

초음파 수위계의 최소 탐지거리 단축을 위한 파동유도관

Waveguide Shortening Minimum Detectable Distance in an Ultrasonic Level Meter

안 병 호* · 허 인 재* · 김 진 오†
Byeong Ho An*, In Jae Heo* and Jin Oh Kim†

(Received December 9, 2020 ; Revised January 4, 2021 ; Accepted January 5, 2021)

Key Words : Ultrasound(초음파), Sensor(센서), Distance(거리), Waveguide(파동유도관), Wedge(썰기), Reflection(반사)

ABSTRACT

This paper describes a method to shorten the minimum detectable distance of an ultrasonic sensor in a liquid-level meter. The minimum detectable distance, which is limited by the number of ultrasonic transmission pulses and the ringing of the vibration plates in the sensor, needs to be shortened by an appropriate method. The purpose of this research is to improve the proximal measurement capability by combining the ultrasonic sensor for a liquid-level meter with a waveguide. Flat- and wedged-wall-type waveguides were designed and finite-element analysis was performed for ultrasound transmission and reception. Experiments were conducted for the distance and water level measurements by using the ultrasonic sensor combined with a waveguide. The results of the finite-element analysis and experiments showed that the wedged-wall-type waveguide produced reasonable measurements of the distance in the proximal range. We confirmed the improvement of the proximal-measurement capability of an ultrasonic level meter, thus shortening the minimum detectable distance by combination with a waveguide.

1. 서 론

초음파 센서는 거리 측정 또는 장애물 감지⁽¹⁾와 유체 면 높이 측정⁽²⁾ 등에 사용된다. 이러한 용도의 초음파 센서 성능 항목 중에는 탐지거리 범위가 있다. 최대 탐지거리를 증대시키는 방안으로 센서 진동부의 치수 비율⁽³⁾이나 설계 변경^(4,5) 또는 혼 가이드 부착^(6,7) 등이 연구되어 있다. 최소 탐지거리는 초음파 송신 펄스 개수⁽⁸⁾와 센서 내부 진동관의 여진으로 인해 제

한된다. 이를 극복하기 위해 송신 펄스의 개수를 줄이는 방법이 있으나 장거리 측정에는 적합하지 않다. 또한 신호처리 방법이 시도되지만 여전히 제약을 받고 있어 다른 방법이 필요하다.

초음파에 의한 유체 면 높이 측정 기술은 액체 또는 기체에 활용된다^(9,10). 최소 탐지 거리를 감축하기 위하여 송신과 수신을 분리하는 방안⁽⁸⁾이 제시되었으나, 이 경우에 센서의 중심이 어긋나서 거리 측정이 부정확하고 최소 탐지 거리에는 여전히 한계가 존재한다. 센서 내부 진동관의 여진에 대한 포락선 데이터에 기

† Corresponding Author; Fellow Member, Soongsil University, Professor
E-mail : jokim@ssu.ac.kr

* Member, Soongsil University, Student

‡ Recommended by Editor Jae Young Kang

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

초하여 근접한 물체의 거리를 측정하는 방법이 고안⁽¹¹⁾ 되었다. 그리고 센서 여진에 파묻히는 신호를 추출하는 신호처리 방법^(12,13)이 제안되었지만 아직 실용화 되지 않았다. 또한 서로 다른 특성을 가지는 두 종류 이상의 제진제를 케이스의 저면부 상단에 도포하여 센서 내부 진동판의 여진을 효과적으로 억제하는 방법이 고안⁽¹⁴⁾되었으나, 위의 방법 모두 여진 신호 외에도 송신 펄스의 개수로 인해 최소 탐지 거리가 생김으로 근거리 측정 성능 향상에 그친다. 송신 펄스 개수로 인한 최소 탐지 거리를 감축하기 위해 초음파의 주파수를 높여 파장을 짧게하는 방안⁽¹⁰⁾이 제시되었으나, 최대 탐지거리도 단축시키는 단점이 있다.

불감지 영역 길이만큼 벽면이 매끈한 유도관을 설치하고, 초음파 전파 경로를 90° 꺾는 반사면을 결합하는 방안이 제시되어 있다⁽¹⁵⁾. 이 방안은 실용화에 장애가 되는 문제가 있어서 이를 해결하기 위해 벽면에 주름이 있는 파동유도관을 저자들이 고안하였다⁽¹⁶⁾. 고안된 파동유도관을 차량용 초음파센서에 적용하여 최소 탐지거리 단축 가능성을 확인한 바 있다⁽¹⁷⁾. 차량용 초음파센서에 비해서 수위계용 초음파센서는 음파 지향성이 좋은데 최소 탐지거리가 더 큰 차이가 있다. 이 논문은 파동유도관을 수위계용 초음파 센서와 결합하여 최소 탐지 거리를 단축한 결과를 제시한다. 파동유도관을 설계하고, 유한요소 해석으로 성능을 예측하며, 거리 측정과 수위 측정 실험을 하여 최소 탐지거리 단축을 확인한다.

2. 파동유도관 설계 및 유한요소 해석

수위계용 초음파 센서의 구조를 Fig. 1에 제시하였다. 수위계용 초음파 센서에는 압전 원판이 핵심요소이다. 전기 신호를 가하면 압전 원판이 진동하여 정합층을 거쳐

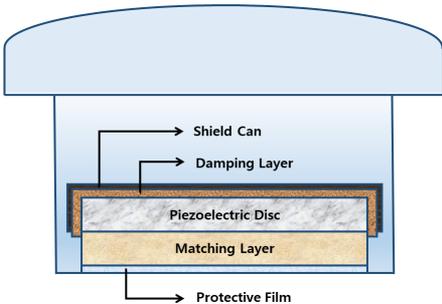


Fig. 1 Structure of ultrasonic sensor for water level meter

초음파가 방출된다. 이후 방출된 초음파가 측정 물체에 맞고 되돌아와 압전 원판을 진동시키면 전기신호로 변환되어 수신 신호를 나타낸다. 이 사례를 Fig. 2에 제시하였다. 여기서 송신 신호는 탄성 원판이 초기에 충분한 크기로 진동하기 위한 시간이 필요하다. 이로 인해 근접 거리를 측정하는 경우 수신 신호가 송신 신호에 겹치면 초음파 전파시간을 제대로 측정할 수 없다. 또한 송신 신호를 줄이기 위해 탄성 원판을 짧은 펄스 신호로 가진하여도 진동이 잔류하게 된다. 이로 인해 근접 거리를 측정하는 경우 수신 신호가 여진신호에 겹치면 초음파 전파시간을 제대로 측정할 수 없다. 이러한 제약조건을 극복하여 근접 거리 측정을 가능하게 하는 파동유도관을 설계 후 초음파 송·수신을 유한요소 해석으로 확인하였다.

2.1 파동유도관 설계

파동유도관의 기본 원리를 Fig. 3에 나타내었다. 센서에서 초음파가 방출된 후 파동유도관과 45°인 반사면을 통해 측정 물체를 향해 방출된다. 그리고 반사되어 되돌아오는 초음파가 센서에 수신되는 구조이다. Fig. 2에 제시된 송신 신호와 여진 신호 동안 초음파가 파동유도관 내에서 전파하므로 수신 신호는 송신 신호와 여진 신호에 겹치지 않는다. 따라서 파동유도관의 입구부터 측정 물체의 까지 거리 d 가 0에 근접해도 거리 측정이 가능하다.

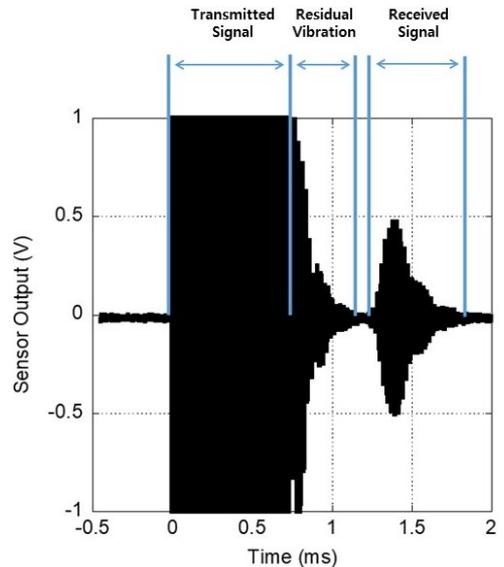


Fig. 2 Signals in a conventional ultrasonic sensor

Fig. 3(a)에 제시된 파동유도관 벽면이 매끈한 경우는 센서에서 생성되는 초음파는 균일한 평면파가 아니고 축대칭 종모양 불균일 파이므로, 파동유도관의 벽면에서 반사되며 진행하는 파동이 혼합된다. 따라서 반사된 초음파가 노이즈 신호로 수신된다. 이를 회피하기 위하여 Fig. 3(b)에 제시한 바와 같이 파동유도관의 내부 벽면에 켜기를 형성하였다. 초음파 센서가 원판형이므로 파동유도관도 원통형으로 설계하였다. 파동유도관 벽면에 관해서, 매끈한 경우와 종방향 켜기형을 비교하였다. 횡방향 켜기는 효과가 없음이 밝혀졌으므로⁽¹⁷⁾ 다루지 않았다.

Fig. 3에 보인 직선형 파동유도관은 전파경로를 90° 꺾기 위해서 45° 반사면이 필요하다. 이로 인한 부작용이

예상되는데, 이에 대해서는 후속 연구가 필요하다.

2.2 유한요소 해석

파동유도관을 설계하고 초음파 송·수신을 유한요소 해석하였다. 매끈한 벽면을 가지는 파동유도관, 종 방향 켜기가 있는 파동유도관의 치수를 Fig. 3과 같이 나타내었다. 여기서 L 은 유도관의 길이, β 는 켜기의 길이, α 는 켜기의 각도, d 는 파동유도관으로부터 타겟면까지의 거리이다. 파동유도관의 길이 L 은 18 cm로 수위계용 초음파 센서의 최소 탐지거리이다. 종방향 켜기가 있는 파동유도관에서 켜기의 길이 β 는 7.5 mm, 각도 α 는 30°이다. 음속이 343 m/s일 때, 45 kHz의 초음파의 파장 λ 는 7.6 mm 정도이므로 이 치수를 근거로 하였다. 각도는 임의로 선정하였다.

또한 실험에서 확인되는 송신신호 시간 0.5 ms에 맞추기 위해 23주기를 가진부에 인가하였다. 요소크기를 $\lambda/6$ 인 1.3 mm 이하로 설정하였다. 유한요소 해석의 모델링 결과를 Fig. 4에 제시하였고, 경계조건을 Fig. 5에 나타내었다. 파동유도관의 흡음은 고려하지 않았다. 초음파를 송신하고 타겟면에 반사되어 돌아오는 수신 신호를 관찰하였다.

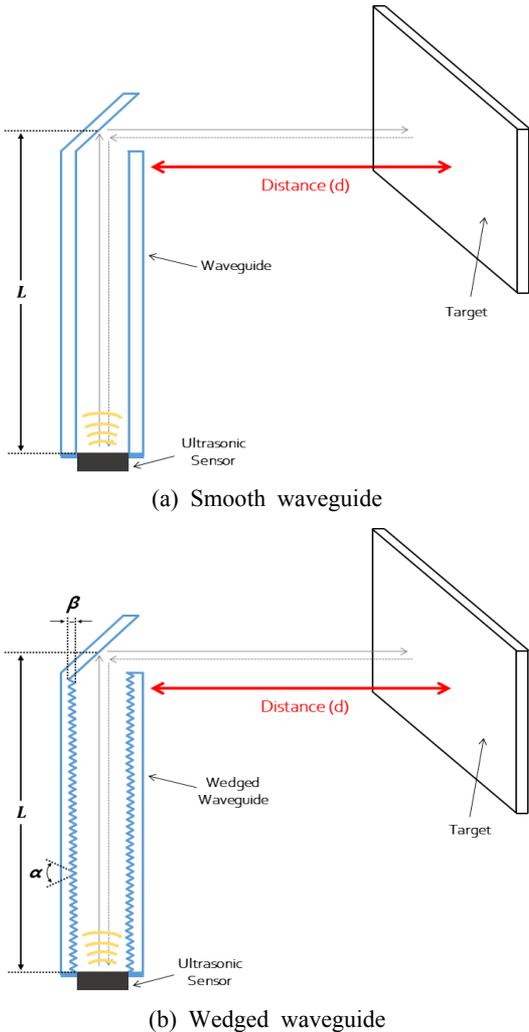


Fig. 3 Configuration diagram of tests

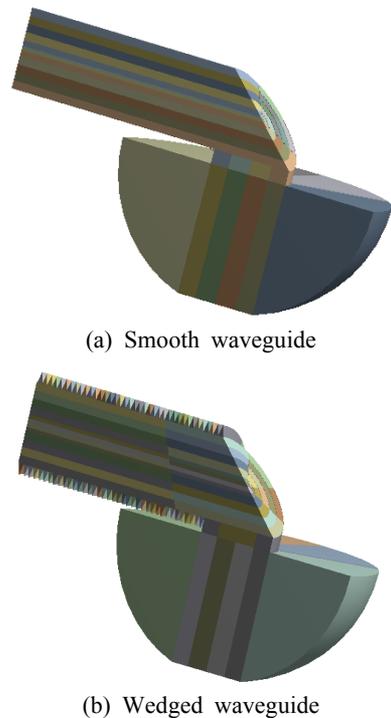


Fig. 4 Acoustic analysis model of a waveguide

유한요소 해석 후 시간에 따른 음압분포를 추출하여 초음파의 송신과 수신을 관찰하였다. 파동유도관의 벽면이 매끈한 경우로부터 타겟면까지의 거리 d 가 10 cm인 경우 파동유도관의 벽면이 매끈한 경우의 음압분포를 Fig. 6에 나타내었다. 그리고 파동유도관의 벽면이 종 방향 췌기인 경우의 음압분포를 Fig. 7에 나타내었다. 가진부에서 시간에 따른 음압을 추출하여 그래프로 제시하였다.

Fig. 8의 (a)는 파동유도관의 벽면이 매끈한 경우이며, (b)는 파동유도관의 벽면이 종 방향 췌기인 경우이다. 해석한 결과 파동유도관의 벽면이 매끈한 경우에는 측정 거리에 영향을 줄 수 있는 반사면 반사파와 출구 반사파 신호로 인해 10 cm에서의 거리 측정이 타당하지 못했다. 파동유도관의 벽면이 종 방향 췌기인 경우 췌기로 인한 송신신호 이후 노이즈가 있으나

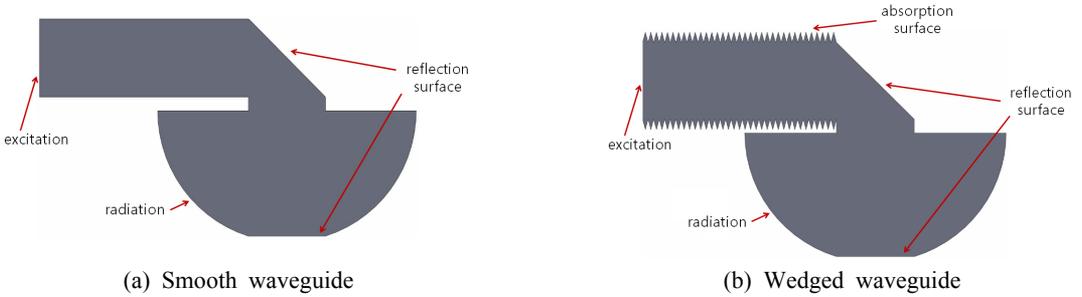


Fig. 5 Boundary conditions of acoustic analysis

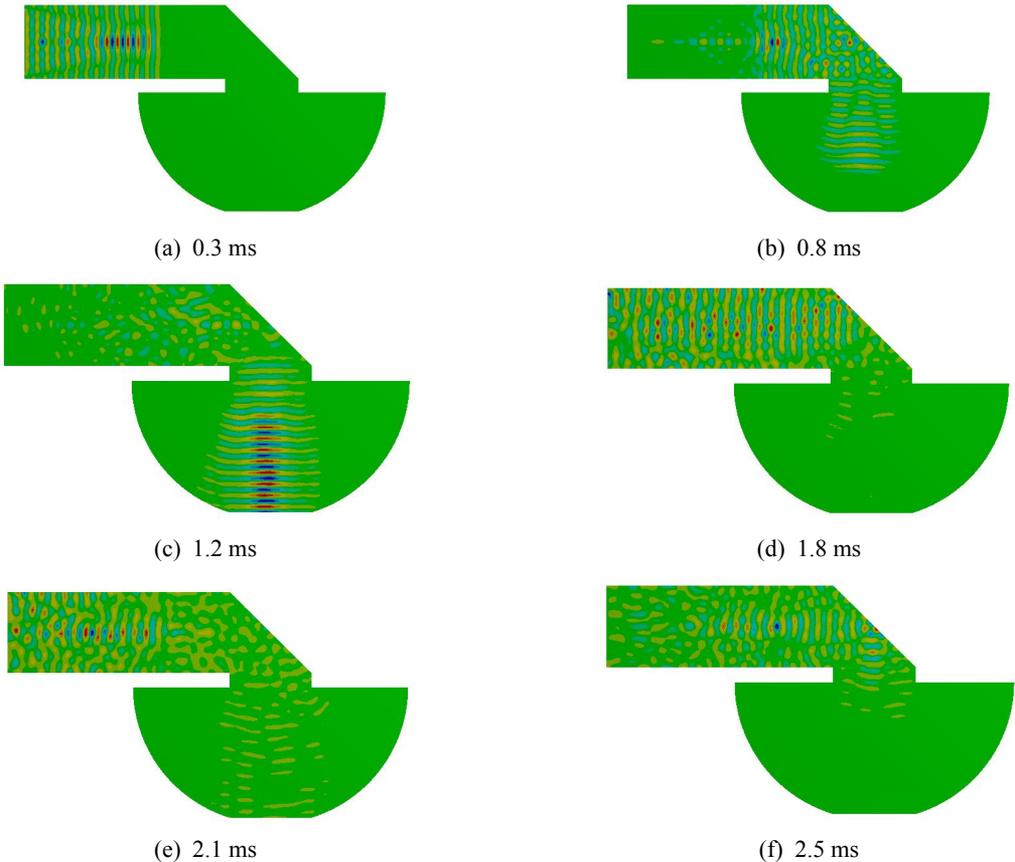


Fig. 6 Sound pressure distribution from transient analysis (with smooth waveguide)

반사면 반사파와 출구 반사파 신호가 생기지 않아 추출한 데이터로부터 거리를 계산하면 10 cm로 거리측정 결과가 타당하다.

따라서 초음파 센서에 파동유도관을 부착하여 거리측정을 하는 경우, 파동유도관의 벽면의 형상은 종방향 썸기 형상이 가장 적합함을 보여준다.

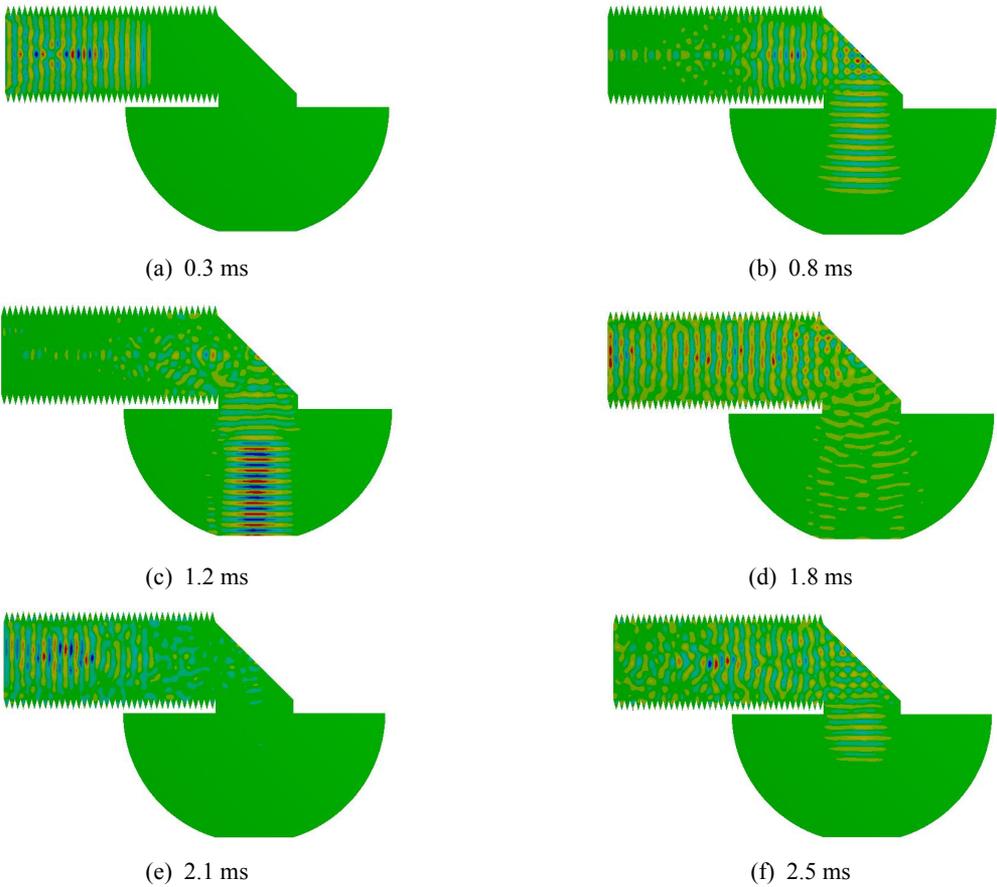


Fig. 7 Sound pressure distribution from transient analysis (with wedged waveguide)

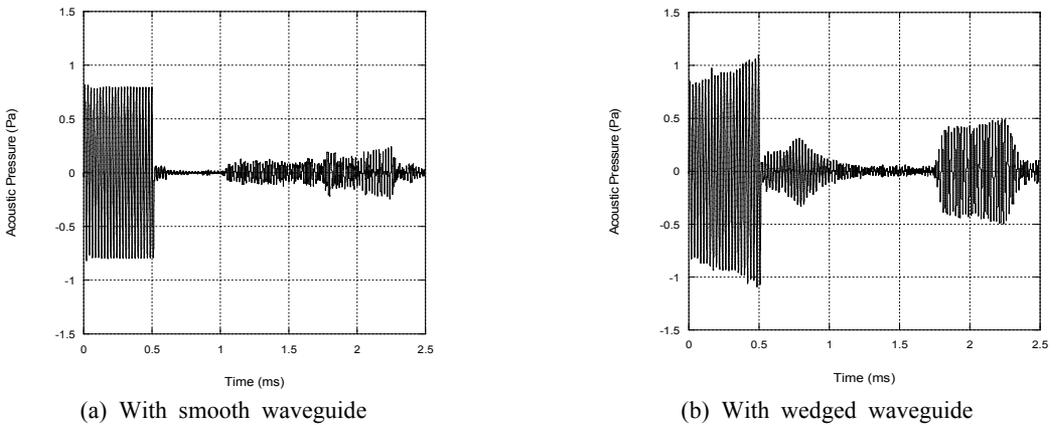


Fig. 8 Acoustic signal from transient analysis

3. 거리 측정 실험

유한요소 해석 결과와 비교하기 위한 거리측정 실험과 수위계에 적용하기 위한 수면 높이 측정 실험을 하였다.

3.1 실험장치

실험에 사용된 초음파 센서는 아이에스테크놀로지(주)의 초음파 수위계(LDX-05)의 센서부이다. 이 초음파 센서는 구동주파수가 45 kHz이고 지름이 56 mm이다. 초음파 센서와 결합되는 파동유도관을 Cubicon의 3D 프린터 Single Plus로 제작하였다. 파동유도관의 내부 벽면은 매끈한 것과 췌기형의 2종류로 하였다. 시제품 사진을 Fig. 9에 제시하였다.

실험 장치를 Fig. 10에 보인 바와 같이 구성하였다.



Fig. 9 Waveguide specimen made by a 3D printer

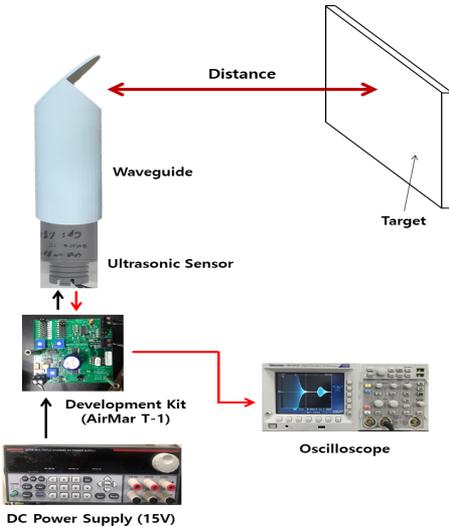


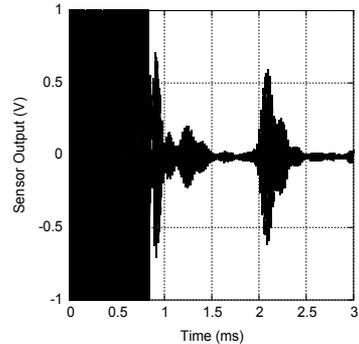
Fig. 10 Instrument configuration of distance measurement test

Tektronix의 직류전원 공급기 2231A-30-3에 의해 15 V 전압이 인가되는 송·수신보드(airmar T-1 development kit)를 사용하여 정현파 신호를 초음파 센서에 전달한다. 이 신호는 주파수가 45 kHz이고 전압이 150V0-p이다. 초음파 센서의 압전소자는 전달받은 전기 신호에 대응하는 진동을 하여 초음파를 방출하고, 파동유도관을 따라 전파하던 초음파는 유도관 끝에 45° 방향 반사면에서 90° 방향으로 반사되어 송출된다. 타겟에서 반사되어 되돌아온 초음파는 파동유도관을 거쳐 압전소자에 수신되고 전기신호로 변환되어 송·수신보드를 거친 후 오실로스코프에서 관찰된다.

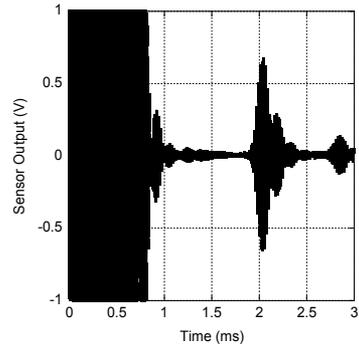
3.2 실험결과

(1) 거리 측정 실험

파동유도관에 45° 각도를 갖는 반사면을 결합하여 거리측정 실험을 하였다. 먼저 벽면이 매끈한 경우와 췌 방향 췌기인 경우에 대해서 비교하였다. 파동유도관의 길이 L 은 18 cm로 수위계용 초음파 센서의 최소 탐지거리이다. Fig. 11은 거리 d 가 0.1 m일 때 초



(a) With smooth waveguide



(b) With wedged waveguide

Fig. 11 Signals at the distance measurement

음과 송수신 신호를 오실로스코프로 관찰한 결과이다. (a)는 파동유도관의 벽면이 매끈한 경우이고 (b)는 종방향 췌기인 경우이다. 종방향 췌기가 있는 파동유도관에서 췌기의 길이 β 는 7.5 mm, 각도 α 는 30°이다. 유한요소 해석에서는 파동유도관의 흡음을 고려하지 않았지만, 실험 결과에서는 매끈한 부분에서도 흡음이 생김을 알 수 있다.

파동유도관의 벽면이 매끈한 경우에 거리측정 결과가 타당하지 못했다. 이는 수신 신호가 작고 측정 거리에 영향을 줄 수 있는 노이즈 신호가 종 방향 췌기 형상에 비해 상대적으로 크게 나왔기 때문이다.

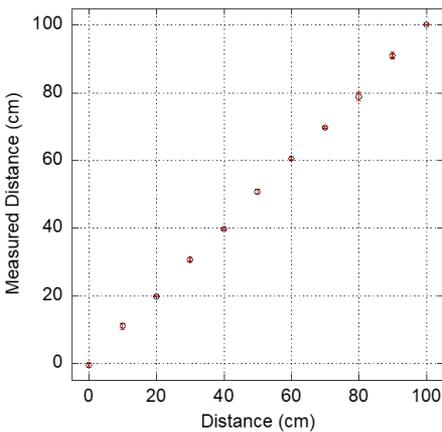


Fig. 12 Distance measurement result with a wedged waveguide

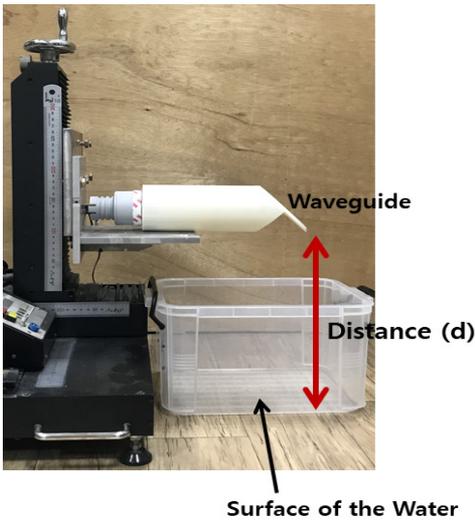


Fig. 13 Instrument configuration of water level measurement test

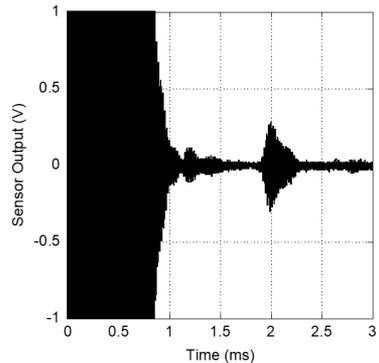
따라서 초음파 센서에 파동유도관을 부착하여 거리측정을 하는 경우, 파동유도관의 벽면의 형상은 매끈한 것보다 종 방향 췌기 형상이 더 적합함을 보여준다.

파동유도관으로부터 타겟까지의 거리 d 를 0부터 1 m 까지 0.1 m 간격으로 하여 실험하였고, 결과를 Fig. 12에 제시하였다. 실험을 3회 반복하였고, 평균값과 표준편차를 나타내었다. 표준편차를 에러 막대로 표시하였는데 작아서 점에 겹쳐져 있다.

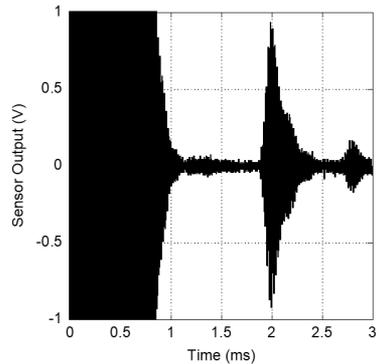
(2) 수위 측정 실험

수위측정 실험도 하였다. 실험 장면 사진을 Fig. 13에 제시하였다. 먼저 벽면이 매끈한 경우와 종 방향 췌기인 경우에 대해서 비교하였다. Fig. 14는 거리 d 가 0.1 m일 때 초음파 송수신 신호를 오실로스코프로 관찰한 결과이다. (a)는 파동유도관의 벽면이 매끈한 경우이고 (b)는 종 방향 췌기인 경우이다. 파동유도관의 벽면이 매끈한 경우에 거리측정 이 타당하지 못했다.

췌기형 파동유도관으로부터 수면까지의 거리 d 를



(a) With smooth waveguide



(b) With wedged waveguide

Fig. 14 Signals at the water level measurement

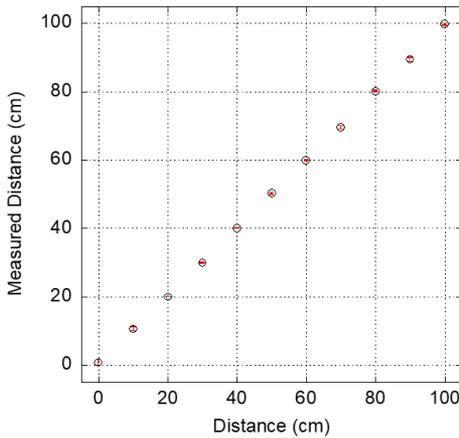


Fig. 15 Water level measurement result with a wedged waveguide

0부터 1 m까지 0.1 m 간격으로 하여 실험하였고, 결과를 Fig. 15에 제시하였다. 실험을 3회 반복하였고, 평균값과 표준편차를 나타내었다. 표준편차를 에러 막대로 표시하였는데 작아서 점에 겹쳐져 있다. 수위계용 초음파센서의 최소 탐지거리가 18 cm이므로 파동유도관을 사용하지 않은 실험의 결과는 Fig. 15에서 거리 0과 10 cm를 제외한 나머지 영역에서 파동유도관을 사용한 실험 결과와 같은 지점에 나타난다.

유한요소 해석 결과인 Fig. 8과 실험 결과인 Fig. 11 및 Fig. 14를 비교하면 차이점과 공통점이 있다. 실험 결과에서 관찰한 파형에는 타겟면에서 반사되어 돌아온 신호가 송신신호 시간보다 짧다. 이는 파동유도관 내에서 흡입이 있기 때문으로 추정되며, 향후에 해석에서도 이를 반영할 필요가 있다. 해석 결과와 실험 결과에서 공통적으로 썸기 벽면의 경우에 매끈한 벽면의 경우에 비해서 타겟면 반사와 신호가 뚜렷이 구별되고 불필요한 신호가 감소하였다.

4. 결 론

이 논문은 파동유도관을 수위계용 초음파 센서와 결합하여 최소 탐지거리 단축을 다루었다. 파동유도관은 벽면이 매끈한 경우와 종 방향으로 썸기가 있는 경우이다. 파동유도관을 모델링하여 초음파의 송·수신을 유한요소 해석하였다.

해석 결과를 검증하기 위해 거리 측정 실험과 수위 측정 실험을 하였다. 3D 프린터로 파동유도관을 제작

하였고, 제작한 파동유도관을 수위계용 초음파 센서와 결합하여 초음파의 송·수신을 측정하였다.

유한요소 해석과 실험을 통해 수위계용 초음파 센서에 파동유도관을 부착하여 거리 측정을 한 결과, 종 방향으로 썸기가 있는 경우가 더 적합한 것으로 확인되었다. 또한 초음파의 송·수신 측정 결과 근거리에서 거리 측정이 타당하게 이루어짐을 확인하였다.

파동유도관 벽면 썸기의 길이를 일단 초음파 파장과 유사하게 하였고 각도는 임의로 선정하였다. 음향학적 측면에서 썸기의 치수에 따른 특성 평가와 치수 선정에 의한 성능 향상이 후속 연구되어야 한다.

후 기

이 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. NRF-2020R1F1A1048453). 초음파 수위계를 사용하도록 한 아이에스테크놀로지(주)의 배려에 감사합니다.

References

- (1) Kim, J. O., 2000, Sensors and Actuators Using Ultrasound, Journal of KSNVE, Vol. 10, No. 5, pp. 723~728.
- (2) Kim, J. O., Kim, D. J. and Lee, S. H., 2014, Ultrasonic Level Meter, Korea Patent 10-1421137.
- (3) Mo, C., Wright, R., Slaughter, W. S. and Clark, W. W., 2006, Behaviour of a Unimorph Circular Piezoelectric Actuator, Smart Materials and Structures, Vol. 15, pp. 1094~1102.
- (4) Park, J. H., Yoo, G. S., Chae, M. K. and Yoon, J. H., 2015, Ultrasonic Transducer for Long-Distance, Korea Patent 10-1491462.
- (5) Seon, S. O. and Kim, J. O., 2019, Vibration and Acoustic Characteristics Depending on Housing Structures of Ultrasonic Sensors, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 29, No. 2, pp. 157~165.
- (6) Lim, S. G. and Kim, J. O., 2018, Acoustic Directivity of an Ultrasonic Sensor Depending on Horn Guide Shape, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 28, No. 6, pp. 707~712.

(7) Lim, S. G. and Kim, J. O., 2019, Acoustic Directivity of an Ultrasonic Sensor Depending on Horn Guide Dimension, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 29, No. 3, pp. 379~388.

(8) Kim, J. H. and Chong, J. W., 2006, A Development of Ultrasonic Based Distance Meter Through Detachment of Receiving and Transmitting Capacitive Ultrasonic Transducer, Journal of the Institute of Electronics Engineers of Korea – System and Control, Vol. 43, No. 3, pp. 41~50.

(9) Zhang, Y., Zhang, B., Zhang, L., Li, Y., Gao, X. and Liu, Z., 2018, Liquid Level Measurement Model Outside of Closed Containers Based on Continuous Sound Wave Amplitude, Sensors, Vol. 18, No. 8, p. 2516.

(10) Zakaria, Z., Idroas, M., Samsuri, A. and Adam, A. A., 2017, Ultrasonic Instrumentation System for Liquefied Petroleum Gas Level Monitoring, Journal of Natural Gas Science and Engineering, Vol. 45, pp. 428~435.

(11) Lee, S. H., 2018, Method for Driving Ultrasonic Sensors to Measure Short Distance, Korea Patent 10-1887902.

(12) Licznarski, T. J., Jaronski, J. and Kosz, D., 2011, Ultrasonic System for Accurate Distance Measurement in the Air, Ultrasonics, Vol. 51, No. 8, pp. 960~965.

(13) Hernandez, A., Urena, J., Mazo, M., Gracia, J. J., Jimenez, A. and Alvarez, F. J., 2007, Reduction of Blind Zone in Ultrasonic Transmitter/Receiver Transducers, Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 133, No. 1, pp. 96~103.

(14) Um, J. H., 2018, Ultrasonic Sensor, Korea Patent 10-0794205.

(15) Lee, S. G., Kim, I. S. and Kwon, N. W., 2014, Ultrasonic Level Measuring Device without Blanking Distance Zone, Korea Patent 10-1419410.

(16) Kim, J. O. and Lim, S. G., 2020, Ultrasonic Wave Apparatus for Measure of Distance, Korea Patent 10-2179231.

(17) Lim, S. G., An, J. H. and Kim, J. O., 2020, Shortening the Minimum Detectable Distance in an Ultrasonic Sensor for Automobiles by a Waveguide, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 30, No. 4, pp. 396~405.



Byeong Ho An received the B.S. and M.S. degrees in mechanical engineering from Soongsil University in 2018 and 2020, respectively. During his stay at Soongsil as a graduate student, he was working on ultrasonic sensors and wave propagation.



In Jae Heo received the B.S. degree in Automation Engineering from Dongyang Mirae University in 2020. He is currently a master candidate as a graduate student. He is working on ultrasonic sensors and waves.



Jin Oh Kim received the B.S. and M.S. degrees in mechanical engineering from Seoul National University in 1981 and 1983, respectively, and the Ph.D. degree from University of Pennsylvania in 1989. For ten years he has got research experiences at Korea Research Institute of Standards and Science, Northwestern University, and Samsung Advanced Institute of Technology. Since 1997, he has been working at Soongsil University, where he is currently a Professor of mechanical engineering. His research interests are in the area of ultrasonic sensors and actuators using mechanical vibrations and waves.