

하향 초음파 조사 시스템에서의 초음파 화학적 및 물리적 효과 평가

김슬기^{1,2} · 손영규^{1,2,*}¹금오공과대학교 환경공학과²금오공과대학교 에너지공학융합전공

Sonochemical and Sonophysical Effects in a Downward-Irradiation Sonoreactor

Seulgi Kim^{1,2} · Younggyu Son^{1,2,*}¹Department of Environmental Engineering, Kumoh National Institute of Technology²Department of Energy Engineering Convergence, Kumoh National Institute of Technology

ABSTRACT

The performance of a downward-irradiation sonoreactor was investigated using calorimetry, KI dosimetry, luminol (Sonochemiluminescence, SCL) method, and aluminium foil erosion method as one of the basic steps for the optimal design of downward-irradiation sonoreactors. The applied frequency was 28 kHz and the input electrical power was 280 - 300 W. The liquid height, from the reactor bottom to the transducer module surface, ranged from 1λ (53.6 mm) to 2λ (107.1 mm). For various liquid heights, the magnitude of calorimetric power and the mass of cavitation-generated I_3^- ion varied significantly. It was found that the additional application of mechanical mixing resulted in higher sonochemical activity, especially in the cavitation active zone, which was induced by violent liquid flow in the reactor. In aluminium foil erosion tests, it was found that less ultrasound energy reached the bottom of the reactor due to the violent liquid flow and no significant sonophysical effect was observed for higher mixing rate conditions (100 and 200 rpm).

Key words : Cavitation, Sonoreactors, Calorimetry, KI dosimetry, Sonochemiluminescence (SCL)

1. 서 론

초음파 기술은 마이크로 크기의 버블에 집중된 에너지가 다양한 형태로 발현되는 캐비테이션 현상을 이용하는 것으로 다양한 화학·화공, 에너지, 물질합성, 환경공학 공정에의 적용 연구가 활발하게 진행 중이다(Petrier and Combet, 2007; Mohod and Gogate, 2011; Sun et al., 2011; Wood et al., 2017; Ge et al., 2019; Fukunaga et al., 2019). 이 중 환경공학 분야를 살펴보면, 기존의 초음파 캐비테이션 연구는 주로 순수한 액상의 균일계 혹은 전체 액상 부피 대비 매우 적은 분량의 고체물질(촉매 등)을 포함하는 유사 균일계에서 액상의 오염물질 분해 중심으로 진행되었다. 최근에는 상대적으로 고체 비중이

매우 높은 불균일계인 토양 및 퇴적물 등의 슬러리상에서의 유·무기 오염물질의 탈착 및 처리 관련 연구도 점진적으로 수행되고 있다(Son et al., 2019). 이러한 불균일계에서의 초음파 조사는 균일계에서와는 다르게 초음파의 진행이 내부 고체물질(토양 입자 등)로 인해 다양하게 방해되어 균일계에서와는 다른 방식의 연구가 필요할 것으로 판단되었다.

토양세척과 같은 불균일계에서의 초음파 탈착·세척 공정을 운영할 경우 대상 고체 물질이 초음파 진동자에 직접 접촉으로 접촉되지 않아야 하므로 초음파 반응기 내부에 다시 세척 용기를 넣어 운영하는 이중 bath 방식의 시스템이 필요하다(Son et al., 2011; Lee and Son, 2019; Park and Son, 2017). 이때 내부반응기의 존재로 인한 에너지 손실이 발생하며, 하단에서 상부로 조사되는 초음파 에너지의 많은 부분이 세척 용기 내 액상이 아닌 외부 반응기의 액상으로 전달되어 실제 소모되는 에너지 대비 상대적으로 낮은 수준의 에너지만이 탈착·세척 반응에 사용되게 된다. 기존 선행 연구에서 고체물질이 없는 상

주저자: 김슬기, 박사과정

*교신저자: 손영규, 교수

E-mail: yson@kumoh.ac.kr

Received : 2020. 8. 28 Reviewed : 2020. 9. 4 Accepted : 2020. 9. 14
Discussion until : 2020. 12. 31

태에서의 내부 세척 용기로의 초음파 에너지 전달은 유입 에너지 대비 약 7~44%(평균 29%) 수준이었으며, 높은 수준의 에너지 전달을 기대하기 위해서는 내부 용기에 보다 많은 양의 물이 채워져야 하는 것으로 확인되었다. 내부 용기에 고체물질(글래스 비드)이 존재할 경우 약 3~48%(평균 22%) 수준의 에너지 전달률을 나타내었는데, 이는 바닥에서 조사된 초음파가 내부 용기 및 고체 물질을 지나가는 동안 상당부분이 감쇠되었기 때문인 것으로 판단되었다(Lee and Son, 2019).

이중 bath 시스템의 에너지 전달효율 문제 등을 개선하기 위하여 본 연구에서는 상향조사 시스템 및 기계적 교반을 제안하였다. 상향조사 시스템은 반응기 상부에 진동자를 설치하여 하단 액상으로 초음파를 조사하는 방식으로 중력으로 인해 반응기 내부의 고체 물질이 반응기 바닥쪽에 머물러 있기 때문에 별도의 내부 용기 설치가 불필요하였으며, 조사되는 초음파 에너지가 모두 대상 부피에 적용되기 때문에 에너지 전달 효율 측면에서 크게 유리할 것으로 기대되었다. 또한, 기계적 교반은 반응기 바닥에 침전된 고체물질을 슬러리상에서 혼합하는데 도움이 되어 초음파의 토양입자에 대한 노출을 증진시킬 수 있을 것으로 판단되었다.

그러므로 본 연구의 목적은 하향 초음파 조사 방식을 소개하고 이 방식의 성능 및 적용성을 다양한 조건에서 평가하는 기초 연구를 수행하였다. 고체 물질이 없는 상태로 실험을 진행하였으며, 내부 액상 높이가 적용 주파수 28 kHz 기준 1λ - 2λ(53.6~107.1 mm)의 조건 및 50~200 rpm의 기계적 교반 속도 조건을 대상으로 하였다. 초음파 에너지 분석(열량측정법), 초음파 화학적 효과 분석(KI 방법), 초음파 물리적 효과 분석(알루미늄 포일 방법) 등을 수행하여 각 조건에서의 결과를 비교분석하였으며, 추가적으로 다양한 조건에서 내부의 캐비테이션 활성화 영역이 어떻게 변화하는지 시각적으로 확인하기 위한 루미놀 방법을 적용하였다.

2. 실험 방법

2.1. 초음파 반응기

Fig. 1에 나타낸 바와 같이 실험 시스템은 사각 형태의 아크릴 반응기(L × W × H: 22 cm × 22 cm × 20 cm)와 사각 형태의 28 kHz 초음파 진동자 모듈(L × W × H: 19.8 cm × 19.8 cm × 9 cm)로 구성된다. 진동자 모듈은 반응기 측면 벽에 걸쳐서 설치하기 위해 높이 조절이 가능한 지지대가 장착되어 있으며, 중앙에 교반기를 설치하기 위한

원형의 구멍(d = 3 cm) 있도록 하였다. 바닥에서부터 진동자 하단부까지의 높이를 액상 높이로 설정하였으며, 다음의 식을 이용하여 주파수 파장을 기반으로 1λ에서 2λ까지의 높이를 0.25λ씩 구분하여 1, 1.25, 1.5, 1.75, 2λ의 총 5개 수위를 실험에 적용하였다.

$$c = \lambda \times f \quad (1)$$

여기서 c 는 물속에서의 소리의 속도(1,500 m/s), λ 는 파장, f 는 적용 주파수(28,000/s)를 의미한다. 위 식에 의해 1λ는 약 53.6 mm로 계산되며, 초음파 조사를 위해 진동자가 액상에 3 cm가 잠기게 하였다. 이상의 내용을 반영하여 액상 높이가 1λ일 때의 액상 부피는 2.9 L 수준이었으며, 2λ에서의 액상 부피는 5.5 L 수준이었다. 내부 액상에 혼합 효과를 유도하기 위하여 테프론 재질의 블레이드($8 \times 1.7 \text{ cm}^2$)를 포함한 교반기를 설치하여 운영하였으며, 적용 교반속도는 50, 100, 200 rpm이었다.

2.2. 초음파 에너지 측정

초음파 에너지 발생을 위해 소모되는 전기에너지는 초음파 장비 발전부에 연결된 파워미터(HPM-300A, AD Power)를 이용하여 측정하였고, 약 280~300 W 수준의 전기에너지가 측정되는 조건을 모든 실험조건에 적용하였다. 초음파화학(Sonochemistry) 분야에서 액상에 퍼지는 초음파 에너지는 열량측정법(Calorimetry)으로 측정하게 되는데, 이는 초음파가 매질을 지나면서 매질과의 마찰 등에 의해 발생하는 열에너지를 측정하는 방법이다. 본 연구에서는 일반적으로 사용되는 다음의 식을 이용하여 초음파 에너지를 산정하였다.

$$E_{cal} = \frac{dT}{dt} C_p M \quad (2)$$

여기서 E_{cal} 은 열량에너지, dT/dt 는 초음파 조사시간에 대한 액상의 온도변화, C_p 는 대상 액체의 비열(물: 4.2 J/g·K), M 은 액상의 질량을 각각 의미한다(Koda et al., 2003; Asakura et al., 2008; Son, 2017). 액상에서의 교반에 의해 온도가 상승할 수 있는데, 본 연구에서는 상대적으로 짧은 시간을 대상으로 초음파에 의한 온도 상승을 측정하여 초음파 에너지를 산정하였기 때문에 교반 효과에 의한 온도 상승은 고려하지 않았다.

2.3. 초음파 화학적 효과 분석

액상의 전체 부피를 대상으로 초음파 화학적 효과를 정량적으로 분석하기 위하여 KI 측정법(KI dosimetry)을 적

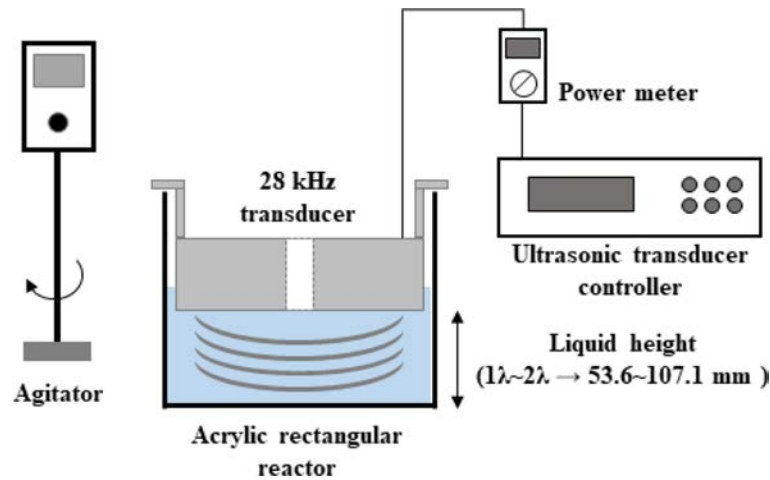
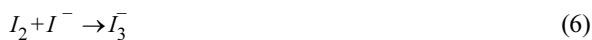


Fig. 1. Schematic of a downward-irradiation ultrasonic system in this study.

용하였다. 고농도의 KI 용액에 초음파를 조사하여 캐비테이션 현상을 일으킬 경우, 100% 이온화된 I^- 이온이 초음파 캐비테이션 현상에 의해 발생하는 OH 라디칼 등의 산화 라디칼에 의해 I_2 로 전환되고, 이후 주변에 과량으로 존재하는 I^- 이온과 반응 하여 I_3^- 가 형성된다. 이상의 KI 용액에서의 초음파에 의한 반응을 정리하면 다음과 같다 (Asakura et al., 2008; Son, 2017).



초음파 화학적 효과의 정량화를 위해 과산화수소 생성 측정법이 사용되고 하는데, 기존 연구에서 300 kHz 및 500 kHz 등의 고주파수 조건에서 KI 방법이 과산화수소 생성 측정법보다 약 10배 더 높은 수준의 반응성을 나타내기도 하였다 (Son, 2017). 본 연구에서는 KI 용액의 농도가 1 g/L인 조건에서 초음파 조사시간을 20분으로 하였으며, 발생된 I_3^- 이온은 분광광도계 (Libra S60, Biochrom)로 350 nm 파장에서 5분 간격으로 측정하여 정량화하였다. 일반적으로 I_3^- 이온의 생성 반응은 반응물이 과량으로 존재하기 때문에 0차 반응으로 가정하여 분석하는 것이 타당하며 (Kirpalani and McQuinn, 2006; Son, 2017), 본 연구에서도 0차 반응으로의 분석 시 모든 경우에 1에 가까운 R^2 값을 나타내었다.

본 연구에서는 액상의 높이를 변경하여 대상 액상부피

가 변동되는 조건이 적용되었는데, 이로 인해 단순히 발생하는 I_3^- 이온의 농도 혹은 반응계수를 비교하는 것은 보다 큰 부피에서의 조건의 결과가 저평가 되는 등의 문제가 발생할 수 있다 (Asakura et al., 2008; Son, 2017). 그러므로 이를 보완하기 위하여 변동되는 대상 액상 부피를 같이 고려하여 초음파 반응에 의해 발생하는 I_3^- 이온의 발생량을 산정하여 각 조건의 결과를 비교분석하였다.

다양한 조건 적용에 의한 액상 내부의 초음파 화학적 효과 변화를 시각적으로 확인하여 위하여 Luminol 용액을 적용하였다. 이는 루미놀 분자가 산화 라디칼과 반응하여 빛을 발생시키는 원리를 이용하는 것으로, 암실 조건에서 루미놀 용액 (luminol 0.1 g, NaOH 1 g/L)에 초음파를 조사하면서 노출 기능이 있는 카메라를 이용하여 음파화학발광 (Sonochemiluminescence, SCL) 이미지를 얻어 이를 시각적으로 분석하는 기법이다 (Asakura et al., 2008; Son, 2017). 본 연구에서는 암실에서의 노출시간을 30초로 하였으며, 별도의 이미지 처리 없이 얻어진 이미지를 연구에 그대로 이용하였다. 루미놀 이미지는 3차원적으로 발생하는 반응의 정도를 측정 방향에서 2차원적으로 측정한 것으로 초음파 화학적 반응을 정량적으로 대표한다고 보기는 어려우나 정성적인 비교는 가능한 것으로 알려져 있다.

2.4. 초음파 물리적 효과 분석

반응기 바닥면에서의 초음파 물리적 효과를 분석하기 위하여 반응기 바닥에 알루미늄 포일을 깔아놓은 조건에서 초음파를 조사한 후 알루미늄 포일이 캐비테이션 현상에 의해 손상되는 정도를 측정하였다. 손상된 알루미늄 포

일을 스캔한 후 이를 이미지 분석 프로그램을 이용하여 손상된 픽셀을 측정하는 방법을 적용하였다(Son et al., 2011; Bao et al., 2013). 초음파 조사 시간은 30초였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 수위 변화 효과

초음파 하향 조사 방식의 적용성을 평가하기 위해 상부의 초음파 진동모듈 진동판에서 반응기 바닥면까지의 거리를 수위로 고려하여 1λ , 1.25λ , 1.5λ , 1.75λ , 2λ 의 5개 조건에 대한 초음파 에너지 변화 및 초음파 화학적 효과를 열량측정법 및 KI 측정법으로 정량 분석하였다. 기존 연구에서 초음파 현상이 $\lambda/4$ 단위로 변화하며, 특히 상향 조사 방식의 초음파 반응기에서 반사판 역할을 하는 수면 근처에서 $\lambda/2$ 단위로 활성화 영역이 확인되는 standing wave field가 만들어지는 것이 확인되었다(Asakura et al., 2010; Son et al., 2011). 이를 근거로 수위를 $\lambda/4$ 단위로 구분하여 하향 조사 방식에서도 유사한 현상이 관찰되는지 확인하였다. 조사거리를 $\lambda/4$ 수준으로 변경 시, 하향 조사 방식에서도 보다 최적화된 초음파 조사 및 캐비테이션 환경을 조성할 수 있을 것으로 기대하였다.

Fig. 2에 나타낸 바와 같이 동일한 유입 전기에너지 조건(약 290 W)에서 다양한 액상 수위 조건에 대하여 초음파 에너지는 173.4-198.6 W로 약 60-70% 수준의 전기에너지에서 초음파 에너지로의 전환이 확인되었다. 본 연구

진이 수행한 선행 연구에서의 이중 bath 및 상향 조사 방식에서는 290 W 수준의 전기에너지 유입에 평균적으로 약 190 W 수준의 초음파 에너지가 형성되어 약 65% 수준의 에너지 전환율이 확인되었다(Lee and Son, 2019). 본 연구 결과와 비교하였을 때 전체 초음파 에너지는 유사한 수준으로 확인되어 내부 용기로 인한 에너지 전달 손실은 크게 영향을 미치지 않는 것으로 판단하였다. 그러나 이중 bath 방식에서 내부 용기로의 초음파 에너지 전달을 살펴보면 14.1-84.1 W 수준의 초음파 에너지만이 측정되어 본 연구의 하향 조사 방식에서의 173.4-198.6 W와 비교하여 매우 낮은 수준만이 이용 가능한 것으로 평가되었다. 즉, 상향 조사의 이중 bath 방식보다 하향 조사 방식이 초음파 에너지 이용 측면에서 매우 유리한 것으로 확인되었다. 다만, 이는 순수 액상만이 있는 균일계에서 확인한 결과로 고체물질이 존재하는 비균일계에서의 하향조사방식에 대한 추가 연구가 필요할 것이다.

산화력을 측정하기 위하여 0차 반응 속도계수와 20분 후의 I_3^- 이온의 생성량을 비교 분석하였다. 0차 반응 속도상수는 각 조건의 액상 부피 변화를 고려하지 않고 I_3^- 이온의 농도 변화만을 이용하여 산정한 것으로, 일반적으로는 대상 액상 부피가 증가할수록 반응 상수가 감소해야 할 것이다. 본 연구에서도 전체적으로 보았을 때 1λ (2.9 L)의 속도상수인 $0.208 \times 10^{-3} \text{ mmol/L/min}$ 에서 2λ (5.3 L)의 속도상수인 $0.112 \times 10^{-3} \text{ mmol/L/min}$ 로 감소하였다. 그러나 1.25λ - 1.75λ 구간에서 속도상수가 유사한 수준을

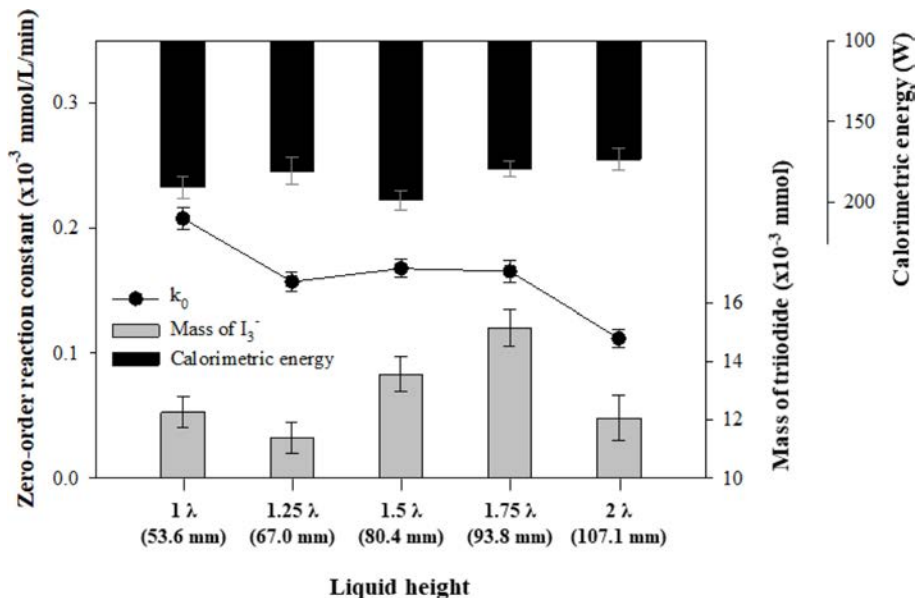


Fig. 2. Zero-order reaction constant, mass of generated triiodide ion (20 min irradiation), and calorimetric energy for liquid height conditions of 1λ - 2λ .

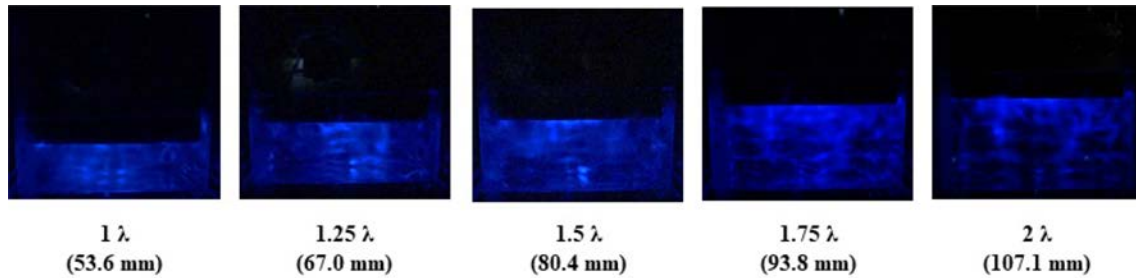


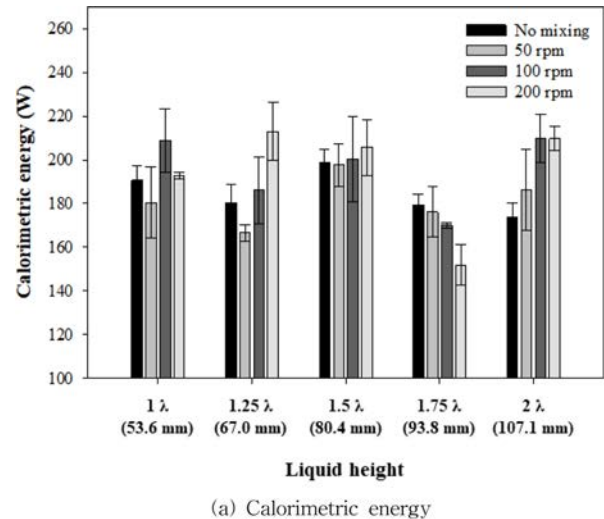
Fig. 3. SCL images for various liquid height conditions of 1λ - 2λ (The exposure time was 30s.).

나타내었는데, 이는 부피가 증가하였음에도 불구하고 액상 내부에서의 반응이 보다 활발하게 일어나 부피 증가로 인한 감소분을 보충하였기 때문인 것으로 판단되었다. 이는 20분 조사후의 최종 I_3^- 이온의 생성량이 1.5λ 및 1.75λ 조건에서 동일한 에너지 유입 조건에서 액상 부피가 증가한 상태임에도 불구하고 다른 조건들과 비교하여 보다 높은 수준을 나타내는 결과로도 확인이 될 수 있다.

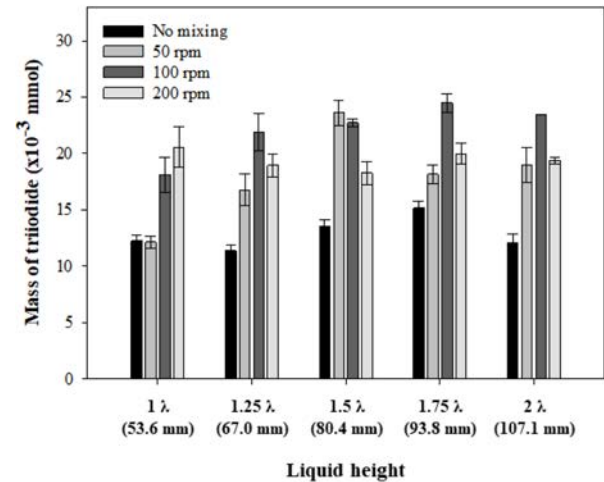
초음파 반응의 경우 동일한 유입에너지 조건에서 대상 부피가 수배 증가하여도 그 효과가 감소하지 않고 오히려 증가하는 결과가 기존 연구에서 여러 차례 보고되었다. 바닥에서 수면까지의 거리가 가까울 경우 부피가 작아져 동일 에너지 유입 조건에서 에너지 밀도가 상대적으로 높아 지는데, 이러한 높은 에너지 밀도 조건보다 수면까지의 거리가 어느 정도 이상이 되어 그에 따라 큰 부피 조건이 형성될 경우(에너지 밀도가 크게 작아지는 경우)에 보다 높은 캐비테이션 활성도가 확인되었다(Asakura et al., 2008; Son et al., 2011; Lim et al., 2014). 이는 내부의 초음파 에너지 분포의 최적화를 위해 반사판까지의 최적 거리가 확보되어야 함을 의미한다. 결과적으로 본 연구에서의 하향 조사 방식에서도 상향 조사 방식인 기존 연구결과와 유사하게 액상 부피가 작을수록 유리한 것이 아닌 최적의 액상 수위 및 부피 조건이 있음이 확인되었다. 이는 Fig. 3의 SCL 이미지에서도 확인할 수 있는데 1.75λ 수위에서의 넓은 액상 영역에서 전반적으로 고른 활성도가 검출되지만 2λ 조건에서는 활성도 분포 영역이 크게 감소한 것으로 나타났다.

3.2. 기계적 교반 효과

하향 조사 방식에서 기계적 교반을 적용하는 경우 생성되는 초음파 에너지, 초음파 화학적 효과 및 캐비테이션 활성도가 어떻게 변화하는지 이해하기 위하여 50, 100, 200 rpm의 기계적 교반을 적용하였다. 교반 블레이드의 회전 운동에 의해 진동모듈에서 조사되는 초음파가 직접적으



(a) Calorimetric energy



(b) Mass of generated triiodide ion

Fig. 4. Calorimetric energy (a) and mass of generated triiodide ion (b) for liquid height conditions of 1λ - 2λ with various mixing rates (0 - 200 rpm).

로 영향 받는 것을 최소화하기 위하여 진동모듈 중앙에 위치한 구멍을 통해 교반기를 설치하고 운영하였다. Fig. 4에

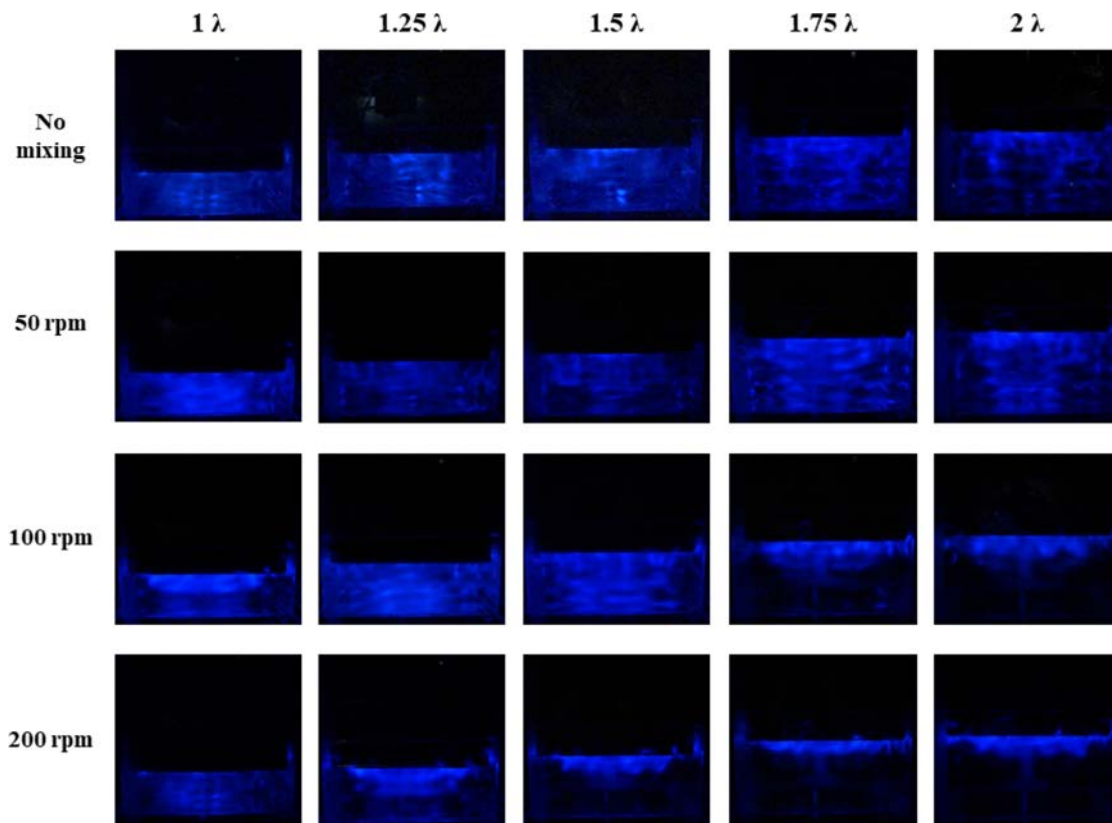


Fig. 5. SCL images for various liquid heights and mixing rates (The exposure time was 30s.).

나타낸 바와 같이 수위 조건에 따라 초음파 에너지 및 화학적 효과에 대한 기계적 교반의 영향이 다양한 수준으로 나타나는 것을 확인하였다. 교반에 의한 온도 상승 효과를 확인하기 위하여 초음파를 조사하지 않는 조건에서 교반을 적용한 후 초음파 에너지 측정 시간과 동일한 시간 동안 온도 변화를 측정한 결과 의미있는 온도 변화는 확인되지 않았다.

초음파 화학적 효과(최종 I_3^- 이온의 생성량)의 경우 모든 수위 범위에서 기계적 교반으로 인한 증진 효과가 확인되었으며, 교반을 하지 않은 조건 대비 120–200% 수준으로 증진되는 것으로 나타났다. 대체적으로 높은 교반 속도에서 보다 큰 증진효과가 확인되었으나 최적 교반 속도 조건은 각 수위 조건에 따라 다소 변화하였다. 이는 각 수위 조건마다 형성되는 내부의 초음파 에너지 분포가 다르며, 추가적으로 교반으로 인한 분포의 교란 정도가 크게 달라지기 때문인 것으로 확인되었다. 기존 연구에서는 0–350 rpm의 교반 조건을 적용하여 교반속도가 높아짐에 따라 초음파 화학적 효과가 증진하는 것과 교반으로 인한 캐비테이션 활성화 영역의 변화를 SCL 이미지로 보고하였다(Kojima et al., 2010).

Fig. 5의 각 조건에서 얻은 SCL 이미지를 살펴보면, 교반으로 인한 각 수위 조건에서의 내부 캐비테이션 활성화 영역의 분포 및 강도 등의 특성이 크게 변화하였다. 특히, 높은 수위 및 높은 교반 속도 조건에서 캐비테이션 활성화 영역이 진동자 주변 근처로 집중되는 것으로 나타났다는데, 이는 해당 수위 조건에서 빠른 교반으로 만들어지는 내부 액상의 격렬한 유체의 흐름으로 인하여 초음파가 바닥쪽으로 전달되지 못하고 진동자 주변에 갇히는 현상이 발생하기 때문인 것으로 판단되었다. 액상 부피 전반적으로 캐비테이션 활성화도가 확인되는 경우와 비교하여 좁은 영역에 집중적으로 매우 높은 캐비테이션 활성화도가 형성되며, 격렬한 흐름으로 인하여 캐비테이션 비활성 영역의 반응물이 활성화 영역으로의 이동이 활발하게 이동하였다고 볼 수 있다. 기존 연구에서도 내부 액상의 격렬한 흐름 발생 및 혼합 효과로 인한 초음파 화학적 효과의 증진이 보고되었는데, 다음의 두 가지 경우도 구분할 수 있다: 초음파 조사에 직접적인 영향을 미치지 않으나 격렬한 흐름을 만들어 간접적으로 캐비테이션 활성화 영역의 일부 변화되어 증진이 일어난 경우; 초음파 조상 직접적인 영향을 미치도록 교반을 적용하여 그로 인한 내부의

활성화 영역의 큰 변화로 증진이 일어난 경우(Hatanaka et al., 2006; Yasuda et al., 2009; Kojima et al., 2010; Bussemaker and Zhang, 2014; Gogate et al., 2015; Choi et al., 2019). 두 가지 모두 교반으로 인한 높은 강도의 혼합 효과가 초음파 화학적 효과에 크게 기여하였을 것으로 판단된다.

기계적 교반을 적용하지 않은 기존 연구에서 초음파 화학적 효과의 경향이 열량측정에 의한 초음파 에너지 경향과 유사한 것으로 보고되었는데, 본 연구에서는 그러한 유사한 경향들이 확인되지 않았다. 최종 I_3^- 이온의 생성량의 초음파 화학적 효과의 경우 모든 수위 범위에서 기계적 교반으로 인하여 증가하는 경향을 보인 반면에, 본 연구에서는 화학적 효과의 경향과 연관성을 찾기 어려운 수준이었다. 초음파 에너지는 액상에 초음파가 전달되면서 매질 내 물 분자와 초음파의 마찰 손실 등을 고려한 것인데, 교반으로 인하여 초음파의 전달이 크게 달라지며, 그로 인한 열 발생의 정도가 기존과는 다르게 나타났기 때문인 것으로 고려되었다. 교반을 하지 않는 조건에서도 초음파 에너지의 경향이 화학적 효과와의 경향과 연관짓기 어려운 것으로 확인되었는데, 이를 통해 하향 조사 방

식 및 기계적 교반의 추가 적용 시의 초음파 에너지 평가 기법에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 판단되었다.

3.3. 초음파 물리적 효과 평가

하향 조사 방식 및 기계적 교반을 적용하는 경우의 반응기 바닥면에서의 초음파 물리적 효과 평가를 위하여 알루미늄 포일을 이용한 손상 실험을 수행하였다. 알루미늄 포일 기법은 캐비테이션 현상이 고체표면에서 발생할 경우 고체를 향해 버블이 폭발하여 그로 인해 손상이 발생하는 원리를 이용한 것으로, 초음파 반응기의 탈착, 세척 등의 초음파 물리적 효과 평가에 일반적으로 사용될 수 있는 방법이다(Son et al., 2011; Bao et al., 2013). 다만, 포일 표면의 2차원적 손상만을 고려하기 때문에 전체 부피에서 일어나는 물리적 효과를 분석하지 못하는 한계를 갖고 있다. 본 연구에서는 다양한 수위 및 교반 조건에서 바닥면까지 전달된 초음파 에너지가 어느 정도 수준으로 확인될 수 있는지를 실험하였다. Fig. 6에 실제 손상된 포일 이미지를 나타내었으며, 이미지 분석 프로그램을 이용한 손상된 정도를 Fig. 7에 나타내었다. 손상 정도는 전체 영역의 픽셀 수와 손상된 영역의 픽셀 수를

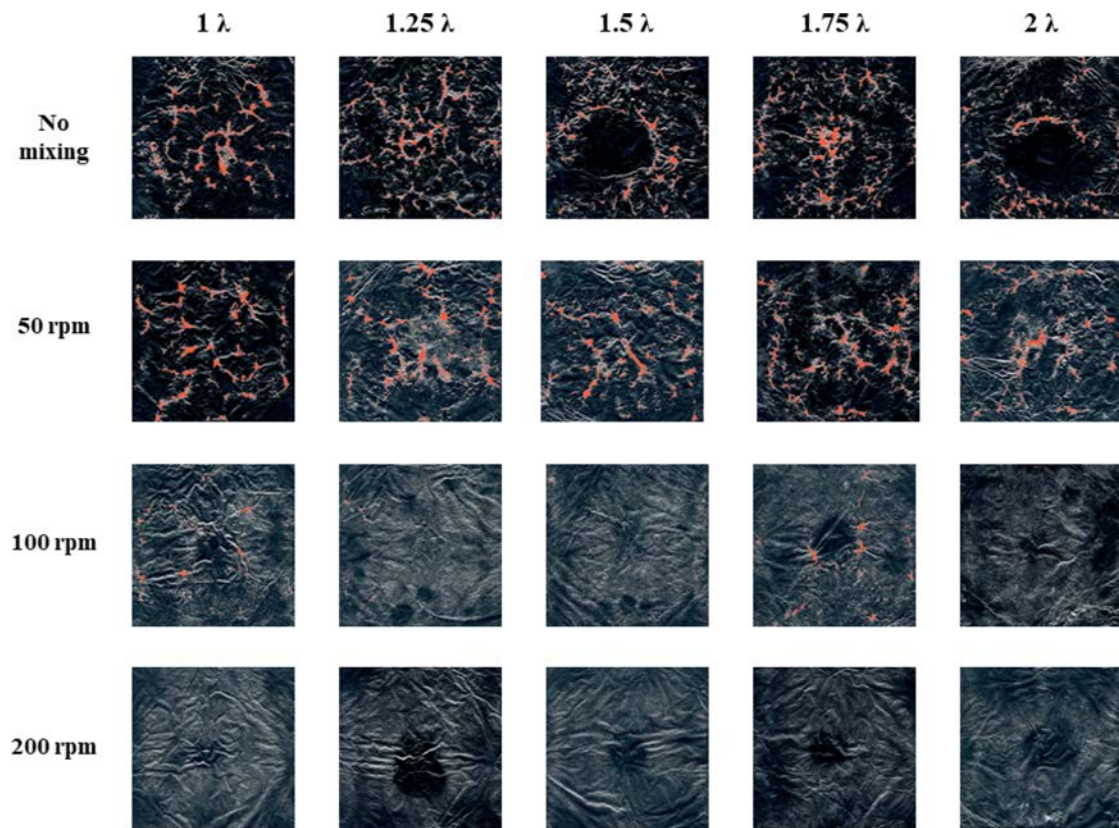


Fig. 6. Damaged aluminium foil images for various liquid heights and mixing rates (The irradiation time was 30s.).

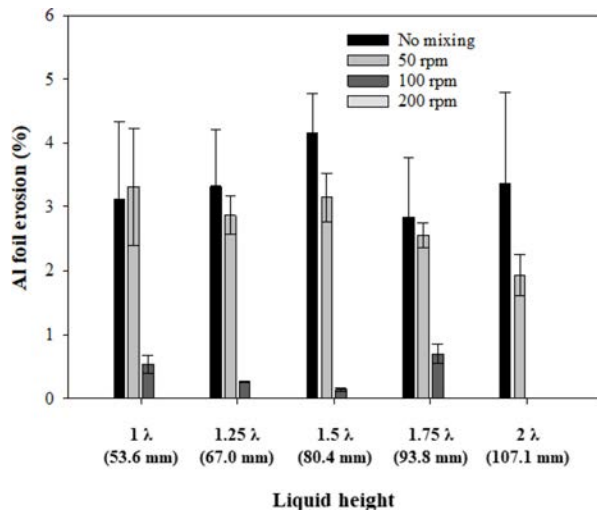


Fig. 7. Portion of aluminium foil erosion for various liquid heights and mixing rates (The irradiation time was 30s.).

고려하여 산정하였다(Son et al., 2011).

알루미늄 포일 손상 정도를 살펴보면 교반을 하지 않거나 낮은 교반 속도 조건에서 높은 손상을 나타내었다. 교반속도가 100 rpm 이상의 경우 손상의 정도가 무시할 만한 수준이었는데, 이는 교반으로 인한 격렬한 유체 흐름이 초음파 에너지의 전달을 저해하고 그로 인해 충분한 강도의 캐비테이션 현상이 바닥면에서 일어나지 않기 때문으로 판단되었다. 위의 Fig. 5에서의 캐비테이션 활성화 영역이 상부의 진동자 근처에 집중되는 현상으로도 이해할 수 있을 것이다.

본 연구결과를 고려하면 실제 충분한 양의 토양 입자를 반응기에 넣어 탈착 및 세척 등을 고려할 경우, 교반을 하지 않는 것이 가장 유리할 것으로 생각할 수 있으나, 반응기 바닥의 토양입자층을 지나면서 초음파 에너지의 감쇠가 크게 발생하기 때문에 토양 입자층의 상부만이 국지적으로 캐비테이션 현상에 영향을 받을 가능성이 높을 것이다. 이를 위해 교반을 적용하는 것이 타당하며 교반에 의해 상부로 이동된 입자들이 캐비테이션 활성화 영역에서 탈착 및 세척 효과를 얻을 수 있을 것이다(Son et al., 2011; Park and Son, 2017). 이를 위해 반응기 일부 영역이 아닌 전체 영역에 대한 초음파 물리적 효과 평가 기법의 개발이 필요할 것으로 판단되었으며, 이를 위한 후속 연구가 요구되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 일반적으로 사용되는 상향 조사 방식의

초음파와 반응기가 아닌 에너지 효율 등을 고려한 하향 조사 방식의 초음파와 반응기의 기초 성능 평가를 수행하였다. 수위를 1λ(53.6 mm)에서 2λ(107.1 mm)로 0.25λ 단위로 변경시켜 수위 변화에 따른 열량측정법에 의한 초음파 에너지 및 KI 방법에 의한 초음파 화학적 효과 등에 대한 영향을 살펴보았으며, 각 수위 조건에서 기계적 교반을 적용하여 교반(0 - 200 rpm)에 의한 변화를 확인하였다. 작은 수위 변화에도 초음파 에너지 및 초음파 화학적 효과의 변화가 확인되었으며, 향후 축적된 정보를 바탕으로 최적화가 가능할 것으로 판단되었다. 기계적 교반은 초음파 화학적 효과를 크게 증진시켰는데, 이는 격렬한 유체의 흐름이 반응기 내부의 캐비테이션 활성화 영역에 영향을 미쳤기 때문이었다. 알루미늄 포일을 이용한 초음파 물리적 효과 평가에서는 교반을 하지 않는 경우에서 가장 높은 물리력을 얻을 수 있었는데, 실제 토양 입자 등을 적용하기 위해서는 교반이 반드시 필요하므로 이에 대한 추가 연구가 필요한 것으로 판단되었다.

사 사

본 연구는 금오공과대학교 학술연구비에 의하여 연구된 논문입니다.

References

- Asakura, Y., Fukutomi, S., Yasuda, K., and Koda, S., 2010, on of Sonochemical Reactors by Measuring Impedance of Transducer and Sound Pressure in Solution, *J. Chem. Eng. Jpn.*, **43**(12), 1008-1013.
- 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, *Ultrason. Sonochem.*, **15**(3), 244-250.
- Bussemaker, M.J. and Zhang, D., 2014, A phenomenological investigation into the opposing effects of fluid flow on sonochemical activity at different frequency and power settings. 1. Overhead stirring, *Ultrason. Sonochem.*, **21**(1), 436-445.
- Choi, J., Khim, J., Neppolian, B., and Son, Y., 2019, Enhancement of sonochemical oxidation reactions using air sparging in a 36 kHz sonoreactor, *Ultrason. Sonochem.*, **51**, 412-418.
- Fukunaga, S., Higashi, S., Horie, T., Sugiyama, H., Kanda, A., Hsu, T.-Y., Tung, K.-L., Taniya, K., Nishiyama, S., and Ohmura, N., 2019, Effect of geometrical configuration of reactor on a ZrP nano-dispersion process using ultrasonic irradiation, *Ultrason. Sonochem.*, **52**, 157-163.

- Ge, H., Li, Y., and Chen, H., 2019, Ultrasonic cavitation noise in suspensions with ethyl cellulose nanoparticles, *J. Appl. Phys.*, **125**(22), 225301.
- Hatanaka, S.-i., Mitome, H., Yasui, K., and Hayashi, S., 2006, Multibubble sonoluminescence enhancement by fluid flow, *Ultrasonics*, **44**, e435-e438.
- Khuyen Viet Bao, T., Yoshiyuki, A., and Shinobu, K., 2013, Influence of Liquid Height on Mechanical and Chemical Effects in 20 kHz Sonication, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **52**(7S), 07HE07.
- Kirpalani, D.M. and McQuinn, K.J. 2006, Experimental quantification of cavitation yield revisited: focus on high frequency ultrasound reactors, *Ultrason. Sonochem.*, **13**(1), 1-5.
- Koda, S., Kimura, T., Kondo, T., and Mitome, H., 2003, A standard method to calibrate sonochemical efficiency of an individual reaction system, *Ultrason. Sonochem.*, **10**(3), 149-156.
- Kojima, Y., Asakura, Y., Sugiyama, G., and Koda, S., 2010, The effects of acoustic flow and mechanical flow on the sonochemical efficiency in a rectangular sonochemical reactor, *Ultrason. Sonochem.*, **17**(6), 978-984.
- Lee, D. and Son, Y., 2019, Sonochemical and Sonophysical Effects in Heterogeneous Systems, *J. Korean Soc. Water Environ.*, **35**(2), 115-122.
- Lim, M., Ashokkumar, M., and Son, Y., 2014, The effects of liquid height/volume, initial concentration of reactant and acoustic power on sonochemical oxidation, *Ultrason. Sonochem.*, **21**(6), 1988-1993.
- Mohod, A.V. and Gogate, P.R., 2011, Ultrasonic degradation of polymers: Effect of operating parameters and intensification using additives for carboxymethyl cellulose (CMC) and polyvinyl alcohol (PVA), *Ultrason. Sonochem.*, **18**(3), 727-734.
- Park, B. and Son, Y., 2017, Ultrasonic and mechanical soil washing processes for the removal of heavy metals from soils, *Ultrason. Sonochem.*, **35**, 640-645.
- Pétrier, C., Combet, E., and Mason, T., 2007, Oxygen-induced concurrent ultrasonic degradation of volatile and non-volatile aromatic compounds, *Ultrason. Sonochem.*, **14**(2), 117-121.
- Son, Y., 2017, Simple design strategy for bath-type high-frequency sonoreactors, *Chem. Eng. J.*, **328**, 654-664.
- Son, Y., Cha, J., Lim, M., Ashokkumar, M., and Khim, J., 2011, Comparison of Ultrasonic and Conventional Mechanical Soil-Washing Processes for Diesel-Contaminated Sand, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **50**(4), 2400-2407.
- Son, Y., Lee, D., Lee, W., Park, J., Lee, W.H., and Ashokkumar, M., 2019, Cavitation activity in heterogeneous systems containing fine particles, *Ultrason. Sonochem.*, **58**, 104599.
- Son, Y., Lim, M., Ashokkumar, M., and Khim, J., 2011, Geometric Optimization of Sonoreactors for the Enhancement of Sonochemical Activity, *J. Phys. Chem. C*, **115**(10), 4096-4103.
- Sun, Y., Liu, D., Chen, J., Ye, X., and Yu, D., 2011, Effects of different factors of ultrasound treatment on the extraction yield of the all-trans- β -carotene from citrus peels, *Ultrason. Sonochem.*, **18**(1), 243-249.
- Wood, R.J., Lee, J., and Bussemaker, M.J., 2017, A parametric review of sonochemistry: Control and augmentation of sonochemical activity in aqueous solutions, *Ultrason. Sonochem.*, **38**, 351-370.
- Yasuda, K., Matsuura, K., Asakura, Y., and Koda, S., 2009, Effect of Agitation Condition on Performance of Sonochemical Reaction, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **48**(7), 07GH04.