

전해질 용액 삼상 유동층의 압력변동 신호의 웨이블릿 변환

박성희[†] · 권혁웅* · 김상돈*

우석대학교 에너지전기공학과
565-701 충청북도 진천군 진천읍 대학로 66
*한국과학기술원 생명화학공학과
305-701 대전시 유성구 구성동 373-1
(2024년 12월 20일 접수, 2025년 1월 13일 수정본 접수, 2025년 1월 23일 채택)

Wavelet Transform of Pressure Fluctuations in a Three Phased Fluidized Bed with Electrolyte Solutions

Soung Hee Park[†], Hyeuk Woong Kwon* and Sang Done Kim*

Department of Energy Engineering, Woosuk University, 66, Daehak-ro, Jincheon-eup, Jincheon, Chungbuk, 27841, Korea

*Department of Chemical & Biomolecular Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology,
373-2, Guseong-dong, Yuseong-gu, Daejeon, 305-701, Korea

(Received 20 December 2024; Received in revised from 13 January 2025; Accepted 23 January 2025)

요 약

본 연구에서는 직경 0.376 m의 삼상 유동층 내에서 액상으로 전해질(NaCl) 용액을 사용하여 압력 변동 실험을 수행하였다. 압력변동 신호를 해석함에 있어 지역 웨이블릿 함수에 기초한 웨이블릿 변환 기법을 적용하였다. 압력 변동 신호들의 시계열 데이터들은 웨이블릿 분해, 이산 웨이블릿 변환 계수, 웨이블릿 에너지 분포 그리고 시간-스케일 표현법으로 분석하였다. 특히 지역 웨이블릿 에너지 분포를 활용하여 전해질 물질을 포함한 삼상 유동층의 유동 특성의 차이를 규명하였으며, 이는 전해질 농도에 따라 미세 스케일 특성이 변화함을 보인다. 이로부터 웨이블릿 변환기법을 이용하여 전해질 물질을 갖는 삼상 유동 층내의 스케일 성분들을 얻을 수 있어 전해질 용액 삼상 유동층의 유동 특성을 예측하는 데 효과적인 도구임을 확인하였다.

Abstract – Pressure fluctuations experiments were conducted in a three phase fluidized bed with electrolyte solution (NaCl solution) as the liquid phase. The wavelet transform based on localized wavelet functions is applicable to analysis of the fluctuating signals. The time series of pressure fluctuation signals have been analyzed through coefficients of discrete wavelet transform, wavelet decomposition, wavelet energy distribution with scale and time-scale representation. By utilizing local wavelet energy distributions, the flow characteristics in the three-phase fluidized bed with electrolyte solutions were identified, showing distinct differences in fine-scale features depending on the concentration of electrolyte solutions. Thus, this wavelet transform method enables us to obtain the scale content of local complex flow behaviors in a three phase fluidized bed with electrolyte solutions.

Key words: Wavelet transform, Multiresolution, Wavelet energy, Three phase fluidized bed, Pressure fluctuation

1. 서 론

유동층 반응기는 상들 간의 효율적인 접촉으로 높은 열 및 물질 전달 속도로 인해 많은 혼합 및 분리 장치와 반응기로 여러 생물 및 화학 공정에 활용되고 있다[1,2]. 최근 삼상 유동층 반응기는 미생

물의 담체를 활용하는 발효 및 생물반응기, 수소생산을 위한 바이오매스의 가스화 공정등에 삼상유동층 반응기가 활용됨으로서 제약, 화장품 및 에너지 시스템등에 널리 적용되고 있다[3-6]. 또한, 생화학 반응기나 폐수처리등 많은 분야에 적용되고 있는 전해질 물질이 포함된 기포탑 및 삼상유동층 연구가 확대되고 있다. 그러나, 전해질 물질을 사용하는 유동층 연구가 매우 부족한 형편이다. 전해질 물질 포함한 연구들로는 Ziemiński and Whitemore[7]는 물에 전해질 형태로 도입된 이온이 이온-이온과 물-물 상호 작용의 차이로 인한 구조변이 효과를 설명하였다. 또한 Jamialahmadi and Müller-Steinhagen[8]은 기포와 전해액 사이의 경계면에서의 표면

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: drpark@woosuk.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.

장력이 기포생성에 영향을 조사하였다. 그러나 이러한 연구들은 기체-액체 시스템에 관한 연구이며 기체-액체-고체 시스템에 대한 연구는 전문한 형편이다.

일반적으로 삼상유동층은 각 상의 조업 조건에 따라 기포의 합체 및 분쇄 현상으로 인한 난류 흐름을 형성하므로 반응기 내부에서의 기체-액체-고체 흐름 현상은 dynamic 하며 매우 복잡하다. 이와 같은 다상의 흐름 거동의 효율적인 해석과 반응기의 수력학적 특성의 이해를 통한 삼상 유동층의 효율적 조업과 설계의 요구가 증대되고 있어 많은 연구자들이 광범위하게 압력변동에 관한 연구를 해 오고 있다[9-13]. 압력변동 특성에 관한 연구는 통계적 방법, 푸리에 변환법, deterministic chaos 해석법과 같은 여러 해석방법이 연구되어 왔다. 함수들의 결합을 이용한 신호의 주파수 해석은 이미 1800년대 초 J. Fourier가 정의한 sine과 cosine을 이용하여 함수를 표현하는 푸리에 변환(Fourier transform)에서 시도되었다. 그러나 푸리에 변환의 기저함수를 구성하는 sine, cosine 함수는 지역적이지 않아 불연속 신호와 sharp spike 해석에 문제를 가지고 있기 때문에 보다 적절한 기저함수의 필요성이 대두되었다. 또한 시간과 주파수 정보를 동시에 표현할 수 없는 단점이 제기되어 시간과 주파수 정보를 동시에 나타낼 수 있는 short time Fourier transform(STFT)이 개발되었으나 이 또한 해상도(resolution)가 고정되는 단점을 가지나. 이를 극복하고자 기저함수가 지역적이고 다양하며 시간-주파수 표현이 가능한 웨이브렛 변환이 개발되었고, 1980년대 중반 이후 Mallat [14]과 Daubechies[15]에 의해 급속도로 발전되어 여러 분야에서 응용되고 있다.

압력변동 신호 해석에 있어서 고전적인 푸리에 변환은 현재까지 널리 쓰이고 있지만, 시간에 대한 정보를 주파수 영역으로 바꿔주는 대신 각 주파수에 대한 정보는 전체 시간 영역에 대한 평균적인 값을 나타내어 준다. 그러나 이 변환은 지역적이지 않은 함수를 기저함수로 하고 있기 때문에 과도(transient) 또는 비정상(non-stationary) 신호의 경우에는 적당하지 않다[16]. 이를 극복하고자 최근에 개발된 압력 변동신호의 웨이브렛 변환 해석법은 모 웨이브렛(mother wavelet)의 스케일링(scaling) 과 이동(translation) 과정에 의해 다양한 기저 함수를 생성하기 때문에 주파수와 시간 정보를 동시에 적절하게 표현할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 이러한 시간과 스케일을 같이 고려할 수 있는 방법을 제시해 주며, 웨이브렛 함수는 시간과 주파수 영역 모두에서 어느 정도 지역화(localization)되어 있기 때문에 이때 스케일은 주파수 정보를 포함하고 이동(translation)은 시간 정보를 포함함으로 압력 변동 신호를 분석하는데 적당하다 [12,17-21].

본 연구에서는 전해질 물질을 갖는 삼상 유동층의 여러 조업 조건에서 얻은 압력 변동 신호에 푸리에 변환법과 웨이브렛 변환법을 적용하여 이들 두 기법을 비교하고, 이산 웨이브렛 변환에 의한 웨이브렛 에너지 분포로부터 삼상유동층의 유동 특성 규명에 있어 또 다른 방법임을 제시하고자 한다.

2. 이론적 배경

2-1. Fourier transform

신호 분석의 목적은 신호를 변환하여 유의미한 정보를 추출하는데 있다. 푸리에 변환은 주어진 신호를 주파수 성분으로 분해하는 수학적 기법이다. 푸리에 변환의 수식적 표현은 다음과 같다. $X(t)$

를 일정 구간(0, T)내의 압력변동 신호 함수라고 하면, 이때 $X(t)$ 의 연속 푸리에 변환은 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned}\hat{X}(f) &= \int_{-\infty}^{\infty} X(t)e^{-j2\pi ft} dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} X(t)[\cos(2\pi ft) - j\sin(2\pi ft)]dt\end{aligned}\quad (1)$$

위 식에서 사인 함수(sine function)와 코사인 함수(cosine function)는 구간(- π , π)에 걸쳐 직교 기저(orthogonal basis)를 이룬다. 위 식에서 보듯이 해석된 계수, $X(f)$ 는 사인파 함수(sinewave)와 주어진 신호 함수간의 무한 구간에 걸친 내적으로 계산되어진다. 결과적으로 푸리에 해석법은 주어진 신호 함수, $X(t)$ 가 사인파 함수 같은 stationary 요소들로 구성되어 있을 때 적합하다. 이를 통해 시간 도메인의 신호함수를 주파수 도메인으로 매핑하며, 신호가 특정 주파수 범주에서 차지하는 에너지 밀도를 파악할 수 있다. 시계열 함수의 파워 스펙트럼에서 볼 수 있듯이 푸리에 변환의 기저함수는 오직 주파수에 따라 지역화될 뿐, 변환의 범위가 시계열 전체 시간 범주에 걸쳐 진행되어짐으로 해서 시간에 대해서는 지역화가 되지 않는다. 더욱이 작은 값들의 계수는 다른 큰 값의 계수에 의해 가려질 수도 있는 단점을 갖고 있다.

2-2. Wavelet transform

푸리에 변환의 한계를 극복하기 위한 시계열 데이터를 해석하는 새로운 대안으로서 웨이브렛 변환이 도입되었다. 사인 또는 코사인 함수가 기저함수로 사용되는 푸리에 변환과 달리, 웨이브렛(wavelet)이라 불리는 함수로 기저함수를 대체한다. 여기서 웨이브렛들은 웨이브렛 변환의 구축 블록(building block)으로 생각할 수 있다. 마치 푸리에 변환에서 삼각함수들을 구축 블록으로 사용했던 것과 같다. 그리고 푸리에 변환이 하나의 함수의 팽창(dilation)을 사용하는 것처럼 모 웨이브렛(mother wavelet)이라 불리는 하나의 고정된 원형 함수의 팽창 또는 스케일링(scaling)과 이동(translation)을 이를 통해 다양한 스케일과 위치에서 함수의 정보를 분석할 수 있다. 여기서 모 웨이브렛 함수는 절대적으로 적분 가능한 함수로 정의되며, 이를 기반으로 스케일링과 이동 조작을 수행하여 웨이브렛 변환에 사용되는 다양한 기저 함수를 생성한다. 그래서 다음과 같이 정의된 함수들의 가계를 이룬다[14,22,23].

$$\psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right)\quad (2)$$

여기서, 변수 a 는 모함수의 팽창 또는 스케일링을 의미하며 b 는 이동을 나타낸다.

사실상 스케일링 조작은 모웨이브렛에 ‘stretching’과 ‘compressing’ 조작을 수행하는 것과 같은 것으로 분석하고자 하는 함수의 주파수 정보를 각각의 주파수에 따라 얻을 수 있다. 즉, ‘compression’ version은 고주파수 정보에 적용되며 ‘stretching’ version은 저주파수 정보에 사용된다. 또한 translation 조작은 시간축에 따라 모웨이브렛의 ‘shifting’을 시행하는 것으로 translated version은 분석하고자 하는 함수의 시간에 따른 정보를 캐취할 수 있도록 해준다. 이러한 방법으로 각각의 스케일링(scaling) 그리고 이동(translation) 변수 a , b 에 따라 scaled 그리고 translated version의 웨이브렛들로 가계를 이룬다.

어떤 함수가 각각의 주파수에 따라 삼각함수들 상에 사상되어지는 푸리에 변환법에서처럼 웨이브렛 변환법은 각각의 다른 dilation과 translation 파라미터에 따라 신호함수를 웨이브렛들상에 투영되어진다. 따라서 웨이브렛 변환은 시간 도메인 함수를 이차원의 scale-time 도메인으로 매핑시키는 결과를 보여준다. 그리고 변환은 다음과 같은 웨이브렛들과 분석 함수간의 내적 계산과정이 포함되어 있다.

$$\langle f(t), \psi_{a,b}(t) \rangle = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (3)$$

2-3. 웨이브렛 에너지

웨이브렛 에너지는 다음과 같이 정의된다.

$$E_j^d = \frac{1}{E} \sum_{k=1}^{n/2^j} d_{j,k}^2 \quad j = 1, \dots, l \quad (4)$$

$$E_j^s = \frac{1}{E} \sum_{k=1}^{n/2^j} s_{j,k}^2 \quad (5)$$

여기서 E는 그 신호의 전체 에너지이다.

3. 실험

본 연구에서 사용한 장치는 pilot plant scale의 삼상 유동층 장치로서 유동화 탑은 주탑과 calming section, 그리고 weir로 구성되어 있다. 기상과 액상의 분배기는 calming section 과 주탑 사이에 설치되어있다[24]. Fig. 1은 장치의 개략도이다. 주탑은 직경이 0.37 m이고 높이는 2.1 m 인 아크릴 관을 사용하였다. 그리고 calming section 은 0.55 m 길이와 0.4 m의 직경을 갖는 스텐레스 강으로 제작되었으며

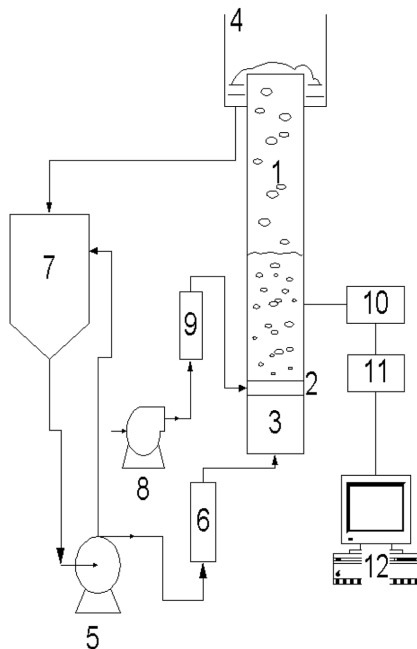


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

- | | |
|--------------------|-----------------------------|
| 1. Main column | 7. Liquid reservoir |
| 2. Distributor | 8. Air compressor |
| 3. Calming section | 9. Flowmeter |
| 4. Weir | 10. Pressure transducer |
| 5. Pump | 11. Data acquisition system |
| 6. Flowmeter | 12. PC |

weir는 탑 상부에서 넘쳐흐르는 액상을 저장조로 순환시키는 역할을 한다. 분배관은 액상의 효율적인 분배를 위하여 사용하였다. 전해 물질로는 NaCl을 사용하였으며, 농도에 따른 전기전도도 보정곡선을 구하여 원하는 전해물질의 양을 펌프를 가동시킨 상태에서 저장조에 투입한 후 일정 시간 동안 시스템을 순환시켜 균일한 농도가 되도록 하였다. 전해물질의 농도는 0.05, 0.1, 0.2 mol/l을 사용하였다. 그리고 압력변동 측정 실험을 조건 조건의 변화-기상유속(0-0.14 m/s), 액상유속(0.02-0.10 m/s)에 따라 측정한다. 고체상을 위한 입자는 글라스비드(직경 1 mm, 밀도 2500 kg/m³)을 사용하였다. 기체상으로는 압축공기를 사용하였다.

주탑에는 정압을 측정할 수 있는 압력점을 분배기 위로 0.07 m 부터 1.610 m 까지 16 개의 압력점을 설치하여 이중 0.04 m 지점의 압력 tap은 차압 변환기(differential pressure transducer)에 연결하였다. 측정된 시간의 변화에 따른 압력 변화 신호는 A/D 변환기를 거쳐 디지털 신호로 바꾼 후 데이터 저장장치 및 컴퓨터에 연결시켜 각 신호에 대한 해석을 시행한다. 압력변동 신호의 크기는 Nyquist sampling theory에 따라 sampling rate를 10 ms 로 하고 4096 point의 시계열 데이터를 얻는다. 이렇게 얻어진 디지털 데이터를 S+Wavelet 소프트웨어(MathSoft Inc., USA)을 이용하여 압력변동 신호의 웨이브렛 변환을 계산하며 이때 모웨이브렛으로는 Coifman-wavelet 함수를 사용하였다.

4. 결과 및 고찰

전해 물질 용액의 액상과 탭 위터의 액상을 갖는 삼상 유동층에서 각각 얻은 압력 변동 신호를 Fig. 2에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 두 압력변동 신호들은 시간에 걸쳐 매우 무작위하고 복잡한 형태를 보여주고 있으며, 이로 인해 두 압력 변동 신호간에 크기 차이는 있을 수 있으나, 시간의 흐름에 따른 유동층 내의 흐름 특성 및 유동요소들의 존재와 움직임에 대해서는 규명하기 어렵다. 이러한 시간 도메인의 한계를 극복하고 압력 변동 특성에 대한 정량적 정보를 도출하기 위해 많은 연구자들은 푸리에 변환을 활용하여 파워스펙트럼 함수를 계산해 왔다.

전해물질 용액을 액상으로하는 삼상유동층 내의 압력 변동 신호를 푸리에 변환(Fourier Transform)을 이용하여 파워스펙트럼을 계산하였으며, Fig. 3에 다양한 조업 조건에 따라 결과를 나타내었다. 파워 스펙트럼 상에서 관찰되는 피크들은 랜덤 변수들의 주요 주기적 성분들과 관련된 것이다. 그림들에서 볼 수 있듯이, 각 파워스펙트럼 상에 뚜렷한 피크들이 0 에서 10 Hz 사이에 주로 나타남을 확인할 수 있다. 이들 피크들은 해당 주파수에 관련된 요소들이 존재함을 나타내는 것으로 주로 삼상 유동층내의 기포와 같은 동역학적 현상을 반영한다. 일반적으로 푸리에 변환은 주어진 시간 영역 함수의 각 주파수에 대응하는 에너지 밀도를 나타낸다. 그림에서 보듯 탭 위터를 액상으로 사용하는 삼상 유동층 내에서 얻은 압력 변동 신호로 얻은 파워스펙트럼과 전해질 물질을 액상으로 사용한 삼상 유동층의 파워스펙트럼 간에 주 주파수의 대역이 10 Hz 이하에 분포하고 있음은 유사하다. 그러나 액상의 전해질 물질의 농도에 따라 그 주파수의 분포 양상이 달라지는 것을 확인할 수 있다. 탭 위터의 경우, 매우 낮은 주파수 대역에 주 주파수들이 분포하나, 전해질 물질의 농도가 증가함에 따라 특정 주파수 주변으로 집중되는 경향을 보이고 있다. 이러한 현상은 액상의 물질 성질에 따라 기포

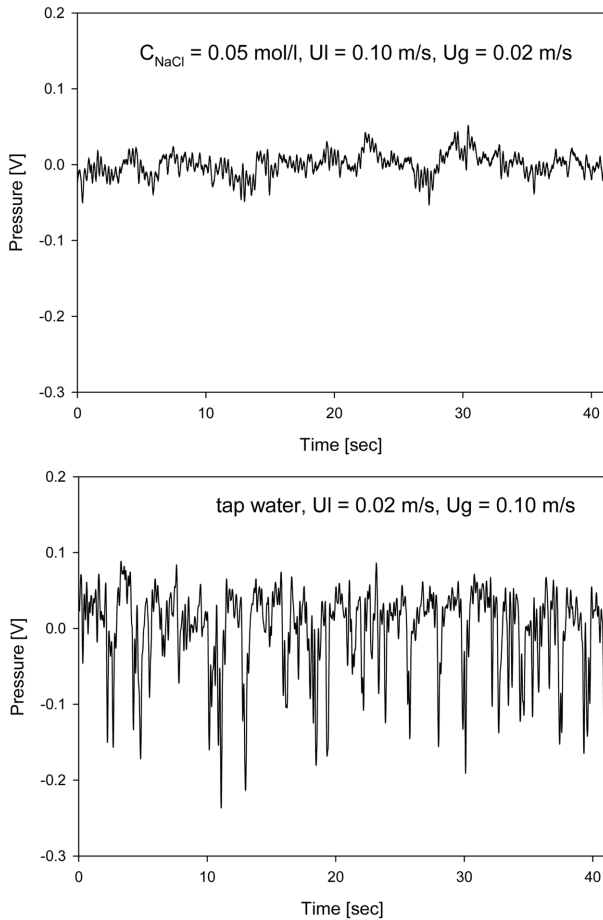


Fig. 2. Typical pressure fluctuation signals under different operation conditions in a three-phase fluidized bed.

합체 및 분쇄 현상에 영향이 있음을 예측할 수 있다. 그러나 파워 스펙트럼 분석만으로는 각 유동층 내에서 발생하는 동역학적 변화를 정량적으로 규명하기에는 한계가 있다. 기포의 크기가 클수록 파워 스펙트럼에서 더 낮은 피크로 나타남은 잘 알려져 있다[11,13]. 그러나 푸리에 변환의 기저함수가 본질적으로 주파수에 대해서만 지역화(localized)되어 있을 뿐, 시간에 대해서는 그렇지 못하다는 한계를 가진다. 이로 인해 파워 스펙트럼에서 주 주파수가 기포들에 의해 형성된다는 정보를 제공하지만, 시간에 따른 이들 기포들의 움직임을 나타내지 못한다. 이런 푸리에 변환의 단점을 극복할 수 있는 대안으로 시간과 주파수 정보를 동시에 제공할 수 있는 웨이브렛 변환(Wavelet Transform)을 시도한다. 웨이브렛 변환은 시간과 주파수 모두에서 지역화된 정보를 제공할 수 있어, 층내에서 유동 요소들이 움직임과 시간에 따른 동역학적 특성들을 보다 정확하게 분석할 수 있다.

Fig. 4 그리고 Fig. 5에는 전해질 용액을 포함한 삼상유동층과 탭 워터를 가진 유동층의 압력 변동신호의 웨이브렛 분해(wavelet decomposition)의 전형적인 예를 각각 보여준다. 웨이브렛 변환은 레벨에 따라서 분해(decomposition)과정과 재구성(reconstruction)과정을 거치게 된다. 분해 과정에서 저역 필터(low-pass filter)를 통해 분해된 신호를 근사계수(approximation coefficient)라하고 고역 필터(high-pass filter)를 통해 분해된 신호를 세부계수(detail coefficient)라 한다. 이때 분해된 각 계수는 개수를 절반으로 줄여주는 다이아드 다운샘플링(dyadic down-sampling) 과정을 거치며, 분해된 근사 계수는 다음 레벨의 분해를 수행하는데 사용된다. 재구성 과정은 분해된 계수들을 결합하는 과정으로 분해과정에서 절반으로 줄여진 개수를 원래 상태로 환원하는 다이아드 업샘플링(dyadic up-sampling)과정을 거쳐 신호를 복원한다. 레벨에 따른 샘플화 과정에 의해 시간 해상도가 조절되고 필터링 과정에 의해 주파수 간격이 조절된다. 따라

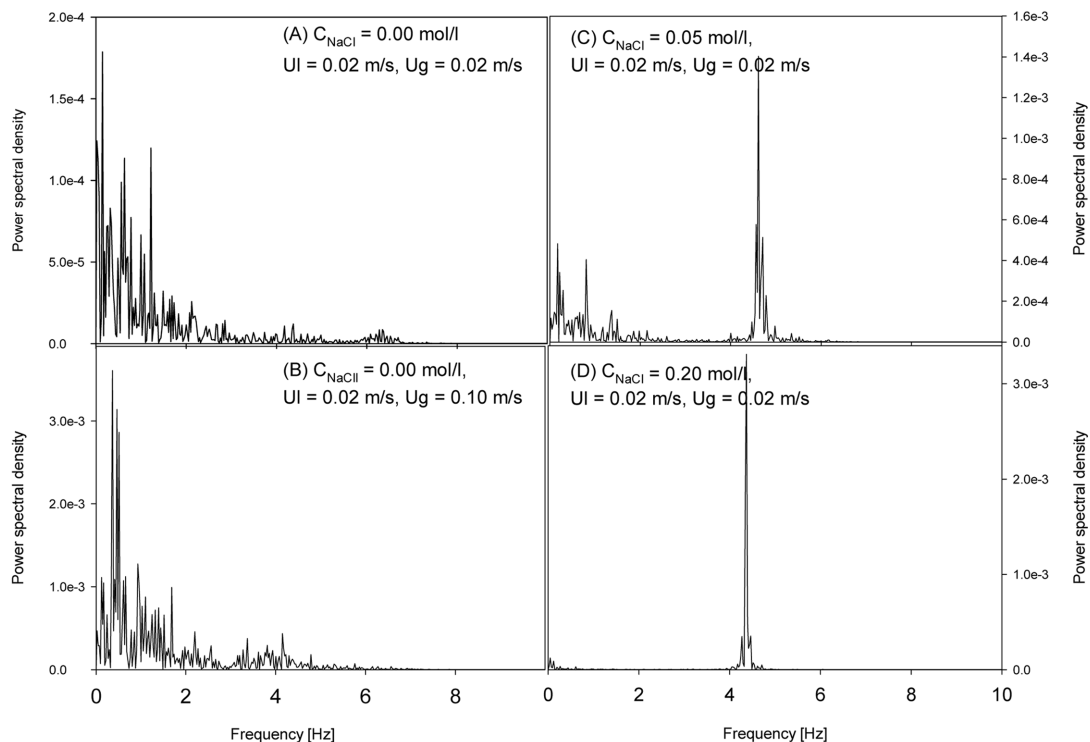


Fig. 3. Power spectra obtained from Fourier transform for different liquid phases: tap water and electrolyte solutions.

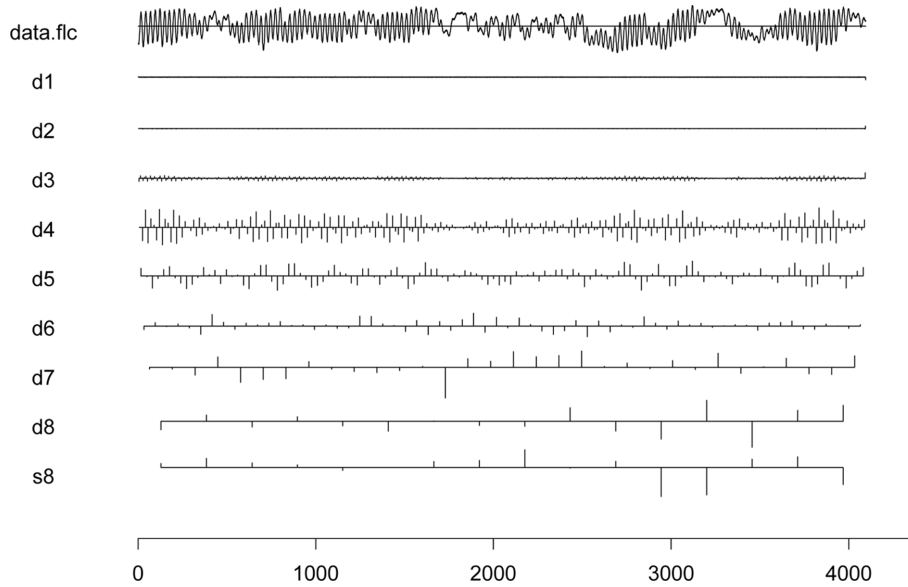


Fig. 4. Plot of coefficients of discrete wavelet transform of a pressure fluctuation signal for a three-phase fluidized bed with an electrolyte solution as the liquid phase.

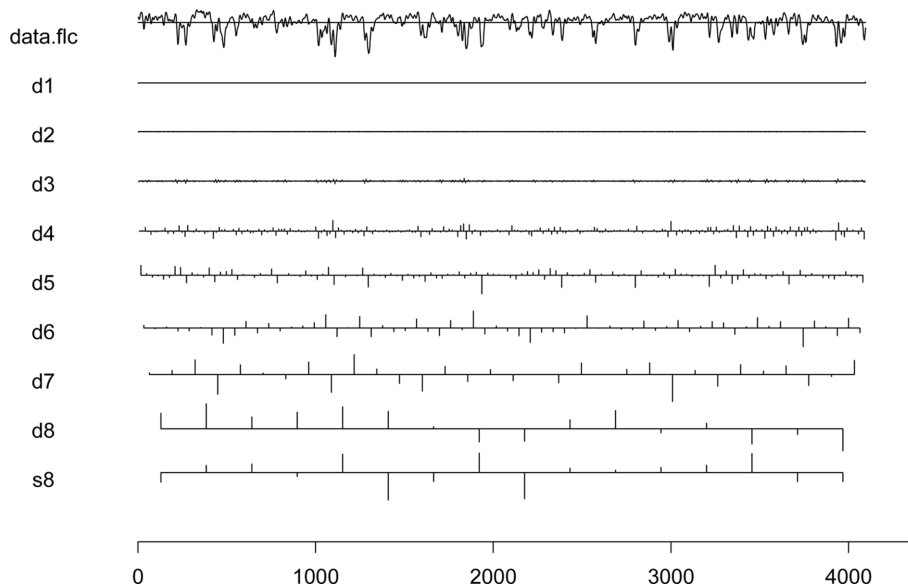


Fig. 5. Plot of coefficients of discrete wavelet transform of a pressure fluctuation signal for a three-phase fluidized bed with tap water as the liquid phase.

서 레벨에 따라 시간과 주파수에 대해 다양한 해상도를 갖게 되는 데 이는 다중 해상도 분석(multi-resolution analysis)라 불리는 중요한 이유이다. 다중 해상도 분석은 시간-주파수 동시 분석을 가능하게 하는 웨이블릿 변환의 중요한 특징 중 하나이다.

Fig. 4와 5에 삼상유동층에서 측정된 압력변동 신호에 대한 이산 웨이블릿 변환(discrete wavelet transform) 결과를 각각 나타내었다. 각 그림의 최상의 행은 본래의 압력변동 신호를 나타내며, 그 아래 행들은 웨이블릿 계수들(fine scale 및 coarse scale)을 레벨별로 나열한 것이다. 두 번째 행부터는 fine scale 계수(d1)에서부터 coarse scale 계수(d8과 s8)까지를 포함하고 있다. 모든 계수는 0 값을 기준으로 수직선 형태로 표시되었다. Fine scale 특성 요소(고주파 변동)는 주로 d1과 d2와 같은 detail 계수에서 나타나며, 이는 고주파 성분을

반영한다. 반면, coarse scale 성분(저주파 변동)은 d8과 s8에서 주로 나타나며, 저주파 특성을 반영한다[12,20]. Fig. 4의 탭 워터의 이산 웨이블릿 변환의 계수들은 주로 d6, d7, d8 계수 값의 강도가 주로 이루고 있다. 그러나 Fig. 5은 전해질 물질 농도를 0.20 mol/l인 경우에서 조업한 삼상유동층의 결과로서 fine scale 인 d4, d5 계수값들이 뚜렷이 나타난다. 이에 반해 coarse scale의 계수값들은 상대적으로 약하고 고른 분포를 보임을 알 수 있다. 이는 전해 물질을 갖는 삼상 유동층의 조업 조건하에서 d4, d5 scale 이 주된 층내 유동특성 요소를 나타내는 것임을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 전해 물질이 기포 합체를 지지하는 물리적 특성을 나타낸다는 점에서 기포 생성 및 동역학에 미치는 영향을 시사한다[7,8,24-26]. 또한, 이산 웨이블릿 변환은 시간에 따른 압력 변동신호의 패턴의 변화를

시각적으로 분석할 수 있어, 기포와 같은 유동 요소들의 시간-주파수적 움직임을 추정하는데 유용하다. 따라서 이를 통해 시간에 따른 기포 현상등과 같은 삼상유동층 특성의 변화를 효과적으로 알 수 있도록 한다.

웨이브렛 에너지는 이산 웨이브렛 변환 계수로부터 얻어진 스케일에서 분석 신호의 에너지 비율로서 전해질 물질의 농도 변화 및 기상 유속에 따른 웨이브렛 에너지 변화를 Fig. 6과 7에 나타내었다. Fig. 6은 삼상유동층 내 전해질 물질의 농도를 변화시키며 각각 웨이브렛 에너지가 스케일에 따라 변화한 모습을 나타낸 것이다. 그림에서 보듯 전해질 물질의 농도가 증가함에 따라 coarse scale 인 d7, d8보다 fine scale인 d4 scale이 더 뚜렷이 나타남을 알 수 있다. 전해질 물질의 농도 증가에 따라 기포를 둘러싸고 있는 액막의 안정성에 영향을 주고 있음이 알려졌다[7,8]. 물에 전해질 물질 형태로 도입된 이온은 이온-이온과 물-물 상호 작용의 차이 때문에 물 분자의 구조에 영향을 주게 된다. 이러한 영향은 steric 성질로 이온의 크기 및 이온 전하량 분포의 변화에 의한 것이기도 하다. 보다 작은 이온 근처에 있는 물 분자들은 강하게 극성화되고, 운동이 둔화되며 이온 쌍극자 상호작용에 의해 매우 압축되어 이온을 둘러싼 마치 단

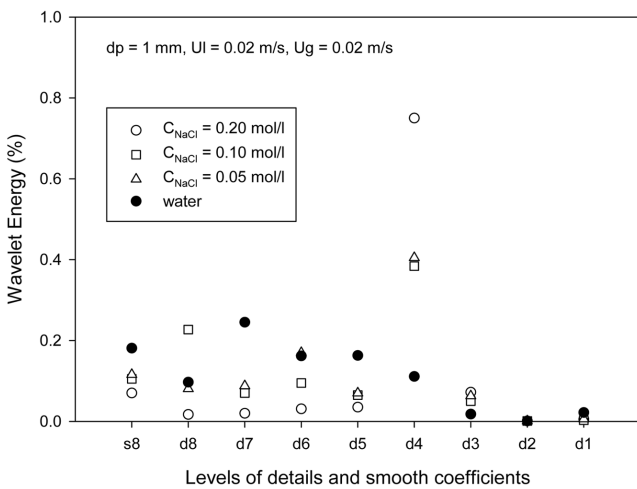


Fig. 6. Wavelet energy distribution of the pressure fluctuation signals with increasing concentrations of electrolyte solutions.

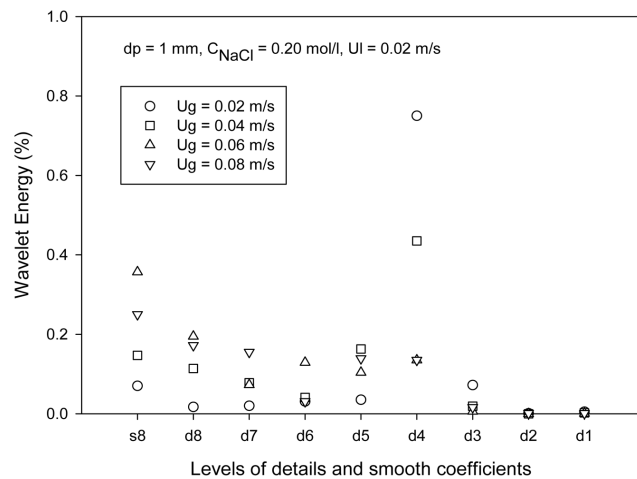


Fig. 7. Wavelet energy distribution of the pressure fluctuation signals with increasing gas flow rates.

단한 크러스트 형태를 형성하게 된다. 이러한 구조변이 효과는 이온의 바로 근접한 부분만이 아니라 전기장 내의 모든 물 분자에 영향을 준다[7]. 또한 Glasgow 등[27]은 생화학 반응기에서 전해질에 따른 기포 크기를 측정된 결과 비교적 높은 기상유속에서도 기포 크기가 감소함을 보였다. 이들은 이러한 이유를 기포표면에 전하의 응집에 의한 기포간의 반탄력 때문으로 해석하였다[28]. 따라서 전해질 물질을 포함한 삼상 유동층 내에서 전해질 물질의 농도의 증가에 따라 같은 기상 및 액상 유속 조업 조건에서 상대적으로 기체의 합체 현상을 방해하여 기포 크기를 작게하여 시스템을 안정화시키는 역할을 하기 때문에 작은 스케일의 d4 scale이 더욱 뚜렷해지는 결과를 얻는 것으로 사료된다. Fig. 7은 삼상 유동층의 기상 유속을 증가함에 따른 웨이브렛 에너지 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯 기상유속이 증가함에 따라 웨이브렛 에너지가 fine scale인 d4가 감소하는 반면 coarse scale인 d7, d8등이 증가하는 모습을 나타낸다. 이는 기상 유속의 증가에 따라 전해질 물질의 기포 합체 저항적 경향보다 합체 경향이 증가하기 때문으로 사료된다[2,9,10].

웨이브렛 계수들의 또 다른 표현법으로써 시간-스케일 플롯을 사용할 수 있다. 신호의 전역 에너지에 기여하는 각 패턴을 시간-스케일 평면에서 나타냄으로써 해석이 용이한 2차원 시각적 표현을 제공한다. 시간-스케일 평면은 웨이브렛 변환의 제곱 모듈로 정의된다[29]. 이는 Fig. 8과 9에서 보듯 종축은 scale 또는 resolution을 보여주고 그 범위는 0(coarsest scale)에서 1(finest scale)이며 횡축은 시간을 나타낸다. 각 time-scale cell의 에너지 준위는 회색의 명암 정도로 나타낸다. 그래서 각 셀들의 에너지 준이 높을수록 짙어진다. 따라서 이 그림으로부터 우리는 2차원적으로 시간과 그와 관련된 scale 또는 resolution 정보를 동시에 볼 수 있다. 그림들에서 보듯이 각각의 조업 조건에서 압력변동신호의 time-scale plane을 얻을 수 있다. Fig. 8를 보면 전해질을 액상으로 하는 삼상유동층의 그림에서 보듯 d4, d5영역의 셀들이 주로 짙은 모습이 보여지는 반면 탭 위터를 액체상으로 하는 삼상 유동층의 스케일-시간의 패턴(Fig. 9)이 전반적으로 d6, d7, d8 영역이 짙은 모습을 보인다. 이는 전해질에 의해 기포를 둘러싸고 있는 액막의 안정성 향상과 기포 표면에 전하의 응집에 의한 기포 간의 반탄력에 의해 기포의 합체 보다는 안정적 기포 상태를 유지하기 때문으로 사료된다[7,27,28].

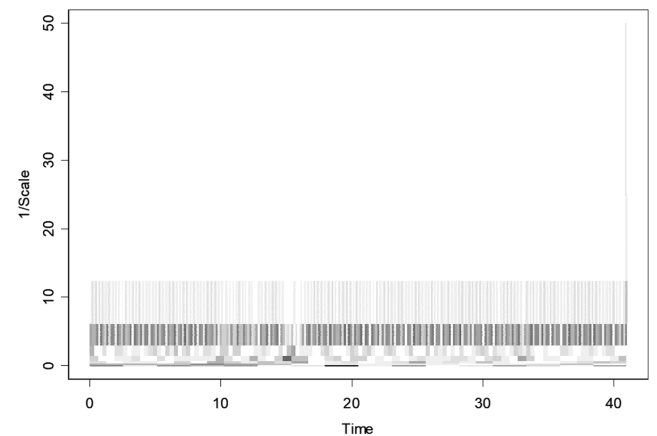


Fig. 8. Time-scale representation (time-scale plane) of the pressure fluctuation signal for a three-phase fluidized bed with an electrolyte solution as the liquid phase.

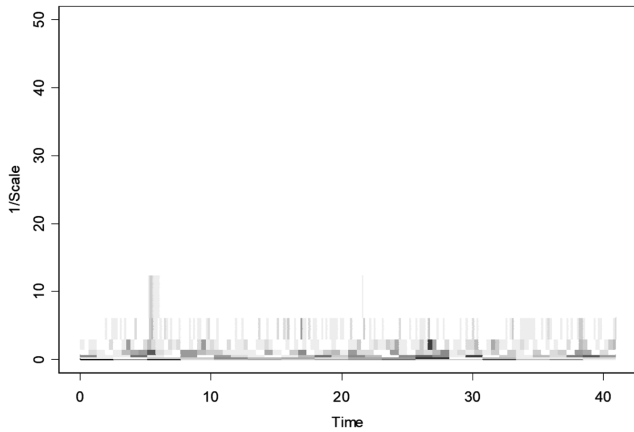


Fig. 9. Time-scale representation (time-scale plane) of the pressure fluctuation signal for a three-phase fluidized bed with tap water as the liquid phase.

따라서 각 운전조건에서 층내의 유동 요소들의 시간의 흐름에 따른 유동 모습을 이 그림들로 부터 그 세기와 시간에 따른 변화를 예상할 수 있다. 작고 미세한 유동 요소가 지배적인 특성은 전해질을 액상으로 하는 삼상 유동층의 유동 상태를 보여주고 있으며, 전해질 농도가 열어지거나 탭 워터 삼상 유동층의 유동의 상태는 좀 더 다양한 스케일의 유동 요소가 영향을 미치는 유동 상태를 예상할 수 있다. 따라서 웨이브렛 변환 기법을 활용한 압력변동 신호 해석으로 삼상 유동층의 층내 유동특성을 예측할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 전해 물질을 포함한 삼상유동층의 압력 변동 신호를 푸리에 변환과 웨이브렛 변환을 이용하여 분석하였다. 압력 변동 신호들의 시계열 데이터들은 푸리에 변환에 의한 파워스펙트럼과 웨이브렛 변환을 이용한 웨이브렛 분해, 이산 웨이브렛 변환 계수, 웨이브렛 에너지 그리고 시간-스케일 표현법으로 해석되었으며, 두 기법을 비교하였다. 전해질 물질을 액상으로 하는 삼상 유동층의 유동특성은 전해질 물질의 농도에 따라 기포 합체 저항력이 커지며, 이에 따라 작은 스케일의 유동 요소가 지배적인 유동특성을 보이는 것으로 나타났다. 이러한 특성은 웨이브렛 변환을 통해 얻은 웨이브렛 에너지 분포와 스케일-시간 분석을 통해 명확히 구별할 수 있었다. 결과적으로, 웨이브렛 변환기법을 통한 웨이브렛 에너지 분포의 분석은 전해 물질을 포함한 삼상유동층내의 유동특성을 구분하고 이해하는 데 있어 유용한 분석방법임을 확인하였다. 이는 삼상 유동층의 유동 특성을 정량적이고 시각적으로 분석할 수 있는 효과적인 기구로 활용될 수 있다. 그러나 웨이브렛 변환으로 압력 변동신호를 해석하여 층내의 유동특성을 이해하고 예측함에는 유용하나, 구체적 유동 특성 요소, 특히 기포특성과 직접적 연계를 위한 더 발전된 해석기법이 필요하다고 사료되어 웨이브렛 패킷 변환 기법등으로 향후 연구가 진행된다.

감 사

우석대학교 지원에 감사드립니다.

사용기호

a	: Scale parameter
b	: Transition parameter
C	: Concentration [mol/l]
d	: Details of discrete wavelet transform at resolution 2^j
dp	: Particle diameter [mm]
E	: Wavelet energy
f	: Frequency [Hz]
s	: Approximation of discrete wavelet transform at resolution 2^j
U_g	: Superficial gas velocity [m/s]
U_l	: Superficial liquid velocity [m/s]
$\hat{X}(f)$: Fourier transform of $X(t)$
$X(t)$: Pressure signal in time-domain

이래첨자

j	: Multiresolution level
k	: Time

그리스 문자

ψ	: Wavelets, mother wavelet
Φ	: Scaling function

References

- Sirisomboon, K., Sopamart, N. and Srisamran, T., "Effects of Excess Air and Energy Fraction on Heat Transfer for Co-firing of Eucalyptus Bark and Peanut Shell Blended Fuel in a Twin-Cyclonic Swirling Fluidized-Bed Combustor," *Korean Journal of Chemical Engineering*, **41**(5), 1343-1353(2024).
- Peng, J., Sun, W., Han, H., Xie, L. and Xiao, Y., "Experimental and Numerical Simulation Study on the Hydrodynamic Characteristics of Spherical and Irregular-shaped Particles in a 3D Liquid-Fluidized Bed," *Korean J. Chem. Eng.*, **39**(11), 3165-3176(2022).
- Park, S. H., "Energy Dissipation Rate and Pressure Fluctuations in a Three Phase Fluidized with a Large Column Diameter," *Korean J. Chem. Eng.*, **21**(5), 1066-1071(2004).
- Oh, K., Seo, M., Son, H. and Kim, D., "Removal of Hydrogen Sulfide in a Three Phase Fluidized Bed Bioreactor," *Korea J. Chem. Eng.*, **15**(2), 177-181(1998).
- Kim, J. S., Youn, J. M., Woo, K. J. and Kang, Y., "Soybean-Oil Leaching in a Three-Phase Fluidized Bed Extractor," *Korean Chem. Eng. Res.*, **38**(2), 225-229(2000).
- Sikarwar, V. S., Zhao, M., Clough, P., Yao, J., Zhong, X., Memon, M. Z., Shah, N., Anthony, E. J. and Fennel, P. S., An Overview of Advances in Biomass Gasification, Energy & Environmental Science, Published on the Web," *Energy Environ. Sci.*, **9**, 2939-2977(2016).
- Zieminski, S. A. and Whittemore, R. C., "Behavior of Gas in Aqueous Electrolyte Solutions," *Chem. Eng. Sci.*, **26**, 509-520(1971).
- Jamialahmadi, M. and H. Muller-Steinhagen, "Effect of Alcohol, Organic Acid and Potassium Chloride Concentration on Bubble Size, Bubble Rise Velocity and Gas Hold-up in Bubble Columns," *Chem. Eng. J.*, **50**, 47-56(1992).

9. Fan, L. S., Satija, S. and Wisecarver, K., "Pressure Fluctuation Measurements and Flow Regime Transitions in Gas-Liquid-Solid Fluidized Beds," *AIChE J.*, **32**, 338(1986).
10. Kwon, H. W., Kang, Y., Kim, S. D., Yashima, M. and Fan, L. T., "Bubble-Chord Length and Pressure Fluctuations in Three-Phase Fluidized Beds," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **33**, 1852-1857(1994).
11. Park, S. H., "Phase Holdups and Pressure Fluctuations in Two- and Three-Phase Fluidized Beds," MS Thesis, Korea Advanced Institute of Science and Technology(1989).
12. Park, S. H. and Kim, S. D., "Wavelet Transform Analysis of Pressure Fluctuation Signals in a Three-Phase Fluidized Bed," *Korean J. Chem. Eng.*, **18**, 1015-1019(2001).
13. Park, S. H. and Kim, S. D., "Experimental, Statistical and Stochastic Studies of Pressure Fluctuations in a Three-phase Fluidized Bed with a Moderately Large Diameter," *Korean J. Chem. Eng.*, **20**(1), 121-127(2003).
14. Mallat, S., "A Wavelet Tour of Signal Processing," Academic Press, New York, NY(1998).
15. Daubechies, I., "Orthonormal Bases of Compactly Supported Wavelets," *Communications on Pure and Applied Mathematics*, **41**(7), 909-996(1988).
16. Farge, M., "Wavelet Transforms and Their Applications to Turbulence," *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **24**, 395(1992).
17. Park, S. H., Kang, Y. and Kim, S. D., "Wavelet Transform Analysis of Pressure Fluctuation Signals in a Pressurized Bubble Column," *CES* **56**, 6259-6265(2001).
18. Park, S. H., Kang, Y., Cho, Y. J., Fan, L. T. and Kim, S. D., "Characterization of Pressure Signals in a Bubble Column by Wavelet Transform," **34**(2), 158-165(2001).
19. Lu, X. and Li, H., "Wavelet Analysis of Pressure Fluctuation Signals in a Bubbling Fluidized Bed," *Chem. Eng. J.*, **75**, 113-119(1999).
20. Ellis, N., Brens, L. A., Grace, J. R., Bi, H. T. and Lim, C. J., "Characterization of Dynamic Behaviour in Gas-Solid Turbulent Fluidized Bed using Chaos and Wavelet Analyses," *Chem. Eng. J.*, **96**, 105-111(2003).
21. Briens, L. A. and Ellis, N., "Hydrodynamics of Three-phase Fluidized Bed Systems Examined by Statistical, Fractal, Chaos and Wavelet Analysis Methods," *CES*, **60**, 6094-6106(2005).
22. Chui, C. K., "An Introduction to Wavelets Vol. 1, Wavelet Analysis and Its Applications," Academic Press, San Diego(1992).
23. Motard, R. L. and Joseph, B., "Wavelet Applications in Chemical Engineering," Kluwer Academic Publishers, Boston(1994).
24. Craig, V. S. J., Ninham, B. W. and Pashley, R. M., "The Effect of Electrolytes on Bubble Coalescence in Water," *J. Phys. Chem.*, **97**, 10192-10197(1993).
25. Al Taweel, A. M., Idhbeaa, A. O. and Ghanem, A., "Effect of Electrolytes on Interphase Mass Transfer in Microbubble-sparged Airlift Reactors," *Chem. Eng. Sci.*, **100**, 474-485(2013).
26. You, D. J., Lim, D. H., Jeon, J. S., Yang, S. W. and Kang, Y., "Bubble Properties in Bubble Columns with Electrolyte Solutions," *Korean Chem. Eng. Res.*, **54**(4), 543-547(2016).
27. Glasgow, L. A., Erickson, L. E., Lee, C. H. and Patel, S. A., "Wall Pressure Fluctuations and Bubble Size Distributions at Several Positions in An Airlift Fermentor," *Chem. Eng. Commun.*, **29**, 311-336(1984).
28. Marrucci, G. and Nicodemo, L., "Coalescence of Gas Bubbles in Aqueous Solutions of Inorganic Electrolytes," *Chem. Eng. Sci.*, **22**, 1257-1265(1967).
29. Rioul, O. and Vetterli, M., "Wavelets and Signal Processing," *IEEE SP Magazine*, 14-38 (1991).

Authors

Soung Hee Park: Professor, Department of Energy Engineering, Woosuk University, Jincheon-eup, Jincheon, Chungbuk, 27841, Korea; drpark@woosuk.ac.kr

Hyeuk Woong Kwon: Researcher, Department of Chemical & Biomolecular Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Guseong-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-701, Korea; hwkwon@hanwha.com

Sang Done Kim: Professor, Department of Chemical & Biomolecular Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Guseong-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-701, Korea; sdkim@kaist.ac.kr