

압전체를 이용한 약품 분사용 초음파 분사 노즐 시스템

고재석 · 김용현 · 김형수 · 조순행* · 최승철

아주대학교 재료공학과, *아주대학교 환경공학과

Ultrasonic Spray Nozzle System with Piezoelectric Device for Chemicals Dispersion

Jae Seok Koh, Yong Hyun Kim, Hyung Soo Kim, Soon Haing Cho* and Seung Chul Choi

Department of Materials Science and Engineering, Ajou University, Suwon-Si 442-749, Korea.

*Department of Environmental Engineering, Ajou University, Suwon-Si 442-749, Korea.

초 록: 압전 세라믹스를 이용하여 약품 분사용 초음파 분사 노즐을 제작하였다. 정수장의 혼화 공정에 사용되는 약품(응집제)의 고효율 분산을 위해 분사 노즐을 설계하였으며 압전세라믹을 최적화하였다. 제작된 초음파 약품 분사 노즐을 패키징하여 정수장의 약품 혼화 과정에 적용하여 약품사용의 고효율화와 사용량 저감을 위한 연구를 진행하였다. 압전체는 실리콘으로 마감처리를 하였으며 Al로 패키징하였다. 본 초음파 분사 노즐 시스템을 적용하여 혼화지에 실험한 결과 약품의 순간 혼화를 촉진시키는 기술로 투입 약품량을 저감시킬 수 있을 것으로 판단된다. 초음파 발진 약품 분사시, 무발진과 비교하여 대장균 제거 효율에서 현저하게 높아졌다.

Abstract: A new type of ultrasonic spray nozzle was fabricated employing a piezoelectric device. The spray nozzle was designed to disperse chemicals in a water treatment mixing tank. The piezoelectric properties in ultrasonic spray nozzles were optimized to improve the dispersion of chemicals. The piezoelectrics were packaged in an aluminum case with silicone resin for the aqueous solution proof packaging. Chemicals were dispersed with high efficiency and the chemicals consumption was reduced by the ultrasonic fine particle spraying. The concentration of Escherichia coli in mixing tank was decreased remarkably using ultrasonic spray nozzle dispersion compared to the conventional methods.

Key words: Ultrasonic spray nozzle packaging, Piezoelectric device, Water treatment, chemicals dispersion, Escherichia coli

1. 서 론

초음파는 인간의 가청주파수 보다 높은 대략 20kHz 이상의 음파를 칭하며, 산업 전반에 걸쳐 매우 광범위하게 활용되고 있다. 압전 세라믹 재료를 이용한 여러 가지 초음파 장치들이 연구되고, 많은 이론들도 정립이 되었다. 초음파의 응용은 고에너지(50-3000W), 저주파수(15-100kHz)의 초음파를 이용하는 분야와 저에너지(50W 이하), 고주파수(1-10MHz)의 초음파를 이용하는 분야로 대

별된다.^{1,2)} 전자는 초음파에 의한 수중 cavitation 발생을 이용하는 것으로 세척기, 용착기 수중음파 탐상기, 담석 또는 결석 제거기, 음향에 의한 화학 반응의 촉진과 같은 것들이 대표적인 응용이며 후자는 초음파 진단기, 비파괴 검사기 등이 대표적인 응용분야이다³⁻⁵⁾. 본 연구에서는 초음파 발생장치인 압전세라믹스와^{6,7)} 초음파 진동자를 제조하고 이를 바탕으로 저주파수, 고에너지의 초음파를 이용할 수 있는 고성능, 고효율의 초음파 약품 분사 노즐을 개발하고, 이를 패키징하여 정수장의

약품 혼합 과정에 적용하여 약품 사용의 고 효율화와 사용량 저감을 위한 연구를 진행하였다.^{8,9)} 이 방법은 기존의 응집제 주입 방식과는 달리 초음파 분사 노즐을 통해 분사되는 응집제가 미세한 액적으로 깨져 상수원수와 혼합되기 때문에, 임펠러의 교반으로 인한 혼합에 비해 훨씬 높은 효율을 가질 것으로 판단된다. 초음파 분사 노즐의 최적화를 통한 기대 효과로 기존 정수장에서는 적은 혼합 효율로 인해 응집제의 30~40%를 과량으로 주입하고 있는데, 초음파 약품 분사 노즐로 인한 혼합 효율 증대로 약품 소요량을 감소시킬 수 있다. 그에 따라 슬러지량이 감소하여 2차적 환경 오염을 줄일 수 있으며, 약품 비용 절감이라는 경제적 효과 또한 기대해 볼 수 있다. 또한 약품 분산을 위한 기존의 방법과는 달리 과도한 교반이 필요 없기 때문에 동력비용 절감의 장점도 있다. 또한 초음파 노즐 발전으로 미세한 용액의 입자들을 분사함으로써 약품의 분산 효율을 극대화하였으며, 초음파 특성인 열분해와 OH 라디칼 반응 등으로 대장균과 일반세균등의 제거 효율을 높일 수 있을 것이다.

2. 실험방법

2.1 압전 세라믹 제조

본 실험에서 사용한 PZT 압전체는 순도 99% 이상의 고순도 특급 시약을 출발 물질로 하여, 원료 분말을 습식 혼합하였다. 트로이들 타입의 압전

세라믹은 외경/내경이 $\phi 27 \text{ mm}/\phi 7.9 \text{ mm}$, $\phi 32.4 \text{ mm}/\phi 9 \text{ mm}$ 등의 다양한 모양으로 제조하기 위해 바인더를 첨가한 후 $2000 \text{ kPa}/\text{cm}^2$ 으로 가압한 후, 1250°C 에서 $4^\circ\text{C}/\text{min}$ 승온 속도로 5시간 동안 소결하였다. 연마기(Speed FAM 4B6-L)를 사용하여 두께를 4mm로 상·하면을 균일하게 연마한 후 스크린 인쇄법으로 Ag 전극을 시편의 양면에 도포한 후 $3.5 \text{ kV}/\text{mm}$ 의 직류 전압으로 120°C , 30분간 분극 처리하였다.

2.2 분사 노즐 설계 및 제작

수중 초음파 실험을 위해 가로 700 mm, 세로 900 mm, 높이 600 mm의 약품혼화 탱크로 아크릴 수조를 제작하였고, 압전체가 장착되어 패키징한 초음파 분사노즐을 수조 내 수중 바닥에서 위로 100mm의 수조 중앙 위치에 설치하였다. 본 실험에서는 비교적 높은 주파수 영역인 40 kHz에서 고유진동수를 얻기 위해 금속 외경을 $\phi 27$ 로 가공하였으며, 세라믹 또한 소결 치수인 $\phi 27$ 로 맞추어 세라믹 금형 제작하여 진동자 실험을 진행하였다. 수중 초음파 약품 분사를 위해 패키징 재료를 설계하여 수중에서 초음파 실험을 진행하였다. 초음파 약품 분사 노즐의 측면 및 단면도를 Fig. 1(a)에 나타내었다. 실제로 트로이들 타입의 압전체와 그것이 장착된 초음파 장치를 Fig. 1(b)에 나타내었다. 분사 약품은 노즐의 inlet 부분으로 투입되어 내부를 통과하는 오리피스(Orifice)로 공급되며, 약품의 분사 효율을 높이기 위해 외각을 감싸는

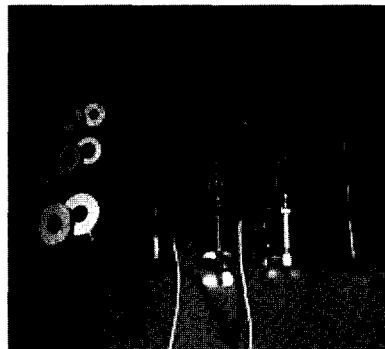
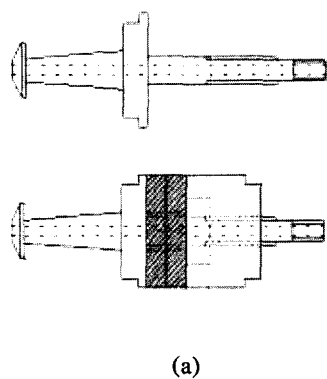


Fig. 1. (a) The structure of ultrasonic nozzle (b) Piezoelectric ceramics and nozzles

트로이드 타입의 압전체를 통해 노즐의 outlet 부분인 노즐 tip에서 약품을 분사시켰다. 노즐에 고전압 인가시 공간 전하에 의한 세라믹 누설을 차단하기 위해 노즐 진동자 조립 후, 트로이드 압전체 외각을 실리콘을 사용하여 밀봉하였다. Fig. 2(a)은 고유진동수 40 kHz의 초음파 노즐이 패키징된 그림을 나타내었으며, 실제로는 Fig. 2(b)와 같이 패키징하였다.

2.3 압전체 물성과 정수처리 적용 실험

시편의 압전 특성은 LF Impedance Analyzer (HP4194A) 를 이용하여 압전상수(d_{33}), 전기 기계 결합계수(k_p), 공진저항(Z_r), 유전 손실(Loss $\tan\delta$) 등을 측정하였다. 세라믹과 노즐의 온도변화 측정은 광학온도계(IR-AHOT, CHINO)로 측정하였으며, 미세구조의 관찰은 주사 전자현미경(S-2700, Hitachi)을 사용하여 관찰하였다.

초음파 노즐의 정수처리 적용성을 평가하기 위하여 연속식 실험을 수행하였다. 실험 조건은 혼화지의 경우 원수의 유입 유량을 1 L/min로 하고 교반 강도 200 RPM, 체류시간은 1 min으로 하였다. 응결지는 교반강도 34~49 rpm를 유지하였다. 응집제(폴리염화알루미늄, PAC : 20~25 mg/L)는 혼화지에 초음파 노즐을 이용하여 수중에서 분사하였다. 분사되는 약품의 입자 크기를 입도 분석

기 (Coulter MultisizerII, Coulter Electronics Ltd.)를 이용하여 측정하였으며, 초음파 분사의 효과를 확인하기 위해 약품 처리 후 대장균 제거 효율을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 미세구조 관찰 및 압전특성

본 연구에서 적용한 PZT 압전체의 각 물성치를 Table 1에 나타내었다. 압전 상수인 d_{33} 가 높고, 발진기에서 인가된 출력을 초음파 노즐의 기계적인 에너지를 최대로 하기 위해 전기 기계적 변환 계수, k_p 가 높은 조성을 선택하였다. 압전 세라믹의 미세구조 사진을 Fig. 3에 나타내었다. 평균입자 크기는 약 2~3 μm 으로 구성 입자가 미세하고 균일하여 기계적 강도가 높은 미세구조를 가지고 있다.

3.2 패키징

패키징 외장 재료는 수중 투입 약품이 약산성인 것을 고려하여 가공이 우수한 Al-6061 계 합금을 선택하였다. 패키징 내부는 초음파 노즐 진동의 감쇄를 최소화하고 액체분사를 최대화하기 위해 초음파 노즐을 패키징에 고무재료인 O-ring을 사용하여 고정하였으며, 수중에서 초음파 노즐 실험

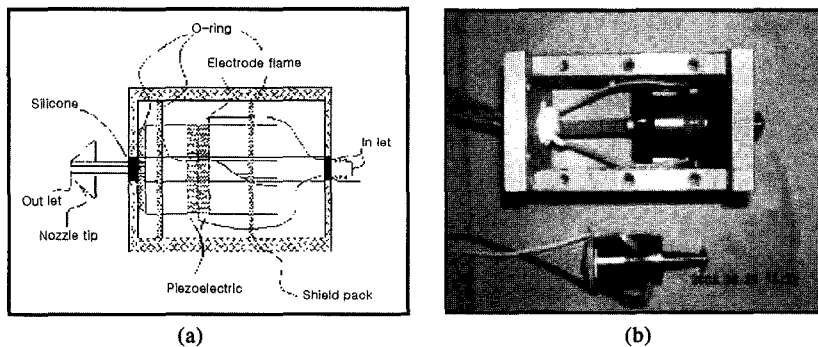


Fig. 2. (a) The packaged design (b) Side view of packaged nozzle

Table 1. Electronic properties of PZT

$f_r(KHz)$	$Z_r(\Omega)$	$F_a(KHz)$	$C(pf)$	Q_m	$d_{33}(10^{-12}m/V)$	$K_p (%)$
56.23	18.56	66.06	378	1465	351	58.05

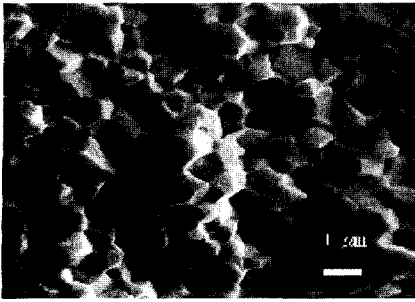


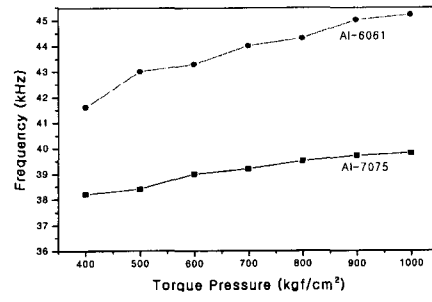
Fig. 3. The microstructure of sintered PZT.

시 방수를 위해 노즐의 inlet과 outlet 부분은 실리콘 고무를 사용하여 밀봉하였다.

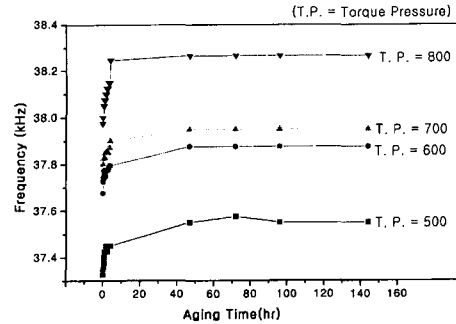
알루미늄 합금 재료인 Al-6061과 Al-7075를 각각 너트 쥘 방식으로 조립 한 후, 그 쥘 압력(torque pressure)에 따른 주파수 특성을 Fig. 4(a)에 나타내었다. 비중이 약간 무거운 Al-7075의 공진 주파수가 낮아졌으며, 그 주파수 변화의 크기도 적게 발생되었다. Fig. 4(b)는 500~800 kgf/cm²의 너트 쥘 압력에서의 aging시간 경과에 따른 주파수 안정성을 나타낸 것으로, 각 조건에서 aging시킨 후, 상온에서의 주파수 변화를 측정하였다. 800 kgf/cm² 조건에서 aging에 따른 주파수 변화가 빠르게 안정화되는 것이 관찰되었다.

3.3 초음파 발진 및 무 발진시 분사효율

세라믹 노즐을 외장 패키징없이 발진 할 경우 주파수 특성이 40kHz부근으로 유지되었으나, 수중 실험을 위해 초음파 노즐 외부를 패키징한 경우 5%정도 공진주파수가 낮은 쪽으로 이동하였다.



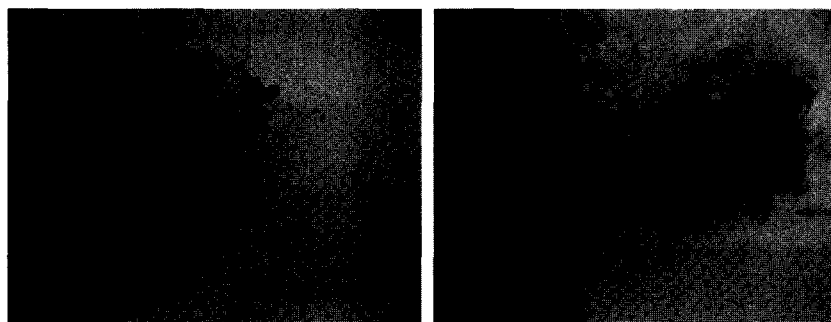
(a)



(b)

Fig. 4. (a) The resonance frequency vs. torque at various nozzle body (b) The operating time dependence of the resonance frequency after aging.

Fig. 5는 세라믹 노즐을 패키징하여 수중에서 약품분사시 초음파 발진과 무 발진 분사를 비교하였다. 약품 분사액의 퍼짐성 및 이동을 쉽게 관찰하기 위해 약품대신 검정색 잉크를 사용하여 분사하였다. Fig. 5(a)에서는 초음파 무발진 분사 실험 결과 액체펌프 압력에 의해 분사액의 퍼짐성이 거의



(a)

(b)

Fig. 5. (a) Chemicals dispersion without ultrasonic generation (b) Chemicals dispersion with ultrasonic generation.

없고 직선방향으로 나가는 것을 알 수 있다. 분사액은 수중에서 액체 분사 압력에 의해서만 물속에서 확산이 진행되어 직선방향으로 약 50 cm 정도 나가다가 바닥으로 가라앉아 서서히 탱크 내 물이 전체로 확산되어 간다. Fig. 5(b)는 초음파 발진분산 시킨 것으로 무발진 분사와 비교했을 때 액체 펌프 압력과 초음파 노즐에서 발생하는 중 진동 즉, 초음파 노즐 tip 부분의 수직면 방향의 진동에너지가 수중으로 확산되어 수중에서의 분사액의 확산이 월등히 뛰어나도록 볼 수 있었다. 초음파를 이용한 분사액의 분사는 노즐 tip 부근에서 분사액 입자가 미세하게 되면서 수중에서 3차원적으로 고른 확산이 진행된다. 결과적으로 초음파 발진 분사 시 약품의 분산 속도가 현저하게 빠르게 진행되었고, 약품이 미세하게 분산됨을 관찰할 수 있었다.

Fig. 6은 대기중과 수중에서 초음파 발진 액체 분사 시 세라믹과 노즐의 온도변화를 비교한 것이다.

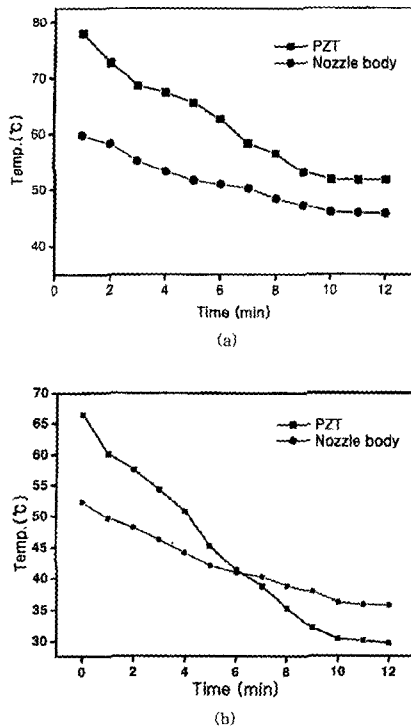


Fig. 6. (a) Temperature changes of nozzle body & PZT in air (b) Temperature changes of nozzle body & PZT in aqueous solution.

대기중 및 수중 모두 동일한 시간 경과 후에 온도의 안정화가 진행되었으며, 대기중에서 보다 수중에서 분사할 경우, 세라믹과 노즐의 온도가 더 낮은 온도에서 안정화되었다. 실제의 적용에서와 같이 수중에서 초음파 액체 분사의 경우 초음파 진동에 의한 피로현상이 없는 신뢰성 있는 발진 상태가 관찰되었다. 이는 수중에서 압전체의 자연냉각이 이루어져서 장시간의 발진에도 문제가 없이 신뢰성이 향상되는 것으로 생각된다.

초음파 노즐을 이용하여 약품 분사를 적용한 연속식 정수처리 실험에서 상수원수와 처리수에 존재하는 입자의 크기를 측정 한 결과를 Fig. 7에 나타냈다. 무 발진시 수처리장으로 공급되는 원수(源水)에서 발생된 입자 크기는 최대 220 μm의 크기를 가지는 것으로 관찰되었으며, 초음파 발진 출력을 50, 100, 150W 으로 변환하여 발진할 경우 flocc의 입자 크기가 50% 정도 감소되었다. 미세화된 입자의 크기는 발진기의 출력과 비례하지 않고, 대부분의 입자는 초음파 발진시 100 μm이하로 미세화 됨을 알 수 있다. flocc의 비표면적을 넓힘으로 인해 응집 효과의 상승과 투입 약품량을 저감시킬 수 있을 것으로 판단된다.

3.4 혼화지 적용 실험 측정

수중에서 초음파 약품 분사 노즐을 이용한 약품 분사시 분사된 입자의 크기 분포를 입도 분석기 (Coulter MultisizerII, Coulter Electronics Ltd.)로 측정 한 결과를 Fig. 8 에 나타내었다. 초음파를 분사시킬 경우 액적의 크기는 100 μm이하이며, 평균 입자크기가 40 μm 정도로 미세화 되어 초음파 무

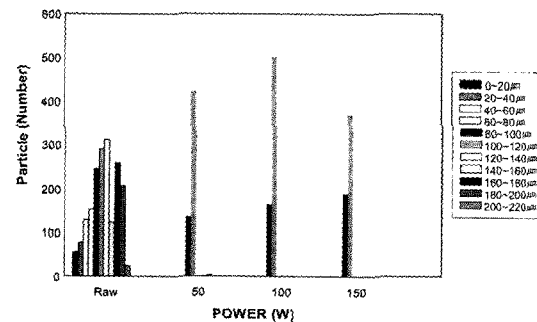


Fig. 7. The flocc particle size with variation of a ultrasonic nozzle generation.

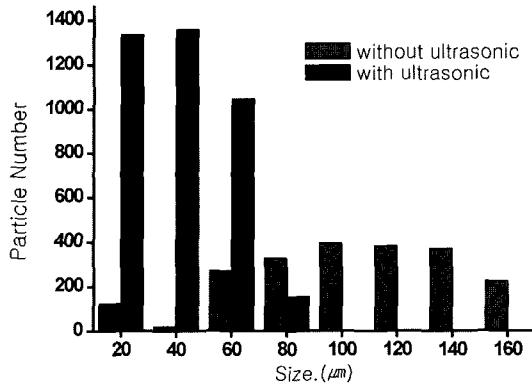


Fig. 8. Injected particle size distribution of chemicals with a ultrasonic nozzle & a conventional nozzle.

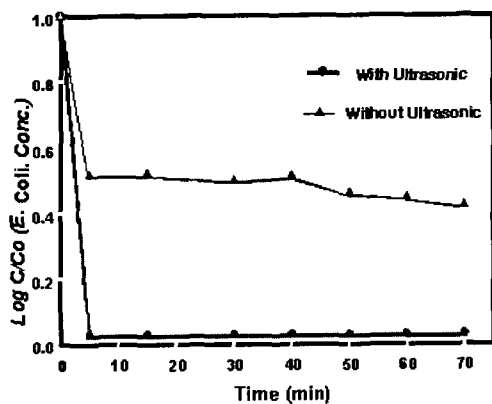


Fig. 9. Removal effect of Escherichia coli.

발진 상태와 비교하여 약품 분사의 효율이 크게 향상되는 것으로 사료된다. Fig. 9는 초음파 약품 분사 노즐을 이용한 정수처리(응집 침전) 후 대장균 제거 효율을 나타낸 것이다. 그 결과로는 대장균 제거율은 초음파 노즐을 이용한 약품 분사 방식 99.8%로 기존 약품 주입 방식에 비하여 대장균 제거율이 월등히 우수한 것으로 조사되었다. 이는 초음파 노즐 발진으로 미세한 용액의 입자들을 분사함으로써 약품의 분산 효율이 극대화되었으며, 초음파 특성인 열분해와 OH 라디칼 반응에 의해 대장균 제거 효율이 높아진 것으로 생각된다. 이것은 본 연구에서 개발한 초음파 약품 분사 시스템이 성공적으로 작동됨을 확인 할 수 있는 결과였다.

마이크로전자 및 패키징학회지 제10권 제4호 (2003)

4. 결 론

압전 세라믹스를 이용하여 새로운 약품 분사형 초음파 분사 노즐을 패키징하여 분사장치를 개발하였다. 이 방법은 기존의 응집제 주입 방식과는 달리 처리수에 응집제를 초음파 분사 노즐을 통하여 분사 주입함으로써 약품의 순간 혼화를 촉진시키는 기술이다.

초음파 분사 노즐을 통해 분사되는 응집제는 미세한 액적형태로 분산되어 상수원수와 혼합되기 때문에, 임펠러의 교반으로 인한 혼화에 비해 훨씬 높은 효율을 가질 것으로 판단된다. 초음파 분사 노즐의 최적화를 통한 기대 효과로 기존 정수장에서는 낮은 혼화 효율로 인해 응집제의 30~40%를 과량으로 주입하고 있는데, 초음파 약품분사 노즐로 인한 혼화 효율 증대로 약품 소요량을 감소시킬 수 있다. 그에 따라 슬러지량이 감소하여 2차적 환경오염을 줄일 수 있으며, 약품비용 절감이라는 경제적인 효과 또한 기대해 볼 수 있다. 또한 약품 분산을 위한 기존의 방법과는 달리 과도한 교반이 필요 없기 때문에 동력비용 절감의 장점도 있다. 또한 초음파 노즐 발진으로 미세한 용액의 입자들을 분사함으로써 약품의 분산 효율을 극대화하였으며, 초음파 특성인 열분해와 OH 라디칼 반응에 의해 99.8%의 대장균 제거 효율을 얻을 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2002년도 한국환경기술진흥원에서 시행한 차세대 핵심환경기술개발 실용화·상용화 기술 사업을 (주)표준전자통신의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. W. H. Glaze, J. W. Kang, and D. H. Chapin "The chemistry of water treatment processes involving ozone, hydrogen peroxide and ultraviolet radiation", *Ozone Sci. & Eng.*, 9(4), pp. 335~352(1987).
2. W. H. Glaze and J. W. Kang, "Advanced oxidation processes for treatment of ground water contaminated with trichloroethylene and tetrachloroethylene", *J. Am. Water Works Assoc.*, 80(5), pp. 57~63(1998).

3. T. J. Mason, Sonochemistry : the use of ultrasound in chemistry, Royal Soc. Chem., pp. 1~8(1990).
4. A. Kotronarou, G. Mills, and M. R. Hoffmann, "Decomposition of parathion in aqueous solution by ultrasonic irradiation", Environ. Sci. Technol., 26, pp. 20~23(1992).
5. N. Serpone, R. Terzian, H. Hidaka, and E. Pelizzetti, "Ultrasonic induced Dehalogenation and oxidation of 2-, 3-, and 4- chlorophenol in air-equilibrated aqueous media similarities with irradiated semiconductor particulates", J. Phys. Chem., 98, pp. 2634~2640(1994).
6. M. R. Soares et al., "Phase coexistence in PZT ceramics", J. Euro. Ceram. Soc., 19, pp. 1865~1871(1999).
7. M. R. Soares et al., "Phase coexistence region and dielectric properties of PZT ceramics", *ibid.*, 20, pp. 321~334(2000).
8. T. J. Mason and J. P. Lorima, "Sonochemistry; Theory, application and uses of ultrasound in chemistry", Ellis Horwood, Ltd., 32, pp. 43~48(1988).
9. H. Nagata, T. Takenaka, Jpn. J. Appl. Phys., 37, pp. 1311~1314(1998).