Korean Chem. Eng. Res., 58(4), 665-674 (2020)
https://doi.org/10.9713/kcer.2020.58.4.665
PISSN 0304-128X, EISSN 2233-9558

외부순환 공기부양반응기에서 낮은 주파수의 압력 변동

최근호†

한밭대학교 화학생명공학과
34158 대전광역시 유성구 동서대로 125
(2020년 5월 13일 접수, 2020년 7월 21일 수정본 접수, 2020년 7월 23일 채택

Low-Frequency Pressure Fluctuations in an External-Loop Airlift Reactor

Keun Ho Choi†

Department of Chemical and Biological Engineering, Hanbat Natinal University,
125, Dongseodaero, Yoseong-gu, Daejeon, 34158, Korea
(Received 13 May 2020; Received in revised from 21 July 2020; Accepted 23 July 2020)

요 약

외부순환형 공기부양반응기에서 낮은 주파수의 압력 변동에 대해 연구하였다. 상승관과 하강관의 상부와 하부에 설치된 내압관의 액면을 휴대폰으로 촬영하는 방법으로 빠른 주파수의 변동이 제거된 압력을 측정하였다. 자기상관함수와 교차상관함수의 계산을 통해 압력의 주기적인 변동을 확인하였다. 기체속도가 일정하여도 순환액체의 관성으로 인해 압력은 물론이고 상승관과 하강관내의 기체체류량도 주기적으로 변동하였다. 일반적으로 기체유속이 증가할수록 압력 변동의 강도는 커졌다. 비분산 액체높이가 0.04 m일 때 압력 변동의 주기는 기체속도가 0.14 ms^{-1}에서 극대값을 보여주었다. 이는 기체속도가 커질수록 순환 액체속도의 증가율은 둔화하고 효과적으로 순환하는 액체의 부피가 감소하므로 순환액체의 관성이 극대값을 보이기 때문이다.

Abstract – Low-frequency pressure fluctuations in an external-loop airlift reactor were investigated. Low-frequency pressure fluctuations could be measured by shooting videos about liquid levels in the four piezometric tubes which were installed at the lower and upper parts of the riser and downcomer using a cellular phone. The periodic characteristics of pressure fluctuations were proved by the calculation of their auto-correlation function and cross-correlation function. Even if the riser superficial gas velocity was constant, the riser and downcomer gas holdups as well as wall pressures were periodically changed due to the inertia of circulating liquid. In general, the intensity of pressure fluctuations increased with an increase in the gas velocity. When the unaerated liquid height was 0.04 m, the maximum period of pressure fluctuations was found at the specific gas velocity (0.14 ms^{-1}). It was because the maximum inertia of circulating liquid resulted from a reduction in the increasing rate of the liquid circulation velocity and a decrease in the volume of the effectively circulating liquid with an increase in the gas velocity.

Key words: Low-frequency, Pressure fluctuations, Airlift reactor, Periodic characteristics

1. 서 론

공기부양반응기(airlift reactor)는 내부 공간을 크게 기체를 불어넣는 상승관(riser)과 그렇지 않는 공간으로 나눌 수 있는 특징을 갖는 반응기를 의미한다. 기체를 불어넣지 않는 공간은 다시 유체가 하강하는 하강관(downcomer)과 이미 언급한 상승관과 하강관을 연결하는 연결부(connection part)로 나눌 수 있다. 공기부양반응기는 이러한 구조적 특징으로 인해 유도된 순환 액체흐름을 갖기 때문에 기포탑(bubble column)보다 나은 혼합 성능을 보인다. 교반조반응기(stirred tank reactor)와 비교할 때 공기부양반응기는 움직이는 부분을 갖지 않기 때문에 멸균이 보다 용이하고 전단력이 낮으며 에너지 소모가 낮다는 장점을 보인다. 공기부양반응기는 이러한 상대적인 장점으로 인해 미생물의 배양을 통한 2차 대사물질의 생산과 폐수 처리 등에서 각광을 받고 있다[1-3].

공기부양반응기는 형태에 따라 내부순환형(internal-loop)과 외부순환형(external-loop)의 두 가지로 크게 나눌 수 있다[3]. 내부순환 공기부양반응기는 단면이 원이거나 직사각형인 큰 관 속에 흡출관(draft tube)이라 불리는 작은 관이나 수직의 방해판(vertical baffle)을 넣어줌으로써 만들 수 있다. 흡출관이나 수직 방해판에 의해 나

† To whom correspondence should be addressed.
E-mail: khchoi@hanbat.ac.kr
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

누어진 내부와 외부의 공간 또는 좌측과 우측의 공간이 각각 상승관과 하강관이 되고, 그것들에 의해 나누어지지 않는 큰 관의 상부와 하부는 연결부의 역할을 한다. 반면에 외부순환형 공기부양반응기는 각각 상승관과 하강관의 역할을 하는 두 개의 수직관의 상부와 하부를 별도의 연결관(connection pipe)으로 연결하여 만든다. 보통 연결관으로는 원통형 관이 사용되지만, 상부에 있는 것은 기체와 액체의 보다 효율적인 분리를 위해 육면체 형태의 관이 사용되기도 한다. 공기부양기반응기에서 상부연결관의 바닥보다 높은 공간은 모두 기액분리기(gas-liquid separator)의 역할을 한다.

최근 몇 십 년 동안 실제 목적에 맞는 공기부양반응기의 설계와 운전을 위해서 물질전달과 혼합 성능에 미치는 변수에는 어떤 것이 있는지 밝히기 위한 상당량의 연구가 진행되었다. 그 결과 반응기의 형태는 물론 상승관에 대한 하강관의 단변적비와 수평연결관의 길이를 포함하는 반응기의 주요 치수와 같은 설계 변수뿐만 아니라, 공급 기체속도나 비분산액체높이와 같은 운전 조건 또한 성능에 크게 영향을 미치는 것이 확인되었다[5-11]. 또한 물질전달과 혼합 성능을 높이기 위해 앞에서 언급한 기본적인 공기부양반응기의 형태를 변형하거나 반응기내에 다양한 내부물질을 설치하는 시도가 있어왔다. 최근에 와서 Lukić 등[12]은 순환유체에 의해 구동되는 임펠러(impeller)를 상승관에 설치하면 물질전달과 혼합 성능이 크게 향상된다는 연구 결과를 보고하였다.

지금까지 다상 반응기(multi-phase reactor)내의 압력 변동에 대한 연구는 주로 기포탑이나 유동층을 대상으로 행해져 왔으며, 최근에서야 공기부양반응기에 대해서도 압력 변동에 대한 연구가 이루어지고 있다. 다상 반응기에서의 압력 변동은 총괄 압력 변동과 국부 압력 변동으로 나눌 수 있는데, 총괄 압력 변동은 분산기에서의 기포의 형성(또는 공기 공급계에서의 흐름 변동)과 층 표면(bed surface)에서의 기포의 폭발 그리고 밀폐된 고압 공간(gas plenum)에서의 기포의 압축 등으로 인한 것이며, 국부 압력 변동은 기포 통과와 분쇄, 합체 그리고 액체 소용돌이(vortex) 등에 의한 것으로 알려져 있다[13,14].

공기부양반응기에서 수행된 벽 압력의 변동에 대한 연구들은 다음과 같다. Glasgow 등[15]은 분할된 직사각형 공기부양반응기에서 거대 단일 기포에 의한 실험을 통해 기포의 형성과 통과와 후류(wake) 그리고 층 표면의 진동을 동반하는 기포 이탈에 따라 벽 압력이 변동하며, 기체속도의 증가는 벽 압력의 제곱근 평균(root mean square)을 증가시키고, 높이가 증가할수록 변동의 크기는 증가한다고 보고하였다. 아울러 높은 기체속도에서는 기포의 생성과 통과가 지배적이어서 자기상관의 Fourier 변환에서 특징적인 주파수가 관찰된다고 주장했다.

Vial 등[16,17]은 압력 변동 신호의 자기상관함수(auto-correlation function)로부터 추출한 특정 시간(characteristic time)으로 흐름 전이를 결정하는 방법을 개발하여 공기부양반응기에 적용하였다. 특정 시간은 균질체제(homogeneous regime)에서는 작은 값으로 일정하게 유지되다가 전이체제(transition regime)에서 급격히 증가했으며 비균질체제(heterogeneous regime)에서는 거의 일정하거나 감소했다고 보고했다.

Fu 등[18]은 압력 변동 신호의 평균과 표준편차 그리고 혼돈 불변량(chaotic invariant)인 상관차원(correlation dimension)과 최대 Lyapunov 지수(largest Lyapunov exponent)를 내부순환 공기부양반응기내의 상승관과 하강관내의 흐름 체제의 전이를 결정하는 데 사용했으며, 상관차원과 최대 Lyapunov 지수의 급격한 증가와 감소로 체제전이를 결정할 수 있었다고 보고했다.

Zhang과 Li[14]는 총괄 압력 변동은 내부순환 공기부양반응기의 하강관에서는 선형적으로 감쇠하나 상승관에서는 거의 감쇠하지 않으며, 층 표면에서의 기포의 폭발은 벽 압력 변동에 작은 영향을 미치고, 국부적 압력 변동은 기포 통과의 주파수 대역폭(frequency bandwidth)과 낮은 일관성으로 결정할 수 있었으며, 기체속도에 따라 국부 압력 변동의 Hurst 지수는 비균질체제보다 균질체제에서 보다 빨리 증가하므로 흐름 체제전이를 감지하는데 활용할 수 있었다고 보고했다.

Zhang 등[19]은 국부 압력 변동으로부터 구한 국부 에너지 비율(local energy ratio)이 내부순환 공기부양반응기의 상승관과 하강관에서 두 개의 전이점을 나타낸다고 보고했다.

Luo 등[20]은 압력 신호로부터 추출한 최대 Lyapunov 지수와 Hurst 지수는 내부순환 공기부양반응기의 상승관과 하강관의 흐름 체제전이(flow regime transition)를 분명하게 보여주며, 상관차원과 Kolmogorov entropy는 하강관에서의 체제전이를 명백하게 보여준다고 보고했다.

이처럼 이전의 연구들은 매우 빠른 속도로 측정한 압력 신호로부터 수력학적 특성치를 추출하여 흐름 체제와 그들 간의 전이를 규정하는 데에만 초점이 맞추어져 있다. 벽 압력의 변동은 공기부양반응기의 성능에 영향을 미치는 기체체류량과 순환액체속도의 변동을 수반할 것이 분명한데도 불구하고 이들 간의 관계에 대한 심도 있는 연구는 지금까지 이루어지지 않았다. 벽 압력은 물론이고 기체체류량과 순환액체속도와 같은 중요한 특성치의 변동이 있다면 공기부양반응기의 적절한 설계와 안정적인 운전에 있어 반드시 고려해 할 중요한 정보이다. 따라서 본 연구에서는 주기적으로 변동하는 공기부양반응기의 수력학적 특성을 보다 이해하기 위해 비교적 낮은 주파수의 벽 압력의 변동을 측정하여 벽 압력 신호의 주기성과 강도와 관련된 특성치를 추출하고 기체체류량과 순환액체속도 그리고 유체의 흐름과 연관하여 해석함으로써 그동안 보고되지 않은 유용한 정보를 제공하였다.

2. 실 험

본 연구에서 사용한 외부순환 공기부양반응기를 포함한 실험 장치에 대한 개략도는 Fig. 1과 같다. 상승관의 내경은 0.149 m이고, 높이는 1.77 m였다. 상승관과 하강관의 내경은 0.108 m였다. 연결관은 바닥으로부터 0.10 m인 높이에 부착되었다. 상승관과 하강관의 떨어진 거리는 0.30 m였다. 상승관과 하강관의 상부 끝은 가로가 0.70 m이고, 세로가 0.26 m이며, 높이가 0.30 m인 기액분리기로 연결되었다. 반응기 바닥에 설치된 기체분산기는 금속판에 부착된 내경이 6 mm인 6개의 관으로 구성하였다. 각각의 관에는 직경이 1 mm인 4~6개의 구멍을 뚫었으며, 전체 30개의 구멍은 21 mm의 삼각피치로 배열했다[5]. 기체로는 공기를 사용했으며, 액체로는 수돗물을 사용했다. 여과기와 압력 조정기를 통과한 공기는 로터미터로 유량을 측정하여 공기분산기로 공급했다. 기체속도는 0.02~0.18 ms^{-1}로 변화시켰다. 기액분리기내에서의 비분산 액체높이는 0~0.04 m로 변화시켰다. 모든 실험은 대기압과 실내 온도(22.5~25.5 ºC)에서 수행하였다.

기포분쇄와 유체의 반경 방향 혼합을 통해 물질전달과 혼합 성능을

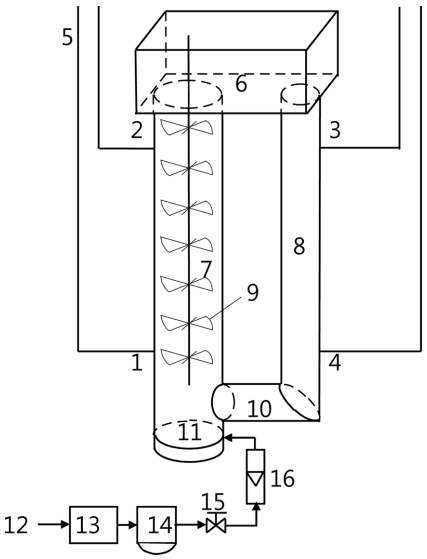

Fig. 1. Schematic diagram of the experimental apparatus.

1~4. pressure tap
5. piezometric tube
6. gas-liquid separator
7. rise
8. downcomer
9. self-agitated impeller
10. connection pipe
11. gas sparger
12. air line
13. air filter
14. pressure regulator
15. valve
16. rotameter.

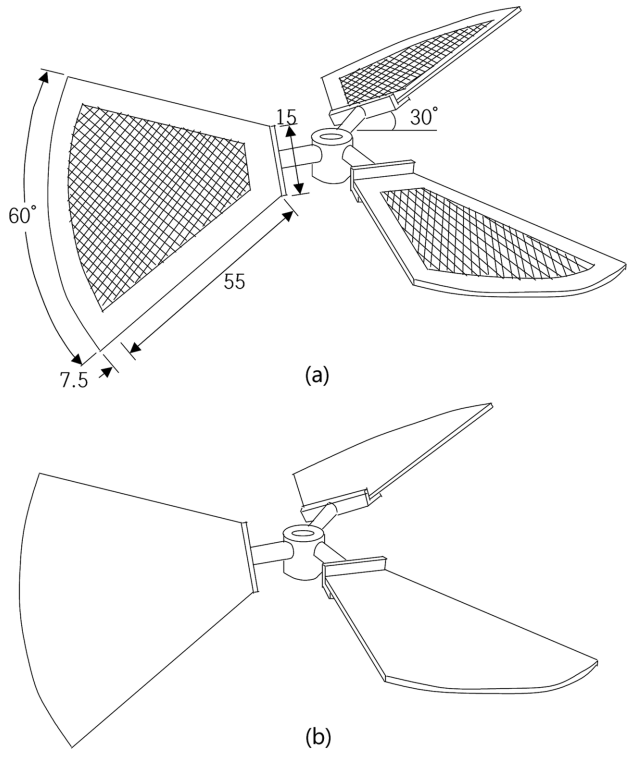

Fig. 2. Self-agitated impellers: (a) type A, (b) type B.

보다 향상시킬 목적으로 순환유체에 의해 구동되는 두 종류의 임펠러를 사용하였다(Fig. 2). 상승관내에 있는 회전축에 바닥으로부터 0.40 m인 높이에 부분적인 체(16 mesh)를 갖는 3개의 날로 구성된 A 형태의 임펠러를 설치하고, 그 다음엔 아크릴판 재질의 3개의 날로 구성된 B 형태의 임펠러를 설치하는 순서로 모두 7개의 임펠러를 0.20 m 간격으로 교대로 설치하였다. 각각의 날은 수평면에 대해 30°가 기울어지게 임펠러를 제작했다. 이렇게 두 종류의 임펠러를 사용하면 낮은 기체속도에도 순환유체에 의해서 잘 구동하였다. 회전축의 양 끝은 베어링(bearing)으로 지지하였다.

순환시간(circulation time)은 유체가 순환경로를 한 바퀴 도는데 걸리는 시간으로 정의되는데, 흐름추종자(flow follower)가 반응기 내의 특정 단면을 통과하는 시간 간격으로 측정하였다[22]. 기체체류량이 적어서 흐름추적자의 관찰이 용이한 하강관이나 기액분리기의 특정 단면을 주시하여 흐름추종자가 통과하는 시간 간격을 측정하는 방법으로 순환시간을 측정하였다. 흐름추종자로는 길이가 7 mm이고 외경이 9 mm인 실리콘 튜브에 폴리에틸렌 왁스를 채워서 물과 유사한 밀도(1.00×10^3 kgm^{-3})를 갖도록 만들어 사용하였다. 반응기에 들어있는 전체 용액이 순환한다고 가정하고 다음 식과 같이 순환 액체속도를 계산하였다.

$$U_{Lr} = \frac{V_L}{t_c A_r} \tag{1}$$

벽 압력의 측정을 위해 반응기의 바닥에 있는 기체분산기로부터 측정한 높이가 0.40 m와 1.50 m인 위치에 해당하는 상승관과 하강관의 상하부에 물로 채워진 내압관(piezometric tube)을 각각 설치하였다. 벽 압력의 변동에 따른 내압관내의 액면의 변동을 감소시키기 위해 길이가 7 mm이고 내경이 0.7 mm인 모세관을 내압관의 입구에 설치했다[22]. 휴대폰(LG G Flex)의 카메라(1300만 화소, F/2.4, 30fps)를 사용해서 모눈종이를 덧쒸운 합판 위에 고정되어 있는 내압관내의 액면 변동을 1분 동안 동영상으로 촬영하여 저장하였다. 저장이 끝난 동영상을 휴대폰에 내장된 앱으로 재생하면서, 화면에 나타나는 실행시간이 1초씩 변하도록 실행 버튼과 정지 버튼을 교대로 눌러서 화면을 정지시키고, 정지 화면에서 배경인 모눈종이의 눈금으로 내압관내의 액체높이를 읽는 방법으로 1초 간격의 벽 압력을 측정하였다. 동영상을 몇 차례 반복하여 재생하여도 같은 정지 화면들을 얻을 수 있었다. 결국 입구에 모세관이 설치된 내압관과 휴대폰의 동영상 기능을 사용하면 기체분산기로부터의 기포의 발생, 기포의 통과와 합체 그리고 분쇄, 층의 액면으로부터의 기포의 폭발과 같은 빠른 주기의 벽 압력의 변동이 제거된 압력 신호를 얻을 수 있었다.

2.1 벽 압력 측정값의 처리

상승관과 하강관내의 기체체류량은 앞에서 측정한 압력 값을 이용하여 (2)식과같이 계산하였다.

$$E \fallingdotseq 1 - \frac{\Delta P}{\rho_L g \Delta Z} \tag{2}$$

동일한 시간 간격($\Delta t = t_{i+1} - t_i$)을 갖는 개별 시간 t_i ($i = 1,..., n$)에 특정 위치의 압력탭으로부터 측정한 벽 압력의 시계열(time series, x_i)의 자기상관함수(auto-correlation function, C_{xx})는 (3)식과 같이 구하였으며, 위치가 다른 압력탭으로부터 측정한 두 개의 벽 압력 시계열(x_i와 y_i)간의 교차상관함수(cross-correlation function, C_{xy})는 (4)식으로 구하였다[23,24].

$$C_{xx}(\tau) = \frac{\sum_{i=1}^{n-k}(x_i-\bar{x})(x_{i+k}-\bar{x})}{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2} \tag{3}$$

$$C_{xy}(\tau) = \frac{\sum_{i=1}^{n-k}(x_i-\bar{x})(y_{i+\tau}-\bar{x})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2}} \quad (4)$$

여기서 $\tau = k\Delta t$ ($k = 0,..., n-1$)는 지연 시간(lag)이고, n은 전체 측정값의 수이며, $\bar{x}$과 $\bar{y}$은 각각 x_i와 y_i의 평균(average)이다.

3. 결과 및 토론

순환시간에 대한 상승관 외견 기체속도(U_{Gr})의 영향은 Fig. 3과 같았고, 상승관 외견 순환액체속도(U_{Lr})에 대한 기체속도의 영향은 Fig. 4와 같았다. 기체속도가 증가할수록 순환액체속도가 빨라지기 때문에 순환시간은 감소하였다. 기체속도가 증가할수록 순환액체속도가 빨라지는 것은 기체속도가 증가하면 액체순환의 구동력인 상승관 기체체류량과 하강관 기체체류량의 차이가 Fig. 5처럼 증가하기 때문이다. 기액분리기내의 비분산 액체높이(h)가 증가하면 기액분리기의 기포 분리 효율이 증가하여 하강관 기체체류량을 보다 감소시키기 때문에, 액체순환의 구동력이 더 커지므로 순환시간은 감소하고 순환액체속도는 더욱 빨라졌다.

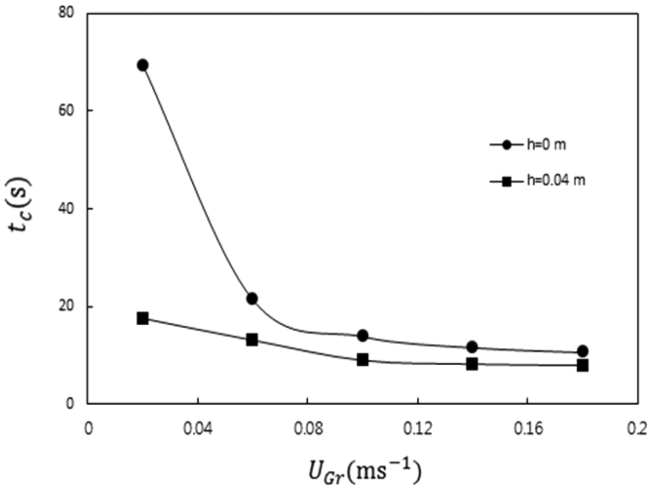

Fig. 3. Effect of the riser superficial gas velocity on the circulation time.

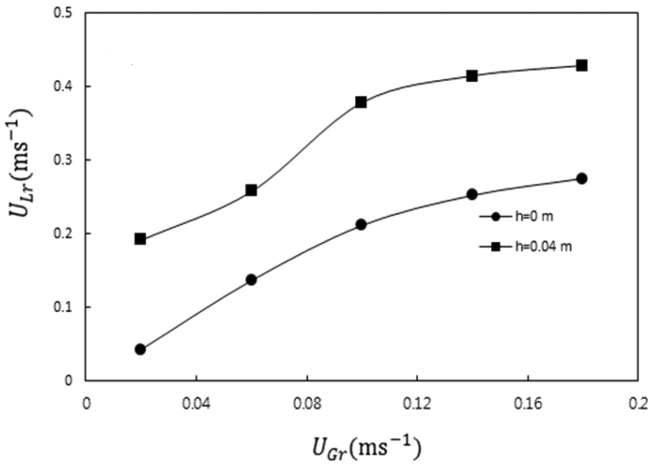

Fig. 4. Effect of the riser superficial gas velocity on the circulation liquid velocity.

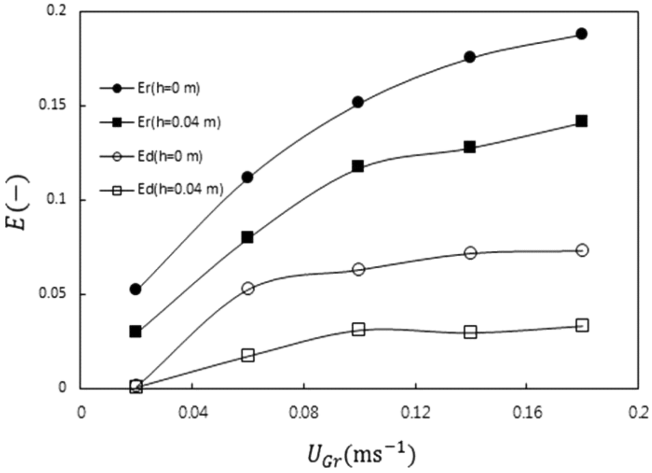

Fig. 5. Effect of the riser superficial gas velocity on the riser and downcomer gas-holdups.

Fig. 5에 기체체류량에 대한 기체속도의 영향을 나타내었다. 기체속도가 증가하면 단위 시간 당 반응기로 공급되는 기포의 양이 증가하며, 이에 따라 순환 액체속도역시 상승한다. 그러나 순환 액체속도의 상승에도 불구하고 공급되는 기포의 양의 증가로 인해 상승관 기체체류량은 증가하지만, 증가율은 기체속도가 증가할수록 점차 감소한다. 하강관 기체체류량 또한 기체속도가 증가할수록 낮은 기체속도에서는 크게 증가하다가 점차 완만히 증가한다. 기체속도의 증가로 순환 액체속도가 증가하면 하강관 상부에서 일어나는 표면 폭기(surface aeration)가 강화될 뿐만 아니라 기액분리기에서 분리되지 않고 하강관으로 유입되는 기포가 증가하므로 하강관 기체체류량은 증가한다. 그러나 기체속도가 0.10 ms^{-1} 이상에서는 순환 액체속도의 증가율이 감소하기 때문에 하강관 기체체류량의 증가는 완만했다.

기액분리기내의 비분산 액체높이가 증가하면 Fig. 4와 같이 순환액체속도가 증가하기 때문에 상승관 기체체류량은 감소했으며, 기액분리기의 성능이 향상되기 때문에 하강관 기체체류량 또한 감소했다. 분산 액체높이가 0 m인 경우, 기체속도가 0.02 ms^{-1}로 낮을 때엔 매우 느린 순환액체의 속도로 인해 작은 크기의 기포가 하강관의 상부에만 존재했다. 그러나 기체속도가 0.06 ms^{-1}만 되어도 빨라진 순환액체의 속도로 인해 상대적으로 많은 기포가 하강관으로 유입되었고, 대부분의 기포는 상승관으로 재순환되었다. 비분산 액체높이가 0.04 m인 경우, 늘어난 기액분리기내의 유체 부피로 인해 기액 분리 능력의 향상되므로 기체속도가 0.02 ms^{-1}로 낮을 때엔 기포는 하강관으로 거의 유입되지 않았다. 그러나 기체속도가 0.06 ms^{-1} 이상일 때에는 역시 빨라진 순환 액체속도로 인해 기포들이 유입되고 빠른 속도로 나선형의 경로를 그리며 하강관을 내려가서는 상승관으로 재순환되었다.

기액분리기내의 비분산 액체높이가 0 m일 때 기체속도에 따른 평균 벽 압력의 변화는 Fig. 6과 같았다. 기체속도가 증가함에 따라 상승관의 하부(P1)와 상부(P2)는 물론 하강관의 상부(P3)와 하부(P4)에서 측정한 벽 압력은 모두 감소하는 경향을 보였다. 이는 기체속도가 증가할수록 상승관과 하강관내의 기체체류량이 Fig. 5와 같이 각각 증가하기 때문이다.

반응기내의 순환 유체는 주기적으로 가속과 감속을 반복하는 것

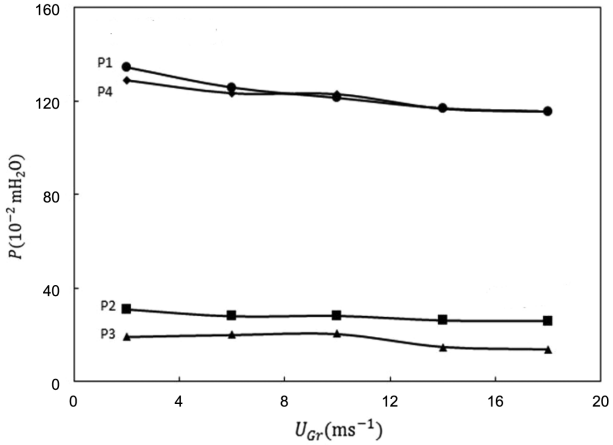

Fig. 6. Effect of the riser superficial gas velocity on average of wall pressures.

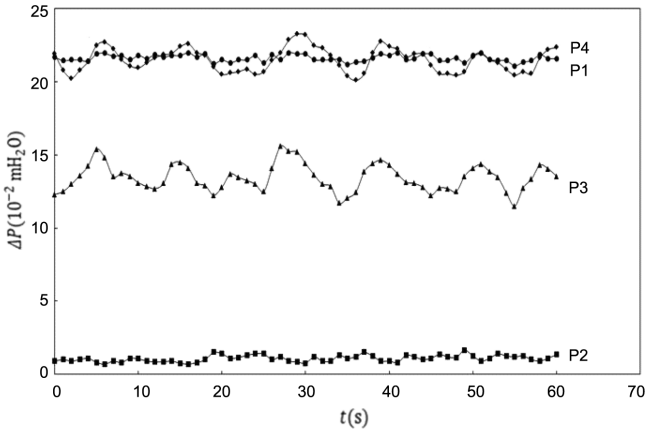

Fig. 7. Fluctuation of wall pressures with time for h = 0 m and U_{Gr} = 0.18 ms^{-1}.

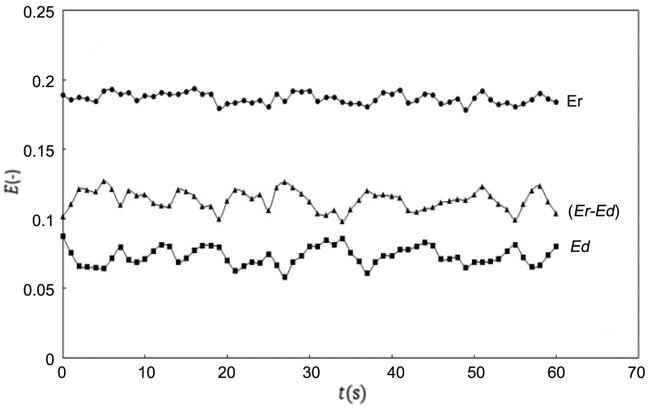

Fig. 8. Fluctuation of gas-holdups with time for h = 0 m and U_{Gr} = 0.18 ms^{-1}.

으로 관찰되었다. 그런 사실은 다음과 같이 자세하게 설명할 수 있다. 반응기로 공기를 공급하기 시작하여 일정한 유량으로 맞추는 시기(기체 공급 초기)엔 정지되어 있던 상승관내의 액체가 기포의 상승과 함께 움직이기 시작하면서 기액분리기내의 상승관 쪽 액위가 하강관 쪽 액위보다 올라가는 소위 '공기부양 효과(airlift effect)', 즉 공기를 불어넣는 공간과 불어넣지 않는 공간 간의 기체체류량의 차이가 발생하며, 이로 인해 연결된 두 공간 사이의 유체의 순환이 유도된다. 초기에 발생하는 두 액위의 차이는 해당 기체속도에서 유지될 수 없는 과도한 값이기에 유체 순환은 최초의 공기부양 효과의 값을 변경하게 된다.

또한 유체 순환의 구동력은 상승관과 하강관 기체체류량의 차이이다. 유체 순환이 시작된 직후의 일정 기간 동안(가속기)은 구동력의 값이 과도하기 때문에 하강관 기체체류량의 계속적인 증가에도 불구하고 순환액체의 가속이 지속된다. 빨라지는 순환액체로 인해 하강관 기체체류량이 증가하고 상승관 기체체류량이 감소하기 때문에 구동력은 점차 감소하여 적정한 구동력에 도달하지만 순환유체의 관성에 의해 거기서 고정되지 않는다. 순환액체의 속도가 적정한 값보다 더 빨라져서 하강관의 기체체류량이 적정한 값 이상으로 상승하고 상승관 기체체류량의 적정 값보다 작아져야 비로써 순환 액체속도의 감소가 일어난다. 즉, 구동력이 적정한 값보다 작은 값에 되고나서야 순환액체의 감속이 시작된다(감속기). 또한 이렇게 시작된 감속기는 역시 순환유체의 관성 때문에 순환 액체속도가 과도하게 느려져서 하강관의 기체체류량이 적정 값보다 하락하고 상승관 기체체류량이 적정 값보다 커질 때까지 지속되며, 그때가 되어서야 다시 순환 액체속도가 가속되기 시작한다(가속기). 이처럼 순환유체의 관성으로 인해 기체속도에 상응하는 적정한 순환 액체속도와 구동력을 지속적으로 유지할 수 없기 때문에 순환유체는 끊임없이 가속과 감속을 반복하게 된다. 그 결과로 벽 압력(Fig. 7)은 물론이고 상승관과 하강관 기체체류량과 그 차이(Fig. 8) 또한 시간에 따라 변동을 보여준다.

한편 기체속도를 실험 조건 중의 다른 값으로 변경하는 것과 관련된 그것들의 변동은 지수 함수적으로 감소하는 것으로 추정되고, 반응기의 치수에 따라서 달라지는 것으로 보인다. 본 실험 장치에서 그런 변동은 짧은 시간(대략 1분 이내)에 사라졌다. 따라서 본 연구에서는 기체속도를 변경한 후 1분 이상이 지난 이후에 벽 압력을 측정하였다.

Fig. 7에 기액분리기내의 비분산 액체높이가 0 m이고 기체속도가 0.18 ms^{-1} 일 때 공기가 분산되지 않을 때와 분산될 때의 압력차(ΔP)의 변화를 시간에 따라 나타냈다. 하강관에 설치한 내압관(P3과 P4)으로 측정한 압력차가 상승관에 설치한 내압관(P1과 P2)으로 측정한 압력차보다 훨씬 큰 변동을 보여주었다. 하강관 입구에서 발생하는 기체 공간의 크기나 하강관 입구 주변에서 발생하는 표면 폭기의 정도와 소용돌이의 크기가 순환 액체속도의 변동에 크게 영향을 받기 때문으로 여겨진다.

압력 변동으로 부터 계산한 기체체류량의 변동은 Fig. 8과 같다. 상승관 기체체류량에 비해 하강관 기체체류량이 더 큰 변동을 보여주었다. 순환액체의 구동력인 상승관과 하강관 사이의 기체체류량의 차이도 주기적으로 변하는 것을 보여주고 있는데 앞에서 설명한 바와 같이 순환 유체가 끊임없이 가속과 감속을 반복하기 때문이다.

벽 압력의 변동은 Fig. 9과 같이 하강관 상부에 일어나는 현상과 관련지어서도 이해할 수도 있다. 기액분리기내의 비분산 액체높이가 0 m일 때에는 기체속도가 0.02 ms^{-1}로 낮을 때부터 하강관의 입구에는 상승관에서 가까운 쪽과 먼 쪽 벽에 각각 기체 공간이 발생했으며 그 사이로 순환액체가 흘러가는 것이 관찰되었다. 기체속도가 커질수록 이러한 기체 공간은 아래쪽으로도 커졌으며, 순환 액체속도의 변동에 따라서도 크기가 변동했다. Chisti와 Moo-Young[1]은 분할된 직사각형 내부순환 공기부양반응기의 하강관 입구에 포획

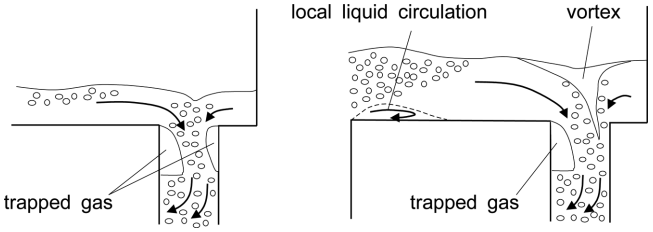

Fig. 9. The trapped gas regions, the vortex and the local liquid circulation in the top section.

된 기체 공간은 기체속도에 따라 커졌다고 보고한 것과 일치한다.

비분산 액체높이가 0.04 m일 때는 실험한 범위의 모든 기체속도에서 하강관 입구 위에 상승관의 먼 쪽으로 치우친 소용돌이가 분명하게 형성되었으며, 이러한 소용돌이는 종종 난류에 의해 상승관에서 먼 하강관 벽면과 접촉하는 것이 관찰되었다. 기체속도가 0.02 ms^{-1}로 낮을 때엔 아직 하강관 입구에 기체 공간이 발생하지 않았으나, 기체속도가 0.06 ms^{-1} 이상으로 커지면 상승관에서 가까운 쪽의 하강관의 입구에 기체 공간이 발생했다. 이러한 기체 공간의 크기는 기체속도가 증가할수록 역시 증가했다.

벽 압력 변동의 강도는 표준편차(σ)의 값으로 확인할 수 있다. Fig. 10에 기액분리기내의 비분산 액체높이가 0 m일 때 기체속도에 따른 벽 압력 변동의 표준편차를 나타내었다. 기체속도가 증가함에 따라 벽 압력 변동의 표준편차는 전반적으로 증가하는 경향을 보여주었다. 이는 기체속도가 증가할수록 순환 액체속도가 보다 큰 폭으로 변동하기 때문이다. 기액분리기를 뚜껑으로 덮지 않으면 기액분리기내의 비분산 액체높이가 높고 기체속도가 빠를 때에 종종 기액분리기밖으로 액체가 튀어나오는 현상이 발생하는 것도 이러한 순환 액체속도의 급격한 변동 때문이다.

상승관 상부의 벽 압력(P2)을 제외한 다른 벽 압력의 표준편차는 Vail 등[16]이 외부순환 공기부양반응기에서 얻은 결과와 유사한 경향을 보였다. 기체속도가 0.02~0.06 ms^{-1}일 때에 압력의 표준편차는 거의 일정했는데, 이러한 결과역시 Vail 등[16]이 다수의 오리피스 노즐을 사용했을 때에 균질체제에서 얻은 결과와 일치한다. 반면에 이런 결과와는 다르게 Fu 등[18]은 균질체제에서도 압력의 표준편차는 기체속도에 대해 선형적으로 증가한다고 보고했다. Glasgow 등[15]도 분할된 직사각형 공기부양반응기에서 기체속도의 증가는 벽 압력의 제곱근 평균을 증가시킨다고 보고한바가 있다.

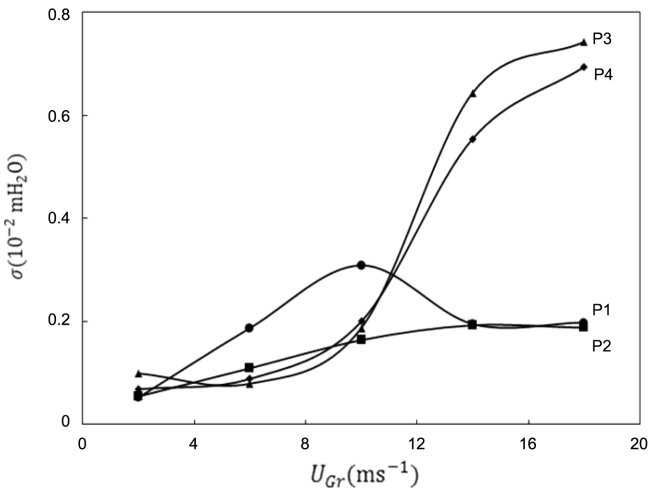

Fig. 10. Effect of the riser superficial gas velocity on standard deviations of wall pressures for h = 0 m.

한편 Chisti와 Moo-Young[1]은 외부순환 공기부양반응기의 경우 하부연결관이 연결되어 있는 상승관의 하부에 국부적인 액체 순환(local liquid circulation)으로 인해 기포가 불균일한 지역(maldistribution zone)이 발생한다고 보고했다. 상승관 하부에서 측정한 벽 압력(P1)이 다른 경향을 보이는 것은 아마도 이러한 지역의 크기가 난류 등으로 변동하기 때문으로 추측된다.

벽 압력의 변동은 공기부양반응기의 성능에 크게 영향을 미치는 기체체류량과 순환액체속도의 변동을 수반한다. 중요한 특성치인 기체체류량과 순환액체속도의 주기성과 변동 강도는 공기부양반응기의 적절한 성능의 보장과 안정적인 운전을 위해서 반드시 고려해야만 한다. 만약 순환액체속도와 기체체류량이 크게 변동한다면 안정적인 운전에 장애가 될 것이다. 이들 특성치의 변동 강도는 운전조건인 기체속도가 증가할수록 커지므로 안정적인 운전만을 도모한다면 가급적 낮은 기체속도가 바람직하다. 그러나 물질전달 성능과 혼합 성능의 향상을 위해서는 앞의 특성치들의 큰 변동을 감수하고 기체속도를 증가시켜야 한다. 결국 현실적인 선택은 이 두 측면을 모두 고려한 적절한 기체속도의 결정이다.

비분산 액체높이가 0 m일 때 기체속도에 따른 개별 벽 압력의 자기상관함수를 Fig. 11에 나타냈다. 비분산 액체높이가 0 m인 경우, 기체속도가 0.06 ms^{-1} 이하에서 모든 벽 압력의 자기상관함수는 주기성을 명확하게 보여주지 않는데, 그것은 주로 순환 액체속도의 변동이 크지 않기 때문이다. 기체속도가 0.10 ms^{-1} 이상으로 커지면 순환 액체속도의 변동이 커지기 때문에 상승관 하부에서 측정한 벽 압력(P1)을 제외한 벽 압력(P2, P3, P4) 중 적어도 어느 하나의 자기상관함수는 주기성을 분명히 보여주었다.

비분산 액체높이가 0.04 m일 때 기체속도에 따른 개별 벽 압력의 자기상관함수를 Fig. 12에 나타내었다. 비분산 액체높이가 0.04 m인 경우, 기체속도가 0.02 ms^{-1} 이하일 때만 모든 벽 압력의 자기상관함수는 주기성을 보여주지 않았다. 비분산 액체높이가 0 m일 때와 비교하면 순환 액체속도가 빠르지만 여전히 순환 액체속도의 변동은 크지 않기 때문이다. 기체속도가 0.06 ms^{-1} 이상으로 커지면 상승관 하부에서 측정한 벽 압력(P1)을 제외한 벽 압력(P2, P3, P4)의 자기상관함수는 모두 주기성을 분명하게 보여주었다.

개별 벽 압력의 자기상관함수로 부터 구한 벽 압력의 변동 주기를 비분산 액체높이와 기체속도에 따라 나타낸 것은 Fig. 13과 같다. 비분산 액체높이가 0 m인 경우에는 아직 기액분리기내에 존재하는 유체의 부피가 상대적으로 작게 유지되기 때문에 대부분의 유체가 효율적으로 순환하기에 본 연구에서 실험한 범위에서 기체속도가 증가할수록 순환 액체속도의 상승에 따라 벽 압력의 변동 주기는 증가했다. 비분산 액체높이가 0.04 m인 경우에도 기체속도가 0.14 ms^{-1} 될 때까지는 기체속도가 증가할수록 벽 압력의 변동 주기는 증가하였다. 그러나 기체속도가 0.18 ms^{-1} 일 때에는 국부 액체 순환 지역과 기액분리기내에서 효과적(빠른 속도)으로 순환되지 않는 액체의 부피가 더욱 커져서 효과적으로 순환되는 액체 부피는 감소하는 반면에 순환 액체속도는 같은 정도로 증가하지 않기 때문에, 결국 순환액체의 관성이 감소하여서 벽 압력의 변동 주기가 감소하는 것으로 여겨진다. 흐름추종자의 움직임으로부터 상승관에 인접한 기액분리기의 바닥과 하부연결관에 인접한 상승관의 하부 그리

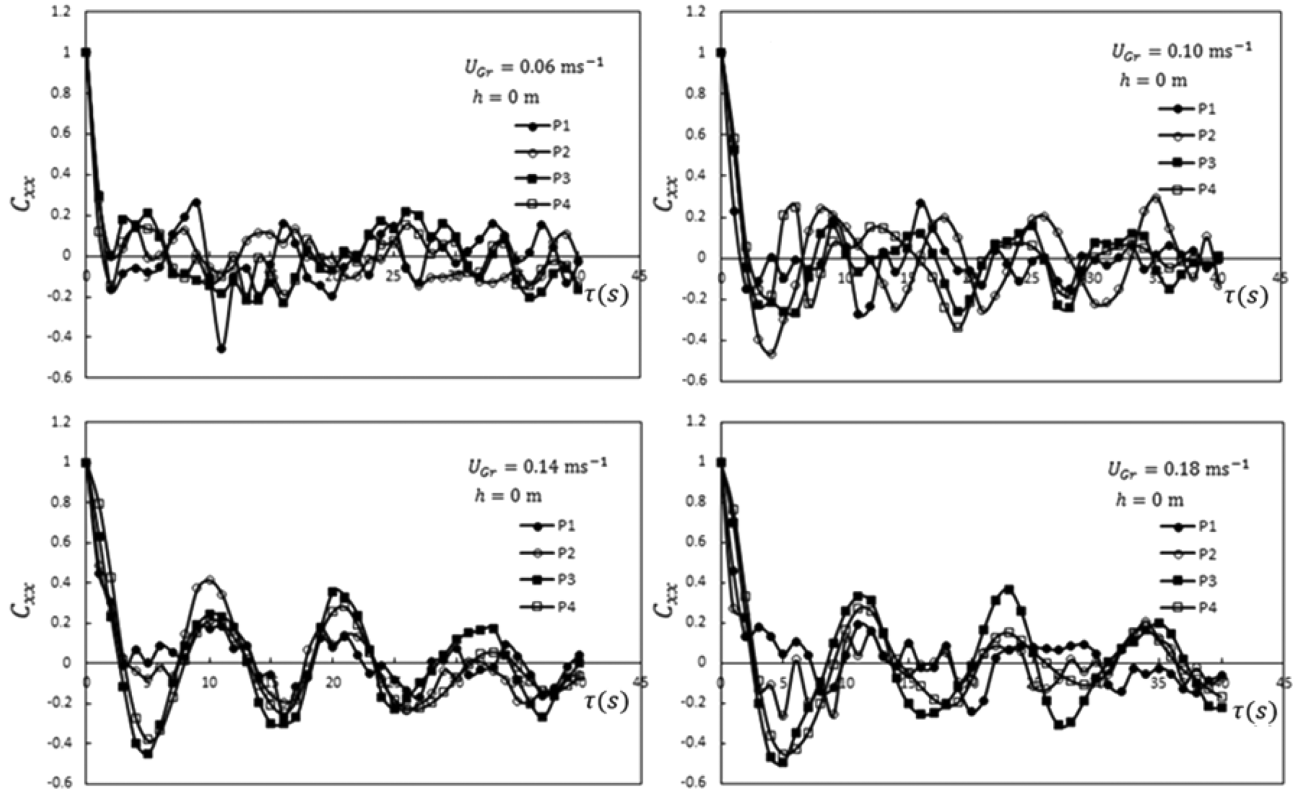

Fig. 11. Auto-correlation function curves for h = 0 m.

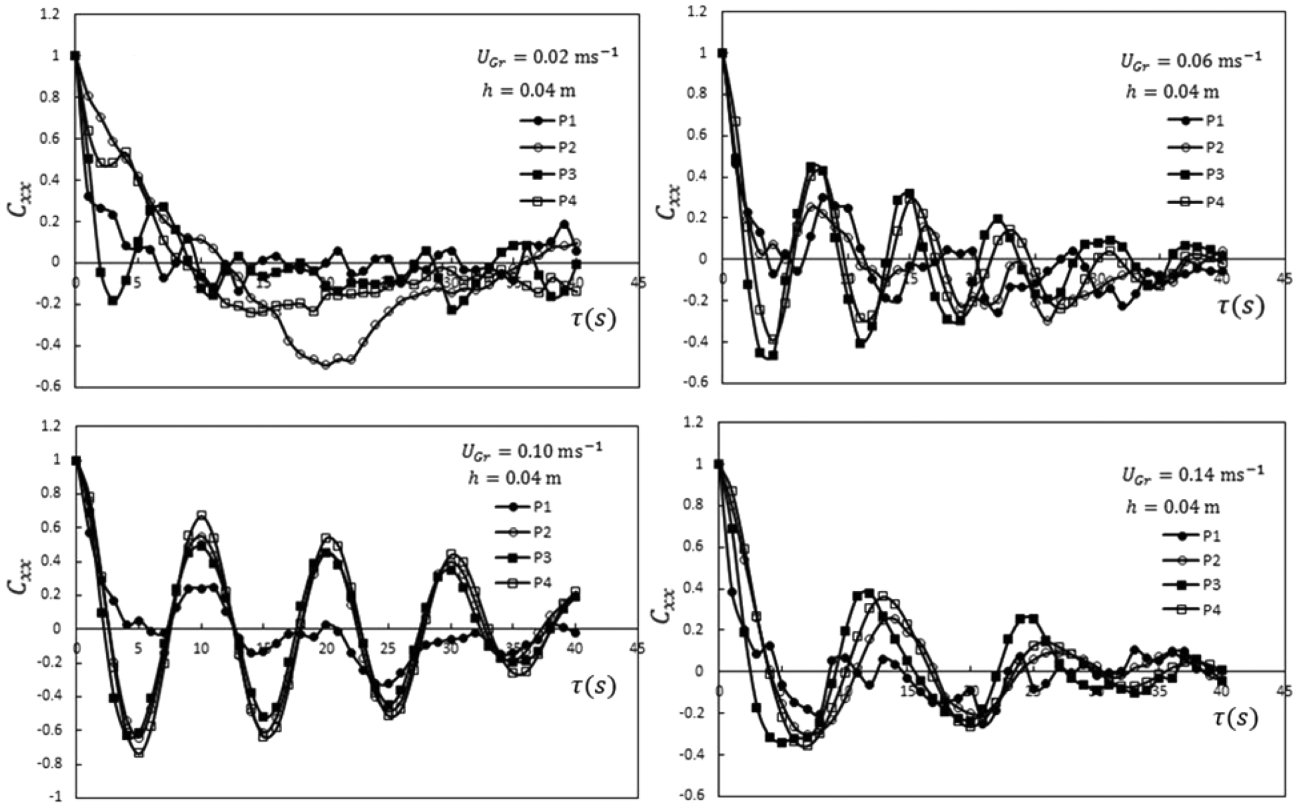

Fig. 12. Auto-correlation function curves for h = 0.04 m.

고 상승관의 벽에 인접해서 여러 개의 국부 액체 순환 지역이 존재함을 확인할 수 있었다[1].

기체속도에 따른 개별 벽 압력의 교차상관함수를 Fig. 14에 나타내었다. 벽 압력의 교차상관함수도 비분산 액체높이가 0 m일 때에

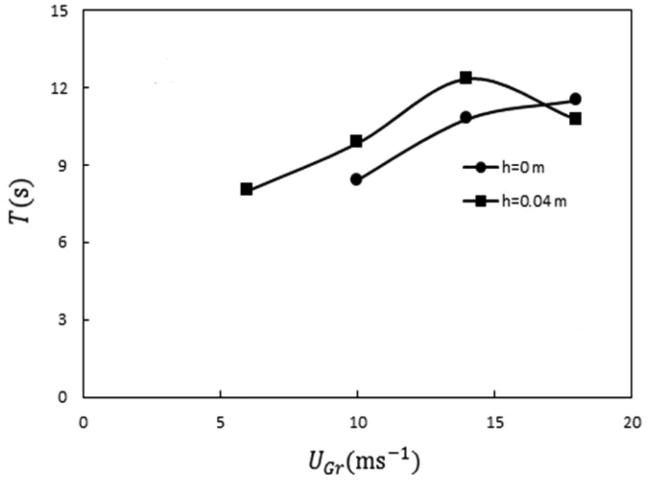

Fig. 13. Effect of the riser superficial gas velocity on the period of pressure fluctuations.

는 자기상관함수와 유사하게 기체속도가 0.10 ms^{-1} 이상이 되어서야 주기성을 보여주었다. 비분산 액체높이가 0.04 m일 때에도 자기상관함수와 유사하게 교차상관함수는 기체속도가 0.06 ms^{-1} 이상에서 분명한 주기성을 보여주었다. 교차상관함수의 첫 번째 봉우리가 나타나는 시간은 두 신호 사이의 지연시간을 나타내며 그 값이 클수록 높은 신뢰성을 가진다고 알려져 있다. 본 연구에서 P3와 P4 사이의 교차상관함수가 가장 큰 값을 보여주며, 두 압력 사이의 지연시간의 값은 대략 1~2초였다. 하강관내에서 유체는 대부분 나선형의 경로를 따라 흘러 내려간다. 그런 현상은 하강관내의 기체체류량이 적고 순환액체속도가 느린 경우, 즉 비분산 액체높이가 높고(0.04 m) 기체속도가 느릴 때(0.02~0.06 ms^{-1})에 보다 분명하게 관찰되었다. 교차상관함수로 구한 두 신호 간의 지연시간은 나선형 경로를 따라 유체가 한 바퀴 도는데 걸리는 시간과 관련이 있어 보였다. 정보의 부족으로 하강관내에 형성되는 나선형 흐름이 공기부양반응기의 성능에 어떤 영향을 미치는지에 대해서 아직 단정할 수는 없다. 다만 그런 현상을 줄이는 방법으로는 하강관의 입구 쪽 벽면에 수직 방해판을 여러 개 부착하는 것을 생각해 볼 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 외부순환형 공기부양반응기내의 상승관과 하강관의 상부와 하부에 각각 설치된 내압관의 액면을 휴대폰으로 촬영하는 방법으로 벽 압력을 측정하였다. 그러면 기체분산기로부터의 기포의 발생과 통과, 기포의 합체와 분쇄 그리고 층의 액면으로부터의 기포의 폭발과 같은 빠른 주기의 벽 압력의 변동은 측정되지 않았다. 그렇게 측정한 벽 압력의 변동 강도와 주기성에 대해 연구하였다. 압력 변동으로부터 계산한 표준편차와 자기상관함수 그리고 교차상관함수로부터 순환액체가 주기적으로 가속과 감속을 반복하는 현상과 하강관내에서의 나선형 흐름을 잘 이해할 수 있었다.

상승관으로 초기에 분산되는 공기에 의해 기액분리기내의 상승관 쪽 액면이 하강관 쪽 액면보다 올라가는 소위 '공기부양 효과'가 발생하며, 이로 인해 연결된 두 공간 사이의 유체의 순환이 유도되고, 이러한 유체의 순환은 초기의 공기부양 효과의 값을 변경하게 된다. 그러므로 공기부양 반응기에서 '공기부양 효과'란 기액분리기내에서의 액면 높이의 차이만을 의미하지 않고 상승관과 하강관의 기체체류량의 차이와 순환액체의 발생과 속도를 모두 포함하는 의미라고 말할 수 있다. 어떤 일정한 기체속도에 대응하는 일

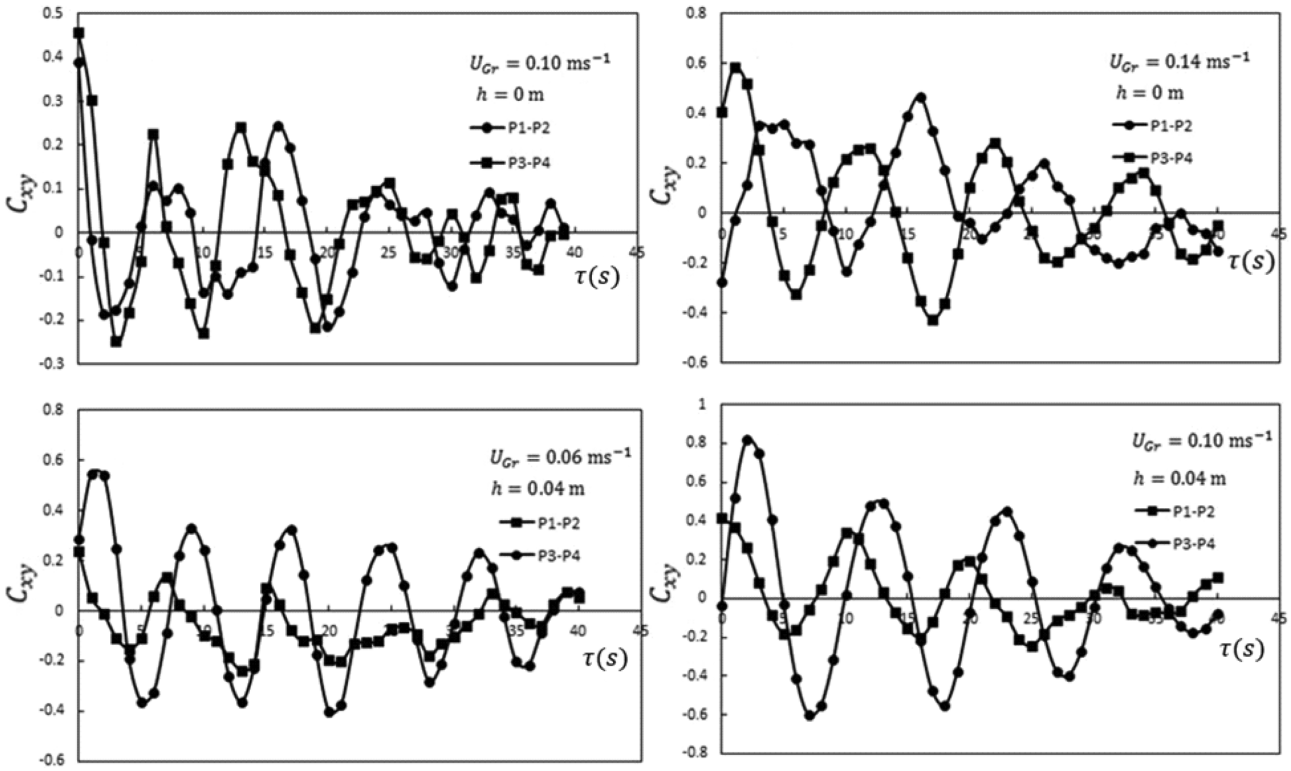

Fig. 14. Cross-correlation function curves.

정한 값의 공기부양 효과가 있지만, 순환유체의 관성으로 인해 상승관과 하강관의 기체체류량의 차이와 순환액체속도 그리고 벽 압력은 일정하게 유지되지 않고 주기적으로 증가와 감소를 반복하였다.

기체속도가 증가할수록 벽 압력 변동의 강도가 커지는 것을 표준편차로 확인할 수 있었다. 자기상관함수로 확인할 수 있는 압력 변동의 주기성은 기체속도가 낮을 때엔 불분명했으나 기체속도가 증가하면 분명해졌다. 압력 변동의 주기성은 기체속도에 상응하는 '공기부양 효과'에 수렴하기 위한 각 부위에서의 기체체류량과 순환액체속도의 변동 때문에 발생한다. 기액분리기내의 비분산액체 높이가 0.04 m일 때 기체속도가 증가할수록 순환액체속도는 증가하는 반면에 국부순환지역과 기액분리기내의 액체 부피의 증가로 효과적으로 순환하는 액체의 부피는 감소하기 때문에, 압력 변동의 주기는 증가하여 극대값을 보여준 후에 감소하였다. 하강관 상하부에서 측정한 압력 변동에 대한 교차상관함수로 구한 지연시간은 대략 1~2초로 나선형 경로를 따라 유체가 한 바퀴 도는데 걸리는 시간과 연관이 있는 것으로 보였다.

사용기호

A_r : riser cross-sectional area [m^2]
C_{xx} : auto-correlation function [-]
C_{xy} : cross-correlation function [-]
E : gas holdup [-]
Er : riser gas holdup [-]
Ed : downcomer gas holdup [-]
g : gravitational acceleration [ms^{-2}]
h : liquid height in the gas-liquid separator [m]
i : number [-]
k : number [-]
n : total number of data [-]
T : period of pressure fluctuation [s]
t : sampling time [s]
t_c : circulation time [s]
t_i : discrete times [s]
U_{Lr} : riser superficial liquid velocity [ms^{-1}]
V_r : liquid volume in the reactor [m^3]
x_i : pressures at discrete times t_i [10^{-2} mH_2O]
y_i : pressures at discrete times t_i [10^{-2} mH_2O]
$\bar{x}$: average of pressures [10^{-2} mH_2O]
$\bar{y}$: average of pressures [10^{-2} mH_2O]

Greek letters

ΔP : pressure difference between two taps or pressure difference between unaerated and aerated liquid levels in a piezometric tube [10^{-2} mH_2O]
Δt : sampling interval [s]
ΔZ : height difference between two taps [m]
ρ_L : liquid density [kgm^{-3}]
σ : standard deviation of pressures [10^{-2} mH_2O]
τ : lag [s]

References

1. Chisti, M. Y. and Moo-Young, M., "Airlift Reactors: Characteristics, Applications and Design Considerations," *Chem. Eng. Commun.*, **60**, 195-242(1987).
2. Merchuk, J. C. and Siegel, H., "Air-Lift Reactors in Chemical and Biological Technology," *J. Chem. Tech. Biotechnol.,* **41**, 105-120 (1988).
3. Siegel, M. H. and Robinson, C. W., "Applications of Airlift Gas-Liquid- Solid Reactors in Biotechnology," *Chem. Eng. Sci.*, **47**, 3215-3229(1992).
4. Choi, K. H., Kim, J. W. and Lee, W. K., "Bubble Properties and Mixing Characteristics in an Airlift Bubble Column with Redistributor," *Korean J. Chem. Eng.*, **3**, 127-134(1986).
5. Choi, K. H., Han, B. H. and Lee, W. K., "Effect of Horizontal Connection Pipe Length on Gas Holdup and Volumetric Oxygen Transfer Coefficient in External Loop Airlift Reactor," *HWAHAK KONGHAK*, **28**, 220-229(1990).
6. Choi, K. H. and Lee, W. K., "Circulation Liquid Velocity, Gas Hold-up and Volumetric Oxygen Transfer Coefficient in External-Loop Airlift Reactors," *Chem. Technol. Biotechnol.*, **56**, 51-58 (1993).
7. Choi, K. H., Chisti, Y. and Moo-Young, M., "Influence of the Gas-Liquid Separator Design on Hydrodynamic and Mass Transfer Performance of Split-Channel Airlift Reactors," *J. Chem. Technol. Biotechnol.,* **62**, 327-332(1995a).
8. Choi, K. H., Chisti, Y. and Moo-Young, M., "Split-Channel Rectangular Airlift Reactors: Enhancement of Performance by Geometric Modifications," *Chem. Eng. Comm.* **138**, 171-181(1995b).
9. Choi, K. H., "A Mathematical Model for Unsteady-State Oxygen Transfer in an External-Loop Airlift Reactor," *Korean J. Chem. Eng.* **16**, 441-448(1999).
10. Choi, K. H., "Effect of Unaerated Liquid Height on Hydrodynamic Characteristics of an External-Loop Airlift Reactor," *Chem. Eng. Comm.,* **189**, 25-42(2002).
11. Choi, K. H., "Effects of Aerated Liquid Level above Downcomer on Hydrodynamic Characteristics of an External-Loop Airlift Reactor," *Chem. Eng. Comm.*, **194**, 1215-1228(2007).
12. Lukić, N. Lj., Śijački, I. M., Kojić, P. S., Popović, S. S., Tokić, M. N., "Enhanced Mass Transfer in a Novel External-Loop Airlift Reactors with Self-Agitated Impellers," Biochem. *Eng. J.*, **118**, 53-63(2017).
13. van der Schaaf, J., Schouten, J. C., Johnsson, F., van den Bleek, C. M., "Non-Intrusive Determination of Bubble and Slug Length Scales in Fluidized Beds by Decomposition of the Power Spectral Density of Pressure Time Series," *Int. J. Multiphas. Flow*, **28**, 865-880(2002).
14. Zhang, W. H., and Li, X., "Origin of Pressure Fluctuations in an Internal-Loop Airlift Reactor and Its Application in Flow Regime Detection," *Chem. Eng. Sci.*, **64**, 1009-1018(2009).
15. Glasgow, L. A., Erickson, L. E., Lee, C. H. and Patel, S., "Wall Pressure Fluctuations and Bubble Size Distributions at Several Positions in an Airlift Fermentor," *Chem. Eng. Comm.*, **29**, 311-336(1984).
16. Vail, C., Camarasa, E., Poncin, S., Wild, G., Midoux, N. and Bouillard, J., "Study of Hydrodynamic Behaviour in Bubble Columns and External Loop Airlift Reactors through Analysis of Pres-

sure Fluctuations," *Chem. Eng. Sci.*, **55**, 2957-2973(2000).
17. Vial, C., Poncin, S., Wild, G. and Midoux, N., "A Simple Method for Regime Identification and Flow Characterization in Bubble Columns and Airlift Reactors," *Chem. Eng. Pro.* **40**, 135-151(2001).
18. Fu, C. C., Fan, L. S. and Wu, W. T., "Flow Regime Transitions in an Internal-Loop Airlift Reactor," *Chem. Eng. Technol.*, **30**, 1077-1082(2007).
19. Zhang, W. H., Li, H. and Li, X., "Identification of Regime Transitions in an Inner-Loop Airlift Reactor Using Local Bubble-Induced Pressure Fluctuations Signals," *Chem. Eng. J.*, **162**, 296-300(2010).
20. Luo, L., Yan, Y., Xie, P., Sun, j., Xu, Y. and Yuan, J., "Hilbert-Hung Transfer, Hurst Chaotic Analysis Based Flow Regime Identification Methods for an Airlift Reactor," *Chem. Eng. J.*, **181-182**, 570-580(2012).
21. Philip, J., Proctor, J. M., Niranjan, K. and Davidson, J. F., "Gas Hold-up and Liquid Circulation in Internal Loop Reactors Containing Highly Viscous Newtonian and Non-Newtonian Liquids," *Chem. Eng. Sci.*, **45**, 651-664(1990).
22. Kojić, P. S., Popović, S. S., Tokić, M. S., Šijački, I. M., Lukić, N. Lj., Jovičević, D. Z., and Petrović, D. Lj., "Hydrodynamics of an External-Loop Airlift Reactors with Inserted Membrane," *Braz. J. Chem. Eng.*, **34**, 493-505(2017).
23. Chatfield, C., *The Analysis of Time Series: An Introduction*, Chapman and Hall, London(1984).
24. Welsh, W. F., "On the Reliability of Cross-Correlation Function Lag Determinations in Active Galactic Nuclei," *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, **111**, 1347-1366(1999).