

초음파 캐비테이션에 의해 생성되는 라디칼의 발생량 평가를 위한 소노루미네센스 발광강도의 측정

Measurement of sonoluminescence intensity for evaluation of the amount of radical generated by ultrasonic cavitation

김정순,¹ 김무준^{2†}

(Jungsoon Kim¹ and Moojoon Kim^{2†})

¹동명대학교 전기공학과, ²부경대학교 물리학과

(Received December 26, 2022; accepted January 20, 2023)

초 록: 이산화티탄 현탁액에서 초음파 캐비테이션 충격파에 의해 발생하는 하이드록실 라디칼($\cdot\text{OH}$) 및 슈퍼옥사이드 음이온 라디칼($\cdot\text{O}_2^-$)은 살균 및 소독 작용을 할 수 있어 활용 가치가 높다. 화학첨가물이 없는 살균 방법으로서의 실용화를 위하여 본 연구에서는 이산화티탄 현탁액에 방사된 강력 초음파에 의해 발생하는 라디칼의 발생 정도를 평가하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법에서는 초음파 붕괴에너지에 의해 발광하는 소노루미네센스 현상을 활용하였고, 소노루미네센스에 의한 빛 에너지의 양을 통해 라디칼 발생 정도를 평가하였다. 그 결과, 이산화티탄의 농도가 0.02 wt%인 낮은 농도에서도, 이산화티탄이 없는 경우보다 5배 이상 높은 빛 에너지가 수광되었다. 그 이후, 농도가 0.1 wt%씩 증가함에 따라 발생하는 소노루미네센스의 광도는 약 14.8×10^{-12} lm씩 선형적으로 증가하였다. 따라서 이산화티탄 현탁액에 강력 초음파를 방사하여 발생하는 라디칼은, 주어진 농도 범위 내에서 이산화티탄의 농도가 증가함에 따라 선형적으로 증가함을 확인할 수 있었다.

핵심용어: 초음파 캐비테이션, 란주반형 초음파 변환기, 이산화티탄, 루미놀, 라디칼, 음향 발광강도

ABSTRACT: The hydroxyl radical ($\cdot\text{OH}$) and superoxide anion radical ($\cdot\text{O}_2^-$) generated by the shock wave generated during ultrasonic cavitation collapse in TiO_2 suspension are highly useful because they can sterilize and disinfect. For practical use as a sterilization method without any chemicals, in this study, we proposed a method for evaluating the generation of radicals generated by high-intensity ultrasound emitted to titanium dioxide suspension. In the proposed method, the sonoluminescence phenomenon, which emits light by ultrasonic cavitation decay energy, was utilized, and the degree of radical generation was evaluated through the amount of light energy by sonoluminescence. As a result, even at a low concentration of titanium dioxide of 0.02 wt%, light energy 5 times higher than in the absence of titanium dioxide was received. After that, as the concentration increased by 0.1 wt%, the luminous intensity of sonoluminescence increased linearly by about 14.8×10^{-12} lm. Therefore, it was confirmed that the radicals generated by radiating high-intensity ultrasound to the titanium dioxide suspension increased linearly as the concentration of titanium dioxide increased within a given concentration range.

Keywords: Ultrasonic cavitation, Langevin-type ultrasonic transducer, Titanium dioxide, Luminol, Radical, Sonoluminescence intensity

PACS numbers: 43.58.Bh, 43.58.Fm

†Corresponding author: Moojoon Kim (kimmj@pknu.ac.kr)

Department of Physics, Pukyong National University, 45, Yongso-ro, Nam-Gu, Busan, 48513, Republic of Korea

(Tel: 82-51-629-5572, Fax: 82-51-629-5549)

“이 논문은 2022년도 한국음향학회 추계학술대회에서 발표하였던 논문임.”



Copyright©2023 The Acoustical Society of Korea. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

I. 서 론

수중에 방사되는 강력 초음파에 의해 캐비테이션이 발생하고 이 캐비테이션의 붕괴 시 발생하는 충격파 에너지에 의해 물 분자가 하이드록실 라디칼($\cdot\text{OH}$) 및 슈퍼옥사이드 음이온 라디칼($\cdot\text{O}_2^-$)로 분리되기도 한다.^[1-3] 이 라디칼들은 세균이나 바이러스에 작용하여 살균 및 불활성화시키는 작용을 한다. 그러나 이 반응은 평형상수가 작아 실용화를 위하여 촉매인 이산화티탄(TiO_2)을 첨가하면 많은 양의 라디칼을 발생시킬 수 있다. 이 현상을 이용하면 종래의 자외선 및 플라즈마 등에 의한 라디칼 발생장치보다 강력하고 인체에 해가 없으며 약품을 사용하지 않는 살균 처리 기술이 실현될 수 있어 이에 관한 연구가 수행되고 있다.^[4-6]

이산화티탄이 포함된 수중에 강력 초음파를 조사하면 단열 팽창과정에 의해 매질 내에 캐비테이션 현상이 발생한다. 발생한 미소 기포들은 초음파에 의한 단열 압축과정에서 붕괴하며 이때 나타나는 에너지(10,000 K 이상)에 의해 이산화티탄이 들뜬상태가 되어 라디칼이 발생하게 된다.^[7,8] 초음파를 이용한 살균처리 기술의 실현을 위해 해결해야 할 문제 중의 하나로, 라디칼 발생량의 정량적인 평가법이 요구된다.^[9,10]

한편, 루미놀 발광 현상을 이용하여 이산화티탄 현탁액에서 광촉매 반응으로 생성된 슈퍼옥사이드 음이온 라디칼을 관측할 수 있다는 연구 결과가 보고되고 있다.^[11] 이를 강력 초음파에 의한 소노루미네센스 현상에 적용하면 이산화티탄 현탁액에서 음향 촉매 반응으로 생성된 라디칼을 관측하는 데 활용될 수 있을 것이다.

따라서 본 연구에서는 초음파 캐비테이션 붕괴에 에너지에 의한 소노루미네센스 현상을 이용하여, 루미놀이 녹아있는 이산화티탄 현탁액에 방사된 강력 초음파에 의해 발생하는 라디칼의 발생량을 평가하는 방법을 제안한다. 또한 제안된 평가법을 적용하여 이산화티탄의 농도변화에 따른 라디칼 발생량의 변화를 조사하여 제안법의 유효성을 검토한다.

II. 라디칼 발생과 루미놀 발광강도

2.1 라디칼 발생 과정

이산화티탄을 혼합한 현탁액에 강력 초음파를 조사하면 초음파 캐비테이션이 발생하게 되며 캐비테이션 붕괴에너지에 의해 이산화티탄이 들뜬상태가 되어 하이드록실 라디칼 및 슈퍼옥사이드 음이온 라디칼이 생성된다.^[7]

그 생성과정을 보면 다음과 같다.

3.2 eV의 밴드 갭을 가지고 있는 이산화티탄이 캐비테이션 붕괴에너지에 의해 들뜬상태가 되면서 전도대 전자(e^-)와 가전자대 정공(h^+)이 생성된다.



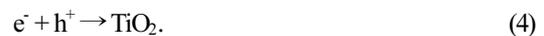
전도대 전자는 이산화티탄의 산소 분자를 환원 또는 이산화티탄 표면에 보충하여 보충 전자(e^-)가 되어 산소 분자를 환원시켜 슈퍼옥사이드 음이온 라디칼을 생성한다.



가전자대 정공은 물 분자를 산화시켜 하이드록실 라디칼을 생성한다.



반응에 기여하지 않은 전도대 전자와 포획 전자는 가전자대 정공 또는 포획 정공과 재결합한다.



캐비테이션 기포가 붕괴할 때의 에너지가 직접 물 분자에 기여하여 하이드록실 라디칼을 생성하기도 한다.



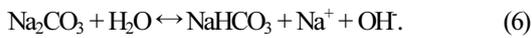
위에서 기술한 바와 같이, 하이드록실 라디칼 및 슈퍼옥사이드 음이온 라디칼의 발생량은 Eq. (1)의

과정에서 초음파에 의한 들뜬상태에 따라 Eq. (2)의 환원 과정과 Eq. (3)의 산화 과정 및 Eq. (5)의 직접 해리 과정에 의해 결정된다. 즉 초음파 캐비테이션 발생의 정도에 강하게 의존함을 알 수 있다.

2.2 라디칼 발생량과 루미놀 발광강도 관계

탄산나트륨이 첨가된 루미놀 용액에 초음파에 의해 발생한 슈퍼옥사이드 음이온이 작용하여 발광하는 과정을 Fig. 1에 나타내었다.

루미놀 용액에 첨가한 탄산나트륨은 물속에서 탄산수소나트륨과 나트륨이온 및 수산이온으로 분리된다.^[11]



이 과정에서 발생한 수산이온은 루미놀 분자에 작용하여, Fig.1에 나타낸 것과 같이, 루미놀 분자를 2가 음이온화 시킨다. 이온화된 루미놀 분자의 공명 구조에 상술한 Eq. (2)에서 발생한 슈퍼옥사이드 음이온 라디칼이 작용하여 질소 분자와 함께 들뜬 상태의 삼중 2가 음이온이 생성되고, 이것이 내부 전환을 거쳐 단일 2가 음이온 상태에서 들뜬 상태의 분자가 바닥 상태로 전이되면서 빛 에너지를 방출하게 된다. 이상의 과정으로부터 초음파에 의해 생성된 슈퍼옥사이드 음이온 라디칼의 발생량은 루미놀 용액에서 발광하는 빛의 강도에 의존함을 알 수 있다.

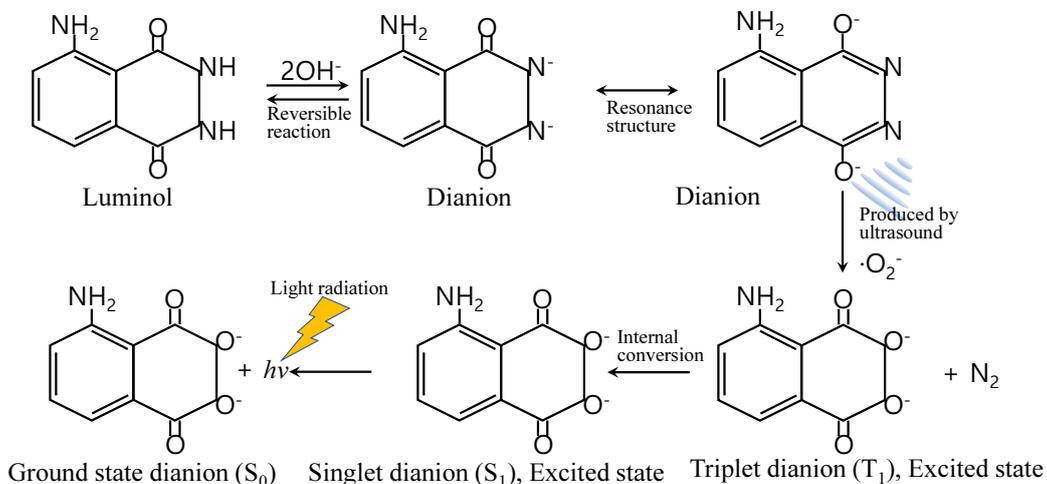


Fig. 1. (Color available online) Light emission process of luminol solution by ultrasonic energy.

III. 실험 장치 및 방법

3.1 라디칼 발생장치

Fig. 2는 라디칼 발생장치 및 광전증폭관(Photo Multiple Tube, PM Tube)을 이용한 루미놀 발광강도를 측정하는 실험 장치이다. 금속제 수조 밀면에 구멍을 뚫어 방사면의 직경이 44.5 mm인 란주반형 초음파 변환기를 고정한다. 증류수 500 mL에 루미놀 파우더 50 mg과 탄산나트륨 250 mg을 혼합하여 기본 용액을 만든다. 이 용액을 100 mL용 비커 5개에 50 g

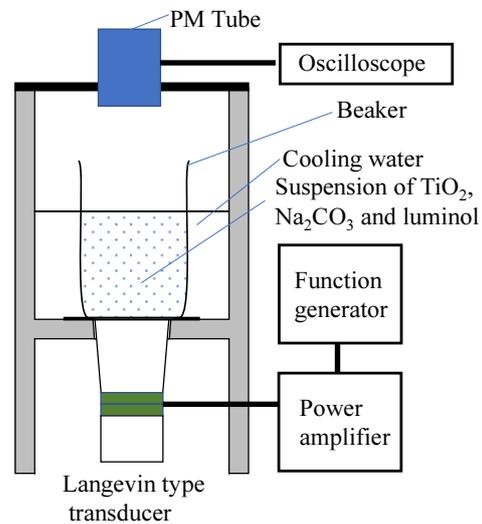


Fig. 2. (Color available online) Experimental setup for evaluating the generation amount of radicals generated by ultrasound.

씩 채우고 이산화티탄粉末를 (0.0, 0.01, 0.04, 0.06 그리고 0.10) g씩 각각 첨가하여 이산화티탄의 농도가 서로 다른 5종류의 현탁액을 준비한다. 초음파 변환기로부터 방사된 강력 초음파는 캐비테이션을 발생시키고 이 캐비테이션의 붕괴에너지에 의해 이산화티탄을 들뜨게 해 하이드록실 라디칼 및 슈퍼옥사이드 음이온 라디칼이 생성됨과 동시에 루미놀에 의한 발광반응을 일으킨다. 금속 수조 덮개 부분에 설치된 광전증폭관(Hamamatsu, H10722-110)을 이용하여 발광강도를 수신한다. 이때 광전증폭관은 현탁액의 표면으로부터 24 mm 거리에 설치되어 있으며, 수신된 발광강도는 오실로스코프를 통해 출력전압으로 측정된다.

실험에 사용된 란주반형 초음파 변환기의 입력어드미턴스를 측정된 결과를 Fig. 3에 나타내었다. Fig.

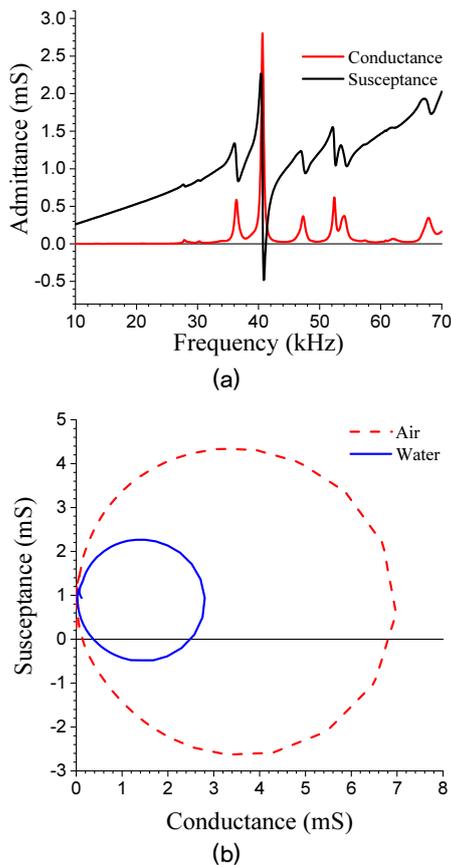


Fig. 3. (Color available online) Measurement of input admittance for the Langevin-type ultrasonic transducer. (a) Admittance characteristic of the transducer with water load and (b) admittance loci of the transducer with water load and air load.

3(a)은 금속 수조 용기에 500 mL의 증류수를 채워 측정된 값으로, 물을 음향부하로 한 입력어드미턴스의 결과이며 공진 주파수는 약 40.64 kHz임을 알 수 있다. Fig. 3(b)은 전기음향 변환 효율을 구하기 위해 공기에서 측정된 어드미턴스와 함께 복소평면에 나타낸 어드미턴스 로커스이다. 이 결과로부터 전기음향 변환 효율이 약 59%임을 도출할 수 있었다.^[12,13]

한편, 변환기에 공급되는 신호는 신호발생기로부터 출력된 연속 정현파 신호로, 파워 증폭기를 거쳐 증폭되어 란주반형 초음파 변환기에 입력된다. 이때 입력되는 전류(0.22 A_{rms})와 전압(157 V_{rms})은 동위상이 되어 최대 전력이 전송되는 조건은 구동 주파수가 39.6 kHz인 경우로 나타났다. 이는 변환기의 측정 공진 주파수 40.64 kHz와는 다소간의 차이가 나는데, 그 이유는 변환기와 파워 증폭기와의 임피던스 정합을 위하여 삽입한 임피던스 정합회로의 영향으로 생각된다.

3.2 탁도를 고려한 광도 보정

서론에서 기술한 바와 같이, 본 연구는 이산화티탄 현탁액에서 음향 촉매 반응으로 생성된 라디칼의 발생량을 루미놀 발광강도를 측정하여 평가하는 것으로 이때 현탁액 속의 이산화티탄 농도변화에 따른 발광강도 변화를 측정한다. 그러나 이산화티탄의 농도증가는 현탁액의 탁도를 증가시키고 이는 루미놀 발광강도 측정에 정확도를 떨어지게 하는 문제를 발생시킨다. 이에 대한 해결방안으로 본 연구에서는

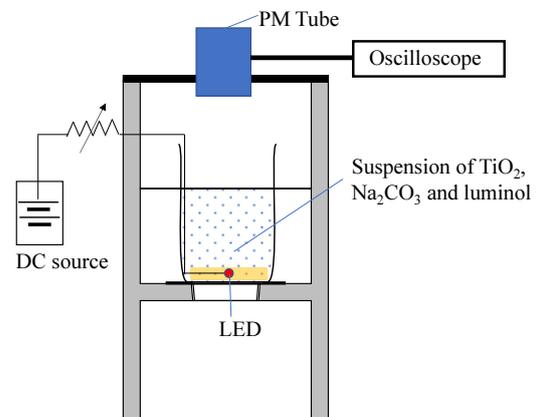


Fig. 4. (Color available online) Experimental setup for calibrating the effect of turbidity.

기준 광원을 이용하여 탁도 변화에 따른 발광강도의 영향을 측정하고, 이를(Fig. 2 장치에서) 광전증폭관에 수신되는 소노루미네센스 발광강도에 보정해주는 방법을 적용하였다. Fig. 4는 이산화티탄 현탁액의 탁도 변화에 의한 광도 보정을 위한 실험 장치를 나타낸 것이다.

표준광원으로는 에폭시 수지에 몰딩 된 LED 소자를 사용하였으며 루미놀의 발광강도와 유사한 강도를 유지하기 위하여 가변저항을 사용하여 적정 강도를 결정한다. 라디칼 발생 실험에 사용한 동일 현탁액에 대해 이산화티탄의 농도가 변함에 따라 변하는 광전증폭관의 출력전압을 관찰한다. 이와 동시에 농도별 시료에 대한 탁도를 탁도계(Lutron TU2016 Turbidity Meter)를 사용하여 측정한다.

IV. 이산화티탄 농도변화에 따른 소노루미네센스 발광강도 측정 결과

이산화티탄 현탁액 내에서 첨가하는 이산화티탄의 농도를 다르게 하여 만든 5종류의 이산화티탄 현탁액에 강력 초음파를 4s간 방사한 후 소노루미네센스 발광강도를 측정하였고, 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 이때 초음파조사 시간 4s는, 장시간 초음파 방사로 야기되는 액체 내의 탈기 현상에 의한 영향을 배제하기 위하여 짧은 시간으로 결정된 값이다.

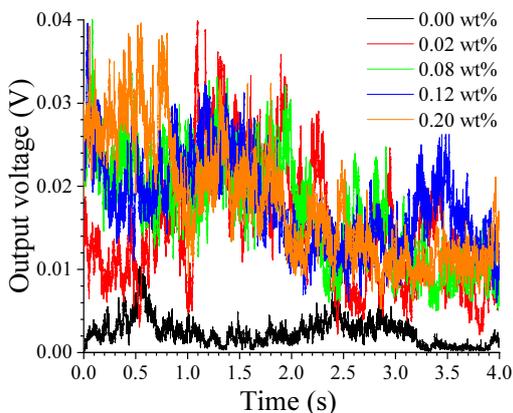


Fig. 5. (Color available online) Temporal change of output voltage of PM tube receiving the sonoluminescence intensity from TiO_2 suspensions with five different concentration.

이 결과를 보면, 우선, 이산화티탄 현탁액으로부터의 발광강도를 수신한 광전증폭관의 출력전압은 매우 불규칙한 파형을 보이고 있는데 이는 초음파에 의한 캐비테이션 발생 및 붕괴가 시간과 장소에 따라 매우 불규칙하게 일어나기 때문이다. 이산화티탄을 첨가하지 않은 경우(0%)에도 초음파 캐비테이션 붕괴에너지에 의해 루미놀에 의한 발광 현상이 일어나고 있다. 또한 이산화티탄의 농도가 증가할수록 촉매 반응 때문에 발광강도가 현저히 증가함을 알 수 있다. 비교의 편의성을 위해 농도별 출력전압의 시간 평균을 구하여 Fig. 6에 나타내었다. 이산화티탄을 첨가하지 않은 현탁액의 경우에 비하면 이산화티탄을 첨가한 현탁액의 경우가 루미놀의 발광강도가 상당히 증가하였다. 이는 이산화티탄의 촉매작용에 의해 라디칼의 생성량이 현저히 증가함을 의미한다. 한편 이산화티탄이 0.02 wt% 이상의 농도에서는 발광강도가 완만한 증가를 나타내고 있는데, 이는 이산화티탄의 농도증가에 따른 현탁액의 탁도 증가에 기인한 것으로, 현탁액의 탁도가 초음파 에너지에 의해 생성된 소노루미네센스의 빛 에너지가 광전증폭관의 수광부에 도달하는 데 있어서 장애 요소로 작용한 것이 그 원인으로 생각된다. 따라서 좀 더 정도 높은 발광강도 측정을 위해서는 현탁액의 탁도가 고려되어야만 한다. Fig. 7은 현탁액 속의 이산화티탄 농도변화에 따른 탁도 변화를 측정하여 나타낸 것이다. 그리고 발광강도 측정에 탁도를 고려하기 위하여, Fig. 4에서 설명한 표준광원을 사용하여 각

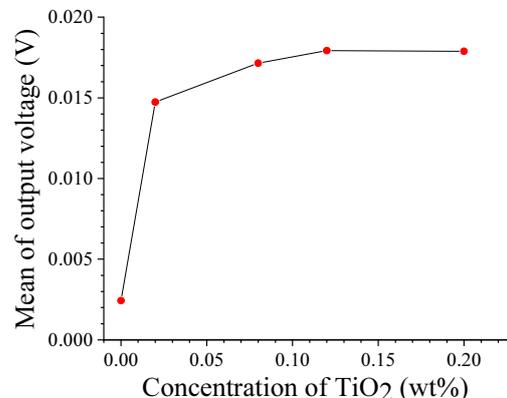


Fig. 6. (Color available online) Time-mean value of output voltage of PM tube depending on the concentration of TiO_2 .

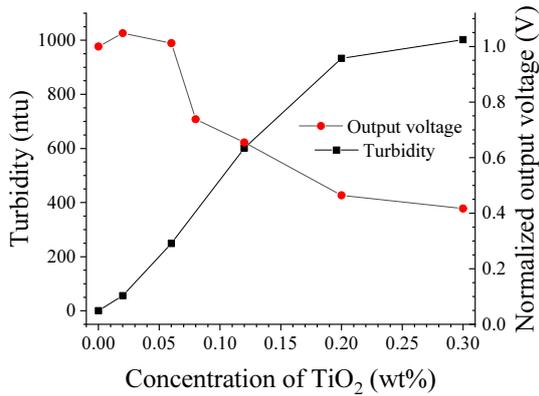


Fig. 7. (Color available online) Turbidity change and PM tube output voltage change for standard light source depending on the TiO₂ concentration.

이산화티탄 농도별 현탁액에 대한 발광강도를 측정 한 광전증폭관의 출력전압을 규격화하여 Fig. 7의 오른쪽 축에 함께 나타내었다. 결과를 보면 대체로 이산화티탄의 농도가 증가함에 따라 현탁액의 탁도는 증가하였고, 수신되는 전압은 감소하는 결과를 보였다. 비록 이산화티탄이 0.02 wt%인 경우의 수신전압이 0 wt%(이산화티탄이 없는 투명한 경우)인 경우보다 약간 증가하였는데 이는 적은 양의 이산화티탄에 의한 빛의 산란에 의한 것으로 생각된다. 그러나 이산화티탄의 농도가 0.06 wt% 이상이 되면 산란의 영향보다는 탁도에 의한 빛의 차폐효과가 더 커져 수신되는 전압이 점점 감소하며 이러한 결과를 확인할 수 있다. Fig. 7의 결과에서 알 수 있듯이, 현탁액의 농도가 증가하면 표준광원에 의한 출력전압이 각 농도의 탁도에 의해 감소하게 되며, 그 감소율이 루미놀 발광에 의한 평균 출력전압에 고려되어야 한다. 이를 위하여, Fig. 7에 나타난 바와 같이, 탁도 증가에 따른 표준광원의 출력전압을 규격화하였는데, 이 규격화된 출력전압은 농도별 현탁액에 대한 광도 보정 계수로, 각 현탁액 농도에서 탁도에 의해 약해진 광도의 비율을 의미한다. 따라서 이 비율만큼 Fig. 6의 농도별 현탁액의 평균 출력전압에 보정해줘야 한다. 즉, Fig. 6의 농도별 현탁액에 의한 평균 출력전압에 Fig. 7의 광도 보정 계수로 나누어주면 된다. 이러한 과정으로부터 도출된 탁도가 고려된 소노루미네센스 발광강도를 Fig. 8에 나타내었다. 이 결과로부터, 이산화티탄의 첨가는 그 농도가 미미한 0.02 wt%인

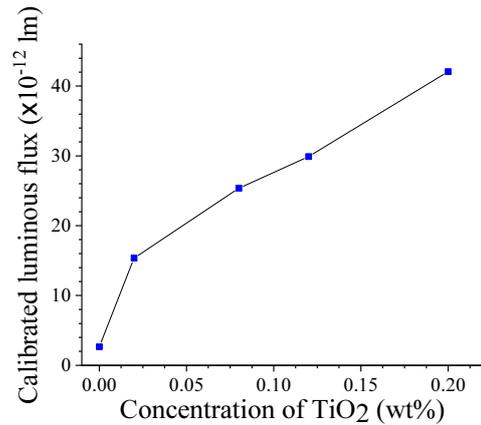


Fig. 8. (Color available online) Intensity change of sonoluminescence from the suspensions depending on the TiO₂ concentration.

경우라도 루미놀의 발광강도가 급격히 증가하며, 그 이후 이산화티탄의 농도가 증가함에 따라 주어진 농도 범위 내에서 루미놀의 발광강도는 선형적으로 증가함을 보인다. 발광강도의 증가는 초음파 캐비테이션 붕괴에너지에 의한 수중에서의 라디칼 발생량의 증가를 의미하는 것으로, 결국 현탁액의 소노루미네센스 발광강도를 통해 이산화티탄 현탁액 내의 라디칼 발생 정도의 평가가 가능함을 확인하였다. 이산화티탄의 농도가 0.2 wt% 이상의 범위에서는 현탁액 내의 이산화티탄 파우더의 침전으로 인하여 의미 있는 발광강도 측정이 곤란하였다.

V. 결 론

초음파 캐비테이션 붕괴에너지에 의한 소노루미네센스의 발광강도를 이용하여 강력 초음파에 의해 발생하는 라디칼의 발생량을 평가하는 방법을 제안하였고, 그 실현 가능성을 확인하였다. 라디칼 발생량의 증가를 위한 촉매제로 이산화티탄 파우더를 사용하였으며, 이산화티탄의 농도변화에 따른 소노루미네센스의 발광강도 변화를 측정하여 이산화티탄 현탁액 내에서의 라디칼 발생 정도를 평가할 수 있었다. 소노루미네센스의 발광강도 측정을 위하여 광전증폭관을 사용하였으며, 이산화티탄 현탁액에 방사된 4 s간의 초음파 조사 시간 동안 수광된 빛 에너지에 의한 광전증폭관의 출력 파형을 평균하여 비교

하고 분석하였다. 그 결과, 주어진 농도 범위 내에서는 이산화티탄의 농도가 증가할수록 발광강도는 선형적으로 증가함을 확인하였고, 이로부터 강력 초음파에 의한 라디칼의 발생량이 이산화티탄의 농도가 증가함에 따라 증가함을 알 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 정부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2022R1F1A1063797)

References

1. P. Riesz and T. Kondo, "Free radical formation induced by ultrasound and its biological implications," *Free Radic. Biol. Med.* **13**, 247-270 (1992).
2. P. Riesz, D. Berdahl, and C. L. Christman, "Free radical generation by ultrasound in aqueous and nonaqueous solutions," *Environ. Health Perspect.* **64**, 233-252 (1985).
3. X. Fang, G. Mark, and C. Sonntag, "OH radical formation by ultrasound in aqueous solutions Part I : the chemistry underlying the terephthalate dosimeter," *Ultrason. Sonochem.* **3**, 57-63 (1996).
4. P. Khandpur, and P. R. Gogate, "Evaluation of ultrasound based sterilization approaches in terms of shelf life and quality parameters of fruit and vegetable juices," *Ultrason. Sonochem.* **29**, 337-353 (2016).
5. T. Ma, J. Wang, L. Wang, Y. Yang, W. Yang, H. Wang, T. Lan, Q. Zhang, and X. Sun, "Ultrasound-combined sterilization technology : An effective sterilization technique ensuring the microbial safety of grape juice and significantly improving its quality," *Foods*, **9**, 1512 (2020).
6. M. Lopez, T. Calvo, M. Prieto, M. Mugica-Vidal, R. Múgica-Vidal, L. Muro-Fraguas, F. Alba-Elías, and A. Alvarez-Ordoñez, "A review on non-thermal atmospheric plasma for food preservation: Mode of action, determinants of effectiveness and applications," *Front. Microbiol.* **10**, 622 (2019).
7. H. Suzuki, S. Yamada, M. Kakikawa, Y. Matsumoto, and M. Iwahara, "Application of giant magnetostrictive actuator in the generation of radicals," *JSAEM*, **17**, S145-S148 (2009).
8. N. Shimizu, C. Ogino, M. F. Dadjour, and T. Murata, "Sonocatalytic degradation of methylene blue with TiO₂ pellets in water," *Ultrason. Sonochem.* **14**, 184-190 (2007).
9. B. Kwon and J. Yoon, "Superoxide anion radical: principle and application" (in Korean), *J. Korean Ind. Eng. Chem.* **20**, 593-602 (2009).
10. Y. Nosaka, S. Komori, K. Yawata, T. Hirakawa, and A. Y. Nosaka, "Photocatalytic ·OH radical formation in TiO₂ aqueous suspension studied by several detection methods," *Phys. Chem. Chem. Phys.* **5**, 4731-4735 (2003).
11. E. H. White and M. M. Bursey, "Chemiluminescence of luminol and related hydrazides: the light emission step," *J. Am. Chem. Soc.* **86**, 941-942 (1964).
12. J. S. Kim, J. H. Kim, M. J. Kim, K. L. Ha, and A. Yamada, "Arrayed ultrasonic transducers on arc surface for plane wave synthesis," *Jpn. J. Appl. Phys.* **43**, 3061-3062 (2004).
13. C. Sherman and J. Butler, *Transducers and Arrays for Underwater Sound* (Springer, New York, 2008), Chap. 12.

저자 약력

▶ 김 정 순 (Jungsoon Kim)



1996년 2월 : 부경대학교 물리학과 학사
1999년 2월 : 부경대학교 대학원 음향진동 공학과 석사
2002년 3월 : Tokyo University of Agriculture and Technology, Japan 공학박사
2006년 3월 ~ 현재 : 동명대학교 전기공학과 교수
<관심분야> 초음파 영상, 비선형음향, 초음파 분산, 의용 초음파, 초음파 트랜스듀서

▶ 김 무 준 (Moojoon Kim)



1985년 2월 : 부경대학교 응용물리학과 학사
1990년 2월 : 부경대학교 대학원 응용물리학과 석사
1994년 3월 : Tohoku University, Japan 공학박사
1995년 3월 ~ 현재 : 부경대학교 물리학과 교수
<관심분야> 초음파 트랜스듀서, 비선형음향, 초음파 분산, 수중음향