

## 74 kHz 초음파 반응기에서 수위 변화에 따른 초음파 화학 반응의 변화

손 영 규\*

국립금오공과대학교 환경공학과

### The Effect of Liquid Height on Sonochemical Reactions in 74 kHz Sonoreactors

Younggyu Son\*

Department of Environmental Engineering, Kumoh National Institute of Technology

#### ABSTRACT

Acoustic cavitation can induce various sonochemical effects including pyrolysis and radical reactions and sonophysical effects including microjets and shockwave. In environmental engineering field, ultrasound technology using sonochemical effects can be useful for the removal and mineralization of recalcitrant trace pollutants in aqueous phase as one of emerging advanced oxidation processes (AOPs). In this study, the effect of liquid height, the distance from the transducer to the water surface, on sonochemical oxidation reactions was investigated using KI dosimetry. As the liquid height/volume increased (40~400 mm), the cavitation yield steadily increased even though the power density drastically decreased. It was found that the enhancement at higher liquid height conditions was due to the formation of standing wave field, where cavitation events could stably occur and a large amount of oxidizing radicals such as OH radicals could be continuously provided.

**Key words :** Sonochemical reaction, Cavitation yield, Sonochemiluminescence (SCL), KI dosimetry, Liquid height

#### 1. 서 론

액상에 주파수 20 kHz 이상의 초음파를 일정 강도 이상으로 조사하게 되면 캐비테이션(Cavitation) 현상이라는 독특한 현상이 발생하게 된다. 캐비테이션 현상을 통해 크게 화학적 효과와 물리적 효과를 얻을 수 있는데, 열분해(Pyrolysis)와 라디칼 반응(Radical reactions) 등의 화학적 효과와 마이크로젯(Microjet) 및 충격파(Shock wave) 등의 물리적 효과가 그것이다. 화학적 효과는 주로 화학물질의 합성, 오염물질의 분해 등과 연관되어 이용될 수 있으며, 물리적 효과는 세척, 세정, 추출 등의 공정에 적용될 수 있다. 일반적으로 화학적 효과는 높은 주파수 영역에서 유리하며, 물리적 효과는 낮은 주파수 영역대가 선호된다(Adeuwuyi, 2001; Son et al., 2011; Son et al., 2012).

최근 PPCPs(Pharmaceuticals and Personal Care Products) 등으로 대표되는 미량 난분해성 오염물질의 처리를 위하여 다양한 고도산화처리공정(Advanced Oxidation Processes, AOPs)이 연구 및 적용되고 있는데, 오존, 자외선, 초음파, 촉매, 과산화수소, 마이크로웨이브 등을 이용하여 기존의 방법으로는 처리하지 못한 다양한 난분해성 오염물질의 분해 및 무기화(Mineralization)가 가능한 것으로 보고되고 있다(Esplugas et al., 2007; Son et al., 2012; Remya and Lin, 2011). 다양한 고도산화처리공정 중 이미 다양한 처리공정에 널리 사용되고 있는 오존 기술과 높은 처리효율을 바탕으로 한 자외선/촉매 공정(Photocatalysis)이 가장 폭넓게 연구되고 있는 실정이다. 그러나 과도한 화학물질 사용, 물질전달의 증대 및 촉매 등의 회수/재이용 등의 문제가 여전히 도전 과제로 남아 있다(Mehrjoui et al., 2015; Son et al., 2012; Yao et al., 2009; Teo

\*Corresponding author : yson@kumoh.ac.kr

Received : 2015. 12. 7 Reviewed : 2015. 12. 11 Accepted : 2015. 12. 16

Discussion until : 2016. 4. 30

et al., 2009).

초음파 기술은 별도의 화학물질의 사용 없이도 높은 산화력을 얻을 수 있으며, 별도의 후처리 공정을 필요로 하지 않기 때문에 최근 새로운 고도산화처리기술로 주목받고 있다. 또한 기존의 오존 및 자외선과 같은 다양한 고도산화처리기술과 혼합 적용 시 높은 시너지 효과를 얻을 수 있어 주요 기술 및 보조 기술로서의 역할이 기대되고 있다(Cui et al., 2010; Torres et al., 2008; Son et al., 2012). 그러나 초음파 기술이 실제 현장에 적용되기까지는 많은 연구가 필요할 것으로 판단되는데, 특히 대부분의 고도산화처리공정에서 제기되고 있는 scale-up에 대한 고려가 초음파 기술 분야에서도 역시 지속적으로 제기되고 있다(Son et al., 2011; Gogate, 2007). 초음파는 소리 에너지를 사용하는 기술로 다른 고도산화처리공정 기술보다 더 섬세한 최적화 및 scale-up 연구가 필요하여, 이는 음향시설, 콘서트홀, 녹음실 등의 설계와 매우 유사하다고 볼 수 있다.

그러므로 초음파 기술의 현장 적용성을 높이기 위해서는 scale-up에 대한 고려가 필요하며, 주파수, 유입에너지와 같은 운영 조건에서 단위 진동자당 유효한 처리 범위 산정 등에 대한 연구가 반드시 수행되어야 한다. 본 연구에서는 화학적인 효과는 다소 떨어지나 scale-up에 유리하다고 알려진 낮은 주파수 영역대인 74 kHz 초음파 반응기를 이용하여 진동자와 수면까지의 거리인 수위 조건을 주파수 파장을 기준으로 변화시켜 초음파 산화 반응의 정량적 분석을 수행하였다. 초음파 산화 반응의 정량화를 위해서 KI 방법을 적용하였으며, 반응기 내 실제로 형성되는 음장을 시각화하기 위하여 루미놀 방법을 같이 적용하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1. 초음파 반응기 구성

본 연구에서 사용한 초음파 반응기의 구성 모식도를 Fig. 1에 나타내었다. 원형 반응기(지름: 110 mm, 높이: 500 mm) 하단에 74 kHz 초음파를 조사할 수 있는 진동자가 위치하여 상단으로 초음파가 조사되는 시스템으로 구성하였으며, 수위를 점차 증가시켜 초음파에 의해 영향 받는 액상 부피가 실험 조건에 따라 변화되게 하였다. 수위는 적용 초음파 주파수의 파장에 따라 변화시켰으며, 2λ에서 20λ까지 1λ 단위로 변화시켰으며, 이 때 1λ는 식(1)에 의해 약 20 mm로 적용하였다. 수위 변화에 따른 액상 부피의 변화는 0.33~3.8 L 범위였다.

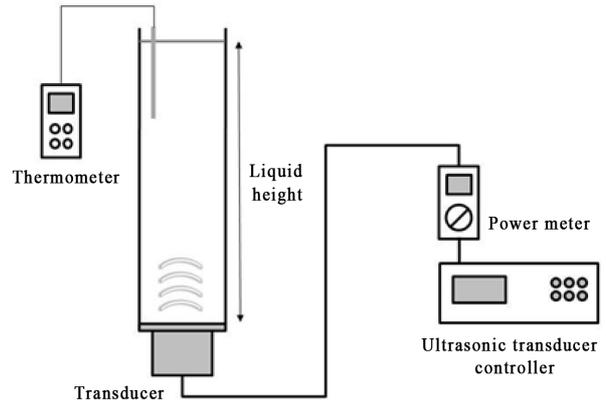


Fig. 1. A schematic diagram of the experimental set-up.

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

여기서  $c$ 는 액상에서의 초음파의 속도(1,500 m/s)이며,  $\lambda$ 와  $f$ 는 각각 초음파의 파장과 주파수를 의미한다.

### 2.2. 에너지 측정

유입에너지는 파워미터를 이용하여 측정하여 모든 수위 조건에서 130 W로 유지하였으며, 다음의 식 (2)를 이용하여 초음파 조사로 인한 액상의 온도 상승을 열량에너지(Calorimetric energy)로 각 조건에서 산정하였다(Son et al., 2011).

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

여기서  $E_{cal}$ 은 열량에너지를,  $dT/dt$ 는 액상의 온도 상승률,  $C_p$ 는 대상 액체의 비열(물: 4.2 J/g · K)을,  $M$ 은 대상 액체의 질량을 각각 의미한다. 동일한 유입에너지 조건에서 수위 변화에 따른 단위 부피당 사용된 유입에너지인 에너지 밀도(Power density)는 다음의 식 (3)을 이용하여 산정하였다.

$$Power\ density = \frac{P_E}{V_L} \quad (3)$$

여기서  $P_E$ 는 유입 에너지를,  $V_L$ 은 액상 부피를 의미한다.

### 2.3. 초음파 화학 반응의 정량적 분석

각 조건에서의 초음파 화학 반응을 정량적으로 분석하기 위하여 KI 용액법(KI dosimetry)을 이용하였다. 초음파 캐비테이션 현상에 의해 발생하는 OH 라디칼 등의 산화 라디칼들은 액상에 과량으로 존재하는  $\Gamma$  이온과 반응하여  $I_2$ 를 생성하고 다시 과량의  $\Gamma$  이온과 반응하여

$I_3^-$  이온을 생성한다. 이렇게 발생한  $I_3^-$  이온은 흡광광도계를 이용하여 정량화할 수 있어 라디칼 산화반응을 정량화하는 방법으로 널리 이용되고 있다(Son et al., 2011; Asakura et al., 2008). 이상의 KI 용액법의 라디칼 산화반응을 다음의 식(4)~식(6)과 같이 정리하였다. KI 용액의 농도는 10 g/L이며, 흡광광도계(SPECORD 40, Analyticjena)의 350 nm 파장에서  $I_3^-$  이온의 농도를 측정하였다.



액상 수위 변화에 따라 같은 유입 에너지 조건에서 액상 부피가 변화하게 되어 다른 부피 조건에서의 초음파 화학적 반응의 비교를  $I_3^-$  이온의 농도를 기준으로 비교할 수는 없었다. 이를 보완하기 위하여 다양한 수위 조건에서 초음파 캐비테이션 현상에 의해 생성되는  $I_3^-$  이온의 발생량을 다음과 같은 Cavitation yield 식을 이용하여 구하고 이를 초음파 화학적 반응의 비교 기준으로 하였다.

$$Cavitation\ yield = \frac{CV_L}{P_E T_I} \quad (7)$$

여기서  $C$ 는 생성된  $I_3^-$  이온의 농도를 나타내며,  $T$ 는 초음파 조사 시간으로, Cavitation yield는 단위조사시간 및 단위유입에너지 당 생성된 반응결과물의 질량을 의미한다.

#### 2.4. 초음파 화학 반응의 시각화

수위 변화에 따라 반응기 내부의 초음파 캐비테이션 현상의 활성화 영역이 변화하게 되는데 이를 시각적으로 확인하기 위하여 루미놀 용액을 이용한 초음파화학 발광기법(Sonochemiluminescence, SCL)을 적용하였다. 루미놀 용액(0.1 g/L 루미놀(3-aminophthalhydrazide)과 1 g/L의 NaOH)을 초음파 반응기에 넣고 암실 조건에서 노출 기능이 있는 디지털 카메라(Canon EOD 400D)를 이용하여 초음파에 의한 캐비테이션 활성화 영역을 촬영하였고, 이를 시각화하였다(Son et al., 2011).

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 유입 에너지 분석

다양한 액상 높이/부피 조건에서의 초음파 화학적 산화반응의 변화를 확인하기 위하여 액상 높이를 74 kHz 주파수 조건에서 2~20  $\lambda$ (0.33~3.8 L)까지 1  $\lambda$  단위로 변

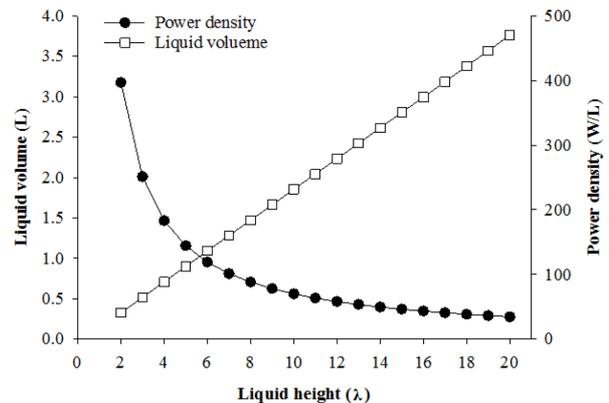


Fig. 2. Liquid volume and power density at each liquid height condition for 74 kHz (The electrical input power was 130 W for all liquid height conditions).

화시켰다. 초음파가 하단에서 상단 수면으로 조사되는 경우 수면은 반사판 역할을 하게 되어 수면 근처에서 진행파와 반사파가 만나게 되며, 이 때 수면 근처에서 정상파(Standing wave)가 형성된다(Son et al., 2011). 본 연구에서의 수위변동은 초음파 음원에서부터 반사판까지의 거리의 변화로 이해할 수 있으며, 본 연구에서와 같은 수직 조사 형태의 초음파 반응기 이외에도 한쪽 측면에서 다른 쪽 측면으로 조사하는 형태의 초음파 반응기에도 연구결과를 이용할 수 있을 것으로 판단되었다.

유입 에너지를 파워미터 기준으로 130 W에 고정하였으므로 Fig. 2와 같이 수위가 증가함에 따라 대상 액상 부피는 선형적으로 증가하고, 대상 부피당 에너지 유입량인 에너지 밀도는 급격히 감소하게 된다. 즉, 3  $\lambda$  조건에서의 에너지 밀도는 약 250 W/L로 높은 수준이지만 14  $\lambda$  조건에서는 약 50 W/L 수준으로 감소하게 된다. 이러한 수위 변화에서 초음파 조사 시 발생하는 감쇠(Sound attenuation 혹은 sound absorption)현상에 의한 액상 온도 상승을 측정하여 각 수위 조건에서의 열량에너지를 산정하였다. 감쇠현상은 소리에너지가 액상과의 마찰 등으로 인하여 열에너지로 전환되는 현상으로 주파수가 증가할수록 감쇠현상이 커지는 것으로 알려져 있다(Mason and Lorimer, 2002). 초음파화학 분야에서는 반응기에 실제 유입되는 초음파 에너지의 정량화를 위해 열량에너지 산정 방법을 많이 이용하였으나 본 연구에서는 파워미터에 의한 전기 에너지를 기준으로 초음파 화학 반응을 분석하였다.

Fig. 3에 나타낸 바와 같이 2  $\lambda$  수위 조건에서 약 42 W의 열량에너지를 확인하였으며, 이후 증가 추세로 20  $\lambda$  조건에서 약 66 W의 열량에너지가 측정 및 산정되었다.

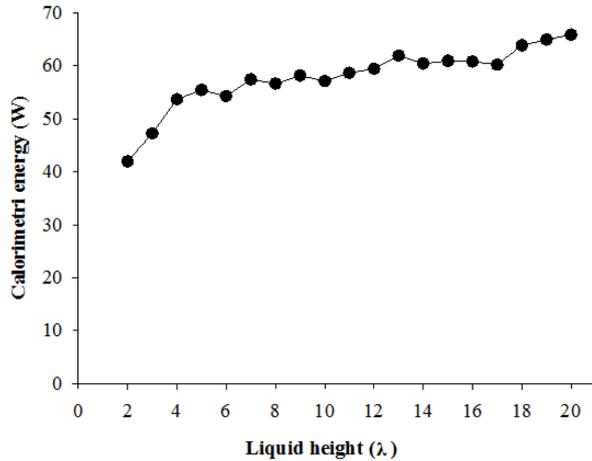


Fig. 3. Calorimetric energy at each liquid height condition for 74 kHz (The electrical input power was 130 W for all liquid height conditions).

수위가 증가할수록 외부로 에너지가 빠져나갈 수 있는 반응기 벽 등의 표면적이 증가하게 되어 동일한 유입 에너지 조건에서 높은 수위 조건에 대하여 액상의 열량에너지는 감소하는 것이 일반적이라고 판단할 수 있다. 그러나 본 연구에서는 수위가 증가함에 따라 열량에너지가 증가하게 되는데 이는 열을 발생시키는 감소현상이 수위가 증가함에 따라 상이하게 나타나는 것을 간접적으로 나타낸다고 할 수 있다. 수위 변화에 따라 내부에 형성되는 음장(Sound field)의 형태 및 특성이 달라지고 이로 인해 소리에너지의 감소현상이 다르게 발생하는 것이다. 기존의 일부 연구에서도 본 연구에서와 같이 수위 변화 시 열량에너지가 증가 혹은 일정하게 유지하는 현상이 보고되었다(Son et al., 2011; Asakura et al., 2008).

### 3.2. 초음파 화학적 반응의 정량적 분석

초음파 캐비테이션 현상에 의해 발생하는 열분해(Pyrolysis) 및 라디칼 반응(Radical reactions) 등의 화학적 효과를 다양한 액상 수위/부피 조건에서 정량적으로 비교 분석하기 위하여 KI 방법을 적용하였다. 휘발성 물질의 경우 캐비테이션 기포 안으로 기화되어 들어가 극한 조건에서 열분해 될 수 있지만, 휘발성이 낮거나 이온 상태의 물질들은 캐비테이션 기포 외부에서 기포 붕괴 시 빠져 나오는 다양한 종류의 라디칼에 의해 반응하게 된다(Petrier et al, 2007). 본 연구에서 적용한 KI 방법은 이온 상태의  $I^-$  이온을 반응 대상으로 하였으므로 열분해 기작은 고려하지 않았으며, 다양한 산화 라디칼 중 앞서 설명한 식(4)-식(6)과 같이 가장 대표적인 OH 라디칼에 의해서만 산화 반응이 일어나는 것으로 가정하였다.

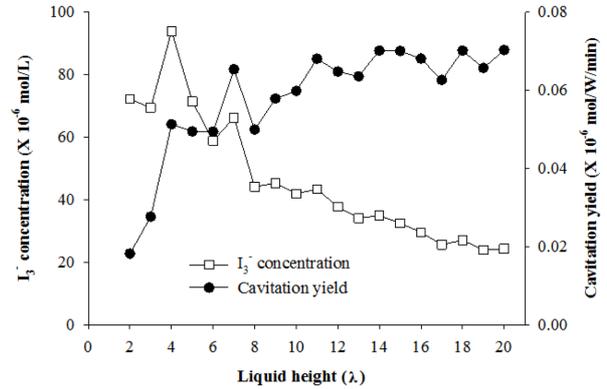


Fig. 4. Quantification of sonochemical oxidation reactions for 74 kHz using KI dosimetry under various liquid height conditions ( $2\lambda \sim 20\lambda$ ).

Fig. 4에 나타난 바와 같이 초음파 화학적 반응의 최종 산물인  $I_3^-$  이온의 농도는 낮은 수위 조건에서 높은 수준을 나타내었으며, 수위가 증가함에 따라 비교적 선형적으로 감소하는 것을 확인하였다. 이는 일반적인 화학반응에서 당연하게 고려할 수 있는 현상으로 반응을 일으키는 원인이 동일한 조건(본 연구에서는 유입 에너지)에서 대상 부피가 증가할수록 생성물의 농도가 부피 변화와 연계되어 감소하게 된다. 경우에 따라 scale-up 효과로 인하여 실제 감소치가 더 크게 측정될 수 있다. 그러나 수위 및 부피 증가에 따른 본 연구에서의 농도 감소가 일반적으로 예상되는 감소치보다 비교적 적은 수준인 것으로 확인되었다. 예를 들어 6 λ 조건에서 대상 액상 부피가 약 1 L 수준일 때  $I_3^-$  이온의 농도가 약  $59 \times 10^{-6} M$ 이었으나 부피가 약 3배 증가한 16 λ(액상부피: 약 3 L) 조건에서는  $I_3^-$  이온의 농도가 약  $30 \times 10^{-6} M$ 로 1/3 수준이 아닌 1/2 수준 정도로 높게 확인되었다.

이러한 직접적인 비교의 어려움으로 반응 생성물의 농도 기준이 아닌 생성량을 기준으로 한 cavitation yield 개념을 이용하여 수위 변화에 따른 초음파 캐비테이션 산화 반응의 정도를 타나낸 결과(Fig. 4 오른쪽 축) 수위가 증가함에 따라 산화 생성물의 양이 증가하는 것을 확인하였다. 즉, 대상 부피 증가로 인하여 초음파 캐비테이션 산화 반응 생성물의 감소가 발생하나 이 감소분 이상의 반응 증진 효과가 발생하여 그 차이를 극복하고 지속적인 증가 추세를 이끌어 낸 것으로 판단되었다. 이는 앞서 설명한 열량에너지의 증가와도 유사한 내용으로 수위 및 부피가 증가함에 따라 내부에 형성되는 음장의 형태 및 특성이 달라지며, 이렇게 변화한 음장에서 초음파 화학적 반응을 보다 증진시킬 수 있는 캐비테이션 현상이 일어난 것이다. 기존의 유사한 연구에서는 이러한 수위 및 부피

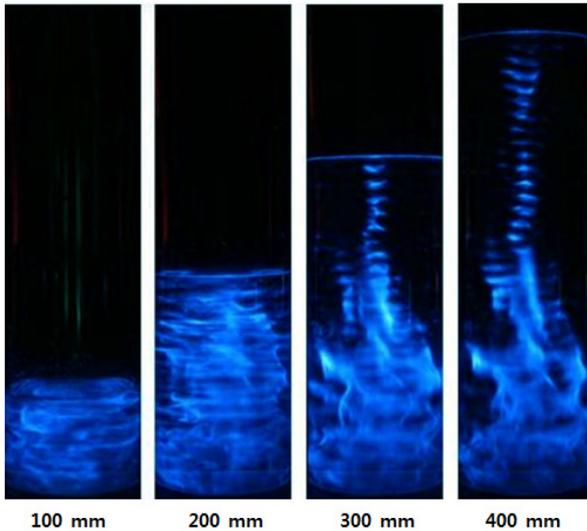


Fig. 5. Sonochemiluminescence (SCL) images for various liquid height conditions including 100, 200, 300, and 400 mm for 74 kHz.

증가에 따른 화학적 반응의 증진을 정상파 형성의 활성화로 설명하였는데, 정상파 조건에서 캐비테이션 기포가 보다 안정적으로 거동하게 되어 산화반응을 일으킬 수 있는 라디칼 등을 매우 안정적으로 공급할 수 있다고 보고하였다(Son et al., 2011; Lee et al., 2011).

### 3.3. 초음파화학 반응 활성화 영역의 시각화

정상파 등과 같은 초음파 반응기 내부의 음장 형성을 육안으로 확인하기 위하여 100, 200, 300, 400 mm 등의 액상 수위 조건에서 루미놀 용액을 이용한 초음파화학 발광 이미지를 촬영하였다. Fig. 5와 같이 루미놀은 OH 라디칼 등의 산화 라디칼과 반응하여 빛을 내게 되는데, 밝게 빛나는 부분은 초음파 캐비테이션 현상에 의한 산화 반응이 매우 활발하게 일어나고 있는 것을 나타낸다. 수위가 증가함에 따라 전체 부피 대비 밝게 빛나는 영역은 줄어들지만 300 mm 및 400 mm 조건과 같이 수면 근처에서 진행파와 반사파가 만나 형성되는 여러 개의 띠와 같은 형태의 정상파 영역이 확인되었다. 밝게 빛나는 띠 형태의 활성화 영역 사이의 거리는 이론적으로  $1/2 \lambda$  으로 알려져 있으며, 본 연구에서도 74 kHz에 대한 한파장(20 mm)의 절반 수준인 10 mm 정도로 확인되었다. 정상파 영역에서는 캐비테이션 현상이 비교적 안정적이며 지속적으로 이루어져 OH 라디칼과 같은 산화 라디칼을 안정적으로 공급하게 되어 높은 수준의 초음파 산화 반응이 일어날 수 있다(Son et al., 2011; Lee et al., 2011; Asakura et al., 2008).

캐비테이션 현상의 시각화를 통해 수위 변화에 따라 내부에 형성되는 음장의 형태 및 성격이 달라지는 것을 직접적으로 확인할 수 있었으며, 또한 수위가 증가함에 따라 수면 근처에서 안정적인 라디칼 공급원 역할을 수행하는 정상파 영역이 보다 활성화 되는 것을 관찰하였다. 이상의 시각화 내용은 앞서 초음파화학 산화반응이 에너지 밀도가 상대적으로 매우 낮은 높은 수위 조건에서도 Cavitation yield와 같은 정량적 지표가 지속적으로 높은 수준을 유지하는 것에 대한 설명을 뒷받침한다고 할 수 있다.

이러한 동일한 유입에너지 조건에서의 수위 및 부피 증가로 인한 초음파 화학 반응의 증진 현상은 초음파 반응기의 대형화를 이끌어 낼 수 있는 중요한 결과로 판단되었다. 기존의 연구에서도 다양한 주파수 조건에서 수위 증가로 인한 초음파 화학적 효과 증진에 대한 보고가 일부 이루어졌는데(Son et al., 2011; Lee et al., 2011; Asakura et al., 2008), 초음파 음원(진동자)에서 수면까지의 거리 변화뿐만 아니라 조사 방향과 수직 방향인 측면으로 어느 정도까지의 범위까지 단일 진동자로 영향을 미칠 수 있는지 등에 대한 연구도 필요할 것으로 고려되었다. 본 연구에서는 74 kHz, 130 W 조건에서 단일 진동자가 영향을 미칠 수 있는 범위는 Fig. 4에 나타난 바와 같이 110 mm의 지름을 갖는 원통형 반응기에서  $20 \lambda$  (400 mm 및 약 3.8 L) 이상이 될 것으로 판단되었다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 74 kHz 초음파 반응기를 이용하여 초음파 음원(진동자)에서 수면까지의 거리인 수위를 2~20  $\lambda$  (40~400 mm 및 0.33~3.8 L)로 변화시키며 초음파 화학 반응의 정도를 KI 방법을 이용하여 정량적으로 비교 분석하였다. 수위가 증가함에 따라 액상 부피가 증가하여 동일한 에너지 조건(130 W)에서 에너지 밀도가 지속적으로 감소함에도 불구하고 초음파 감쇠 현상으로 인한 열량에너지 측정치는 지속적으로 증가하였다. 또한 초음파 캐비테이션 산화 반응의 생성물인  $I_3^-$  이온의 발생량이 지속적으로 증가하는 현상 역시 확인하였다. 이는 모두 수위 변화에 따라 내부에 생성되는 음장의 형태 및 성격이 다르게 변화되기 때문으로, 루미놀 실험을 통해 이를 시각적으로 관찰할 수 있었다. 특히 캐비테이션 현상이 안정적으로 일어난다고 알려진 정상파 영역을 높은 수위 조건에서 보다 많이 확인할 수 있었는데, 이러한 정상파 영역의 형성이 낮은 에너지 밀도 조건에서도 높은 수준의 초음파 산화 반응을 얻을 수 있는 원인이 되는 것으로 판단하였다.

## 사 사

본 연구는 환경부 “토양지하수오염방지기술개발사업(The GAIA Project, (2012000550003)) 복합오염녹색연구단 과제”로 지원받았습니다.

## References

- Adeuyi, Y.G., 2001, Sonochemistry: Environmental science and engineering applications, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **40**, 4681-4715.
- 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**, 244-250.
- Cui, M., Son, Y., Lim, M., Na, S., and Khim, J., 2010, Elimination of two hormones by ultrasonic and ozone combined processes, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **49**, 07HE09.
- Esplugas, S., Bila, D.M., Krause, L.G.T., and Dezotti, M., 2007, Ozonation and advanced oxidation technologies to remove endocrine disrupting chemicals (EDCs) and pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in water effluents, *J. Hazard. Mater.*, **149**, 631-642.
- Gogate, P.R., 2007, Application of cavitation reactors for water disinfection: Current status and path forward, *J. Environ. Manage.*, **85**, 801-815.
- Lee, J., Ashokkumar, M., Yasui, K., Tuziuti, T., Kozuka, T., Towata, A., and Iida, Y., 2011, Development and optimization of acoustic bubble structures at high frequencies, *Ultrason. Sonochem.*, **18**, 92-98.
- Mason, T.J. and Lorimer, J.P., 2002, *Applied Sonochemistry-The Uses of Power Ultrasound in Chemistry and Processing*, Wiley-VCH Verlag GmbH: Weinheim.
- Mehrjoui, M., Müller, S., and Möller, D., 2015, A review on photocatalytic ozonation used for the treatment of water and wastewater, *Chem. Eng. J.*, **263**, 209-219.
- Pétrier, C., Combet, E., and Mason, T., 2007, Oxygen-induced concurrent ultrasonic degradation of volatile and non-volatile aromatic compounds, *Ultrason. Sonochem.*, **14**, 117-121.
- Remya, N. and Lin, J.G., 2011, Current status of microwave application in wastewater treatment-A review, *Chem. Eng. J.*, **166**, 797-813.
- 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**, 4096-4103.
- Son, Y., Lim, M., Khim, J., and Ashokkumar, M., 2012, Attenuation of UV light in large-scale sonophotocatalytic reactors: The effects of ultrasound irradiation and TiO<sub>2</sub> concentration, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **51**, 232-239.
- Teo, B.M., Chen, F., Hatton, T.A., Grieser, F., and Ashokkumar, M., 2009, Novel one-pot synthesis of magnetite latex nanoparticles by ultrasound irradiation, *Langmuir*, **25**, 2593-2595.
- Torres, R.A., Nieto, J.I., Combet, E., Prier, C., and Pulgarin, C., 2008, Influence of TiO<sub>2</sub> concentration on the synergistic effect between photocatalysis and high-frequency ultrasound for organic pollutant mineralization in water, *Appl. Catal. B-Environ.*, **80**, 168-175.
- Yao, P., Choo, K.H., and Kim, M.H., 2009, A hybridized photocatalysis-microfiltration system with iron oxide-coated membranes for the removal of natural organic matter in water treatment: Effects of iron oxide layers and colloids, *Wat. Res.*, **43**, 4238-4248.