건에서 유동입자에서 최소 유동화 속도를 결정하였다[15, 16].

Annular 유동층에서 기체 유속이 압력 요동 자료의 표준편차(standard deviation, SD)에 미치는 영향을 Fig. 4에 나타내었다. Fig.

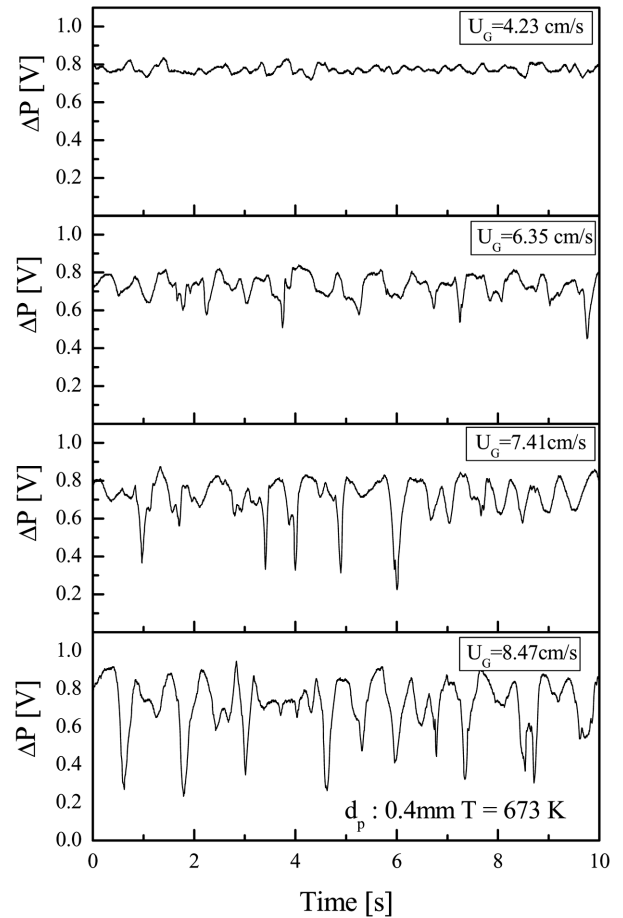


Fig. 2. Typical examples of pressure drop fluctuations in annular fluidized beds.

4에서 볼 수 있듯이 압력 요동 자료의 표준 편차 값은 각 유동 조건에서 기체의 유속이 낮은 범위에서는 일정한 값을 유지하다가 기체 유속이 어느 값이 도달하면 기체의 유속 증가에 따라 거의 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 기체 유속이 어느점에 도달하면 고체 유동 입자가 이와 같이 기체 유속의 변화에 따라 압력 요동 자료의 표준 편차 값이 변화하는 점에서 유동 입자의 최소 유동화 속도를 결정할 수 있는데[15, 16], 표준 편차에 의해 결정된 유동입자의 최소 유동화 속도와 압력강하 변화에 의해 측정된 유동 입자의 최소 유동화 속도는 10% 오차 범위 내에서 값을 나타내었다.

최소유동화속도 결정시 유동층 내부에서의 압력 강하를 이용할 경우 기체 유속을 상승하는 경우와 하강하는 경우에 따라 서로 다른 값을 얻을 수 있지만, 압력요동의 표준편차에 의해 얻은 최소유동화속도는 압력강하를 이용한 방법보다 오차가 적기 때문에 최근 많은 연구자들에 의해 사용되고 있다[17]. 한편, Fig. 4에서 볼 수 있듯이 유동층 내부에서 온도의 증가는 유동 입자의 최소유동화속도를 감소시키는 것을 알 수 있다. 고온에서 조업되는 유동층 반응기에서는 온도가 증가하면 기체의 부피가 팽창하게 되어 유동입자의 최소유동화 속도는 감소하는 것으로 사료된다[15, 16].

Annular 유동층에서 기체 유속의 변화가 유동층 내부 압력 요동 자료의 상관차원(correlation dimension)에 미치는 영향을 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이 기체 유속이 낮은 범위에서는

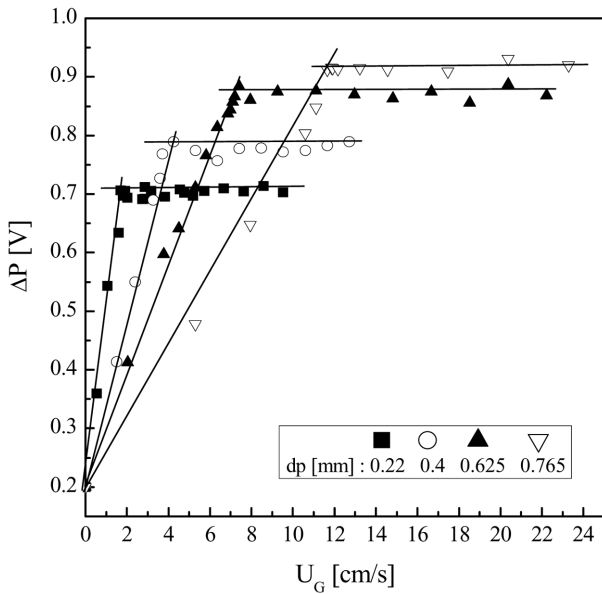


Fig. 3. Pressure drop variations in annular fluidized beds (T=673 K).

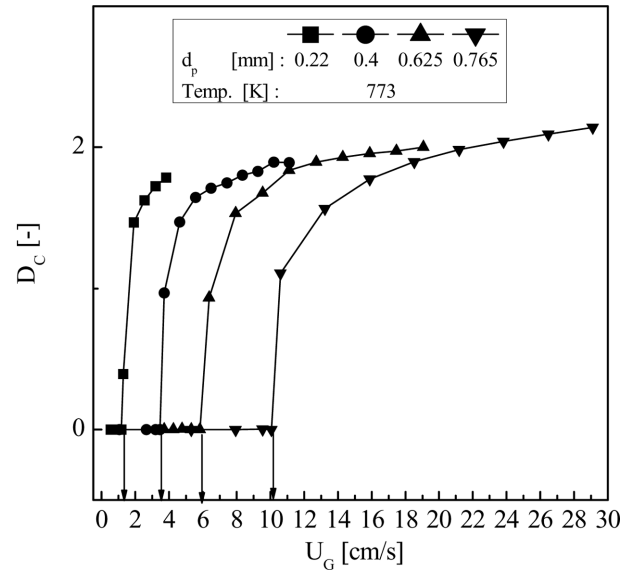


Fig. 5. Effects of gas velocity on the correlation dimension of pressure fluctuations in annular fluidized beds.

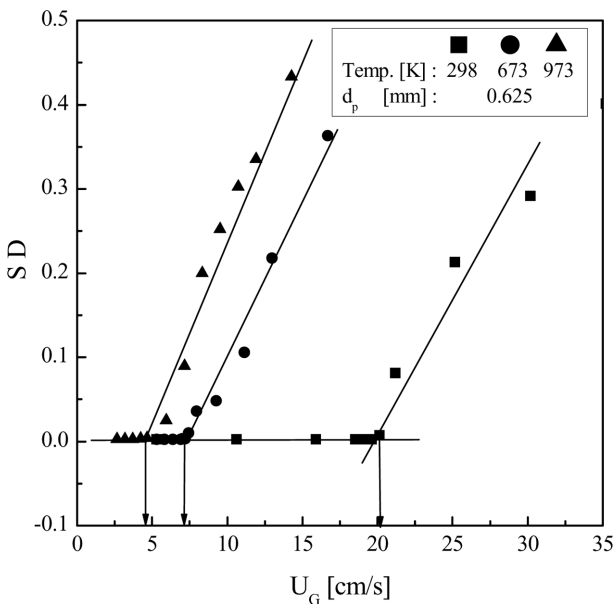


Fig. 4. Effects of gas velocity on the standard deviation of pressure fluctuations in annular fluidized beds.

기체 유속이 증가함에 따라 압력 요동자료의 상관차원은 변화하지 않으나 기체의 유속이 어느 값에 도달하며 압력요동 자료의 상관 차원 값은 갑자기 증가하는 것을 알 수 있다. 이와 같이 기체 유속의 증가에 따라 압력 요동 자료의 상관 차원이 갑자기 증가하기 시작하는 기체 유속 조건은 압력 요동 자료의 표준 편차 값이 거의 선형적으로 증가하기 시작하는 기체 유속의 조건과 5% 오차 범위 내에서 거의 일치하였으며 또 압력강하가 거의 일정하게 유지되기 시작하는 유동조건과도 거의 유사하였다. 이와 같은 결과에 의하여, 압력 요동 자료의 상관 차원 값의 변화로 annular 유동층에서 유동 입자의 최소 유동화 속도를 예측하는 것이 가능하다고 할 수 있다. Fig. 5에서 유동입자의 크기가 클수록 압력 요동 자료의 상관 차원의 값은 큰 값을 나타내었는데 이는 입자의 크기가 클수록 유동층

내부에 형성되는 기포의 크기가 커지며 또한 기포의 상승 속도가 증가하여서 유동층 내부에서 기포와 고체 입자의 흐름 거동이 유동 입자가 작은 경우 보다 복잡하고 비선형성이 증가하여서 거동의 예측이 점점 어려워지기 때문에 해석할 수 있다[11-13].

Annular 유동층에서 유동층 내부의 온도가 압력 요동 자료의 상관 차원에 미치는 영향을 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 유동층의 온도가 증가함에 따라서 상관차원, D_C 값은 증가하였는데, 이는 유동층 온도의 증가는 기체의 체류량을 증가시킬 뿐만 아니라 기체의 부피를 팽창시켜 밀도가 감소하기 때문에 사료 된다. 즉, 기체 밀도의 감소에 따라 유동층 내부에서 상승하는 기포의 항력이 감소하며, 이러한 항력의 감소는 기포의 합체현상을 증가시켜 기포의 크기를 증가시키기 때문이다. 따라서 기포 크기의 증가는 기포의 무작위적이고 무질서한 거동의 증가를 가져와 유동층 내부의 거동을 복잡하게 만들기 때문에 압력 요동 자료의 상관차원은 증가한다고 할 수 있다.

이와 같이 annular 유동층에서 조업온도의 변화는 유동층 내부에서 유동현상의 변화를 가져오므로 온도의 변화가 유동 입자의 최소 유동화 속도에 미치는 영향을 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7에서 볼 수 있듯이 모든 입자들에 대하여 유동층 내부 온도의 증가에 따라 유동 입자의 최소유동화속도는 감소하는 것을 볼 수 있다. 특히, 큰 입자의 경우 최소유동화속도의 변화 폭은 더 커짐을 보였다.

Annular 유동층에서 유동 입자의 크기나 유동층 온도의 변화에 따라 유동 조건이 변화하므로 이에 따라 유동층 내부에서 형성되는 기포의 크기와 개수 및 상승 속도 등도 변화하며 유동 입자와 기포 간의 접촉과 흐름 현상 등이 변화하므로 이러한 변화를 종합적으로 나타낼 수 있는 압력 요동 자료의 상관 차원의 변화에 따른 유동 입자의 최소 유동화 속도의 변화를 무차원군으로써 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8에서 볼 수 있듯이 annular 유동층에서 유동 입자의 최소 유동화 속도를 기준으로 한 레이놀즈수(Reynolds number)는 압력 요동 자료의 상관차원값이 감소함에 따라 증가하는 것을 알 수 있다. 이와 같은 연관성으로부터 유동 입자의 최소 유동화 속도를 압력 요동 자료의 상관 차원 값의 함수로 식 (4)와 같이 나타낼

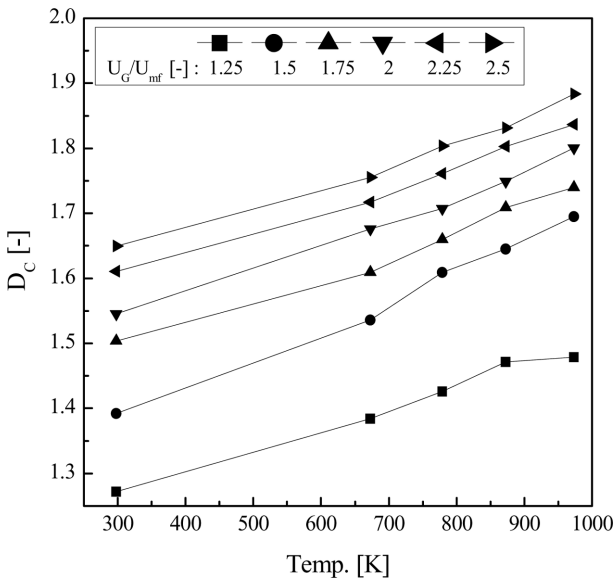


Fig. 6. Effects of temperature on the correlation dimension of pressure fluctuations in annular fluidized beds ($d_p=0.4$ mm).

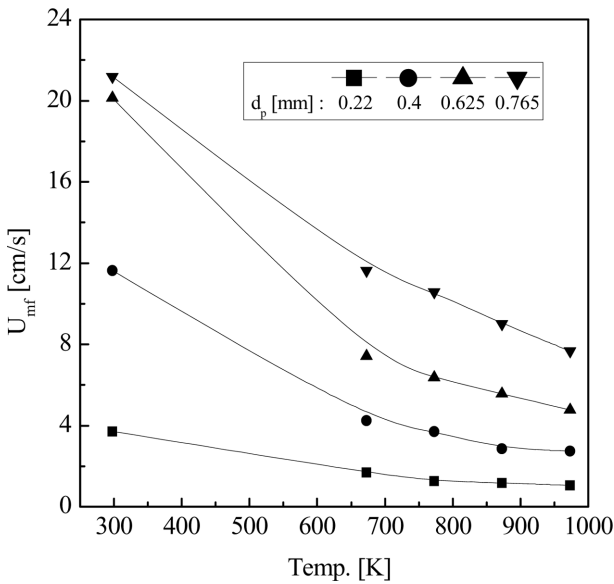


Fig. 7. Effects of temperature on the minimum fluidized velocity in the annular fluidized beds.

수 있었으며 식 (4)의 상관 계수는 0.97이었다.

$$\frac{d_p \rho_g U_{mf}}{\mu_g} = 4.05 \times 10^{-4} Ar^{0.950} D_c^{0.006} \quad (4)$$

본 연구의 결과로부터 입자의 크기와 유동층내 온도의 변화에 따른 최소유동화속도의 변화를 Ergun식[18]과 Wen과 Yu의 상관식[19]과 비교하여 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9는 실험적으로 측정된 유동 입자의 최소 유동화 속도를 기준으로 한 관성력과 점성력의 비인 Reynolds 수와 유동 입자크기 및 입자밀도들을 나타내는 고체 유동 입자 특성 그리고, 기체특성(기체점도 및 기체밀도)의 함수인 Archimedes 수의 연관성을 나타낸 것인데, Archimedes 수가 증가함에 따라 거의 선형적으로 Reynolds 수가 증가하게 되는 것을 볼 수 있다. Fig. 9에서, 본 연구의 결과는 문헌의 결과보다 약간 낮은 값

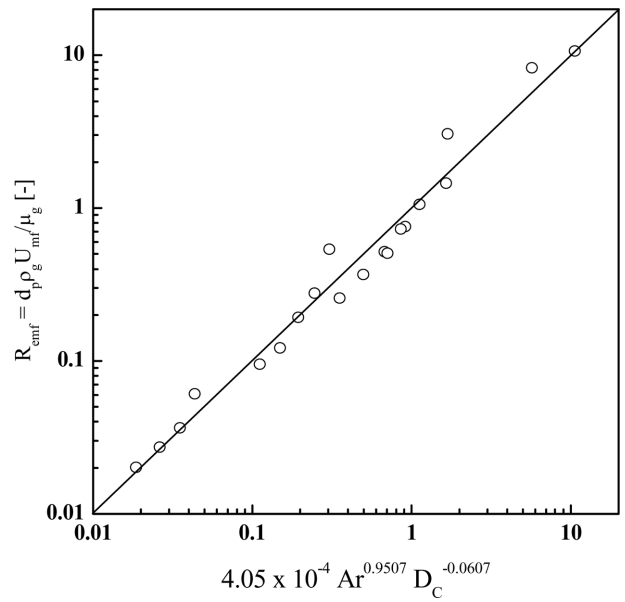


Fig. 8. Relation between the U_{mf} and the correlation dimension of pressure fluctuations in annular fluidized beds.

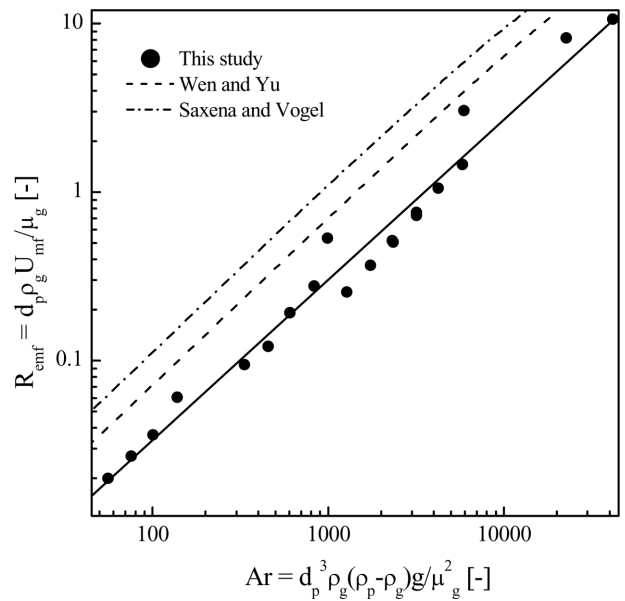


Fig. 9. Comparison of Correlations for the prediction of U_{mf} in annular fluidized beds with of those of conventional fluidized beds.

을 나타내었는데, 이는 사용한 입자들의 밀도와 크기, 구형도 그리고 공극률에 따른 영향들 뿐만 아니라 유동층의 구조가 Annular 형이기 때문으로 해석할 수 있다[16]. 본 연구의 결과와 문헌의 자료로부터 최소유동화속도와 Ar과의 상관성은 식 (5)와 같이 나타낼 수 있었는데, 이 식의 상관계수는 0.97로 실험결과들과 잘 일치하였다.

$$U_{mf} = \frac{\mu}{\rho_g d_p} (\sqrt{9.93^2 + 0.0056 Ar} - 9.93) \quad (5)$$

4. 결 론

폐PS의 열분해공정에서 효율적으로 잔사를 처리하고 잔사의 연소시 발생된 열을 회수하여 폐PS의 열분해 반응에 사용함으로써 발

열 반응과 흡열 반응을 동시에 수행하여 매우 경제적으로 폐PS를 처리하기 위해 제안된 Annular 유동층반응기의 수력학적 특성을 고찰한 본 연구의 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) Annular 유동층내의 압력 요동 자료로부터 상관차원(correlation dimension)을 구하여 반응기내에서 기체 및 유동 입자의 복합적인 거동을 정량적으로 나타낼 수 있었는데, 상관차원의 값은 기체의 유속, 유동 입자의 크기, 그리고 반응기의 온도가 증가함에 따라 증가하였다.

(2) Annular 유동층에서 기체 유속의 변화에 따른 유동층 내부의 압력 강하 변화와 압력 요동 자료의 표준 편차의 변화 그리고 압력 요동자료의 상관차원의 변화들로부터 주어진 유동 입자의 최소 유동화 속도를 각각 구할 수 있었는데, 이들 최소 유동화 속도 값은 거의 유사하였다.

(3) Annular 유동층반응기에서 유동입자의 최소 유동화 속도는 유동입자의 크기가 증가할수록 증가하였으나 반응기의 운전 온도가 증가함에 따라 감소하였다.

(4) Annular 유동층반응기에서 유동입자의 최소 유동화 속도를 유동층 내부 압력 요동 자료 상관차원 값의 함수와 무차원군의 함수로 나타낼 수 있었다.

감 사

본 연구는 한국화학연구원과 자원 재활용 사업단의 연구비(3A-3-1) 지원으로 진행되었으며, 귀 기관들에 감사드립니다.

사용기호

Ar : Archimedes number [$Ar = d_p^3 \rho_g (\rho_p - \rho_g) g / \mu^2$]

$C_d(r)$: correlation integral

D_C : correlation dimension

D : bed diameter [m]

d_p : particle diameter [m]

g : gravitational acceleration [m/s^2]

H : Heavyside function defined as Eq. (2)

m : number of data point

P : pressure [MPa]

Re : Reynolds number [$Re = d_p \rho_g u_g / \mu_g$]

r : radius of hypersphere

T : temperature [K]

t : time [s]

U : fluidizing velocity [m/s]

U_{mf} : minimum fluidization velocity [m/s]

그리스 문자

μ : viscosity [kg/ms]

ρ : density [kg/m^3]

아래첨자

g : gas phase

p : particle

참고문헌

- Sasse, F. and Emig, G., "Chemical Recycling of Polymer Materials," *Chem. Eng. Technol.*, **21**(10), 777-789(1998).
- Lim, K. Y., Jun, H. C., Lee, H. P., Kim, H. T. and Yoo, K. O., "Recovery of Styrene Monomer from Polystyrene Using Carbon Black from Pyrolysis of Waste Tire," *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **11**(8), 952-958(2000).
- Hirose, T., Takai, Y., Azuma, N., Morioka, Y. and Ueno, A., "Polystyrene Foams with Dispersed Catalyst for a Design of Recyclable Plastics," *J. Mater. Res.*, **13**(1), 77-80(1998).
- Sakata, Y., Uddin, A. and Muto, A., "Degradation of Polyethylene and Polypropylene into Fuel oil by using Solid Acid and Non-acid Catalysts," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, **51**(1-2), 135-155(1999).
- Mertin, J., Kirsten, A., Predel, M. and Kaminsky, W., "Cracking Catalysts used as Fluidized Bed Material in the Hamburg Pyrolysis Process," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, **49**(1-2), 87-95(1999).
- Lee, C. G., Kim, J. S., Song, P. S., Cho, Y. J., Kang, Y. and Choi, M. J., "Effects of Catalyst on the Pyrolysis of Polystyrene Wastes in a Fluidized Bed Catalytic Reactor," *HWAHAK KONGHAK*, **40**(4), 445-449(2002).
- Lee, C. G., Kang, S. H., Kim, J. S., Yun, J. S., Kang, Y. and Choi, M. J., "Characteristics of Catalytic Pyrolysis of Polystyrene," *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **15**(2), 188-193(2004).
- Son, S. M., Kim, U. K., Shin, I. S., Kang, Y., Kang, S. H., Yoon, B. T. and Choi, M. J., "Analysis of gas flow behavior in an annular fluidized bed reactor for PS waste treatment," The 4th International Symposium on Feedstock Recycling of Plastics and Other Polymeric Materials, September, Jeju(2007).
- Shin, I. S., Son, S. M., Kim, U. Y. and Kang, Y., "Gas Mixing and Characteristics of RTD in an Annular Fluidized Bed Reactor," The 20th Symposium on Chemical Engineering Daejeon/Chungnam- Kyushu, December, Daejeon(2007).
- van den Bleek, C. M., Coppens, M. O. and Schouten, J. C., "Applications of Chaos Analysis to Multiphase Reactors," *Chem. Eng. Sci.*, **57**(22-23), 4763-4778(2002).
- Kang, S. H., Lee, C. G., Song, P. S., Kang, Y., Kim, S. D. and Kim, S. J., "Radial Liquid Dispersion and Chaotic Behavior of Liquid-Solid Flow in Liquid-Solid Circulating Fluidized Beds," *Korean Chem. Eng. Res.*, **42**(2), 241-247(2004).
- Karamavruc, A. I., Clark, N. N. and Halow, J. S., "Application of Mutual Information Theory to the Fluid Bed Temperature and Differential Pressure Signal Analysis," *Powder Technol.*, **84**(3), 247-257(1995).
- Schouten, J. C., and van den Bleek, C. M., "Chaotic Hydrodynamics of Fluidization Consequences for Scaling and Modeling of Fluid bed Reactors," *AIChE Symp. Series*, **88**(289), 70-84(1992).
- Daw, C. S. and Halow, J. S., "Characterization of Voidage and Pressure Signals from Fluidized Beds Using Deterministic Chaos Theory," *Proc. 11th International Con. on Fluidized Bed Combustion*, Montreal, April, 777-786(1991).
- Kunii, D. and Levenspiel, O. Fluidization Engineering, Butterworth-Heinemann (1991).
- Chitester, D. C., Kornosky, R. M., Fan, L. S. and Danko, J. P., "Characteristics of Fluidization at High Pressure," *Chem. Eng. Sci.*,

- 39**(2), 253-261(1984).
17. Kang, S. H., Kang, Y. Han, K. H. and Jin, G. T., "Effects of Pressure on the Minimum Fluidization Velocity and Bubble Properties in a Gas-solid Fluidized Bed;" **10**(3), 330-336(2004).
18. Ergun, S., "Fluid Flow through Packed Columns;" *Chem. Engr. Prog.*, **48**(2), 89-94(1952).
19. Wen, C. Y. and Yu, Y. H., "A generalized Method for Predicting the Minimum Fluidization Velocity;" *AIChE J.*, **12**(3), 610-612 (1966).
18. Ergun, S., "Fluid Flow through Packed Columns;" *Chem. Engr.*