

수중 TCE 분해용 압전 초음파 트랜스듀서 개발

이영진^{1,a}

¹ 한국세라믹기술원 전자소재·모듈팀

Development of the Ultrasonic Transducers for the Degradation of TCE in Aqueous Solution

Youngjin Lee^{1,a}

¹ Electronic Materials & Module Team, Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology,
 Seoul 153-801, Korea

(Received September 2, 2014; Revised October 2, 2014; Accepted October 13, 2014)

Abstract: This paper describes the development of a piezoelectric flextensional transducer, which aims to effectively degrade the TCE contained in aqueous solution. In order to adjust the 1st flextensional resonant frequency and output displacement of the flextensional transducer, the effect of the geometrical variations on performance was analyzed using the finite element analysis (FEM). The results indicated that the effect of external shell's thickness and curvature were most significant, and experimental fabrication and characterization of a transducer was performed to confirm the results. To prove the capacity to degrade the TCE contained in aqueous solution, 50 and 100 ppm of TCE were prepared in sealed chamber, and investigated the removal rate of TCE through the time and initial concentration.

Keywords: Piezoelectric transducer, Flextensional, TCE, FEA

1. 서론

지하 토양 내 자연 정화능력에 의해 분해될 수 있는 유기물질의 경우에는 문제성이 낮지만, 방향족 화합물 등 난분해성 유해 물질의 경우에는 완전 분해되기까지 장시간이 소요되며, 특히 화합물의 대부분은 분해 과정에서 초기 물질보다 독성이 증가되는 이차 오염 문제가 더욱 심각하다. 따라서 단시간에 완전 분해를 유도할 수 있는 정화기술에 대한 효과적인 공정개발이 지속적으로 요구되고 있으며, 그 중 인위적

오염물질 중 하나인 TCE (trichloroethene)는 섬유 세척제, 금속 탈지제, 유기용제 등 여러 용도로 국내 세탁업체 및 화학 산업계에서 연간 12,000여 톤이 사용되고 있고, 다량 흡입할 경우 중추신경계 기능을 저하시켜 현기증, 피로감, 두통, 발한, 조정력 저하 증상을 보이거나 폐부종을 일으킬 수 있고, 간괴사 증상을 보이거나 허파와 심장, 신장에 영향을 줄 수 있어 매우 엄격히 관리할 필요가 있는 물질이다 [1].

TCE의 정화의 경우, 현재 ZVM (zero valent metal)을 이용한 정화 방법을 주로 사용하고 있으나, ZVM의 표면에 침전되는 물질이 오염물질의 처리기능을 저하시키는 것이 문제점으로 대두되고 있다 [2]. 그 외 표준화된 팔라듐 코팅 나노 영가철 (Fe) 제작 기술을 통한 정화기술이 제시된 바 있다 [3]. 또 하나의 대안으로서 초음파를 이용한 정화기술을 적용한

a. Corresponding author: yjlee@kicet.re.kr

연구가 있으며, 난분해성 액체물질에 초음파를 조사하여 발생하는 공동화 현상 (cavitation)을 이용하여 미세기포가 파괴되는 과정에서의 순간압력, 전단력, 고온을 에너지원으로 각종 오염물질의 물리, 화학적 변화 플럭 구조를 파괴하여 난분해 유기물의 분해를 유도하는 방법이다 [4,5]. 이와 같은 원리를 이용하여 주로 하수처리장의 난분해성 박테리아와 미생물 분해를 촉진하고, 또한 녹조 등의 해수 및 담수의 오염물질 처리에 적용이 되어 왔다.

수중에서 독자적으로 사용할 수 있는 음향 변환기는 플렉스텐서널 (flextensional)형이 있으며, 압전소자를 적층 배열한 후 외곽에 주로 금속 재질의 셸(shell)을 통해 진동자의 수직운동을 수평운동으로 변환시켜 상대적으로 큰 출력을 얻는 구조로서, 사용 주파수 대역에서 부피와 무게 대비 큰 변위를 얻을 수 있고 수중에서 독자적으로 모든 방향으로 음파를 발생시킬 수 있어 고출력 수중 음향 변환기로 주로 사용되고 있다. 또한, 구조적인 안정성이 뛰어나 우수한 내구성을 가지는 것으로 증명되어 장시간에 걸쳐 큰 출력을 필요로 하는 곳에 가장 적합한 것으로 알려져 있다 [6,7]. G. Brigham과 W. Lam 등은 수학적으로 플렉스텐서널 변환기를 해석하였고 [8,9], C. Debus 등은 등가회로 해석법으로 변환기를 해석하였다 [10].

본 연구에서는 수중에 포함되어 있는 난분해 유해물질인 TCE를 효율적으로 분해할 수 있도록, 수중에서 직접 동작할 수 있는 소형의 플렉스텐서널 초음파 트랜스듀서의 구조를 제안하고, 유한요소해석법 (finite element analysis, FEA)을 이용하여 여러 형상변수를 조정하여 설계하고, 이를 실제 제작, 실험 평가를 통하여 수중의 TCE 분해에 대한 가능성을 확인하고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1 기본 구조 flextensional 트랜스듀서 모델링

일반적으로 플렉스텐서널 변환기의 공진주파수는 셸의 3가지 진동모드, 즉 제 1 플렉스텐서널 진동모드, 제 2 플렉스텐서널 진동모드, 그리고 breath 진동모드와 적층 진동자의 두께 진동모드의 결합으로 이루어진다. 선행 연구결과들에 의하면 먼저 셸의 제 1, 2 플렉스텐서널 진동모드의 공진 주파수는 셸을 두께의 수직 바 (bar)가 결합한 것으로 단순화하여 가정했을 때 식 (1)로 표현될 수 있다 [11].

$$f_{shell} = \frac{\pi}{8} \frac{t}{\sqrt{12}} \frac{S^2}{L^2} \sqrt{\frac{Y_{shell}}{\rho_{shell}}} \quad (1)$$

여기서 t 는 셸의 두께, S 는 모드별 상수 (1차: 3.0112, 2차: 5), L 은 셸의 수직/수평 축 (axis) 길이에 의해 결정되는 상수로서 $\pi\sqrt{0.5(a^2+b^2)}$, a 는 셸의 수직 축(main axis) 길이, b 는 수평 축 (minor axis) 길이, Y_{shell} 은 셸의 영률 (Young's Modulus) 그리고 ρ_{shell} 은 셸의 밀도를 나타낸다. 단, 식 (1)은 셸 내부의 세라믹 적층 진동자 등의 영향은 모두 무시되고 내부가 비어있는 셸의 특성만을 고려한 것이다. 세라믹 적층 진동자의 두께 진동모드 공진 주파수는 식 (2)로 표현된다 [11].

$$f_{ceramic} = \frac{1}{2d} \sqrt{\frac{Y_{ceramic}}{\rho_{ceramic}}} \quad (2)$$

d 는 셸의 세라믹 적층 두께, $Y_{ceramic}$ 는 세라믹 적층 영률 그리고 $\rho_{ceramic}$ 는 세라믹 적층 밀도를 나타낸다. 그러나 식 (1), (2)는 셸과 세라믹 적층 진동자 각각에 대해서는 적용될 수 있으나, 셸과 세라믹 적층이 동시에 적용된 복합 구조를 가지는 플렉스텐서널 변환기에 대해서는 정확한 공진 주파수를 계산하기는 불가능하다. 따라서 유한요소해석을 이용하여 플렉스텐서널 트랜스듀서를 설계하고 그 특성을 분석하였다.

그림 1에 본 연구에서 적용한 플렉스텐서널 트랜스듀서의 기본 구조를 나타내었다. 총 8개의 PZT4 계열의 압전 세라믹이 적층되고, 음향 방사체 역할을 하는 셸, 중심점을 잡아주고 진동자와 셸을 연결하는 마감판 (end-plate), 적층한 진동자와 마감판을 전기적으로 분리하는 절연 소자 (dummy element) 및 전체 구조체를 체결하는 볼트와 너트로 구성되어 있다. 유한요소해석은 상용 프로그램인 ANSYS 10.0을 이용하였으며, 모델 구성 시 변환기의 대칭성을 고려하여 2차원 축 대칭 모델을 사용하였고, 적층 진동자는 ANSYS의 요소 (element) 중 기계-전기-자기-열의 결합 요소 (coupled element)인 Plane13을, 변환기의 기타 구조체 모델링에는 이방체 요소 (isometric element)인 Plane42를 적용하여 모델링하였고, 변환기의 모든 부분은 자유상태의 경계조건으로 가정하였다. 공진주파수 해석은 모드 해석 (modal analysis)을, 임피던스 특성은 조화 해석 (harmonic analysis)을 통

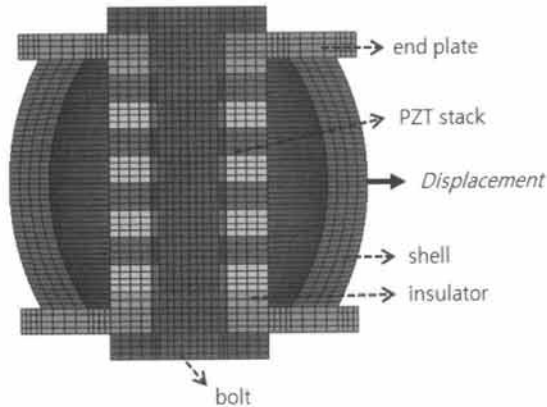


Fig. 1. Numerical analysis of the flextensional transducer: grid system.

Table 1. Material properties of the parts used in the transducer.

Materials	Young's modulus (GPa)	Density (kg/m ³)	Poisson's ratio
Shell (Al)	70.3	2,770	0.33
End-plate (SUS304)	206.0	7,955	0.30
Ceramic stack & Insulator (PZT4)	80.0	7,500	0.30

해 계산하였으며, 모드 해석을 통해 공진주파수를, 조화 해석을 통해 임피던스 특성 및 그림 1에 표기된 바와 같이 셸의 수평 변위를 계산하였다. 총 노드 (node) 수는 895개, 요소는 720개로, 그림 1에 모델링 및 표 1에 각 구성품의 물성을 표기하였다.

효율적 트랜스듀서 구조를 도출하기 위하여, 플렉스텐서널 트랜스듀서의 각 구성 요소의 형상 변화에 따른 제 1 플렉스텐서널 모드의 주파수 변화 및 셸의 수평 변위를 계산하여 각 구성 요소의 영향도를 조사하였다.

2.2 TCE 분해 실험장치 셋업

본 실험에서는 TCE의 초음파 조사에 의한 제거 효율을 확인하고자 아래 그림 2와 같은 밀폐형 반응조를



Fig. 2. Test setup to evaluate the degradation of TCE.

제작하였다. 직경 250 mm, 높이 300 mm의 반응조와 직경 450 mm, 높이 370 mm의 항온조를 구성하고, 온도조절 유무 및 시간에 따른 초음파 조사에 의한 TCE 제거도를 평가하였다. 밀폐형이 아닌 개방형 반응조를 적용할 경우, 초음파 조사에 의해 수온이 상승하며 온도를 일정하게 한 경우에 비해 대기 중으로 휘발하는 분율이 높아 제거율이 높아져 정확한 실험이 어려운 문제가 있다. 반응조는 SUS316, 항온조는 아크릴 재료를 사용하였다.

TCE 용액의 제조는 TCE (99.5%, Sigma-aldrich)를 methyl alcohol (99.9%)에 녹인 후, 증류수를 이용하여 10,000 ppm의 TCE 용액을 제조한 후, 원하는 농도의 용액으로 희석하여 사용하였다. 용존 TCE 평가는 UV-분광광도계 (UV-spectrophotometer)를 사용하였으며, TCE가 가장 잘 흡수하는 것으로 알려져 있는 파장 200 nm 부근의 자외선 파장에 대한 TCE의 흡광도를 측정하고, 미리 농도별로 조사한 흡광도 기준 데이터와 비교하는 방법으로 TCE 농도를 측정하였다 [12].

3. 결과 및 고찰

먼저 제1 flextensional 진동모드 주파수가 20 kHz 이상을 갖는 임의의 기본 모델을 구성하였으며, 전체 길이 68 mm, 셸 두께 10 mm, 세라믹 적층 진동자

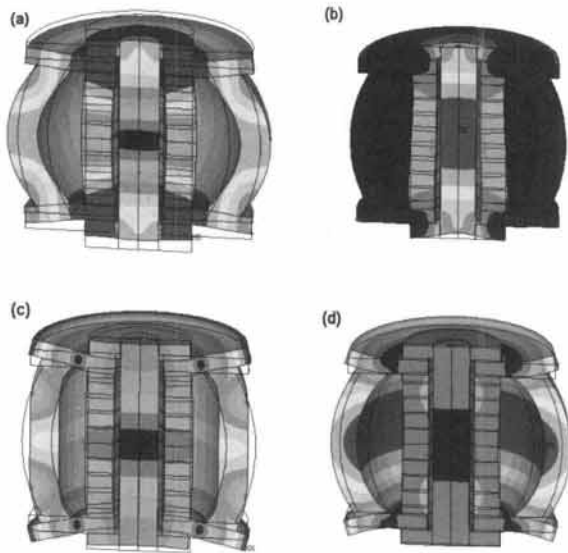


Fig. 3. Numerical analysis of the flextensional transducer: modal analysis.[Arb. Unit] (a) 1st flextensional mode(21.2 kHz), (b) thickness vibration mode(28.3 kHz), (c) 2nd flextensional mode(29.8 kHz), and (d) breath mode(36.7 kHz)

두께 42 mm, 마감판 5 mm, 절연체 3 mm를 적용하고, 셸의 내경은 43.2, 외경은 48.2 mm로 설정하였으며, 모드 해석 결과를 그림 3에, 조화해석 결과를 그림 4에 나타내었다. 그림 3(a)는 제 1 플렉스텐서널 진동모드로 적층 진동자의 수직 변형에 의해 셸의 수평운동이 발생하는 진동으로 그림 3의 임피던스 해석 결과와 같이 공진/반공진 특성이 뛰어난 운동 특성을 가지고 있다. 그림 3(b)는 적층진동자의 두께방향 진동모드로서 실제 셸의 진동은 거의 발생하지 않음을 알 수 있고, 이는 그림 4의 임피던스 해석에서도 해당 주파수의 특성 변화가 나타나지 않는 것으로부터 재확인할 수 있다.

그림 3(c), 3(d)는 제 2 플렉스텐서널 진동모드와 breath 진동모드로서 셸의 2차 변형 운동 및 셸 전체의 수축/팽창 운동 형태를 가지며, 제 2 플렉스텐서널 모드의 경우에서 셸 전체의 운동보다는 중앙부분의 운동이 지배적인 관계로 전체 효율은 낮음을 알 수 있으며, breath 진동모드는 실제 적층진동자의 변형과는 큰 연관성이 없는 동작 모드임을 알 수 있다. 따라서 제 1 플렉스텐서널 모드를 이용하는 것이 가장 효율적인 수중 발생 음압을 발생시키는 진동 방식임을 확인할 수 있으며, 이상의 기본모델에서 셸의 두께,

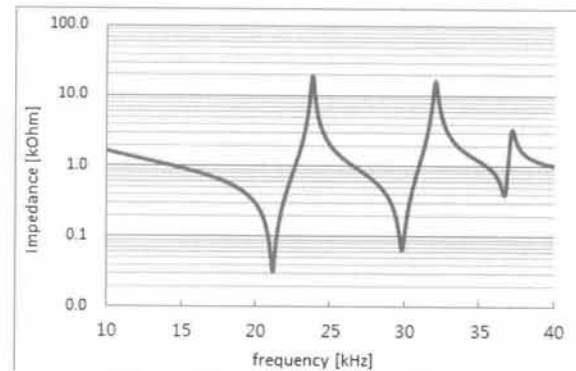


Fig. 4. Numerical analysis of the flextensional transducer: harmonic analysis.

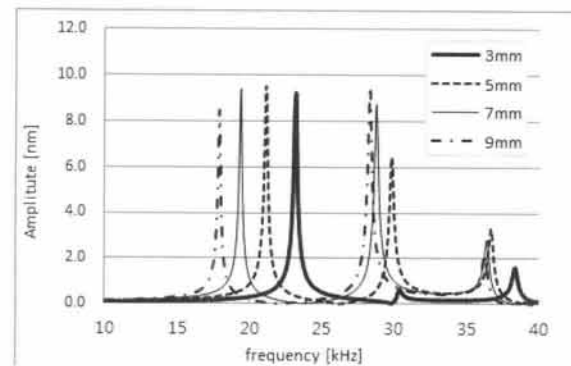


Fig. 5. Effect of the thickness of End-plate on the shell's horizontal displacement.

곡률반경, 마감판 두께 등 중요한 형상변수 조절을 통하여 가장 효율적인 구조를 도출하고자 하였으며, 효율적 구조의 판단기준은 셸 중앙점의 수평 변위와 공진/반공진 주파수 특성을 기준으로 하였다.

그림 5는 마감판 두께 변화에 따른 셸의 수평 운동의 변위를 계산한 것으로, 셸의 두께가 두꺼워질수록 제 1 플렉스텐서널 진동모드의 공진주파수는 수식 (1)에서 확인되는 바와 같이 두께에 비례하여 낮아짐을 알 수 있으며, 진동변위는 약간의 감소 경향을 보인다.

이상과 같은 방법으로 셸의 곡률, 셸의 두께, 마감판의 두께, 절연소자의 두께 변화에 대한 특성변화를 조사하였으며 그림 6에 그 결과를 나타내었다. 제 1 플렉스텐서널 공진주파수는 셸의 곡률과 마감판의 두께에 의해 크게 변하며, 반면 발생변위는 셸의 곡률과 셸의 두께에 의해 크게 변화하는 것을 알 수 있다.

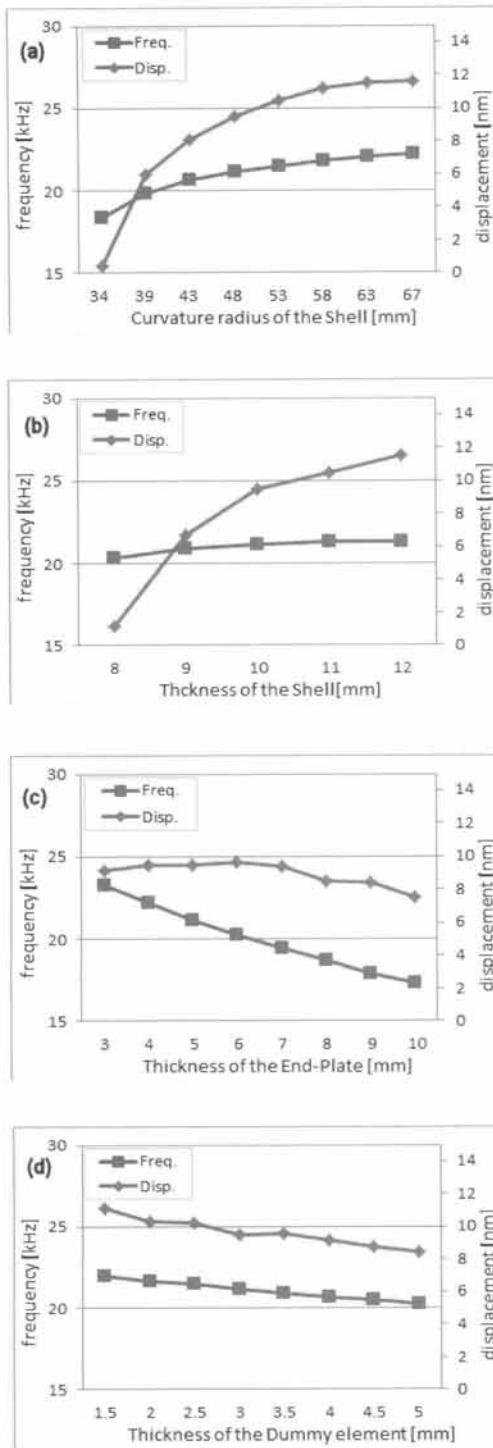


Fig. 6. Effect of the 4 design parameters on both the 1st flextensional resonant frequency and shell's horizontal displacement. (a) curvature of the shell, (b) thickness of the shell, (c) thickness of the end-plate, and (d) thickness of the Dummy element.

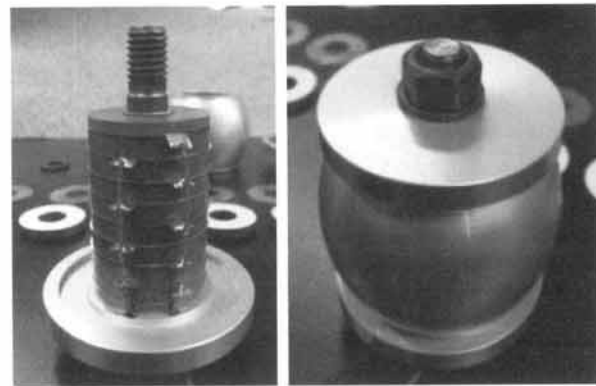


Fig. 7. Effect of 4 design parameters on both the 1st flextensional resonant frequency and shell's horizontal displacement.

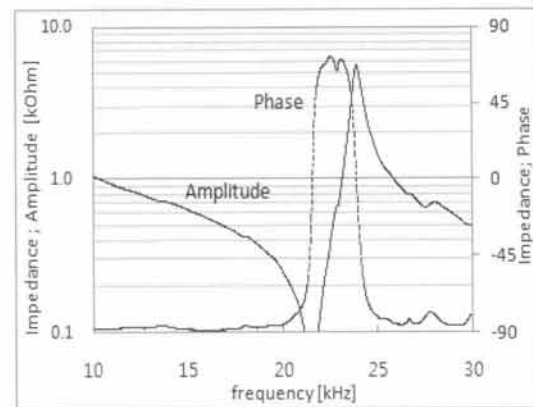


Fig. 8. Measured result of the impedance profile of flextensional transducer.

절연소자의 크기, 즉 전체 트랜스듀서의 수직 길이의 증가에 따라서는 공진주파수와 발생변위가 동시에 낮아지는 경향을 보임으로써, 가급적 절연소자의 두께는 얇게 설계하는 것이 유리하나, 지나치게 얇은 소자 적용 시 소자 파손의 문제점이 있어 적절한 두께 선정이 필요하다. 또한 셸의 두께를 두껍게 가져 갈수록 발생변위는 증가하는 것으로 계산되었으나, 이는 마감판의 두께가 5 mm로 한정되어 있을 경우에 대한 결과로서 마감판 두께의 약 2배의 두께에서 증가 기울기가 둔화되는 것을 알 수 있다. 실제로 본 트랜스듀서의 동작 구조상, 적층 진동자의 수직 운동이 마감판을 통해 셸의 수평운동으로 전환되는 구조로서, 마감판 대비 셸이 지나치게 두꺼울 경우에는 발생 변위 열화를 초래할 수 있다.

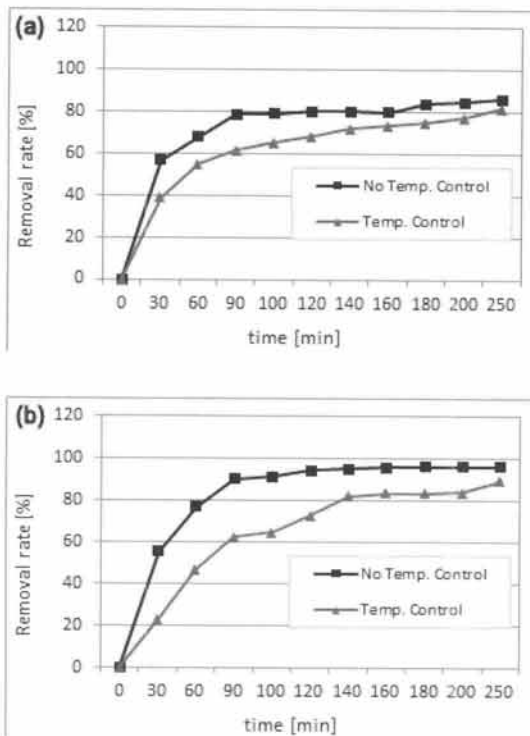


Fig. 9. Influence of TCE removal rate according to existence of temperature control: (a) 50 ppm, (b) 100 ppm.

이상의 결과들을 종합적으로 고려하여 22 kHz 중심주파수를 가지는 트랜스듀서 제작을 위하여, 기본 모델에서 셀의 내경을 57 mm로 수정하여 최종 모델을 선정하여 실제 제작하였으며, 실제 제작 샘플 및 측정된 임피던스 특성을 그림 7, 8에 나타내었다.

제작된 초음파 트랜스듀서를 50 ppm과 100 ppm의 TCE 용액 14 l가 담겨져 있는 그림 2의 반응조 내부에 배치한 후, 22 kHz, 60 W의 정현파 신호를 인가하여 시간별 TCE 제거도를 측정하였다. 그림 9에서 나타난 것과 같이, 온도 조절을 하지 않은 경우에 반응시간 50분 정도까지는 초기 농도와 상관없이 제거율이 직선적으로 증가하였으나, 이후 초기 농도가 높은 경우 반응시간이 경과함에 따라 제거율이 높게 나타났다. 반면 온도 조절을 한 경우에는 반응시간 100분 정도까지는 초기 농도가 낮은 경우가 제거율이 높게 나타났으나, 이후 초기 농도가 높은 경우 반응시간이 경과함에 따라 제거율이 높게 나타났다. 따라서 긴 반응시간과, 초기 농도가 높을수록 제거율이 높게 됨을 알 수 있다. 제거율 수치를 보면, 초기 농도의 80%를 제거하는 데는 온도조절을 하지 않은 경

우, 초기 농도 50 ppm에서 약 90분, 초기 농도 100 ppm에서는 65분 정도가 소요되었다. 반면, 온도조절을 한 경우에는, 초기농도 50 ppm에서 약 240분, 초기농도 100 ppm에서 약 140분이 소요된 것으로 나타났다. 제거율 증가 속도는 비교적 완만한 특성을 보여 장시간이 소요되었는데, 이는 반응조의 형태와 초음파 출력과 상관이 있으므로, 향후 초음파 출력강도, 반응조 형태에 따른 제거율에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 수중에 포함되어 있는 난분해 유해물질인 TCE를 효율적으로 분해할 수 있도록, 수중에서 직접 동작할 수 있는 소형의 플렉스텐서널 초음파 트랜스듀서의 구조를 제안하고, 유한요소해석법을 이용하여 여러 형상 변수를 조정하여 설계하고, 이를 실제 제작, 실험평가를 통하여 수중의 TCE 분해에 대한 가능성을 확인하고자 하였다.

이를 위하여, 플렉스텐서널 트랜스듀서의 셀의 곡률, 셀의 두께, 마감판의 두께, 절연소자의 두께 변화에 대한 제 1 플렉스텐서널 모드의 공진주파수 변화 및 셀의 수평 변위를 계산하였으며, 그 결과 셀의 곡률과 셀의 두께에 의해 크게 변화하는 것을 알 수 있었다. 이상의 결과를 바탕으로 중심주파수 22 kHz의 초음파 트랜스듀서를 제작하여 그 특성을 검증하였으며, TCE의 초음파 조사에 의한 제거효율을 확인하고자 밀폐형 반응조를 제작하고, 50 ppm과 100 ppm의 TCE 용액에 초음파를 인가하여 시간별 TCE 제거도를 측정하였다. 긴 반응시간과, 초기 농도가 높을수록 제거율이 높게 됨을 알 수 있었으며, 제거율 증가는 비교적 완만한 특성을 보여 장시간이 소요되었는데, 이는 반응조의 형태와 초음파 출력과 상관이 있으므로, 향후 초음파 출력강도, 반응조 형태에 따른 제거율에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

REFERENCES

[1] KRIBB, *Development of Biocatalyst for Dechlorination from Metagenome* (Ministry of Environment, 2009) p.11.
 [2] S. W. Jeon and R. W. Gillham, *J. Geological Soc. of*

- Korea*, 44, 557 (2008).
- [3] W. A. Arnold and A. L. Roberts, *Environ. Sci. Technol.*, 34, 1794 (2000).
- [4] A. Alippi, F. Cataldo, and A. Galbato, *Ultrasonics*, 30, 148 (1992).
- [5] F. Contamine, F. Faid, A. M. Wilhelm, J. Berlan, and H. Delmas, *Chem. Eng. Sci.*, 49, 5865 (1994).
- [6] O. B. Wilson, *Introduction to Theory and Design of Sonar Transducers* (Peninsular Publishing, Los Altos, 1988) Chap. 4-6.
- [7] J. R. Oswin and J. Dunn, *Power Sonics and Ultrasonic Transducers Design* (Springer-Verlag, Berlin, 1988).
- [8] G. Brigham, *J. Acoust. Soc. Am.*, 56, 31 (1974).
- [9] Y. W. Lam, *Applied Acoustics*, 36, 123 (1992).
- [10] J. C. Debus, J. N. Decarpigny, and B. Hamonic, *Power Sonics and Ultrasonic Transducers Design* (Springer-Verlag, Orlando, 1992).
- [11] L. E. Kinseler, A. R. Frey, A. B. Coppens, and J. V. Sanders, *Fundamentals of Acoustics* (John Wiley & Sons, Inc., New York, 2000) Chap. 3.
- [12] A. K. Ibrahim, T. A. Moghny, Y. M. Mustafa, N. E. Maysour, F. M. Dars, and R. F. Hassan, *ISRN Soil Science*, 2012, 9 (2012).