초음파 수처리 공정 개발을 위한 반응기 설계 기초 연구

김슬기 · 손영규⁺

국립금오공과대학교 환경공학과

Basic Study on the Design and Optimization of Sonoreactors for Sonochemical Water/Wastewater Treatment Processes

Seulgi Kim · Younggyu Son⁺

Department of Environmental Engineering, Kumoh National Institute of Technology

요 약

본 연구는 환경, 에너지, 재료 등 다양한 분야에 적용할 수 있는 초음파 기술을 수처리 공정에 적용하기 위한 기초 연구로 수행되었다. 초음파 기술과 같은 고도산화처리공법은 중금속, 내분비계장애물질, 의약품 등 미량오염물질 처리에 효과적이어서 하천, 호소, 습지의 수질 향상에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대되고 있다. 초음파 기술은 파를 기반으로 하기 때문에 본 연구에서는 적용 주파수의 파장을 이용하여 0 ~ 4λ 구간의 수위를 1/4λ 간격으로 나누어 동일한 유입에너지 조건에서 발생하는 열에너지 및 초음파 캐비테이션의 화학적 효과를 정량화하였다. 실험 결과 낮은 수위 (적은 부피)의 에너지 밀도가 높은 조건보다 높은 수위 (큰 부피)의 에너지 밀도가 낮은 조건에서 열에너지 및 화학적 효과가 극대화되는 것을 확인하였다. 이러한 현상을 반응기 내부의 캐비테이션 활성도 시각화를 통해 알아본 결과, 높은 수위 (큰 부피) 조건에서는 에너지 밀도가 낮음에도 불구하고 반응기 전체적으로 높은 활성도를 얻을 수 있기 때문인 것으로 확인되었다. 따라서 본 연구결과를 이용하여 초음파 기술을 수처리 분야에 적용할 경우 반응성 및 에너지 효율 측면에서 적용 가능성을 보다 높일 수 있을 것으로 예상된다.

핵심용어 : 초음파, 캐비테이션, 초음파화학, 초음파 반응기, 수위

Abstract

Ultrasound technology can be applied in various fields including environmental, energy, and material engineering processes. In this study the effect of liquid height/volume on calorimetric energy and sonochemical oxidation was investigated as one of the basic steps for the design of water/wastewater treatment sonoreactors. The liquid height was increased from 0 to 4 λ by 1/4λ and it was found that both calorimetric energy and sonochemical oxidation were significantly increased at relatively high liquid height/volume where the power density was relatively low. The sonoluminescence (SCL) images for the visualization of the activity of cavitation also showed that larger and more stable active zone was formed with high SCL intensity at high liquid height/volume. Therefore, it was revealed that sonoreactors for water/wastewater treatment could be significantly effective in terms of removal efficiency and energy consumption.

Key words : Ultrasound, Cavitation, Sonochemistry, Sonoreactor, Liquid height

⁺ Corresponding author : yson@kumoh.ac.kr

1. 서론

우리나라의 경우 수자원 공급처의 대부분이 4대강 및 여러 지천으로 제한되어 있기 때문에 이러한 하천이 오염될 경우 생활용수, 공업용수, 농업용수 등의 공급 및 이용에 심각한 문제를 발생시킬 수 있다. 이를 예방하기 위하여 다양한 하수/폐수 처리시설이 설치되어 오염된 물이 하천에 직접적으로 방류되는 것을 방지하고 있으나, 최근 들어 중금속, 내분비계장애물질, 의약품 등 $\text{ng/L} \sim \mu\text{g/L}$ 수준의 미량오염물질들이 하천을 비롯한 여러 수계에서 지속적으로 확인되고 있는 실정이다 (Kim et. al., 2013).

이러한 미량오염물질들은 도시 주변의 하천 등에서 주로 검출되고 있으며, 이에 대한 실태조사가 수행되고 있는데 (NIER, 2011a; NIER, 2011b; NIER 2011c), 이는 비점오염원 등으로 인한 미량오염물질의 직접적인 유입에 의한 것일 수 있다 (Choi et. al., 2013a; Choi et. al., 2013b). 또한 하수/폐수 처리시설 등에 유입된 미량오염물질이 현재 적용된 처리공법에 의해 처리되지 않고 방류수로 배출되어 하천에 유입되기 때문일 수 있다 (Lee et. al., 2009). 실제로 구미시를 관통하는 낙동강 주변의 하수처리장 및 정수장 현황을 살펴보면 Fig. 1과 같이 정수장 취수원 상류쪽에 하수처리장이 위치하고 있어 하수처리장으로 유입된 미량오염물질이 적절하게 처리되지 않고 방류되면 그 미량오염물질이 정수장으로 유입되는 악순환이 반복될 수 있다. 최근 낙동강 본류 및 주변 하수처리장에서 금속류, 내분비계장애물질, 농약류, VOCs 등이 검출된 사례가 학계에서 자주 보고되고 있다 (Lee et. al., 2009; NIER, 2010).

이러한 미량오염물질을 처리하기 위해서 최근 주목받고 있는 기술이 고도산화처리공정 (Advanced Oxidation Processes, AOPs)이다. 고도산화처리공정은 오존 (2.07V), 과산화수소 (1.78V) 등의 기존 산화제보다 산화력이 높은 OH 라디칼 (2.80V) 등의 라디칼을 발생시켜 이를 통해 오염물질을 정화하는 방법으로 자외선 및 초음파 등의 파 (Wave) 에너지를 이용한 자외선공정 (Photolysis), 자외선광촉매공정 (Photocatalysis), 초음파공정 (Sonolysis) 등과 이들의 혼합 공정 등을 의미한다 (Son et al., 2012b; Parsons, 2004). 이 중 초음파 공정은 별도의 화학물질 첨가 없이 초음파 조사만으로 캐비테이션 (Cavitation) 현상을 일으켜 다양한 물리/화학적 효과를 얻을 수 있기 때문에 최근 주목 받고 있으며, 녹색 기술 (Green technology)로 인식되고 있다 (Son et. al. 2011b;

Mason, 2007). 이러한 초음파 공정은 상수, 하/폐수 처리 등의 수처리 분야 이외에도 세척/세정, 물질 합성, 추출 등의 다양한 환경/에너지/화학 공정에 널리 사용되고 있으며 그 적용 범위가 지속적으로 확대되고 있어 매우 유망한 기술이라 할 수 있다.

Fig. 1. The locations of sewage and water treatment plants in Gumi (Nakdong river)

기존 초음파 수처리 연구는 적용 주파수, 입력 파워, 연속식/간헐식 조사 등의 초음파 조사 조건과 온도, pH, 용존 가스, 용존 이온, 입자성 물질, 첨가제 등의 대상 액상 조건, 그리고 휘발성/소수성, 초기 농도, 분자구조, 복합오염물질 등의 대상 오염물질 조건의 세 가지 특성에 대해 소규모 반응기에서 집중적으로 이루어졌다. 초음파 수처리 공정은 파를 기반으로 하는 기술이기 때문에 이상의 연구 이외에도 초음파 조사 시 반응기 내부에 형성되는 음장 (Sound field) 과 그로 인한 캐비테이션 활성도 (Cavitation activity) 분포 등에 대한 연구가 필요하다. 그러나 해당 분야의 연구가 아직 초기 단계에 머물러 있어 초음파 기술의 높은 적용 가능성에도 불구하고 수처리용 중·대형 초음파 반응기의 설계 및 적용은 실험실을 중심으로 제한적으로 이루어지고 있는 실정이다 (Son et. al., 2011b). 이러한 수처리용 초음파 반응기의 내부 에너지 분포 연구는 공기 중 소리의 전달을 최적화하여 만족스러운 소리 조건을 만들기 위한 콘서트홀의 설계, 실내 형태의 변화, 스피커 출력/위치 변화 등과도

유사한 작업이다.

본 연구에서는 초음파 수처리 공정 연구의 초기 연구로 36 kHz의 초음파 반응기를 이용하여 액상의 높이, 즉 진동자에서 수면까지의 거리를 변화시켜 그로 인한 초음파의 화학적 효과와 내부에 형성되는 캐비테이션 활성도 분포의 변화를 분석하였다. 초음파의 화학적 효과 분석을 위해서는 가장 널리 사용되는 KI 분석방법 (KI dosimetry)을 적용하였으며, 반응기 내부의 캐비테이션 활성도 (Cavitation activity) 분포 분석을 위해서 루미놀 방법을 이용하였다.

2. 연구방법

2.1 초음파 반응기

본 연구에 이용한 초음파 반응기는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 36 kHz의 단일 진동부 (Mirae Ultrasonic Tech)가 하단에 설치되어 있으며, 초음파가 위 방향으로 조사되는 시스템으로 수면의 높이를 변화시켜 조사 대상 액상의 부피를 변화시켰다. 유입 전기에너지는 전력 측정기 (HPM-300A, ADPower)를 이용하여 모든 액상 높이/부피 조건에서 40 W로 고정하여 적용하였으며, 이로 인해 모든 액상 높이/부피 조건에서 유입 전기 에너지가 동일하게 유지되도록 하였다. 액상의 높이는 적용 주파수인 36 kHz의 한 파장을 다음의 식 (1)에 의해 계산하여 이를 기본으로 1/4 간격으로 증가시켰다.

$$C = \lambda \cdot f \quad (1)$$

여기서 C는 액상에서의 소리의 속도 (1,500 m/s), λ 는 파장, f (36,000/s)는 적용 주파수를 의미한다. 36 kHz의 한 파장은 약 42 mm로 본 연구에서는 10.5 mm에서 166.6 mm까지의 총 16개 (0~4 λ)의 수위를 적용하였다. 이 때 수위에 따른 부피 변화는 128 ~ 2,050 mL 였다.

Fig. 2. A schematic of a sonoreactor with various liquid height/volume

2.2 초음파 에너지 분석

반응기 내부로 전달되는 초음파 에너지를 정량화 하기 위한 방법 중 하나인 소리 에너지가 액상에서 감쇄할 때 발생하는 열에너지를 측정하여 초음파 에너지로 환산하는 열량측정법 (Calorimetry)을 다음의 식 (2)를 이용하여 적용하였다 (Son et. al., 2011b; Kim and Son, 2013).

$$P_{us} = \frac{dT}{dt} C_p M \quad (2)$$

여기서 P_{us} 는 열량측정 초음파 에너지, dT/dt 는 온도 상승 속도, C_p 는 물의 비열용량 (4.2 J/g·K), M은 물의 질량을 의미한다.

2.3 캐비테이션의 물리적, 화학적 효과 분석

초음파 캐비테이션 현상의 정도를 대략적으로 평가하기 위해 액상에 가정용 알루미늄 호일 (두께: 16 μ m)을 넣고 초음파를 조사하여 초음파 캐비테이션 현상의 물리적 효과로 인한 호일 표면의 손상 정도를 정성적으로 분석하였다 (Son et. al., 2011a).

초음파 캐비테이션 현상의 화학적 효과 중 산화능력을 평가하기 위해서는 KI (Potassium iodide, Junsei, 99.5 %) 분석 방법을 적용하였다. KI 용액 (10 g/L)에 초음파를 조사하면 다음의 반응식과 같이 해리된 I 이온과 OH 라디칼 등의 산화 라디칼이 반응하여 I 라디칼을 발생시키고, 두 개의 I 라디칼이 결합하여 I_2 가 형성된다. 형성된 I_2 는 주변의 I 이온과 결합하여 정량화가 가능한 I_3^- 이온으로 변환된다 (Son et. al., 2011b; Kim and Son, 2013).

산화 라디칼에 의해 형성된 I_3^- 이온의 농도는 파장 350 nm 조건의 UV-vis spectrophotometer (Libra S60, Biochrom)을 이용하여 정량 분석하였다. 또한 수위 변화로 인해 액상 부피가 변화함으로 이를 보정하기 위하여 생성물의 농도가 아닌 질량 기반의 분석을 위해 다음의 식과 같이 Cavitation yield 개념을 이용하였다 (Son et. al., 2011b; Asakura et. al., 2008).

$$Y_C = \frac{CV_L}{PT_I} \quad (6)$$

여기서 Y_C 는 cavitation yield, C 는 I_3^- 이온의 농도, V_L 은 액상의 부피, P 는 유입 에너지, T_I 는 조사시간이다.

2.4 캐비테이션 활성화도 분포 분석

반응기 내 초음파 캐비테이션에 의한 화학적 효과의 시각적 분석을 위해 루미놀 용액을 암실 조건에서 초음파 조사하여 내부에 형성되는 캐비테이션 활성화도 분포를 촬영하였다. 이러한 이미지를 음파화학발광(Sonochemiluminescence, SCL) 이미지라 한다. 액상 수위는 1, 2, 3, 4λ를 대상으로 루미놀 용액 (0.1 g/L 루미놀 (3-aminophthalhydrazide), 1 g/L의 NaOH)과 노출 기능이 있는 디지털 카메라 (500D, Canon)를 이용하여 초음파 조사 조건에서 5분간 노출시켜 촬영하였다 (Kim and Son, 2013).

3. 연구결과 및 고찰

3.1 알루미늄 호일 손상 분석

반응기 내부의 초음파 캐비테이션 현상에 대한 대략적인 평가를 위해 알루미늄 호일 표면의 손상 부위를 분석한 결과 Fig. 3과 같이 초음파 캐비테이션 현상에 의한 물리적 발생으로 인해 호일 표면이 손상되고 구멍이 뚫리는 현상을 확인하였다. 실험결과 손상 정도가 구간 별로 다르게 나타났는데, 손상 정도가 심한 부분일수록 캐비테이션 현상이 강하게 일어나는 곳임을 유추할 수 있었다 (Son et. al., 2011a). 또한 손상 부위가 일정 지점에 집중되어 나타나는 것을 볼 수 있었고, 손상 정도가 수면 쪽으로 올라 갈수록 작아졌다 커졌다가 다시 작아지는 것으로 나타났기 때문에 캐비테이션 현상이 반응기 내부에서 균일하게 일어나지 않고 특정 수위에서 극대화되었던 것으로 판단되었다.

초음파 캐비테이션에 의해 알루미늄 호일 표면이 손상되는 것은 캐비테이션 버블이 폭발 시 고체 표면을 향해 폭발하면서 강한 물리력을 고체 표면에 작용시키기 때문이다 (Son et. al., 2011a). 이러한 원리를 이용하여 안경 세척 등의 세정/세척 공정이 개발/적용되고 있다.

Fig. 3. The damaged foil caused by acoustic cavitation

3.2 열량측정법에 의한 초음파 에너지 분석

액상의 초음파 조사 시 초음파와 물 분자 사이의 마찰력 등으로 인해 소리 에너지가 감쇄하면서 열이 발생되는데, 이러한 열에너지를 정량화하여 반응기로 유입되는 초음파 에너지로 정의하였다 (Asakura et. al., 2008; Son et. al., 2011b). Fig. 4와 같이 수위가 증가할수록 열에너지가 증가하는 추세를 나타내었는데 이는 동일한 유입에너지 조건에서 수위가 증가할수록 보다 많은 에너지가 초음파 에너지로 전환되었다는 것을 의미한다. 수위가 높아질수록 외부와의 접촉 면적이 커져 열이 더 빠져나갈 수 있음에도 불구하고 열에너지가 높아지는 것은 낮은 수위, 즉 적은 부피보다 높은 수위 혹은 보다 큰 부피 조건에서 초음파 에너지가 보다 활성화 될 수 있음을 간접적으로 나타낸다고 할 수 있다.

Fig. 4. The variation of the calorimetric power at each liquid height

또한 1/4 파장마다 반복되는 패턴이 확인되었는데, 이는 사인함수와 같이 진행되는 파의 특성 때문일 것으로 판단되었으며, 이를 통해 초음파 캐비테이션 현상의 화학적 효과를 확인하는 경우에도 유사한 현상이 나타날 것으로 예상되었다. 기존의 연구에서는 파장단위로 수위를 변화시켰기 때문에 1/4 파장마다 반복되는 패턴은 확인되지 않았으나, 본 연구결과와 유사하게 수위가 증가하면서 열에너지, 즉 초음파 에너지가 증가하는 현상은 보고되었다 (Asakura et. al., 2008; Son et. al., 2011b).

3.3 초음파 캐비테이션 현상의 화학적 효과 분석

초음파 수처리 공정을 개발하기 위해서는 초음파 캐비테이션 현상에 의해 오염물질을 얼마나 산화시켜 분해시킬 수 있는지에 대한 평가가 필요하며, 본 연구에서는 이를 위해 다양한 수위/부피 조건에서 KI 용액을 이용하여 간접적으로 산화능력을 평가하는 KI dosimetry가 적용되었다. 일반적으로 유입에너지가 고정인 경우 높은 유입에너지 밀도 (Power density) 조건인 작은 부피에서는 생성물의 농도 증가가 크게 관찰되나 큰 부피에서는 유입에너지 밀도가 작아져 생성물의 농도 증가가 크지 않게 된다. 그러므로 수위가 변화하는 조건에서는 대상 부피도 변화하기 때문에 생성물의 농도 비교는 초음파 캐비테이션의 산화력을 비교·평가하는데 적합하지 않은 것으로 판단되어 I_3^- 이온의 총 생성질량을 기반으로 한 cavitation yield를 이용하여 비교·분석하였다. 유입에너지 밀도는 다음의 식 (7)과 같이 표현된다 (Kim and Son, 2013).

$$D_P = \frac{P}{V_L} \quad (7)$$

여기서 D_P 는 에너지 밀도이다. Fig. 5에 나타낸 바와 같이 I_3^- 이온의 농도는 수위가 증가함에 동일 유입에너지 조건에서 에너지 밀도가 낮아져 감소하는 경향을 나타내었다. 그러나 일부 큰 부피 조건은 작은 부피 조건보다 농도가 높게 확인되는 등 부피 변화로 인하여 수위 조건별 비교 분석이 쉽지 않음을 알 수 있었다. 그러나 변화하는 부피 조건을 보정하기 위해 Fig. 6에 각 수위 조건에서의 산화력 정도를 cavitation yield로 나타내었다.

Fig. 5. The variation of the concentration of triiodide (I_3^-) ion at each liquid height

Fig. 6. The variation of the cavitation yield of (I_3^-) ion at each liquid height

Fig. 6에 나타낸 바와 같이 큰 부피 조건에서 동일한 에너지가 유입됨에도 불구하고 높은 산화력을 얻을 수 있는 수위 조건이 있음을 확인할 수 있었다. 1.5λ와 4.0λ의 수위 조건에서 최대의 산화력을 얻을 수 있었는데, 이때의 에너지 밀도는 가장 낮은 수위인 0.25λ의 각각 0.17배 및 0.06배 수준이었다. 이는 에너지 밀도가 높은 조건보다 일정 수준의 에너지 밀도 조건이 초음파 캐비테이션 현상을 보다 극대화할 수 있음을 의미한다. 이러한 현상이 발생하는 원인은 높은 에너지 밀도의 초음파 에너지를 적용할 경우 많은 캐비테이션 버블이 진동자 주변에 형성되어 이것들이 서로 뭉쳐져 진동자에서 멀리 떨어진 지점까지 초음파가 도달하지 못하게 하는 방해 역할을 하기 때문인 것으로 알려져 있다 (Son et. al., 2012a).

또한 Fig. 4의 초음파 에너지 분석 부분에서 예측한 바와 같이 1/4 파장 단위로 증가하고 감소하는 경향이 일부 구간에서 발생하였는데, 이를 통해 초음파

기술은 기존의 일반적인 화학반응과는 다른 반응 메커니즘을 갖고 있음이 확인되었다. 즉, 파를 기반으로 하는 초음파 기술은 기존의 반응기 설계 및 최적화 기법과는 다르게 적용 주파수의 파장을 이용한 기법 개발 및 적용이 필요할 것으로 예상되었다. Asakura et. al.(2008)은 다양한 주파수 조건에서 임의의 수위에 대하여 초음파 캐비테이션 현상의 화학적 효과를 정량화하고 이를 통해 다음과 같은 경험식을 제안하였다.

$$h_p = \frac{23,400}{f} - 22.9 \quad (8)$$

여기서 h_p 는 산화력이 극대화될 때의 수위이며, f 는 적용 주파수를 의미한다. 위 식을 이용하는 경우 본 연구에서 적용한 36 kHz에 대한 최적 수위는 약 630 mm로 매우 높은 수위까지 초음파 에너지가 전달되어 산화력이 극대화될 수 있는 것으로 예측되었다. 그러나 동일한 반응기를 이용한 본 연구팀의 기존 연구 결과에서는 약 210~250 mm의 수위에서 산화력의 정도가 극대화되는 것으로 확인되었다 (Son et. al., 2009). 이러한 차이는 유입 에너지 및 반응기의 형태, 재질 등이 다르기 때문일 수 있으며, 또한 경험식을 제안한 연구팀에서는 파장을 기반으로 수위를 변화시키지 않았기 때문인 것으로 판단된다. 보다 일반적으로 사용될 수 있는 경험식의 도출을 위해서는 이와 관련된 보다 많은 연구 결과가 축적되어야 할 것이다.

3.4 캐비테이션 활성도 분포 분석

수위 조건별로 반응기 내부에서 초음파 캐비테이션의 화학적 반응이 어느 정도로 일어나고 있는지 시각적으로 확인하기 위하여 1, 2, 3, 4 파장의 수위에 대하여 루미놀 실험을 수행하였고, 결과인 음파화학적발광 (SCL) 이미지를 Fig. 7에 나타내었다. 또한 루미놀 실험을 이용하여 얻어진 이미지를 Fig. 8과 같이 이미지 분석 프로그램을 이용하여 빛의 세기를 분석함으로써 반응의 정도를 정량화하였다.

Fig. 7. Sonochemiluminescence (SCL) images at four liquid height conditions

Fig. 8. Relative intensity of SCL at each liquid height

초음파 캐비테이션의 화학적 효과에 대한 시각화 분석에서도 앞선 연구 결과와 동일하게 1λ 조건에서 4λ 조건으로 수위가 증가하여 부피가 4배 증가함에도 불구하고 반응기 내부의 캐비테이션 현상은 오히려 더 강해지는 것이 확인되었다. 높은 에너지 밀도의 낮은 수위 조건에서 캐비테이션 현상의 정도가 덜 한 이유는 Traveling wave field가 형성되어 캐비테이션 현상 자체는 매우 강하게 일어나지만 불안정하게 발생되기 때문인 것으로 보고되었다. 반면 낮은 에너지 밀도의 높은 수위 조건에서 캐비테이션 현상의 정도가 증가되는 원인은 떠 형태의 Standing wave field가 형성되어 상대적으로 덜 강한 캐비테이션 현상이 발생하지만 이러한 현상이 안정적이며 지속적으로 발생하기 때문이다 (Son et. al., 2011b).

이상의 결과는 콘서트홀 등의 설계와 같이 동일한 스피커, 음량 조건에서 음악을 들을 때 무조건 작은 방에서 들어야 만족스러운 소리가 들리는 것이 아니라 방의 크기, 모양, 벽의 재질, 표면 등의 특성을 복합적으로 고려해야 하는 것과 유사하다. 그러므로 동일한 에너지 조건에서 대상 부피가 증가하여 에너지 밀도가 감소함에 따라 산화반응을 일으킬 수 있는 힘이 부족해짐에도 불구하고 초음파 캐비테이션 현상에 의한 산화력이 높게 유지될 수 있었던 이유는 반응기 내부가 초음파 전달에 맞게 조절되었기 때문이다. 본 연구에서 수행한 수위 조건에서 가장 합리적인 수위는 가장 높은 수위인 4λ로 판단되며, 향후 4λ 이상의 수위 조건에 대한 결과가 추가되면 초음파 수처리를 위한 최적의 수위 조건을 도출할 수 있을 것으로 예상된다.

4. 결론

초음파 수처리 공정은 캐비테이션 현상을 이용하는 것으로, 특히 높은 산화력을 갖는 OH 라디칼 등의 산화 라디칼을 별도의 화학약품 주입 없이 지속적으로 발생시켜 이를 이용하는 공정이다. 그러므로 중금속, 내분비계장애물질, 의약품 등과 같은 미량오염물질의 처리에 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 예상된다. 초음파 수처리 공정을 설계하기 위해서는 파의 성질을 바탕으로 한 연구가 필요하다. 본 연구는 1/4파장마다 초음파 캐비테이션 효과가 달라지며, 높은 에너지 밀도의 조건보다 상대적으로 낮은 일정 수준의 에너지 밀도 조건에서 보다 효과적인 초음파 캐비테이션 효과가 얻어지는 것을 확인하였다. 이는 반응성뿐만 아니라 에너지 효율 측면에서 초음파 수처리 공정의 적용 가능성을 높일 수 있는 결과로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 금오공과대학교 학술연구비에 의하여 연구된 논문입니다.

References

- Asakura, Y, Nishida, T, Matsuoka, T, and Koda, S (2008). Effects of ultrasonic frequency and liquid height on sonochemical efficiency of large-scale sonochemical reactors, *Ultrasonics Sonochemistry*, 15(3), pp. 244-250.
- Choi, J, Son Y, Lee S, Lee Y and Kim, L (2013a). Development of tree box filter LID system for treating road runoff, *J. of Wetlands Research*, 15(3), pp. 407-412. [Korean Literature]
- Choi, J, Kim, S, Lee, S, Nam, G, Cho, H and Kim, L (2013b). Development hybrid filter system for applicable on various rainfall, *J. of Wetlands Research*, 15(4), pp. 535-541. [Korean Literature]
- Kim, E, and Son, Y (2013). The effect of distance between two transducers on sonochemical reactions in dual irradiation systems, *J. of Soil and Groundwater Environment*, 18(5), pp. 39-45. [Korean Literature]
- Kim, H, Hong, Y, and Ahn, JH (2013). A study on the management of micropollutants in water system considering climate change and other potential effects, *Korean Chemical Engineering Research*, 51(6), pp. 645-654. [Korean Literature]
- Lee, C, Lee, S, and Jang, I (2009). Occurrence of priority pollutants in the midstream of Nakdong river basin, *J. of Korean Society of Environmental Engineering*, 31(6), pp. 401-408. [Korean Literature]
- Mason, TJ (2007). Sonochemistry and the environment - Providing a "green" link between chemistry, physics and engineering, *Ultrasonics Sonochemistry*, 14, pp. 476-483.
- National Institute of Environment Research (NIER) (2010). Nakdong basin-wide monitoring of potentially hazardous organics and development of prediction system. [Korean Literature]
- National Institute of Environment Research (NIER) (2011a). Monitoring and prediction system development of potentially hazardous materials in the Han river basin. [Korean Literature]
- National Institute of Environment Research (NIER) (2011b). Monitoring and risk assessment of potentially hazardous chemicals in the Yeongsan and the Seomjin rivers. [Korean Literature]
- National Institute of Environment Research (NIER) (2011c). Monitoring of potentially hazardous compounds in the Geum river basin and risk assessment. [Korean Literature]
- Parsons, S (2004). Advanced oxidation processes for water and wastewater treatment, IWA Publishing, London, pp. 3-6.
- Son, Y, Cha, J, Lim, M, Ashokkumar, M, and Khim, J (2011a). Comparison of ultrasonics and conventional mechanical soil-washing processes for diesel-contaminated sand, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50, pp. 2400-2407.

- Son, Y, Lim, M, Ashokkumar, M, and Khim, J (2011b). Geometric optimization of sonoreactors for the enhancement of sonochemical activity, *The Journal of Physical Chemistry C*, 115(10), pp. 4096-4103.
- Son, Y, Lim, M, Khim, J, and Ashokkumar, M (2012a). Acoustic emission spectra and sonochemical activity in a 36 kHz sonoreactor, *Ultrasonics Sonochemistry*, 19, pp. 16-21.
- Son, Y, Lim, M, Khim, J, and Ashokkumar, M (2012b). Attenuation of UV light in large-scale sonophotocatalytic reactors: The effects of ultrasound irradiation and TiO_2 concentration, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 51(1), pp. 232-239.
- Son, Y, Lim, M, Song, J., and Khim, J (2009). Liquid height effect on sonochemical reactions in a 35 kHz sonoreactor, *Japanese Journal of Applied Physics*, 48, 07GM16.

- 논문접수일 : 2014년 01월 09일
- 심사의뢰일 : 2014년 01월 14일
- 심사완료일 : 2014년 02월 01일