

《原著》

## 이중 초음파 조사 시스템에서 진동부 사이의 거리가 초음파 화학 반응에 미치는 영향

김은경 · 손영규\*

국립금오공과대학교 환경공학과

## The Effect of Distance between Two Transducers on Sonochemical Reactions in Dual Irradiation Systems

Eunkyung Kim · Younggyu Son\*

Department of Environmental Engineering, Kumoh National Institute of Technology

### ABSTRACT

Many researchers have studied the effectiveness of ultrasound in chemical and environmental engineering fields including material synthesis, pollutant removal, cleaning, extraction, and disinfection. Acoustic cavitation induced by ultrasound irradiation in aqueous phase can cause various sonophysical and sonochemical reactions without any chemicals. However most of the previous studies focused only on the relationships between ultrasonic conditions and the results of sonochemical reactions in lab-scale sonoreactors. As a results of this, only a few studies have been devoted to design and optimization of industrial scale sonoreactors. In this study, the effect of the distance between two opposite transducer modules on sonochemical reactions was investigated in single and dual irradiation systems (334 kHz) for four distances including 50, 100, 150, and 200 mm using KI dosimetry. It was found that the dual irradiation systems provided higher performance in terms of the zeroth reaction coefficient and the cavitation yield compared to the single irradiation systems. The sonochemiluminescence (SCL) images for the visualization of the cavitation field showed that cavitation active zone was larger and sonochemical reaction intensity was much higher in the dual irradiation system than in the single irradiation system.

**Key words :** Sonochemical reaction, Single irradiation, Dual irradiation, Cavitation yield, Sonochemiluminescence (SCL)

### 1. 서 론

일정 강도 이상의 초음파를 액상에 조사하면 액상에 존재하던 미세 기포 혹은 초음파에 의해 형성되는 마이크로 크기의 캐비테이션 버블(cavitation bubble 혹은 cavity)이 양압과 음압을 반복적으로 받아 성장하고, 일정 크기에 도달하면 폭발하는 캐비테이션 현상(cavitation event)이 발생하게 된다. 이 때 캐비테이션 버블 내부는 이론적으로 고온(5000 K), 고압(1000 atm)의 극한 조건으로, 오염 물질이 캐비테이션 버블 내부로 휘발되어 처리되거나(열분해, pyrolysis), 버블 내부로 들어온 물 분자나 산소 분자

가 열분해 되어 발생한 다양한 종류의 라디칼이 버블 폭발로 인해 외부로 방출되면서 버블 주변의 오염 물질을 산화시키게 된다(라디칼 산화, radical oxidation) (Adewuyi, 2001; Son et al., 2011; Lim et al., 2011). 이러한 두 가지의 초음파 화학적 효과를 이용하여 액상에 존재하는 여러 종류의 유기무기 오염 물질을 처리할 수 있다는 것이 지속적으로 보고되고 있으며, 단독 혹은 오존, 자외선, 광촉매, 과산화수소 등 다른 고도산화처리공정과의 혼합 공정에서 최적화된 조건을 찾기 위한 연구들이 진행되고 있다(Torres et al., 2008; Son et al., 2009a; Son et al., 2012; Lim et al., 2009).

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

원고접수일 : 2013. 9. 3 심사일 : 2013. 10. 17 게재승인일 : 2013. 10. 17  
질의 및 토의 : 2013. 12. 31 까지

초음파 단독 공정을 적용하는 경우 초음파 화학반응을 향상시키기 위해 다양한 방법이 적용되고 있으며, 그 중 다중 진동부를 적용하는 연구가 활발하게 논의되고 있다. 다중 초음파를 적용하게 되면 초음파 간에 영향으로 생성된 강한 강도를 가진 안정적인 음장(Sound energy field)이 초음파 반응기 내부에 넓게 형성되어 단일 진동부 시스템과 비교하여 상대적으로 높은 효율을 보이게 된다 (Kanthale et al., 2008; Son et al., 2010; Lee and Oh, 2010).

다중 초음파 진동부를 이용했을 때, 진동부 배열의 여러 조합을 고려하여 최적 조건을 도출하는 연구들도 활발히 진행되고 있는데, Zhao et al.(2009)은 주파수 28 kHz의 초음파를 이용했을 때 초음파 진동부를 마주보게 배열하는 경우와 직각으로 배열하는 경우를 실험하여 초음파 화학 반응의 효율이 달라질 수 있다는 것을 확인하였다. 또한 Lee and Oh(2010)은 주파수 28, 584, 970 kHz의 초음파를 사용했을 때, 초음파 주파수 조합에 따라 초음파 화학 반응의 효율을 높일 수 있음을 보고하였다.

이러한 다중 초음파 진동부를 이용한 연구들은 대부분 하나의 고정된 반응기에서 연구가 이루어지고 있다. 하지만 초음파 공정은 초음파 반응기의 재질, 크기, 반사판의 유무 등과 같은 초음파 반응기의 기본 설계인자에 의해 효율이 크게 달라질 수 있다. 특히 진동부에서 반사판까지의 초음파 조사거리 혹은 마주보는 진동부와 진동부 사이의 거리에 따라 음장이 다르게 형성되어 초음파 화학 반응의 결과가 크게 달라질 수 있기 때문에 초음파 조사거리 등과 관련된 기본 설계인자를 초음파 반응기 설계 연구에서 우선적으로 고려해야 한다(Son et al., 2011).

Son et al.(2011)과 Asakura et al.(2008)의 연구를 살펴보면 단일 초음파 진동부 조건에서 초음파 조사거리에 따라 초음파의 음장이 형성되는 형태가 다르며 그에 따라 초음파 화학 반응의 효율도 크게 달라짐을 확인할 수 있다. 다중 초음파 진동부를 설치했을 때 역시 초음파 조사거리에 따라서 음장 형성이 달라질 수 있으므로 초음파 화학 반응의 효율뿐만 아니라 단일 초음파 진동부와 비교했을 때 시너지 효과 역시 다르게 나타날 것이라고 예상할 수 있다.

그러므로 본 연구는 이중 초음파 조사(Dual ultrasound irradiation) 반응기의 기초 설계 연구로서 334 kHz의 초음파를 조사하는 진동부를 반응기 측면에 마주보는 형태로 설치하고, 두 진동부 사이의 거리를 변화시켰을 때 형성되는 음장의 변화와 그에 따른 초음파 화학적 반응을 정량적, 정성적으로 비교 분석하고자 한다. 본 연구의 결과

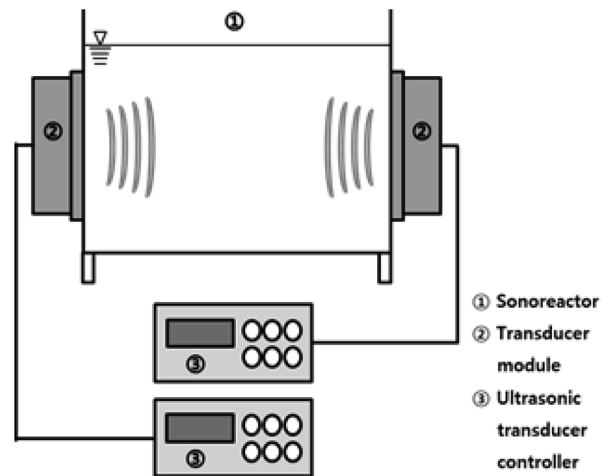


Fig. 1. A schematic diagram of the experimental set-up.

는 단독 또는 이중 조사형 초음파 반응기 설계 연구분야에서 기초자료로 활용이 예상된다.

## 2. 실험 방법

### 2.1. 초음파 반응기 구성

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 이중 조사 초음파 반응기의 모식도로, 반응기는 사각의 아크릴 반응기와 반응기의 양 측면에 마주보게 설치된 두 개의 초음파 진동부로 구성된다. 적용한 반응기는 가로길이 및 높이가 각각 68과 250 mm이며, 진동부 사이 거리인 세로길이는 50, 100, 150, 200, 250 mm를 적용하였다. 본 연구에서 사용한 초음파 기기(Flexonic, Mirae Ultrasonic Tech., Korea)의 진동부는 3개의 PZT 진동자(각각의 지름 50 mm)가 장착된 것으로, 각 거리 조건 모두에서 진동부당 유입 에너지는 240 W로 하였고, 이중 조사 시스템의 경우에는 총 480 W의 에너지가 고정적으로 유입되도록 하였다. 조사 주파수는 334 kHz를 적용하였다.

### 2.2. 초음파 화학적 반응의 분석

이중 조사 시스템에서의 두 진동부 사이의 거리 혹은 단일 조사 시스템에서의 한쪽 진동부와 반사판 역할을 하는 반대쪽 진동부 사이의 거리를 변화시켜 반응기 내부의 초음파 화학적 반응으로 생성되는 라디칼을 정량적으로 비교 분석하였다. 라디칼을 정량화하기 위한 방법으로 KI 분석 방법을 이용하였는데, KI 용액에 초음파를 조사하면  $\Gamma$  이온(Iodide ion)이 캐비테이션 현상에 의해 발생하는 OH 라디칼 등의 산화 라디칼에 의해  $I_2$ (Iodine)로 산화되고, 발생한  $I_2$ 는 주변에 과량으로 존재하는  $\Gamma$  이온과 반응

**Table 1.** Power density for each distance condition in single and dual ultrasound irradiation systems

Experimental condition	Distance from the transducer to the opposite wall or between two transducers					
	50 mm	100 mm	150 mm	200 mm	250 mm	
Solution volume (L)	1.42	2.58	3.70	4.83	5.93	
Power density (W/L)	Single irradiation	169	93	65	50	41
	Dual irradiation	338	186	130	99	81

**Table 2.** Zero-order reaction kinetic coefficient for each distance condition in single and dual ultrasound irradiation systems

Distance (mm)	Zero-order reaction kinetic coefficient (mg/L/min)		Enhancement <sub>k</sub>
	Single irradiation	Dual irradiation	
50	$1.44 \times 10^{-5}$ ( $R^2 = 0.996$ )	$4.14 \times 10^{-5}$ ( $R^2 = 0.999$ )	2.88
100	$4.86 \times 10^{-6}$ ( $R^2 = 0.988$ )	$2.21 \times 10^{-5}$ ( $R^2 = 0.998$ )	4.55
150	$2.64 \times 10^{-6}$ ( $R^2 = 0.997$ )	$1.18 \times 10^{-5}$ ( $R^2 = 0.982$ )	4.47
200	$1.38 \times 10^{-6}$ ( $R^2 = 0.976$ )	$6.99 \times 10^{-6}$ ( $R^2 = 0.995$ )	5.07
250	$1.08 \times 10^{-6}$ ( $R^2 = 0.994$ )	$4.78 \times 10^{-6}$ ( $R^2 = 0.998$ )	4.43

하여  $I_3^-$  이온(Triiodide ion)을 형성하게 된다(Son et al., 2011). 형성된  $I_3^-$  이온의 농도는 UV-vis spectrophotometer (SPECORD 40, Analyticjena, Germany)를 이용하여 파장 350 nm에서 정량분석 하였다(Son et al., 2011; Asakura et al., 2008). 사용한 KI 용액의 농도는 10 g/L이다.

### 2.3. 반응속도 및 cavitation yield 분석

단일 및 이중 조사의 각 거리 조건에 따른 초음파 화학 반응의 비교 분석을 위해 KI 분석방법을 이용하여 정량한  $I_3^-$  이온 농도를 이용하여 반응차수 및 그에 따른 반응속도상수를 산정하였다.

반응속도 분석은 부피가 변화하는 조건을 고려할 수 없어 대상 부피의 변화 혹은 유입 에너지 밀도의 변화를 고려한 초음파 화학적 반응의 비교분석을 위해 캐비테이션 현상에 의해 생성되는 초음파 반응 생성물의 양(mass)을 기반으로 하는 cavitation yield 개념을 도입하였고 이는 다음의 식 (1)과 같이 표현 된다(Son et al., 2011).

$$Cavitation\ yield = \frac{CV_L}{P_E T_I} \quad (1)$$

여기서  $C$ 는 반응생성물의 농도로 본 연구에서는 생성된  $I_3^-$  이온의 농도,  $V_L$ 은 반응 용액의 부피,  $P_E$ 는 반응에 사용된 유입 전기 에너지,  $T_I$ 는 초음파 조사시간으로 단위 조사시간을 의미한다.

### 2.3. 초음파 화학 반응 영역의 시각화

초음파 반응기 내에서 일어나는 초음파 화학 반응 영역에 대한 시각화를 위하여 루미놀 용액을 이용한 초음파

화학 발광기법(Sonochemiluminescence, SCL)을 사용하였다. 루미놀 용액에 초음파를 조사하게 되면 캐비테이션 현상에 의해 생성되는 OH 라디칼과 같은 산화제와 루미놀이 반응하여 빛이 발생하게 되며, 이 때 발생하는 빛을 암실 조건에서 노출 기능이 있는 디지털 카메라(EOS 400D, Canon, Japan)를 이용하여 저장 및 시각화하였다. 각 조건에서의 노출 시간은 1분으로 모두 동일하게 적용하였다. 루미놀 용액은 0.1 g/L 루미놀(3-aminophthalhydrazide)과 1 g/L의 NaOH를 3차 증류수에 넣어 혼합하여 제조하였다(Son et al., 2011).

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 반응계수의 비교

각 조건에서의 액상 부피 및 에너지 밀도를 Table 1에 나타내었다. 에너지 밀도는 단위 부피 당 사용된 유입 에너지를 의미하며, 식 (2)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Power\ density = \frac{P_E}{V_L} \quad (2)$$

예비실험을 통해  $I_3^-$  이온의 생성이 시간에 대해 선형적으로 이루어진다는 것을 확인하였으며, 이를 근거로 본 실험 조건에서의  $I_3^-$  이온의 생성 반응은 0차 반응을 따르는 것으로 가정하였다. 이는 초음파 조사시간 동안 캐비테이션 반응에 의해 생성되는 산화 라디칼에 의해 지속적이며 안정적으로 산화반응이 일어날 수 있도록 반응물인  $I^-$  이온의 양을 충분히 주입하였기 때문인 것으로 판단되었다. Table 2에 각 조건에서의 0차 반응 계수를 정리하

였으며, 반응 계수 산정에 따른  $R^2$  값 및 식 (3)을 이용하여 각 거리조건에서 단독 조사에 비해 이중 조사 시 향상된 정도를 같이 나타내었다.

$$Enhancement_k = \frac{k_{dual\ irradiation}}{k_{single\ irradiation}} \quad (3)$$

여기서  $k_{dual\ irradiation}$ 과  $k_{single\ irradiation}$ 은 각각 단독 및 이중 조사조건에서의 0차 반응 계수를 의미한다.

단독 및 이중 조사에서 반응 계수의 비교 분석 결과 동일한 에너지 유입 조건에서 두 진동부 사이의 거리가 증가함에 따라 0차 반응 계수가 감소함을 확인하였다. 이는 Table 1에 나타낸 바와 같이 거리증가로 부피가 증가하고, 결과적으로 캐비테이션 현상을 일으키게 되는 초음파의 유입에너지 밀도가 크게 감소하기 때문인 것으로 판단된다. 단독 조사에 비해 이중 조사의 경우 유입 에너지가 2배 더 소비가 되나, 0차 반응 계수의 비교 결과 모든 거리 조건에서 2배 이상의 향상 효과를 얻을 수 있었으며 특히 100 mm 이상의 거리 조건에서 4~5배 수준의 향상 효과가 확인되어, 일정 규모 이상의 초음파 반응기를 설계 및 제작하는 것이 이중 초음파 조사 조건에서 초음파 화학적 효과를 향상시킬 수 있을 것으로 생각된다.

### 3.2. Cavitation yield의 비교

반응 계수의 비교를 통해 각 거리조건에서 단독 조사와 이중 조사 시스템의 정량적 비교가 가능하나, 반응 대상 액상의 부피 변화로 인해 거리 조건에 대한 직접적인 정량 비교 평가는 어려울 것으로 판단되었다. 즉, 높은 유입 에너지 밀도 조건인 작은 부피에서는 생성물의 농도 증가가 크게 관찰되어 반응 계수는 가장 작은 부피에서 가장 높게 나타난다. 그러나 큰 부피에서는 유입 에너지 밀도가 작아져 생성물의 농도 증가가 크지 않게 되며, 그로 인해 반응 계수는 작게 될 것이다. 그러나 대상 부피의 차이가 있기 때문에 전체 초음파 화학적 반응의 정도가 어느 정도 수준인지 정량적으로 확인하기는 어렵다.

Cavitation yield는 단위 유입 에너지 및 단위 조사시간당 초음파 화학적 반응 생성물의 양 혹은 단위 유입 에너지 밀도 및 단위 조사시간당 초음파 화학적 반응 생성물의 농도를 나타내므로 부피가 변화하는 조건에서의 정량적 비교분석에 적합한 방법으로 평가되고 있다. 각 조건에서의 cavitation yield 값을 산정한 결과와 이중 조사 시 향상된 효과의 비교 분석을 위해 단일 조사 시스템의 결과를 산술적으로 2배한 결과를 Fig. 2에 함께 나타내었으며, 이중 조사로 인한 cavitation yield의 정량적 향상

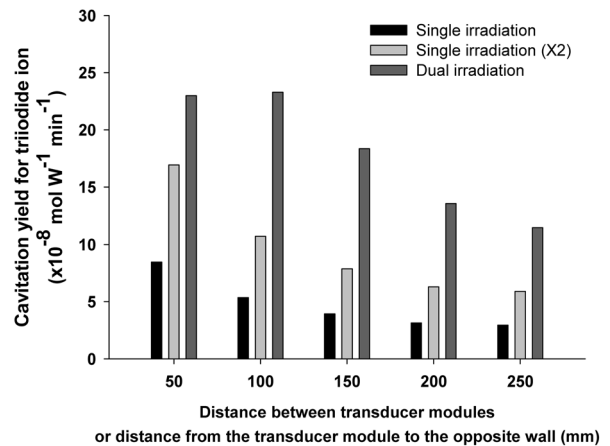


Fig. 2. The variations of cavitation yields for single and dual ultrasound irradiation in five distance conditions (50, 100, 150, 200, and 250 mm).

Table 3. Enhancement of cavitation yield at each distance condition

Distance (mm)	50	100	150	200	250
Enhancement <sub>y</sub>	2.72	4.35	4.66	4.31	3.88

효과를 Table 3에 나타내었다. Cavitation yield의 향상 효과는 다음의 식 (4)을 이용하였다.

$$Enhancement_y = \frac{Y_{dual\ irradiation}}{Y_{single\ irradiation}} \quad (4)$$

여기서  $Y_{single\ irradiation}$ 과  $Y_{dual\ irradiation}$ 은 각각 단독 조사 및 이중 조사 조건에서의 cavitation yield를 의미한다.

Fig. 2에 나타낸 바와 같이 단독 조사의 경우 조사거리 50 mm에서 가장 높은 cavitation yield 값을 나타내었고, 이중 조사의 경우 100 mm에서 가장 높은 cavitation yield 값을 나타내었다. 그러므로 단독 조사의 50 mm와 이중 조사의 100 mm 조사거리가 본 연구에서 적용한 조사거리 조건 중 초음파 반응을 극대화할 수 있는 조사거리인 것으로 확인되었다.

전반적으로 cavitation yield 값 역시 반응 계수와 마찬가지로 조사거리가 길어져 부피가 증가함에 따라 점차적으로 감소하는 경향을 나타내고 있다. 일반적인 화학반응의 경우 동일한 반응시간 및 유입에너지 조건에서 대상 부피가 증가하면 반응을 일으키는 유입에너지 밀도는 부피에 비례하여 감소하고 이에 따라 반응물의 생성 농도가 감소하여 결과적으로 부피 증가와 농도 감소의 상쇄효과가 발생하여 동일한 생성물의 양을 얻는 것이 이론적으로 가능할 것이다.

그러나 실제 반응의 경우 대상 부피가 증가하면 동일 에너지 조건에서 에너지 전달 효율 문제, 혼합 문제, 반응을 일으키기 위한 최소 에너지 조건 문제 등으로 인해 이론적인 예상치보다 낮은 반응 결과를 얻게 되는 것이 일반적이다. 특히 소리 에너지의 경우 이러한 저감 요인 이외에도 매질과의 직접적인 접촉 등으로 인해 기계 에너지(Mechanical energy)가 열에너지(Heat energy)로 전환되는 등의 감쇄 현상(Sound attenuation or absorption)이 일어나게 되어 부피 증가로 인한 추가적인 저감 효과가 발생하게 된다(Mason and Lorimer, 2002). 본 연구에서도 에너지 전달 효율 저하, 소리 에너지 감쇄 현상 감소 등으로 인해 초음파 반응 생성물의 양이 부피가 증가할수록 감소하는 것으로 나타났다.

본 연구결과와는 다르게 Son et al.(2011)는 조사거리가 증가하면서 cavitation yield가 증가하는 경우를 보고하였는데, 이러한 현상이 일어나는 원인은 반응기 내부에 형성되는 소리 에너지 장(sound energy field)이 부피 혹은 조사거리가 증가함에 따라 진행파(traveling wave field)에서 띠 형태의 정상파(standing wave field)로 변화되어 보다 안정적인 캐비테이션 현상이 일어나기 때문인 것으로 주장하였다. 그러나 이 연구는 35 kHz의 낮은 주파수 조건에서 적용하여 초음파 파장( $\lambda$ ) 길이의 수 배 이내로 조사거리가 적용되는 한정적인 범위이기 때문에 이를 고주파수 영역까지 확장하여 일반화하기는 관련 연구 부족으로 어려운 것으로 판단되었다.

유사한 연구 결과를 보고한 Asakura et al.(2008)는 다

양한 주파수 및 조사거리 조건에서 cavitation yield가 가장 높게 나올 때의 조사거리를 산정할 수 있는 경험식을 제안하였는데, 이를 다음의 식 (5)에 나타내었다. 이 경험식은 하단부에서 상부의 수면으로 초음파가 수직 조사되는 시스템에서 얻어진 경험식이며 타 연구자의 유사한 실험 조건에서 유효한 것으로 확인되었다.

$$h_{peak(mm)} = \frac{23,400}{f} - 22.9 \tag{5}$$

여기서  $h_{peak}$ 는 cavitation yield가 최대로 나올 때의 조사거리이며,  $f$ 는 초음파 주파수를 나타낸다. 이 경험식을 본 연구에서 이용한 초음파 주파수 334 kHz를 적용하면 cavitation yield가 최대로 나올 때의 조사거리는 47 mm로 산정되므로 cavitation yield가 조사거리에 따라 증가하지 않고 점차적으로 감소하는 것이 경험식으로 예측 가능할 수 있음이 확인되었다.

Table 3에 나타낸 바와 같이 단독 조사보다 이중 조사에서 보다 큰 cavitation yield를 모든 거리 조건에서 얻을 수 있었는데, 특히 100 mm 이상의 조사거리 조건에서 약 4배 이상의 증진 효과를 확인하였다. 이렇게 이중 조사 조건에서 초음파 화학 반응이 보다 활발하게 일어나는 이유는 반응기 내부 음장이 비교적 균등 분포되어 사각지대를 감소시킴으로써 더 많은 캐비테이션 현상이 발생하기 때문인 것으로 판단되었다. 이를 확인하기 위해 다음과 같이 초음파 반응기 내부의 형성 음장에 대한 시각화 실험을 수행하였다.

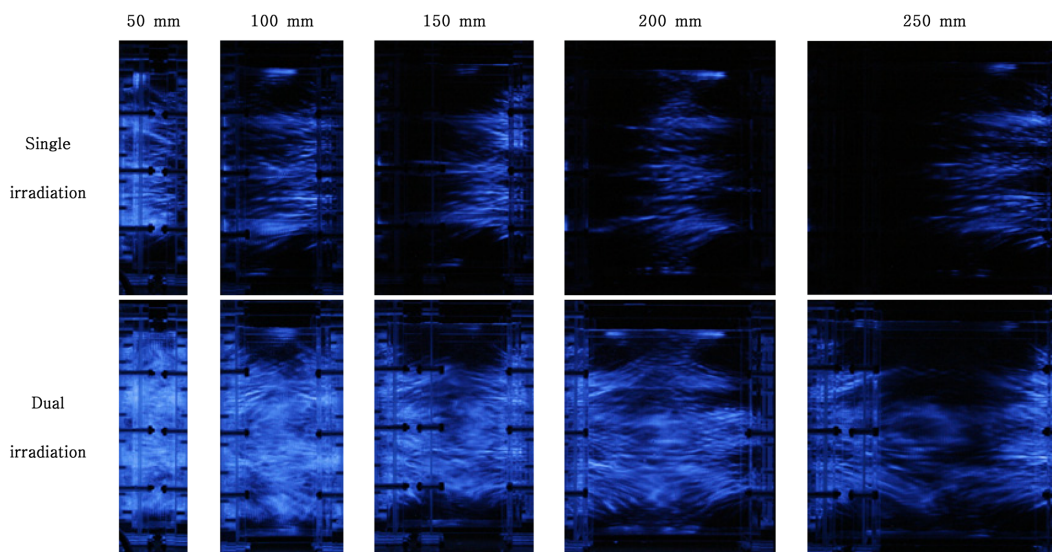


Fig. 3. Sonochemiluminescence images for single and dual ultrasound irradiation in five distance conditions (50, 100, 150, 200, and 250 mm).

### 3.3. 초음파 반응기 내부의 음장 형성 시각화

루미놀 용액을 이용한 초음파 화학 발광기법(SCL)을 적용하여 시각화한 형성 음장을 Fig. 3에 나타내었다. 이미 지 비교 결과 단독 조사의 경우 작은 부피 조건에서는 반응기 전 영역에서 캐비테이션 반응이 발생하나 부피가 증가하면서 전체 대상 영역 대비 캐비테이션 반응이 활성화되는 영역이 매우 작아지는 것을 확인할 수 있었다. 이론적으로 초음파 감쇄 계수는 주파수 제곱에 비례하므로 고주파수의 소리 에너지를 적용하는 경우 더 큰 감쇄 현상이 일어나는 것으로 알려져 있다. 본 연구에 적용한 334 kHz의 주파수는 낮은 영역대의 20~40 kHz에 비해 비교적 높기 때문에 상대적으로 매우 큰 감쇄 현상이 일어날 것이며(Son et al., 2009b), 이는 250 mm 거리 조건 시 단독조사에서도 확인할 수 있다.

이러한 한계로 인해 상대적으로 큰 초음파 반응기에 고주파수를 적용하기는 어려운 것으로 보고되었다. 그러나 본 연구의 이중 조사 결과를 살펴보면 부피가 증가하면서 활성화 영역 비율이 감소하는 동일한 현상이 발생하나 단독 조사와 비교하여 활성화 영역이 2배 이상 확장되는 것으로 나타났다. 또한 산화반응으로 인한 빛의 강도와 밀도가 단독 조사 시 보다 높은 것으로 확인되었다. 이는 고주파수 이용 초음파 반응기에 대상 부피를 보다 확장할 수 있는 근거로 본 연구 결과를 이용하여 보다 큰 초음파 반응기의 설계 및 적용이 가능할 것으로 판단된다. 그러나 보다 체계적인 설계를 위해 이러한 향상 효과에 대한 원인 규명 연구가 필요하여, 반응기의 나머지 측면을 고려한 삼중 혹은 사중 조사에 대한 연구 역시 이루어져야 할 것이다.

## 4. 결 론

이중 조사 초음파 반응기의 적용 가능성을 평가하기 위해 진동부 사이의 거리를 변화시켜 초음파 화학 반응을 정량적으로 분석한 본 연구는 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. KI 분석 방법을 이용한 반응 속도 분석 결과, 조사 거리가 증가함에 따라 반응 계수가 지속적으로 감소하였다. 단일 조사와 이중 조사의 반응 계수를 비교한 결과 조사거리 100 mm 이상에서 4~5배의 증진효과가 있는 것으로 확인되었다.
2. 반응속도 분석은 부피가 변화하는 조건에서 각 조건의 결과를 비교하는데 적합하지 않기 때문에 cavitation yield 산정식을 도입하여 각 거리 조건에서의 초음파 반응

생성물의 정량적 비교를 수행하였다. 이중 조사 시 모든 거리 조건에서 단일 조사의 cavitation yield 값의 2배보다 많은 cavitation yield 값을 나타내었으며, 반응 속도 분석과 마찬가지로 100 mm 이상의 조건에서 증진효과가 약 4배 수준으로 확인되었다.

3. 이중 조사에서 초음파 반응이 단일 조사 보다 활성화되는 이유를 확인하기 위해 반응기 내부 음장의 시각화를 수행한 결과 이중 조사로 인해 초음파 반응의 활성화 영역이 확대되며, 반응의 정도가 더 강해지는 것을 확인하였다.

4. 적용 가능한 부피가 상대적으로 작은 고주파를 이용하는 초음파 반응기의 대상 부피 확장을 위해 이중 주파수를 적용하는 것이 합리적인 방안일 것으로 판단되었다. 초음파 반응을 극대화할 수 있는 이중 조사 조건의 조사 거리는 100 mm이며, 이중 조사로 인한 증진 효과가 높게 나타나는 조사거리는 100~200 mm로 확인되었다.

## 사 사

본 연구는 금오공과대학교학술연구비에 의하여 연구된 논문입니다.

## 참 고 문 헌

- Adewuyi, Y.G., 2001, Sonochemistry: Environmental Science and Engineering Applications, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **40**(22), 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**(3), 244-250.
- Kanthale, P.M., Brotchie, A., Ashokkumar, M., and Grieser, F., 2008, Experimental and theoretical investigations on sonoluminescence under dual frequency conditions. *Ultrason. Sonochem.*, **15**(4), 629-635.
- Lee, M. and Oh, J., 2010, Sonolysis of trichloroethylene and carbon tetrachloride in aqueous solution, *Ultrason. Sonochem.*, **17**(1), 207-212.
- Lim, M., Son, Y., Cui, M., and Khim, J., 2009, Effects of Hydrogen Peroxide and Frequency for the Sonochemical Degradation of Aqueous Phenol, *J. J. Appl. Phys.*, **48**(7), 07GH07.
- Lim, M., Son, Y., and Khim, J., 2011, Frequency effects on the sonochemical degradation of chlorinated compounds. *Ultrason. Sonochem.*, **18**(1), 460-465.

- Mason, T.J. and Lorimer, J.P., 2002, Applied Sonochemistry-The Uses of Power Ultrasound in Chemistry and Processing, Wiley-VCH Verlag GmbH: Weinheim.
- Son, Y., Lim, M., Cui, M., and Khim, J., 2010, Estimation of Sonochemical Reactions under Single and Dual Frequencies Based on Energy Analysis, *J. Appl. Phys.*, **49**(7), 07HE02.
- Son, Y., Lim, J., Cui, M., Lim, M., Kweon, B.Y., and Khim, J., 2009a, Application of Ultrasound and Ozone for the Removal of Aqueous Tannin, *J. J. Appl. Phys.*, **48**(7), 07GH05.
- Son, Y., Lim, M., and Khim, J., 2009b, Investigation of acoustic cavitation energy in a large-scale sonoreactor, *Ultrason. Sonochem.*, **16**(4), 552-556.
- 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.
- 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**(1), 232-239.
- 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**(1-2), 168-175.
- Zhao, L., Ma, J., and Zhai, X., 2009, Synergetic effect of ultrasound with dual fields for the degradation of nitrobenzene in aqueous solution, *Environ. Sci. Technol.*, **43**(13), 5094-5099.