

연속 조작 기포탑에서 부유물에 의한 기포분쇄가 압력 변동에 미치는 영향

강 용 · 민병태* · 고명한 · 김상돈**

충남대학교 화학공학과

*한국원자력연구소

**한국과학기술원 화학공학과

(1993년 6월 10일 접수, 1993년 10월 19일 채택)

Effects of Bubble Breaking by Floating Material on Pressure Fluctuations in a Continuous Bubble Column

Yong Kang, Byung Tae Min*, Myung Han Ko and Sang Done Kim**

Department of Chemical Engineering, Chungnam National University, Taejeon 305-764

*Korea Atomic Energy Research Institute

**Department of Chemical Engineering, KAIST, Taejeon 305-701

(Received 10 June 1993; accepted 19 October 1993)

요 약

연속 조작 기포탑에서 부유물질의 첨가에 의한 기포의 분쇄효과를 압력변동의 특성을 분석함으로써 고찰하였다. 액체 및 기체의 유속, 분산판으로부터의 높이, 부유물질의 첨가량 등을 실험변수로 선택하였으며, 이들 실험변수의 변화에 따른 압력 변동의 평균값, 표준편차, 비대칭도, 첨도 그리고 스펙트럴 밀도 함수 등의 변화를 검토하였다. 본 연구의 결과 연속 조작 기포탑에 부유기포 분쇄물질의 첨가는 기포탑내에서 기포흐름의 균일성과 안정성을 향상시킬 수 있는 것으로 나타났다.

Abstract—Effects of floating material on the bubble breaking were investigated by analyzing the pressure fluctuations in a bubble column operating continuously. The gas and liquid velocities, height from the distributor, and amount of floating material added in the column were selected as experimental variables. The variations of the mean value, standard deviation, skewness, kurtosis and spectral density function from the pressure fluctuations were determined with the variations of experimental variables. From the results of this study, the addition of floating material into the bubble column could improve the qualities of uniformity and stability of bubble flowing in the column.

1. 서 론

기포탑의 수력학적 특성은 기포탑내에서 다상의 접촉 및 열전달과 물질전달에 미치는 영향이 크므로 이는 기포탑을 응용한 화학반응기 또는 미생물 반응기 특성의

결정에 직결되고 있는데, 이 수력학적 특성은 주로 기포의 흐름에 의해 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있다[1, 2]. 많은 장점을 가진 기포탑 반응기의 문제점중의 하나는 기포탑 반응기내에 존재하는 기포가 상승하면서 그 크기가 커지는데 있으므로, 기포탑 반응기의 효율을

증대시키기 위해서는 큰 기포의 분쇄가 매우 중요한 일이라 할 수 있다.

기포탑 및 삼상 유동층에서 기포분쇄기를 이용하여 기포를 분쇄함으로써 기체의 체류량 및 기-액 접촉면적과 물질전달계수의 상당한 증가를 가져온 연구결과들도 최근 보고되고 있는데[3-7], 이들 부유 기포 분쇄물의 첨가가 유동층이나 기포탑 전체의 수력학적 특성에 미치는 영향에 대한 연구는 아직 매우 미흡한 실정이다. 특히 연속조작을 위한 기포탑이나 유동층 반응기의 제어, 최적조작 조건의 도출 및 이들 반응기의 안전성 등을 해석하기 위해서는 첨가된 기포 분쇄물의 거동이 기포탑이나 삼상유동층의 수력학적 동특성에 미치는 영향에 대한 정보는 매우 절실하다 하겠다.

따라서, 본 연구에서는 연속 조작 기포탑에서 기포 분쇄를 위해 첨가된 부유물이 기포탑의 수력학적 특성에 미치는 영향을 검토하기 위하여, 부유물의 첨가에 따른 압력 변동 특성을 고찰하였다.

2. 해 석

기포탑내에서의 압력 변동을 시간에 따른 변화 기록 자료들(historical random data)로부터 무작위 과정(random process)으로 나타낼 수 있는데, 압력 변동을 나타내는 시간응답 기록 $X(t)$ 의 앙상블(ensemble)을 임의의 시간 t 에서 평균하면

$$X_M(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(t)P(X:t)dX \quad (1)$$

와 같이 쓸 수 있으며, 일차 확률밀도함수 $P(X:t)$ 가 시간에 무관하면 이 계는 에르고딕(ergodic)하며 정지상태(stationary state)의 통계적 성질을 가지므로 확률밀도함수는 $P(X)$ 로 나타낼 수 있다. 이와 같은 경우 이 계의 평균값, 분산, 비대칭도(skewness) 및 첨도(kurtosis)는 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다[8-10].

$$X_M = \int_{-\infty}^{\infty} X(t)P(X)dX \quad (2)$$

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (X - X_M)^2 P(X)dX \quad (3)$$

$$S = \frac{1}{\sigma^3} \int_{-\infty}^{\infty} (X - X_M)^3 X(t)dX \quad (4)$$

$$K = \frac{1}{\sigma^4} \int_{-\infty}^{\infty} (X - X_M)^4 X(t)dX \quad (5)$$

또한 무작위과정의 정지상태 응답자료인 압력 변동의 자기 상관함수(autocorrelation function)는 식 (6)과 같

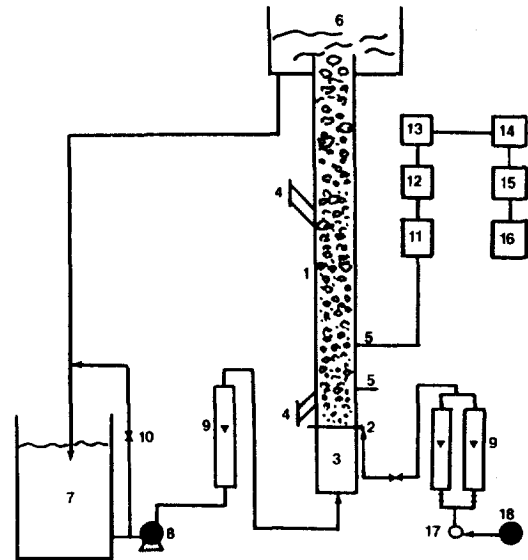


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

- | | |
|-------------------------|-------------------------|
| 1. Column | 10. Valve |
| 2. Distributor | 11. Pressure transducer |
| 3. Calming section | 12. Amplifier |
| 4. Breaker loading port | 13. Oscilloscope |
| 5. Pressure tap | 14. Filter |
| 6. Weir | 15. A/D converter |
| 7. Reservoir | 16. Computer |
| 8. Pump | 17. Regulator |
| 9. Rotameter | 18. Compressor |

이 정의되며, 스펙트럴 밀도 함수(power spectral density function, PSDF)는 자료의 직접 푸리에 변환(Fourier transformation)이나 상관함수의 푸리에 변환 등으로 구할 수 있으므로[8-10] 식 (7)에 압력 변동의 자기 상관함수를 푸리에 변환하여 스펙트럴 밀도 함수를 구하는 식을 나타내었다. 여기서, j 는 복소수를 나타낸다.

$$R_{XX}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T X(t)X(t+\tau)dt \quad (6)$$

$$G_{XX}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{XX}(\tau)e^{j2\pi f\tau}d\tau \quad (7)$$

본 연구에서는 이들 식 (2)-(7)을 사용하여 압력 변동 특성을 해석하였다.

3. 실험

본 연구에 사용한 실험장치는 Fig. 1에서 보는 바와

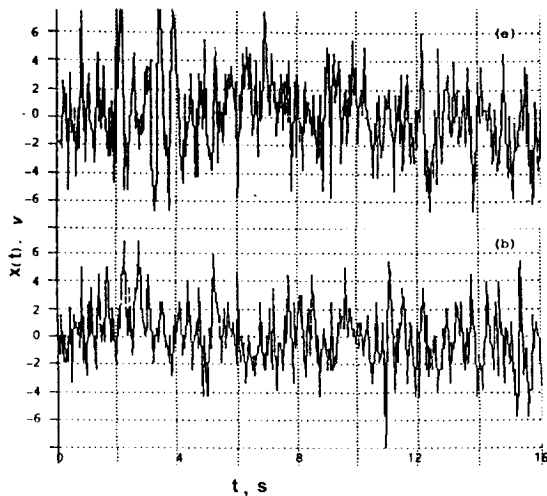


Fig. 2. Typical example of pressure fluctuation signals ($U_L=0.126$ m/s, $U_G=0.047$ m/s, $h=0.2$ m).
(a) $\epsilon_F=0$, (b) $\epsilon_F=0.02$

같은 직경 0.15 m, 높이 2.0 m인 아크릴관을 사용하였는데 기체-액체 분산판으로는 기체와 액체가 같은 면에서 분산되도록 제작한 다공판을 사용하였다[3-7, 10]. 다공판은 내경이 0.15 m이고 두께가 0.015 m인 스테인레스강을 사용하였는데, 기체분산을 위해 다공판 중심에서 양쪽으로 각각 0.016과 0.048 m 떨어진 위치에 깊이 0.011 m, 폭 0.006 m의 홈을 내어서 그곳을 두께 0.002 m의 스테인레스 판으로 용접한 후 직경 0.001 m의 구멍을 뚫었으며 기체분산판구멍의 수는 28개이었다. 액체 분산판은 직경 0.003 m의 구멍 160개가 균일하게 분포되도록 제작하여 사용하였다[10]. 기포탑의 높이에 따른 정압 강하를 측정하기 위해 탑 벽면에 분산판으로부터 0.15 m 간격으로 압력탭을 설치하였으며, 압력 변동의 동특성을 측정하고자 분산판으로부터 0.1 m와 0.2 m의 위치에 반도체 형태의 압력센서(coppel electronics)를 설치하여 이를 압력변환기, 증폭기, 오실로스코프, 필터와 A/D 변환기 등에 차례로 연결하여 압력변동자료를 컴퓨터에 입력시켰다. 즉, 압력센서와 변환기에 의해 압력-시간의 압력 변동 신호를 볼트-시간의 신호로 바꾼 후 low-pass 필터를 사용하여 120 Hz 이하의 신호만 선택하여 이를 디지털 신호로 바꾸어(PCL812) 컴퓨터의 자료수록 계에 입력시켰다. 압력 변동 신호의 처리에 사용한 자료처리계는 PCLS-805 SNAPSHOT (Master Lab Card)를 사용하였다. 각 실험조건에서 압력 변동 신호자료의 채취는, 속도를 50 m/s로 하여 150 초 동안 채취하여 3000개를 취하였는데 이는 기포탑내에서의 압력 변동 특성을 해석하는데, 즉, 평균값, 분산,

비대칭도 및 첨도 등을 구하는데와 자기상관함수와 스펙트럴 밀도 함수의 특성을 구하는데 충분하였다.

물과 압축공기를 각각 연속 액상과 기체 분산상으로 사용하였는데, 연속 액상의 유속 범위는 0.047-0.126 m/s, 그리고 기체의 유속 범위는 0.032-0.077 m/s이었다. 기포분쇄를 위한 첨가 부유물은 길이 0.019 m, 직경 0.015 m인 실린더형 아크릴 튜브를 사용하였는데 이 부유물의 밀도는 1200 kg/m³이었다. 각 실험은 정상상태에 도달된 후에 행하여졌으며, 각 조건에서 부유 기포 분쇄물질의 첨가량은 식 (8)-(9)를 사용하여 기포탑내의 부피분율로 결정하였다[5-7]. 기포분쇄를 위한 첨가 부유물은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 기포탑의 상부 주입부에서 주입하였으며, 실험후 하부 통로를 사용하여 꺼냈다.

$$\epsilon_L + \epsilon_G + \epsilon_F = 1.0 \quad (8)$$

$$\epsilon_F = \frac{W_F}{AL\rho_F} \quad (9)$$

$$\frac{\Delta P}{L} = g(\epsilon_G \rho_G + \epsilon_L \rho_L + \epsilon_F \rho_F) \quad (10)$$

4. 결과 및 고찰

기포탑의 기체-액체 분산판으로부터 0.1 m 떨어진 지점에서 기포분쇄를 위한 부유물질을 첨가하지 않은 경우와 부피분율로 0.02 첨가한 경우의 압력 요동 특성을 Fig. 2에 각각 나타내었는데, 부유물질을 첨가하면 압력 요동 곡선의 진폭이 감소하는 것을 볼 수 있다. 압력 변동 곡선의 진폭의 크기는 그 파동의 에너지의 크기를 나타내므로[11] 기포탑에서 압력 요동 곡선의 진폭의 크기는 기포탑 내부의 압력장 영역에서 기포의 크기에 비례한다고 할 수 있다[10-12]. 따라서, 기포탑내 부유물의 첨가 결과 나타나는 압력 요동 곡선의 진폭의 감소는 기포의 분쇄에 의해 기포가 작아지기 때문으로 해석할 수 있다.

이와 같은 부유물에 의한 기포탑내 기포의 분쇄효과는 Fig. 3에서 더욱 뚜렷이 나타난다. Fig. 3에서 기포분쇄를 위한 부유물질을 첨가한 경우, 첨가하지 않은 경우보다 $X(t)$ 의 값이 작아졌으며 X 값의 변화에 따른 빈도 분포의 균일도도 증가하는 것을 알 수 있다. 기포탑에서 기포분쇄를 위한 부유물질의 첨가량의 증가에 따른 압력 요동 곡선의 평균값을 식 (2)에 의해 구하여서 기체 유속의 변화에 따라 Fig. 4에 나타내었는데, 부유물질의 첨가량의 증가에 따라 모든 실험조건에서 X_M 값은 크게 변화하지 않는 것을 알 수 있다. 이는 본 연구의 실험범위내에서 부유물질의 부피분율이 증가함

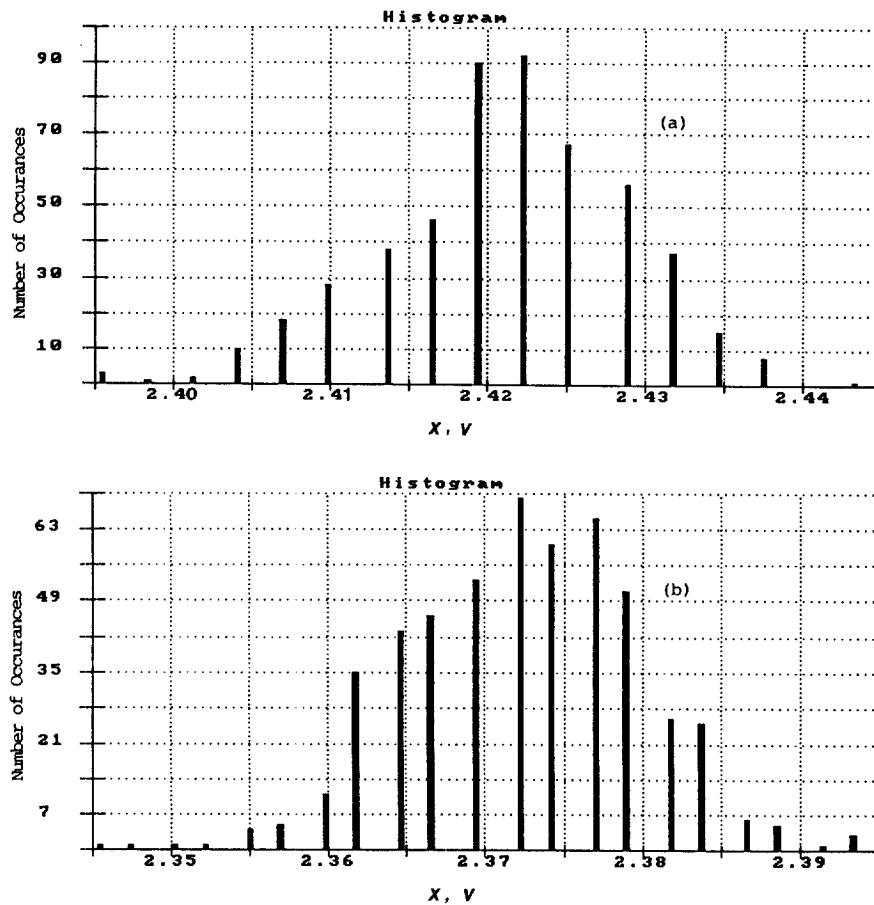


Fig. 3. Typical example of histogram of fluctuations ($U_L = 0.079$ m/s, $U_G = 0.062$ m/s, $h = 0.1$ m).

(a) $\epsilon_F = 0$, (b) $\epsilon_F = 0.02$

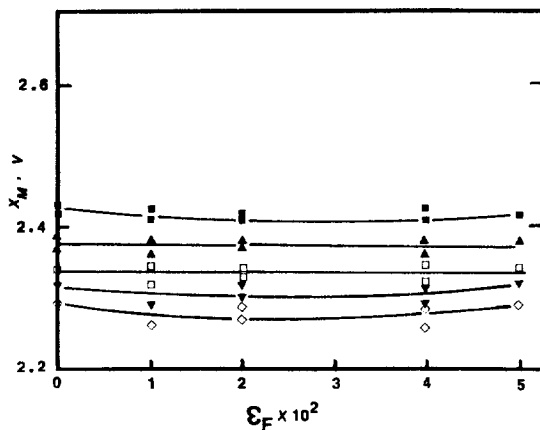


Fig. 4. Effects of bubble breaker on X_M in the column ($U_L = 0.079$ m/s, $h = 0.2$ m).

U_G (m/s): 0.017 0.032 0.047 0.062 0.077

에 따라 기포탑내에 성장한 큰 기포를 더욱 효과적으로 분쇄하여 기포탑내에 기포의 체류량이 증가하기 때문으로 설명할 수 있다[5-7].

Fig. 5는 기포탑에서 부유기포 분쇄물질의 첨가량이 증가됨에 따라 압력장에서 압력 요동 곡선의 표준편차가 감소하고 있는 것을 나타내는데, 이런 경향도 부유기포 분쇄물질의 첨가량이 증가함에 따라 기포탑내에 크기 차이가 큰 기포들이 존재하기 보다는 비슷한 크기의 기포들이 존재하기 때문으로 해석할 수 있으며 이는 큰 기포의 효과적 분쇄 결과 때문이라 할 수 있다.

기포탑에서 압력 요동 곡선의 특성을 나타내는 비대칭도 분포의 변화 양상을 부유 기포 분쇄물의 첨가량에 따라 Fig. 6에 나타내었는데 일반적으로 부유 기포 분쇄물의 첨가량의 증가에 따라 압력 요동의 비대칭도는 감소하고 있는 것을 알 수 있으며, 이는 부유 기포 분쇄물의 첨가량의 증가에 따라 압력 요동 곡선의 대칭

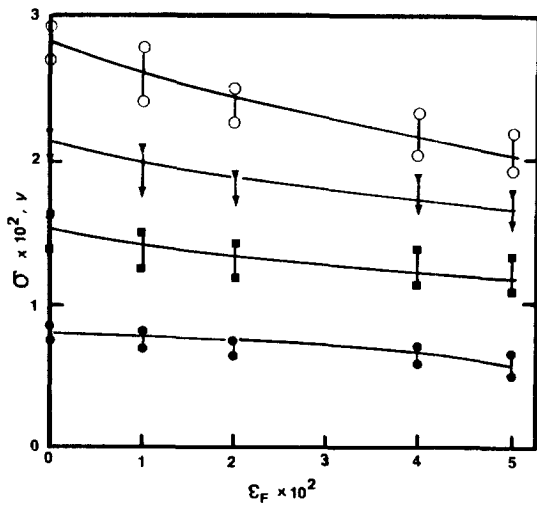


Fig. 5. Effects of bubble breaker on σ of the pressure fluctuations in the column ($U_L = 0.126$ m/s, $h = 0.2$ m).

U_G (m/s): 0.032 0.047 0.062 0.077

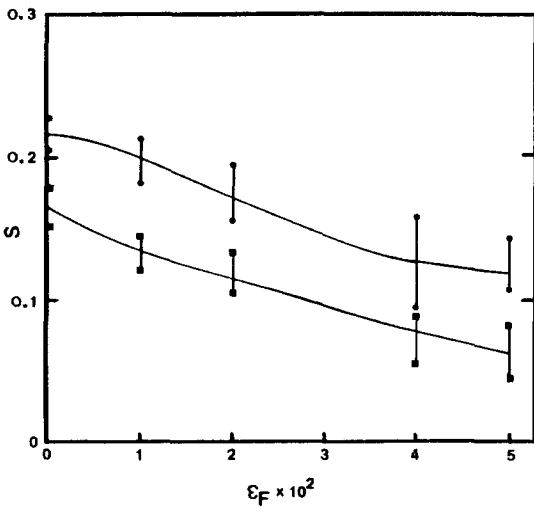


Fig. 6. Effects of bubble breaker on S of the pressure fluctuations in the column ($U_L = 0.079$ m/s, $h = 0.1$ m).

U_G (m/s): 0.032 0.062

성이 증가한다는 것을 의미한다. 이와 같은 결과는 부유 기포 분쇄물의 첨가량의 증가에 따라 기포탑내에 존재하는 기포의 크기 분포의 상대적 대칭성의 증가를 의미한다. 기포탑내에서 기포 크기 분포의 상대적 대칭성의 증가는 기포탑내에 크기의 차이가 큰 기포들의 존재경향이 감소하였음을 나타내는데, 이는 특히 기포의

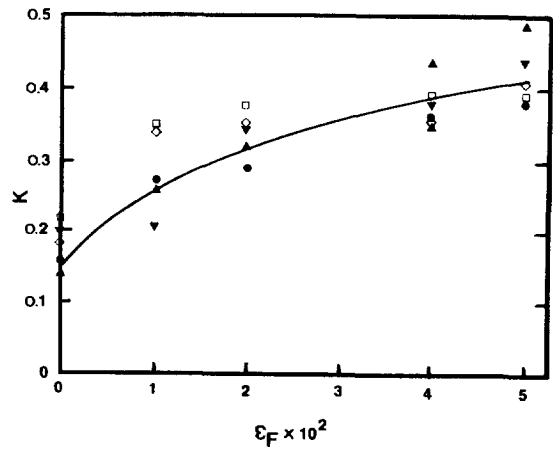


Fig. 7. Effects of bubble breaker on K of the pressure fluctuations in the column ($U_L = 0.056$ m/s, $h = 0.2$ m).

U_G (m/s): 0.017 0.032 0.047 0.062 0.077

합체현상에 의해 크기가 증가된 큰 기포가 분쇄되어 여러 개의 작은 크기의 기포들로 되므로, 통계적 측면에서 기포 크기 분포의 대칭성의 증가를 가져온다고 할 수 있다.

따라서, 기포탑에서 부유 기포 분쇄물의 첨가량이 증가할수록 큰 기포의 분쇄효과는 좋아져서 기포탑내에 존재하는 기포의 운동에 의한 압력 요동의 비대칭도는 감소한다고 해석할 수 있다. 특히, 기포탑 반응기에서 반응 전환율, 기-액 접촉 및 물질전달 등에 문제가 될 수 있는 기포의 불균일 흐름이나 기포탑 반응기의 비균일성(non-uniformity) 등은 기포탑 내부에서 존재하는 크기의 차이가 큰 기포들 때문에 일어나므로, 기포탑에 부유 기포 분쇄물의 첨가는 기포탑내의 기포의 흐름 특성이나 균일성(uniformity)의 향상에도 기여할 수 있는 것으로 사료된다.

Fig. 7에 압력 요동의 또다른 특성을 나타내는 침도값의 변화를 나타내었는데, 기체의 유속 변화에 따라 다소의 차이는 있지만, 본 연구의 모든 범위에서 얻은 자료를 최소자승법에 의해 구해 본 결과 침도값은 부유 기포 분쇄물의 첨가량의 증가에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 압력 요동의 침도값의 증가는 압력 변화의 값이 평균값 근처에 많이 분포되어 있는 것을 의미하므로, 결과적으로 부유 기포 분쇄물의 첨가량이 증가함에 따라 기포탑내에서 기포의 흐름이 상대적으로 균일해진다는 것을 알 수 있다. 이와 같은 부유 기포 분쇄물의 첨가가 기포탑내에서의 기포의 균일 흐름과 안정성에 기여하는 현상은 압력 요동의 스펙트럼 밀도

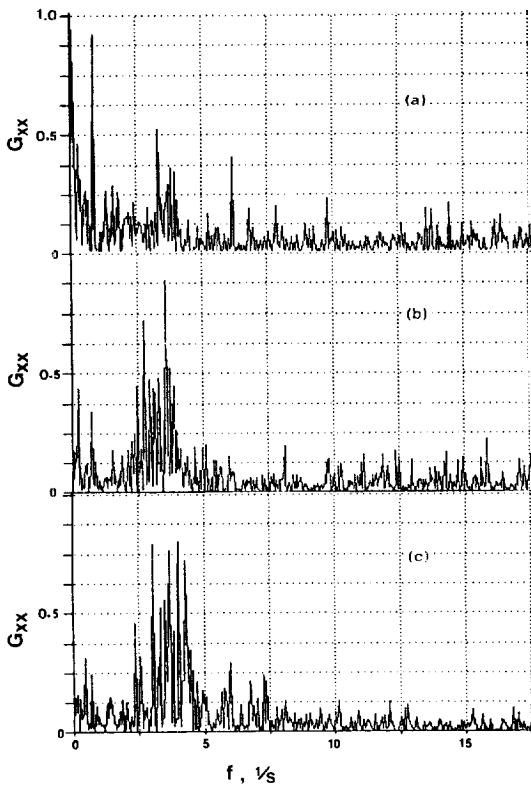


Fig. 8. Typical power spectrum density functions from the pressure fluctuations in the column($U_L=0.079$ m/s, $h=0.1$ m, $U_G=0.032$ m/s).
(a) $\epsilon_F=0$, (b) $\epsilon_F=0.02$, (c) $\epsilon_F=0.05$

함수의 해석에서도 찾아볼 수 있다.

Fig. 8에 부유 기포 분쇄물이 첨가된 경우 압력 요동의 스펙트럴 밀도 함수를 나타내었는데, 기포 분쇄물의 첨가에 따라 주 진동수(dominant frequency)의 증가를 가져왔음을 알 수 있다. 압력 변동 신호와 같은 wave 형태의 신호들은 일반적으로 주기적인 요소와 무작위적 요소를 포함하고 있는데, 이들 신호의 주기적 요소의 증가는 신호의 주기적인 규칙성의 증가를 나타내는 것으로 알려져 있으며 신호의 주기적 요소는 그 신호의 진동수를 나타낸다[11, 12]. 따라서, 스펙트럴 밀도 함수의 주 진동수의 증가는 압력 요동의 상대적 규칙성의 증가를 의미하며 이는 결국 기포탑 내부에서 기포 흐름 현상의 균일성과 안정성의 증가를 가져온다고 볼 수 있다[11-15].

5. 결 론

본 연구의 실험결과 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

기포탑에서 부유 기포 분쇄물의 첨가는 압력 요동 곡선의 평균값에는 큰 영향을 미치지 않았으나, 부유 기포 분쇄물의 첨가량이 증가함에 따라 압력 요동 곡선의 표준 편차와 비대칭도는 감소한 반면 첨도는 증가하였다. 또한, 압력 요동 곡선의 스펙트럴 밀도 함수로부터 구한 주 진동수는 부유 기포 분쇄물의 첨가량이 증가함에 따라 증가하였으며, 이와 같은 경향은 기포탑에 부유 기포 분쇄물을 첨가함으로써 탑내에 존재하는 큰 기포를 효과적으로 분쇄하여 줌으로써 탑내에서 기포 흐름의 균일성과 안정성을 상대적으로 향상시켜 준다고 판단되었다.

감 사

본 연구는 한국과학재단 연구지원(911-1004-006-2)으로 일부 이루어졌으며 귀 재단에 감사드립니다.

사용기호

- A : crosssectional area of the column [m^2]
- f : frequency [$1/\text{s}$]
- L : height of the breaker distribution [m]
- G_{xx} : power spectral density function
- g : gravitational acceleration [m/s^2]
- h : height from the distributor [m]
- K : kurtosis of the pressure fluctuations
- $P(x)$: probability density function
- R_{xx} : autocorrelation function
- S : skewness of the pressure fluctuations
- t : time [s]
- U : velocity [m/s]
- W : weight of the breaker [kg]
- X : historical random data [v]
- X_M : mean value of the pressure fluctuations [v]

그리스 문자

- ϵ : phase holdup
- σ : standard deviation of the pressure fluctuations [v]
- τ : elapsed time [s]
- ρ : density [kg/m^3]

하첨자

- G : gas phase
- L : liquid phase
- F : floating material

참고문헌

1. Shah, Y. T., Kelkar, B. G., Godbole, S. P. and Deckwer, W. D.: *AIChE J.*, **28**, 353(1982).
2. Kawase, Y. and Moo-young, M.: *Chem. Eng. Commun.*, **40**, 67(1986).
3. Kim, J. O. and Kim, S. D.: *Particulate Sci. Technol.*, **5**, 309(1987).
4. Kim, J. O. and Kim, S. D.: *Can. J. Chem. Eng.*, **68**, 368(1990).
5. Kang, Y., Min, B. T., Nah, J. B. and Kim, S. D.: *AIChE J.*, **36**, 1255(1990).
6. Kang, Y., Fan, L. T., Min, B. T. and Kim, S. D.: *Biotechnol. Bioeng.*, **37**, 580(1991).
7. Kang, Y., Min, B. T., Nah, J. B. and Kim, S. D.: *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, **51**, 235(1991).
8. Priestler, M. B.: "Spectral Analysis and Time Series", Vol. I & II. Ap Inc.(1981).
9. Schumwang, R. H.: "Applied Statistical Time Series Analysis", Prentice Hall, NJ(1988).
10. Min, B. T.: Ph. D. Dissertation, Chungnam National Univ., Taejon, Korea(1992).
11. Fan, L. T., Kang, Y., Neogi, D. and Yashima, M.: *AIChE J.*, **39**, 513(1993).
12. Yashima, M., Nasser, R., Fan, L. T. and Kang, Y.: *AIChE J.*, **38**, 629(1992).
13. Gluszek, J. and Marcinkowski, R.: *Chem. Eng. J.*, **26**, 181(1983).
14. Lindt, J. T.: *Chem. Eng. Sci.*, **27**, 1775(1972).
15. Kang, W. K., Sutherland, J. P. and Osberg, G. L.: *Ind. Eng. Chem. Fund.*, **6**, 499(1967).