

하수관 퇴적물 감지를 위한 초음파 퇴적센서 개발

박범근 · 신정희 · 백종후 · 이영진⁺

Development of Ultrasonic Sediment-level Sensor for Sewer Pipe Application

Buem-Keun Park, Jeong-Hee Shin, Jong-Hoo Paik, and Young-Jin LEE⁺

Abstract

In this study, we successfully developed a highly reliable ultrasonic sediment sensor to detect the sediment levels in sewer pipes in harsh environments. The ultrasonic transducer employed in the ultrasonic sediment sensor was designed so as to possess a simple structure. The developed sensor was carefully optimized by simulating the electromechanical characteristics, radiated sound wave pressures, and directivity via finite element analysis. It was also designed to possess a simple mounting structure minimizing the flow disturbance in a 400-mm sewer pipe; additionally, eight ultrasonic transducers were arranged in a four-channel mode, allowing for measurement of the sediment height in five easy steps. Through experimental evaluations, we verified the performance of the ultrasonic sediment-level sensor and its industrial applicability. The results suggested that although the precision value was notably low at 15 mm, the sediment detection performance was adequate; therefore, the developed sensor can potentially be used in industrial applications.

Keywords: Sediment Level Sensor, Ultrasonic transducer, Sewer Pipe, Piezoelectric, FEA

1. 서 론

도시 지역에서 발생하는 국지성 집중호우로 인한 침수는 하수관거의 통수능 부족 및 빗물받이 폐쇄 등의 원인으로 인해 발생하며, 그 중 하수관 내의 퇴적물은 그 현상을 심화시키는 주요 원인 중 하나이다[1]. 하수관거 내 퇴적물은 또한 원활한 하수의 흐름을 방해할 뿐 아니라, 수질 악화 등의 부가적인 문제를 발생시켜 결막염, 기관지염, 폐수종 등의 각종 질병까지 야기시키는 것으로 알려져 있다[2].

강변이나 하천 등에 퇴적되는 토사 및 유사에 관한 퇴적측정 센서는 다양하게 연구되고 있으나, 우수관거 및 하수관에 대한 퇴적센서에 대한 연구는 거의 보고되지 않고 있다[3,4].

하수관거 속은 NH₃, CO, H₂S 등의 유해가스 농도가 높고, 하계 주위 온도도 높은 등 열악한 환경을 가지며, 그 속에서 안정성과 신뢰성 높은 동작을 위해서는 상대적으로 음파를 이용

하는 단순한 측정원리를 가지는 초음파 센서가 유리하며, 또한 퇴적센서를 구성하는 일부 초음파 트랜스듀서들 간의 시간차이를 측정하여 연속계로 활용하면 유량 측정이 동시에 가능한 장점도 가질 수 있다[5,6].

본 연구에서는 하수관 내의 퇴적물 레벨을 감지하기 위하여 높은 신뢰성을 가지는 초음파 퇴적센서를 개발하고자 하였다. 초음파 퇴적센서를 구성하는 핵심부품인 초음파 트랜스듀서의 구조를 단순하게 하기 위하여, 하우징 소재는 일반 시중에서 쉽게 구할 수 있는 합성수지계 재료를 적용하였다. 다양한 소재들을 적용하여 유한요소해석(Finite Element Analysis, FEA)을 통해 트랜스듀서의 전기기계적 특성, 방사음파의 음압, 지향성 등 모든 계산을 하였으며, 가장 적합한 구조를 선정, 제작하여 그 특성을 확인하였다.

400 mm의 하수관거에 흐름의 방해를 최소화하면서 장착이 용이한 퇴적센서 구조를 설계하고, 총 8개의 초음파 트랜스듀서를 4채널 배열구조로 내부에 배치하여 퇴적물의 높이를 5단계로 측정할 수 있도록 하였다. 실제 실험평가를 통해 초음파 퇴적센서의 성능을 검증하여 현장 적용성을 검증하였다.

한국세라믹기술원 전자융합본부 (Electronic Convergence Division, Korea Institute of Ceramic Engineering & Technology), Jinju 52851, Korea
⁺Corresponding author: yjlee@kicet.re.kr
(Received: Dec. 30, 2020, Revised: Jan. 19, 2021, Accepted: Jan. 21, 2021)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

2. 연구 방법

2.1 초음파 트랜스듀서 설계 및 제작

개발 대상 초음파 퇴적센서는 퇴적물이 없는 상태에서는 초음파 신호가 수중 경로를 통해 원활히 송수신 되지만, 퇴적물이 존재하는 경우 퇴적물의 방해로 초음파 신호가 감지되지 못하는 비교적 단순한 원리를 이용한다. 압전 세라믹으로부터 발생한 진동이 하우징을 거쳐 수중으로 원활히 전달되기 위해서는 정합층(matching layer) 역할을 하는 하우징 소재의 음향 임피던스(acoustic impedance)의 적절한 선정이 중요하다. 이상적인 단일 정합층은 압전소자의 음향 임피던스(Z_1 , 34Mrayl)와 물(Z_2 , 1.5Mrayl)의 음향 임피던스의 중간값($\sqrt{Z_1 Z_2}$)으로 약 7Mrayl 이지만, 이 값을 가지는 유용한 소재가 거의 없어 적절한 타협이 필요하다[7-9]. 또한 제품화를 위해서는 단가, 가공성, 내구성 등의 특성도 동시에 고려해야 한다.

본 연구에서는 하우징 소재 선정을 위하여 시중에서 쉽게 구할 수 있는 합성수지계 재료 중에서 적절한 밀도와 음속을 가지는 것으로 알려진 Table 1의 4가지 후보 소재를 선정하고, 발생 초음파의 음압(sound pressure), 지향성(radiation pattern) 및 임피던스 특성을 유한요소 해석을 통해 분석하였다.

Fig. 1에 도시된 바와 같이 트랜스듀서의 압전소자로부터 발생된 진동은 하우징 소재를 곧바로 거쳐 수중으로 방사 및 수신되는 단순한 구조이며, 퇴적센서 내에서 송수신 초음파 경로를 적절하게 형성할 수 있도록 앵글빔(Angle Beam) 트랜스듀서 구조를 적용하였으며, 각도 x의 변화에 따라 초음파의 방사각, 음압, 방사패턴 등을 종합적으로 고려해 가장 적합한 하우징 소재 및 방사각도를 결정하고자 하였다.

적용된 압전소자는 두께 진동모드 1 MHz 공진주파수를 가지도록 PZT5계의 두께 2 mm, 직경 10 mm 디스크형 압전소자를 사용하였다.

Table 1. Material properties of housing candidate materials (www.ndt.net)

Housing Material	Density [g/cc]	Sound Speed [m/s]	Acoustic impedance [Mrayl]	Thermal conductivity [W/m°F]
PLA(Polylacticacid)	1430	2260	3.23	0.24
POM(Polyoxymethylene)	1425	2440	3.48	0.23
PEI(Polyetherimide)	1270	2467	3.13	0.06
PEEK(Polyetheretherketone)	1320	2586	3.41	0.26

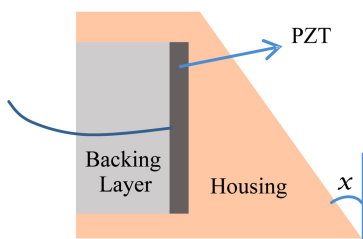


Fig. 1. Structure of the piezoelectric ultrasonic transducer.

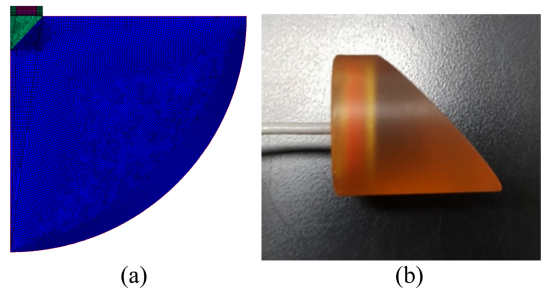


Fig. 2. Ultrasonic transducer; (a) Meshed finite element model and (b) Fabricated sample.

Fig. 2(a)는 상용 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS를 이용한 초음파 트랜스듀서의 유한요소 모델로서, 모델링에 사용된 노드(node)와 요소(element)는 각각 30,126, 29,785개이며, 요소는 PLANE42, PLANE13 및 공기와 물과의 FSI(Fluid-Structure Interfaces) 적용을 위해 FLUID29 요소를 사용하였다. 물의 외곽은 반사조건이 없는 무한경계 조건을 부여하여 반사와 영향을 배제하였다.

2.2 초음파 퇴적센서 제작

하수 배관의 직경은 다양하게 운영되며, 오폐수 배관에 널리 적용되고 있는 400 mm 직경 배관에 장착 가능한 퇴적 센서를 제작하였다. Fig. 3에서 보인 것과 같이 송수신 역할을 각각 하는 초음파 트랜스듀서 2개를 수평으로 나란히 배열하고, 수직으로 15 mm 간격으로 총 4채널로 구성하여 퇴적물의 높이에 따라 수신되는 초음파 신호의 유무를 통해 퇴적 높이를 5단계로 검출할 수 있도록 하였다. 각 채널별 2개의 트랜스듀서 간의 거리는 트랜스듀서의 방사각도 및 배관 반대쪽에 배치한 반사판과의 거리에 맞추어 배치하였다. 초음파 트랜스듀서가 배치된 부분은 하수의 흐름 방해를 최소화할 수 있도록 유선형으로 하였다.

2.3 특성 평가 방법

초음파 트랜스듀서의 임피던스 스펙트럼은 임피던스 분석기(HP4294A, HP) 로 측정하였으며, 초음파 신호는 Waveform Generator(KEYSIGHT, 335500B)로 파형을 발생시키고 이를 High Speed Bipolar Amplifier (NF, HSA4052)로 신호를 증폭시켰다.

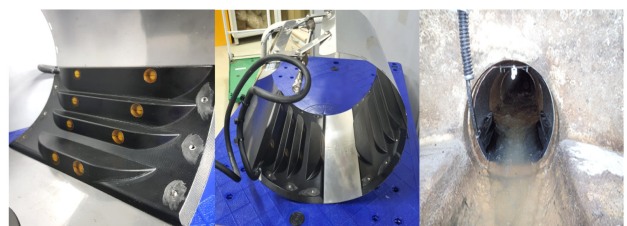


Fig. 3. Ultrasonic sediment level sensor.

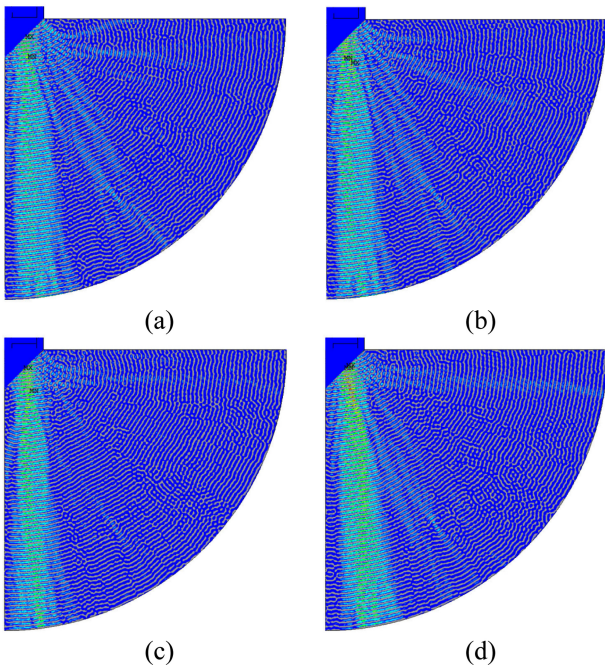


Fig. 4. Simulation Results of Sound Pressure in water: (a) PLA, (b) POM, (c) PEI, (d) PEEK.

수신된 초음파 신호는 Oscilloscope(Tektronix, DPO3054)를 통해 측정하였다

3. 결과 및 고찰

3.1 하우징 소재에 따른 특성 변화

전산모사 결과, 하우징 방사각을 45°의 조건에서 4가지 하우징 재질에 따른 수중에서의 초음파 트랜스듀서의 임피던스 특성은 크게 차이가 없었으며, Fig. 4의 음압 해석 결과에서 보이는 것과 같이 수중에서 4가지 소재 모두 원활한 초음파 발생이 이루어지는 것을 알 수 있고, PEEK > PEI > POM > PLA 의 순으로 높은 음압이 형성된다. PEEK와 PEI 두 소재 모두 본 연구에서 요구되는 음향 적합성을 만족하며 엔지니어링 플라스틱으로 우수한 강도와 내열성을 가지고 있으나, PEI 소재가 보다 단가가 낮고 열전도율이 훨씬 낮아 PEI 소재를 적용하는 것으로 결정하였다[10]. 그림에서의 단위는 정규화(normalized)된 값으로 붉은색이 높고, 푸른색이 낮은 압력을 나타낸다. Fig. 5은 PEI를 적용하여 임피던스 특성을 해석한 것으로 1 MHz에서 중심 주파수를 가지는 것을 확인할 수 있다.

3.2 지향각에 따른 특성변화

PEI의 굴절률(Reflective Index)는 1.529로 물의 굴절률 1.333

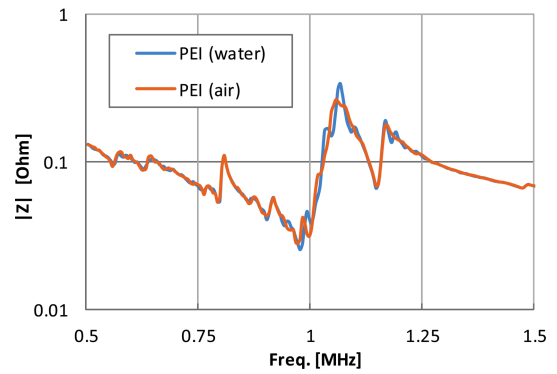


Fig. 5. Simulated Impedance properties in water and air (PEI).

과 큰 차이는 없으며[11], 따라서 Snell의 법칙에 따라 PEI와 물과의 계면에서 큰 굴절은 일어나지 않고 배치된 압전소자의 각도와 거의 유사한 방사특성을 가진다. 적용 가능한 각도는 장차

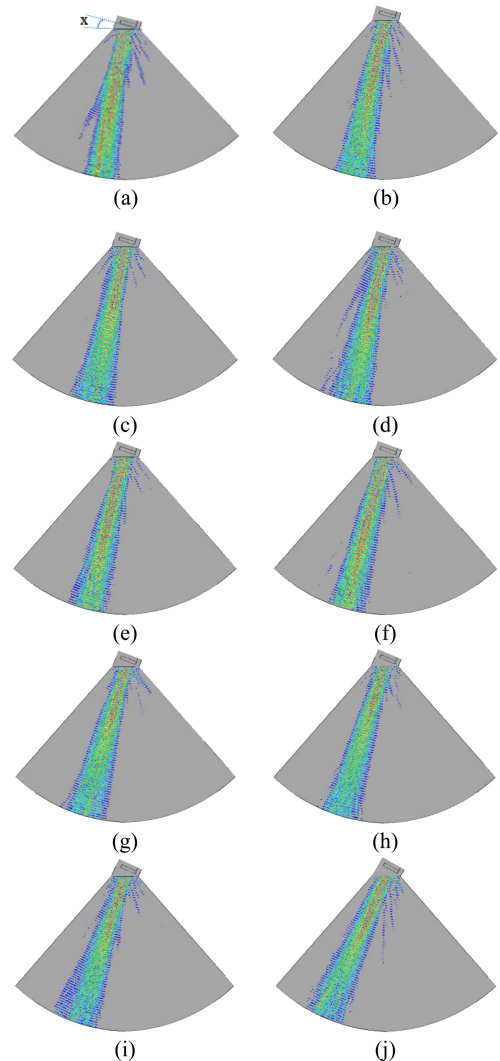


Fig. 6. Simulation Results of Sound Pressure according to the Case Angle: (a) 15°, (b) 16°, (c) 17°, (d) 18°, (e) 19°, (f) 20°, (g) 21°, (h) 23°, (i) 25°, (j) 30°.

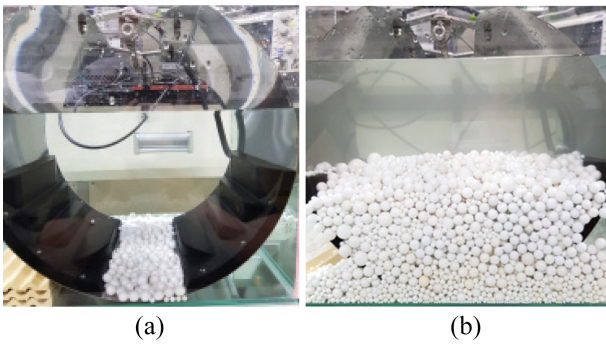


Fig. 7. Sediment level measurement; (a) Height of 30 mm, (b) Height of 120 mm.

될 퇴적센서의 트랜스듀서 배치 위치에 의해 1차로 결정되며, 각도가 30도 이상 넘어가면 송수신 초음파 트랜스듀서 간의 거리가 멀어져 적용이 어렵다.

따라서 15도에서 30도 사이의 각도 변화에 따른 발생 초음파 특성을 전산모사 하였으며, Fig. 6에서 보이는 것과 같이 19~20도의 각도에서 우수한 지향성과 음압이 형성됨을 알 수 있다.

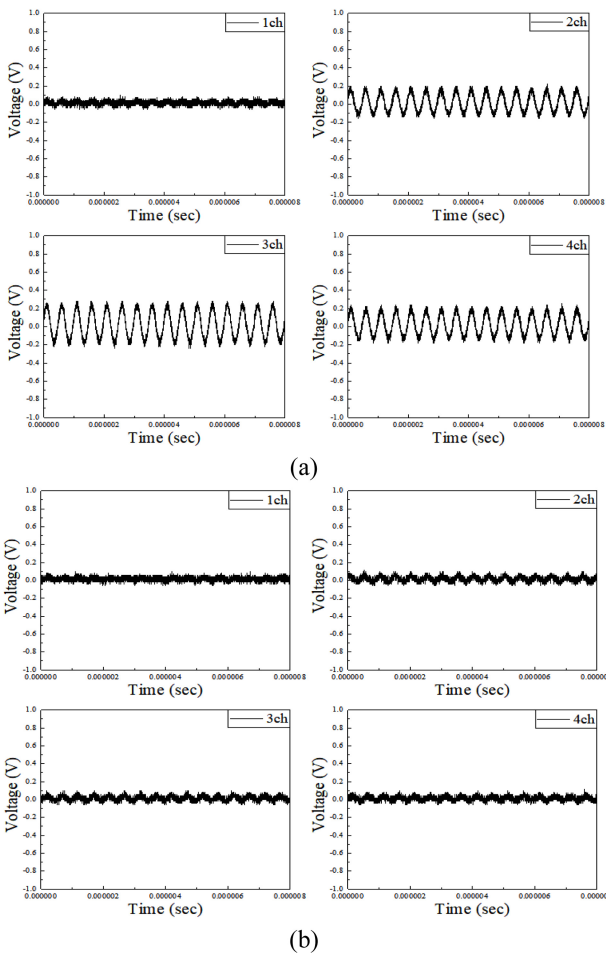


Fig. 8. Response of sediment level sensor to ; (a) Height of 30 mm, (b) Height of 120 mm.

그림에서의 단위는 정규화(normalized)된 값으로 붉은색이 높고, 푸른색이 낮은 압력을 나타낸다.

3.3 퇴적센서 특성평가

퇴적물의 높이에 따른 퇴적센서의 특성을 평가하기 위하여 Fig. 7과 같이 퇴적물을 대신할 다양한 크기의 지르코니아 볼을 배치하였다. 15 mm 간격으로 0에서 120 mm 높이로 배치한 후 waveform generator로 1 MHz주파수를 갖는 파형을 발생시키고 이를 High speed Bipolar Amplifier로 신호를 20배 증폭하여 각 채널의 신호를 검출하였다.

Fig. 8은 4채널별로 수신된 오실로스코프 파형을 나타낸 것으로 퇴적물의 높이에 따라 각 채널의 수신 신호의 유무를 통해 높이를 측정할 수 있으며, 15 mm 단위로 측정이 가능한 정밀도(resolution)를 가진다. 일반적인 센서의 성능을 고려하면 낮은 값이라 할 수 있지만, 실제 하수관거의 퇴적량을 모니터링 하는 수요업계에서는 충분한 성능으로 판단하여 실제 현장 적용에는 어려움이 없을 것으로 기대한다.

4. 결 론

본 연구에서는 하수관 내의 퇴적물 레벨을 감지하기 위하여 높은 신뢰성을 가지는 초음파 퇴적센서를 개발하고자 하였다. 초음파 퇴적센서에 적용된 초음파 트랜스듀서를 단순한 구조를 가지도록 하였으며, 유한요소해석을 통해 전기기계적 특성, 방사음파의 음압, 지향성을 모의 계산하여 가장 적합한 구조를 선정, 제작하여 그 특성을 확인하였다. 400 mm의 하수관거에 흐름의 방해 최소화하면서 장착이 용이한 퇴적센서 구조를 설계하고, 총 8개의 초음파 트랜스듀서를 4채널 배열구조로 내부에 배치하여 퇴적물의 높이를 5단계로 측정할 수 있도록 하였다. 실제 실험평가를 통해 초음파 퇴적센서의 성능을 검증하여 현장 적용성을 검증하였으며, 그 결과 정밀도는 15 mm로 다소 낮지만 실제 수요업계에서 요구하는 수준의 퇴적물 감지 성능은 충분히 구현하는 것을 확인하였다. 향후 정밀도 향상을 위하여 초음파 트랜스듀서 채널을 확대하고 다른 채널간의 송수신 신호분석을 통해 정밀도를 개선해 나갈 예정이다. 개발된 퇴적센서는 퇴적물의 걸림성을 최소화하기 위해 유선형으로 제작되었으며, 간단한 구조로 인해 고장의 확률이 낮아 별도의 유지보수 없이 장시간 사용이 가능할 것으로 예상되며, 이에 대한 추가 실험을 진행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 2020년도 환경부 환경기술개발사업 ‘상하수도 혁

신 기술개발사업(No. RE202001418)의 지원을 받아 수행됨.

REFERENCES

- [1] D. K. Kang, J. B. Park, D. S. Shin, H. S. Shin, J. K. Jang, D. J. Jo, "A Study on Flood Analysis for Reducing the Flood Damage in Urban Area", *J. Hydro-environ. Res.*, pp. 279-282, 2011.
- [2] S. S. Yoo, H. W. Ji, J. H. Kang, B. J. Lee, "Analysis of Sewer Pipe Sedimentation and Proposal of Sedimentation Solution for Reducing Odor", *Environ. Anal. Health. Toxicol.*, pp. 271-271, 2019.
- [3] B. H. Jun, C. D. Jang, N. G. Kim, "Analysis of Erosion and Deposition by Debris-flow with LiDAR", *J. KAGIS*, Vol. 13, No. 2, pp. 54-63, 2010.
- [4] A. J. Watt, M. R. Phillips, C. A. Campbell, L. Wells, and S. Hole, "Wireless Sensor Networks for monitoring under-water sediment transport", *Sci Total Environ*, Vol. 667, 160-165, 2019.
- [5] Y. J. Lee, J. I. Im, "Development and Evaluation of the piezoelectric transducer for the transit-time ultrasonic flow-meters", *Mag. IEKK -SC*, vol. 43, No. 4, pp.30-34, 2006.
- [6] F. Gomez, K. Althoefer, and L. D. Seneviratne, "Modeling of ultrasound sensor for pipe inspection", *Proc. IEEE*, Vol. 2, pp. 2555-2560, 2003.
- [7] V. T. Rathod, "A Review of Acoustic Impedance Matching Techniques for Piezoelectric Sensors and Transducers", *Sens.* Vol. 20, No. 14, pp. 4051, 2020 .
- [8] R. A. Webster, T. W. Button, C. Meggs, D. MacLennan, S. Cochran, "Passive Materials for High Frequency Ultrasound Components", *Proc. IEEE Ultrasonics Symp.*, pp. 1925-1928, New York, 2007.
- [9] T. L. Szabo, "Diagnostic Ultrasound Imaging: Inside Out", *Elsevier Academic*, Vol. 35, No. 2, pp. 100-117, 2004.
- [10] <http://www.goodfellow.com/> (retrieved on Dec. 30. 2020).
- [11] <https://www.chemicalbook.com/> (retrieved on Dec. 30. 2020).