

가압유동층에서 압력변동을 이용한 거동해석

감석환, 한근희*, 이창근*, 진경태*, 손재익*, 강 용
충남대학교 화학공학과, *한국에너지기술연구원 청정에너지연구부

Behavior analysis using pressure fluctuations in a pressurized fluidized bed

Suk-Hwan Kang, Keun-Hee Han*, Chang-Keun Yi*,
Gyoung-Tae Jin*, Jae-Ek Son* and Yong Kang†

Department of Chemical Engineering, Chungnam National University,

*Department of Clean Energy Research, KIER

1. 서론

가압유동층은 복합발전이 가능하며, 총괄효율이 높을 뿐만 아니라 가압에 의한 장치의 소형화 및 탈황효율의 증대 그리고 배가스 중의 NOx 농도를 줄일 수 있기 때문에 공해 배출 물질의 감소 등 상압유동층 연소에 비하여 많은 장점들을 가지고 있어 선진 국가들에서도 이미 상당한 진전을 보이고 있으며, 중국이나 일본에서도 차세대 연소기술로 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 가압 system을 사용하고 있으므로 이에 동반되는 조작변수의 변화와 실험의 어려움 그리고 scale-up 등 고려해야 할 문제점들을 많이 포함하고 있으므로 이에 대한 연구가 필요하다[1].

기포유동층에서 압력 증가에 의한 유동층 내부의 영향은 최소유동화속도(U_{mf}), 기포의 크기(d_b)와 모양, 상승속도(V_b), 빈도수, 분율 및 고체의 거동 등에 영향을 미치므로 가압유동층 내부의 수력학적 거동을 관찰하기 위한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 이러한 기포의 특성을 관찰하는 방법 중 압력요동(pressure fluctuation)의 이용은 층내의 국부고체흐름을 방해하지 않고, 짧은 시간에 내부 관찰이 어려운 system에 적용할 수 있는 장점을 가지고 있으며, 또한 압력요동의 시계열을 해석함으로써 유동층 내부의 수력학적 특성을 관찰할 수 있으므로 수많은 연구자들에 의해 사용되었다[2].

따라서, 본 연구에서는 압력요동을 이용하여 가압유동층에서 유동층의 거동에 매우 중요한 역할을 하는 기포의 특성인 크기와 상승속도가 기체의 유속과 압력의 변화에 따라서 변화하는 특성을 고찰하기 위하여 Fan 등[3]이 제안한 cross-correlation 함수를 도입하였다. 또한, 결정론적 해석방법인 위상공간과 계가 가지는 자유도(degree of freedom)로서 attractor의 공간적 복잡성(spatail complexity)을 특성화하고 계의 안정성을 판별하는 기준이 되는 상관차원을 도입하여 가압상태의 유동층에서 기체와 고체의 무작위적 접촉 및 비선형적 흐름거

동에 대한 기초자료들을 실험적으로 구하여 가압유동층의 수력학적 특성을 규명하였다.

2. 해석

2.1. 교차상관함수 (Cross Correlation Function)

유동층내의 중심을 통하여 상승하는 기포의 크기와 상승속도는 아래와 같은 교차상관함수(Cross-correlation function)에 의해 구할 수 있다. 연속적인 무작위적인 변수들, $X(t)$, $Y(t)$ 의 교차상관함수는 다음과 같이 표현된다[3].

$$\phi_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t)y(t+\tau)dt \quad (1)$$

여기서, $x(t)$ 는 시간 t 에서 얻은 $X(t)$, $y(t+\tau)$ 는 시간 $t+\tau$ 에서 얻은 $Y(t)$ 이다. $X(t)$ 는 아래에 위치한 probe의 time series이고, $Y(t)$ 는 위에 위치한 probe의 time series이다. 두 probe를 통과하는데 필요한 평균시간은 τ_1 , transit time이며, cross-correlation function이 최대값이다. 그러므로 Bubble의 상승속도는 아래와 같이 계산되어진다.

$$U_B = \frac{L}{\tau_1} \quad (2)$$

여기서, L 은 두 probe간의 거리이다. τ_2 는 함수값이 처음 이르는 최소점이며, 이것을 이용하여 식 (3)과 같이 기포의 pierced length를 구할 수 있다.

$$D_B = \frac{L}{\tau_1} \times (\tau_2 - \tau_1) \quad (3)$$

Fan 등[3]에 의하면, bubble의 운동은 유동층 상부에서 압력거동으로 일어나며 수평관을 통과하는 단일 bubble을 측정할 경우 압력-시간의 곡선으로 측정되는 주기적 wave를 단일 bubble의 통과로 나타낸다. 위 식에서 정의한 U_B 는 유동층의 각 영역에서 bubble, slug, 또는 압력 wave의 평균상승속도이다.

2.2. 위상공간투영 (Phase Space Portraits)

다차원 상공간투영(multidimensional phase space portraits)은 압력변동을 시계열로부터 시간지연방법을 사용하여 상공간에 투영할 수 있다. 즉, 실험적으로 측정된 압력요동의 시간에 따른 변화자료인 $X(t)$ 를 재구성하여 벡터자료로 만들면 다음과 같이 표현된다.

$$Z_i(t) = [X(i \cdot \Delta t), X(i \cdot \Delta t + \tau), \dots, X(i \cdot \Delta t + (p-1)\tau)] \\ i = 1, 2, 3, \dots, [m - (p-1)k] \quad (4)$$

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

3. 실험

본 연구에서 사용한 가압유동층의 실험장치를 Fig. 1에 나타내었다. 상온 가압 유동층장치는 압력을 유지할 수 있는 가압용기내에 설치되어 있다. 가압 용기는

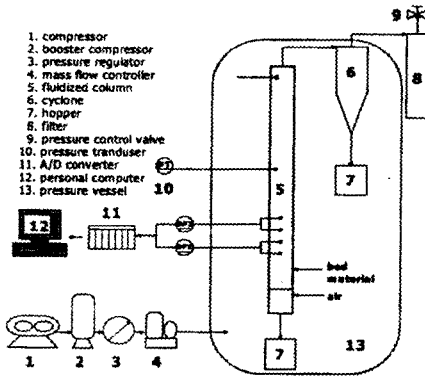


Fig. 1. Schematic diagrams of cold model pressurized fluidized bed.

직경 3.0m 높이 3.5m로 압력을 지탱할 수 있도록 구조용탄소강(STS 49)을 사용하였고, 두께는 30mm로 상온 상태에서 30기압을 지탱할 수 있도록 설계되었다. 유동층은 직경이 0.1m이고, 높이가 2.0m인 아크릴로 되어 있다. 사용된 층 물질은 평균 입경이 0.59mm (0.5-0.71mm)인 sand이며, 이 층 물질의 밀도는 2,650kg/m³이었다. 층 물질은 분산판으로부터 0.75m까지 충전하였으며, 건조된 공기는 MFC에 의해 정량적으로 가압 vessel 내부로 유입되어 유동층의 분산판을 통하여 제공되었다. 또한 유동층의 압력은 압력 조절 밸브에 의해 조절하였다. 동적인 압력 요동 신호는 직경이 6.5mm인 tube에 의해 수집되었으며, 이 tube들은 분산판으로부터 0.3, 0.4, 0.5, 0.6m의 위치에서 유동층 벽면에 부착되어 tube의 끝이 유동층의 중앙까지 오도록 설치하였다. 유속은 각 시스템 압력에서 최소유동속도(U_{mf})를 얻은 후, 압력요동신호를 U_c/U_{mf} 의 증가 조건으로 수행하였다. 압력요동은 압력 probe에 연결된 차압 transducer(Validyne, Model P24D)에 의해 신호로 수집되었다. 이 압력신호는 A/D converter(Real Time Devices Inc., Model AD2110)에 의해 디지털로 computer에 저장되었다. 18,000개의 압력요동 data를 300Hz의 sampling rate으로 측정하였으며, 이 때 측정 시간을 1min으로 하였다.

4. 결과 및 고찰

기포의 크기

기포의 크기는 기포의 수직 길이를 의미하며, 일반적으로 기체의 유속이 증가하면 기포의 pierced length는 증가하며, 상당히 높은 유속에서는 기포의 pierced length의 증가가 둔화되는 경향을 나타낸다고 보고되었다[5].

압력의 증가에 따른 기포의 pierced length를 Fig. 2에 나타내었다. 모든 유속의 경우 압력에 대한 영향이 확연히 나타났다. 압력의 증가는 탑 내에서의 기체의 밀도 즉 기체의 momentum을 증가시켜 기포의 합체현상을 억제하여 기포의 크기를 작고 균일하게 만들며 이는 wake의 크기와 강도를 감소시키고, 이러한 감소현상은 기포들간의 합체현상(coalescence)을 유발하는 국부흐름의 불균일성을 감소시켜 전체적인 계의 거동을 안정화시키기 때문이다. 또한 유속의 증가는 상

압에서 pierced length가 7.5cm부터 13.5cm까지 증가하였다.

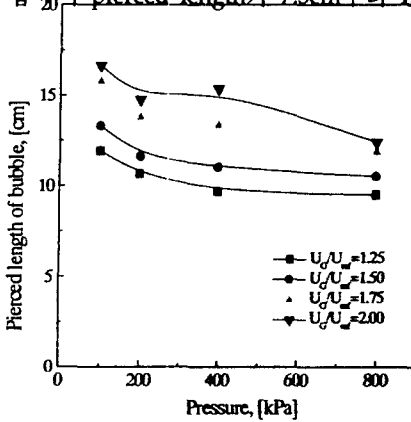


Fig. 3. Effects of pressure on the pierced length of bubble.

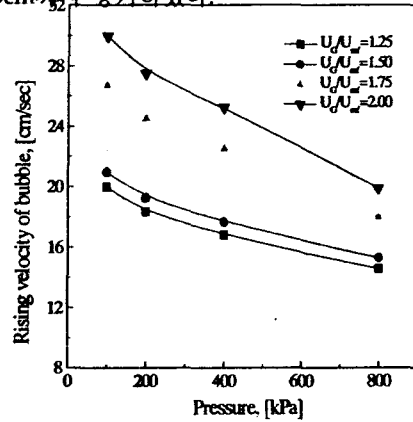


Fig. 2. Effects of pressure on the rising velocity of bubble.

기포의 상승속도

기포 유동층에서 기포의 상승속도는 단일 기포의 상승속도보다 크다고 할 수 있는데, 그 이유는 U_G-U_{mf} 의 속도로 기포들이 cloud를 밀어주기 때문이다[6]. 실제 기포의 상승속도는 기포의 크기에 비례하지는 않으며, 입자들과 상승하는 기포들 사이의 복잡한 상호작용에 의해 일어난다. 압력의 증가에 따른 기포의 상승속도에 대한 영향을 Fig. 3에 도시하였다. 압력의 상승에 대한 기포의 상승속도는 증가하였으며, 낮은 유속에서 급격히 증가하지만 더 높은 유속에서는 기포의 상승속도가 거의 일정하게 되는 균일 기포 흐름영역이라 할 수 있다. 본 실험에서 사

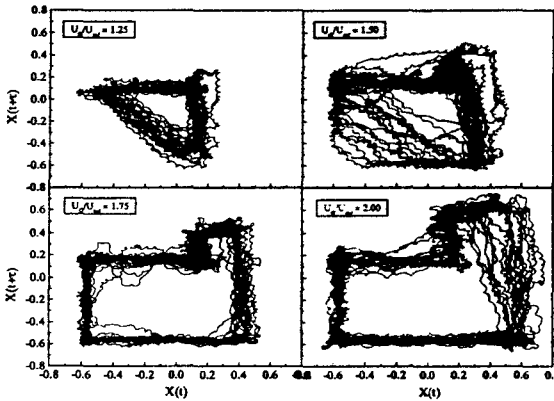


Fig. 4. Attractor plots of pressure fluctuations in a pressurized fluidized bed ($P=200\text{kPa}$).

방법에 의해 2차원의 위상공간(phase space)상에 strange attractor로 재구성한 것

용된 유속 범위는 기포유동층에 해당되므로 전자에 해당된다고 볼 수 있다. 압력과 공탑속도의 증가는 기포의 activity를 증가시키며 기체 momentum의 증가 효과를 얻는다. 그 결과 압력과 유속의 증가에 따라 기포의 빈도수와 상승속도는 증가한다.

위상공간투영

Fig. 4는 압력변동의 시계열을 시간지연(time-delay)의

이며, 시간지연인 τ 는 상호정보함수(Mutual Information Function)에 의해 얻었다. 그림에서와 같이 기체 유속의 증가는 attractor의 궤적을 분산시키고 attractor의 내부구조를 복잡하게 하는데, 이는 기체의 유속이 증가함에 따라 유동층내에 존재하는 기포의 체류량이 증가하고 기포의 흐름형태가 더욱 무작위하게 되기 때문으로 해석할 수 있다. 또한 기포의 크기가 증가하여 기체흐름의 난류강도가 증가하기 때문에 attractor의 중심이 오른쪽으로 옮겨가는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

기포의 pierced length와 상승속도는 유속의 증가에 따라 증가하였으며, 압력에 대한 영향은 감소하였다. 시계열의 2차원 위상공간투영에 의해 유동층의 흐름은 기체 유속의 증가에 따라 더 무작위적인 거동을 하였으며, 압력의 증가는 더 안정적인 거동을 보였다. 계의 안정성을 판별하는 기준이 되는 상관차원은 기체의 유속이 증가함에 따라, 또한 압력이 감소함에 따라 계의 복잡성이 커짐을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Cuenca, M.A. and Anthony, E.J.: "PFBC", 1st edition, Chapman & Hall, (1995).
2. Jin, G.T., Han, K.H., Shun, D.W., Yi, C.K., Bae, D.H., Cho, S.H. Park, J.H.: KIER-A03708, (2000).
3. Fan, L.T., Ho, T.C. and Walawender, W.P.: *AIChE J.*, **29**, 33(1983).
4. Grassberger, P. and Procaccia, I.: Estimation of the Kolmogorov Entropy from a Chaotic Signal, *Physical review A*, **28**(4), 2591(1983).
5. Lee, C.K.: "Measurement of bubble properties in a gas fluidized bed", MS Thesis, (1984)
6. Kunii, D. and Levenspiel, O.: "Fluidization Engineering", Wiley N.Y., (1991).