

직선형 파동유도관에서 벽면 췌기의 길이에 따른 초음파 전파 Ultrasonic Propagation according to the Length of Wall Wedges in a Linear Waveguide

이 제 홍* · 김 진 오†
Jae Hong Lee* and Jin Oh Kim†

(Received December 6, 2022 ; Revised January 19, 2023 ; Accepted January 20, 2023)

Key Words : Ultrasonic Wave(초음파), Sensor(센서), Propagation(전파), Waveguide(파동유도관), Wall Wedge(벽면 췌기)

ABSTRACT

This study focuses on the ultrasonic propagation along the wedge length of the wall in a straight waveguide designed to reduce the minimum detection distance of an ultrasonic sensor for distance measurement. Wedges are created on the waveguide wall to avoid ultrasound interference caused by reflection on a smooth wall, and the wedge dimensions must be chosen carefully. The magnitude of the ultrasonic signal was evaluated according to the wedge length in terms of the ratio of the target reflection to the exit reflection while maintaining the wedge angle selected in the previous study. The propagation of ultrasonic waves was studied using finite element analysis. The wedge length that maximizes the magnitude of the ultrasonic signal was found to be similar to the wavelength. It was possible to reduce unwanted reflection and increase target reflection by adjusting the waveguide wall wedge length.

1. 서 론

초음파 기술을 사용한 거리측정 센서는 초음파 수위계⁽¹⁾, 차량 후방감지기⁽²⁾ 등에 활용된다⁽³⁾. 거리측정용 초음파센서를 사용할 때 탐지거리 범위는 센서의 성능을 나타내는 지표 중 하나이다⁽⁴⁾. 송신과 수신을 겸하는 초음파 센서에서 최소 탐지거리가 제한되는 시간이 발생한다⁽⁵⁾. 이는 진동판 여진 때문에 나타난다. 이로 인해서 타겟을 감지할 수 없는 시간을 불감지 시간이라 한다. 불감지 시간에 해당하는 거리만큼의 길이를 갖는 파동유도관(waveguide)을 개입시키는 방법⁽⁵⁾이

고안되어 최소 탐지거리를 단축하고자 하였다.

파동유도관의 기본 개념은 Fig. 1 (a)에 보인 바와 같다. 파동유도관의 출구에서부터 타겟면까지 거리 d 를 측정한다. 이때 불감지 영역의 거리를 단축하기 위해 길이 L 만큼의 직선길이를 갖는다. 이러한 파동유도관에서는 벽면에서 반사하며 진행되는 파가 직선으로 진행되는 파에 간섭하여 파형신호에 변형을 일으킨다.

유도관 벽면의 반사를 줄이기 위해 앞선 연구⁽⁶⁾에서는 Fig. 1 (b)와 같이 벽면 흡음률을 증가시키는 방안을 제시하였다. 벽면에 췌기를 설치하고, 벽면 췌기 치수를 선정하기 위해 췌기 각도에 따라 거리측정용 초음파 신호 크기를 평가했다. 최적의 벽면 췌기 각도를

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

‡ Recommended by Editor Seong Yong Wie
© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

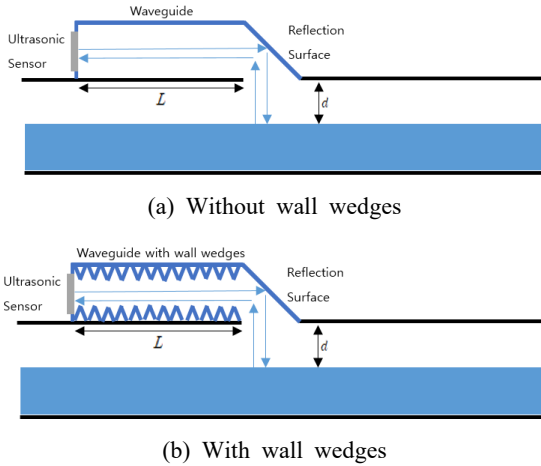


Fig. 1 Schematic diagram of linear waveguides

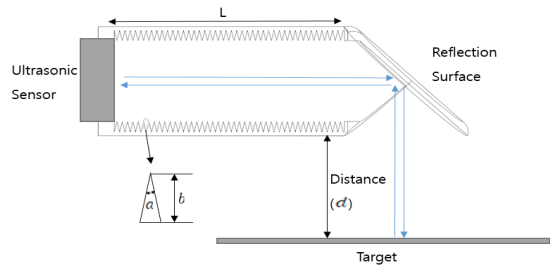


Fig. 2 Dimensions of the waveguide and wall wedges

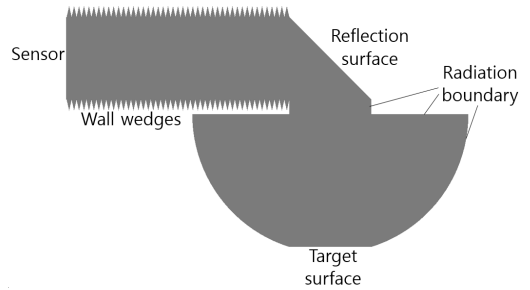


Fig. 3 Analysis model and boundary conditions

찾았는데, 썩기 치수를 결정하는 요인 중 다른 하나인 썩기 길이에 따른 성능 차이를 파악하지는 않았다.

무향실 벽면 썩기의 흡음특성은 썩기가 길수록 주파수 광대역에서 전반적으로 흡음률이 크지만, 특정 주파수에서 흡음률이 특히 더 크고 썩기가 길수록 그 주파수는 낮게 나타난다⁽⁷⁾. 따라서 일정 주파수의 파동에서는 흡음률이 가장 큰 썩기 길이가 있음을 예상할 수 있다. 이 연구는 파동유도관에서 벽면 썩기 길이에 따른 초음파 전파 특성을 유한요소 해석을 통해 확인하고, 초음파 센서에 수신된 신호 크기를 평가한다. 실험을 하여 해석 결과를 비교 검증한다. 해석과 실험을 통해 파악되는 최적 썩기 길이로 파동유도관 내부 벽면을 설계함으로써 최소탐지거리 단축용 파동유도관의 초음파 전파 성능을 향상시키고자 한다.

2. 파동유도관 벽면 썩기 설계

파동유도관 벽면의 흡음률이 크면 불필요한 출구 반사파가 작고 필요한 타겟면 반사파가 크다⁽⁶⁾. 흡음률을 크게 만들기 위해 유도관 벽면에 썩기를 형성한다.

2.1 벽면 썩기 각도

Fig. 2와 같이 썩기 치수를 구성하는 요소로 썩기 각도 a 와 썩기 길이 b 가 있다. 이전 연구에서 썩기 각도 25° 부근에서 흡음률이 크고 타겟면 반사파 수신신호가 가장 큰 것을 알아냈다⁽⁶⁾. 이에 따라 썩기 각도 a 를 25° 로 설정했다.

2.2 벽면 썩기 길이

연구대상 수위계용 초음파 센서의 구동주파수는 45 kHz이다. 공기 중에서 음속이 약 340 m/s이므로 파장 λ 는 7.5 mm이다. 썩기 길이가 파장의 1/4보다 커야 흡음 효과가 있다⁽⁸⁾. 이는 썩기가 길면 썩기 구석에서 초음파가 여러 번 반복해서 반사하기 때문이다. 이에 근거해서 이보다 충분히 큰 7.5 mm를 썩기 기준길이에 설정했다. 이 기준길이 부근의 여러 썩기 길이에 대하여 해석과 실험을 하였다. 이를 통해 최적의 썩기 길이를 찾는다.

3. 유한요소 해석

파동유도관에서 썩기 길이에 따른 초음파 전파에 대해 유한요소 해석을 하였다. 상용 프로그램인 ANSYS를 사용하였다.

3.1 해석 모델 및 조건

Fig. 3과 같이 해석 모델을 설정한 후 초음파 전파를 해석하였다. 방사 경계조건을 위해 파동유도관의 출구부분에서 타겟면까지의 공간은 반구형으로 설정했다. 파동

유도관의 벽면은 쐐기가 부착된 형태로 설정했다. 쐐기 치수에서 쐐기 각도는 25°로 일정하게 유지하고 쐐기 길이는 5 mm부터 10 mm까지 여러 모델로 해석했다.

Fig. 3에 보인 해석 모델은 128 941개의 절점으로 구성되어 있다. 해석 영역의 매질은 공기이고, 요소 크기는 1.5 mm 이하로 설정했다. 실제 센서 위치에서 주파수가 45 kHz인 정현파 23주기인 가진 신호를 인가하였다. 파동유도관 입구의 센서에서 초음파가 발생하고 유도관을 따라 전파한다. 전파된 초음파가 45°의 반사면에서 반사되어 90° 꺾여 출구 밖으로 방출되고 타겟면에서 반사하여 되돌아오는 과정을 해석했다.

3.2 해석 결과

ANSYS의 과도(transient)해석 기능을 이용해서 초음파 전파를 해석했다. 해석 결과인 음압 신호를 Fig. 4에 쐐기 길이별로 제시했다. 쐐기 각도는 25°이고, 쐐기 길이가 5 mm, 7 mm, 7.5 mm, 8 mm, 9 mm, 10 mm인 경우의 음압신호를 나타냈다. 공기 매질에서 음속을 감안하여 0.5 ms ~ 0.9 ms, 0.9 ms ~ 1.7 ms, 1.8 ms ~ 2.3 ms 구간이 각각 벽면 쐐기 반사파, 출구 반사파, 타겟면 반사파로 구분된다.

Fig. 4 (a)에 벽면 쐐기 반사파, 출구 반사파, 타겟면 반사파 구간을 표기하였다. Fig. 4 (e)와 (f)에서 시간이 0 ms ~ 0.5 ms일 때 가진 신호가 일정한 크기로 나타나지 않는다. 이는 쐐기 길이가 길어짐에 따라 쐐기에 입사하는 파가 증가하여 쐐기에서 반사되어 송신부로 돌아오는 벽면 쐐기 반사파가 커졌기 때문이다. 벽면 쐐기 반사파가 커져 가진 신호에 영향을 줄 뿐만 아니라 출구 반사파 신호, 타겟면 반사파 신호에도 영향을 준다. 이에 따라 쐐기 길이가 일정한 길이 이상인 경우 초음파 수신 성능을 오히려 감소시키는 경향의 결과가 나타났다.

Fig. 4의 그래프에서 출구 반사파와 타겟면 반사파 구간에서 음압 크기를 RMS 값으로 구해서 Table 1에 기재하였다. 이 데이터를 Fig. 5에 그래프로 나타냈다. Fig. 5 (a)에 출구 반사파 크기를 나타냈다. 쐐기 길이가 8 mm 이상일 때 출구 반사파가 커지는 경향을 보인다. 출구 반사파가 생기는 구간에서 타겟면 반사파가 형성된다면 두 신호를 구분하기가 어렵기 때문에 출구 반사파는 작을수록 좋다. Fig. 5 (b)는 타겟면 반사파 크기를 나타낸다. 쐐기 길이 7.5 mm에서 타겟면 반사파가 가장 크며 이 쐐기 길이에서 멀어지

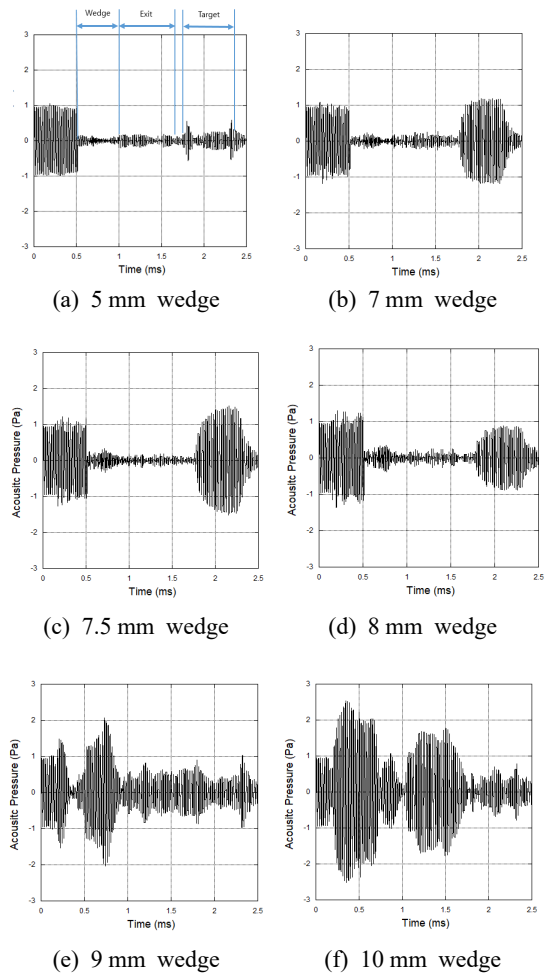


Fig. 4 Ultrasonic wave signals at various waveguides obtained by analysis

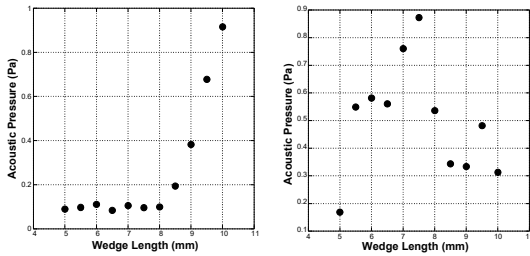
면 반사파 크기가 작아진다. 타겟면 반사파가 크면 파동 신호 수신에 유리하다.

쐐기가 길수록 타겟면 반사파가 큰 게 아니라 특정 쐐기 길이에서 극대값을 나타내는 이유를 추론할 수 있다. 첫째 이유는 Fig. 4 (e, f)에서 확인했듯이 쐐기가 너무 길면 파동이 유도관 밖으로 방출되기 전에 쐐기에서 차단되는 것이다. 둘째 이유는 일정한 쐐기 길이에서 흡음률이 극대값인 주파수가 있으므로⁽⁷⁾, 주파수 또는 파장에 따라 흡음률이 극대값을 나타내는 특정 쐐기 길이가 있기 때문이다.

이전 연구에서 거리측정용 초음파 신호 크기를 평가하기 위해 TER(target reflection to exit reflection ratio)을 식 (1)과 같이 정의했다⁽⁹⁾.

Table 1 Signal magnitudes of exit reflection and target reflection obtained by analysis

Wedge length [mm]	Acoustic pressure [Pa]		TER [dB]
	Exit reflection	Target reflection	
5.0	0.090	0.169	5.45
5.5	0.090	0.549	14.53
6.0	0.111	0.582	14.41
6.5	0.077	0.600	16.56
7.0	0.106	0.761	17.13
7.5	0.076	0.925	19.17
8.0	0.099	0.536	14.66
8.5	0.198	0.332	4.96
9.0	0.383	0.334	-1.175
9.5	0.694	0.442	-2.96
10.0	0.916	0.313	-9.34



(a) Reflection at the exit (b) Reflection at a target

Fig. 5 Magnitudes of received signals after reflection obtained by analysis

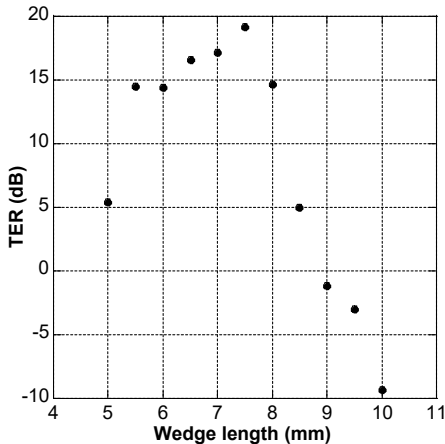


Fig. 6 Target reflection to exit reflection ratio obtained by analysis

$$TER \equiv 20 \log \frac{P_{target}}{P_{exit}} \text{ (dB)} \tag{1}$$

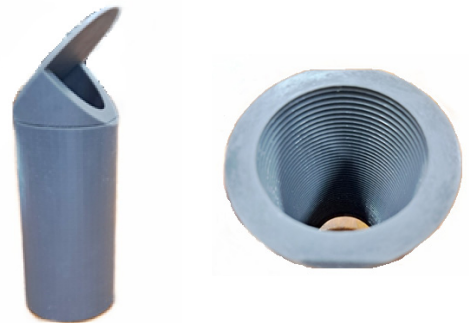
이는 타겟면 반사파와 출구 반사파의 크기 비를 나타낸다. Table 1에서 음압 크기를 TER 값으로 환산하여 오른쪽에 기재하고, 이를 Fig. 6에 그래프로 나타냈다. 썸기 길이 7.5 mm 부근에서 최대값을 나타내고 이 길이에서 멀수록 TER 값이 작은 경향을 보인다. 이를 통해서, 출구 반사파는 작고 타겟면 반사파는 큰 최적의 썸기 길이를 찾았고, 파동유도관 썸기를 형성할 때 활용할 수 있는 경향을 얻었다.

4. 실험

벽면의 썸기 길이가 다양한 파동유도관 시제품들과 수위계용 초음파센서를 결합해 초음파 송·수신 실험을 하고, 이를 통해서 유한요소 해석 결과를 검증했다.

4.1 실험 방법

실험에서 사용된 수위계용 초음파센서는 아이에스 테크놀로지사의 LDX-05이다. 이 초음파센서의 구동 주파수는 45 kHz이고, 지름은 57 mm이다. 초음파센서와 결합되는 파동유도관을 formlabs의 3D 프린터 form 3로 제작하였다. 사용한 3D 프린터 form 3는 광경화(stereo lithography apparatus) 방식으로서, 일반 3D 프린터에 비해 매끈한 곡면을 만드는 데에 유용하다. 썸기 각도를 25°로 일정하게 하고, 썸기 길이를 6.5 mm ~ 8.5 mm까지 5 mm 간격으로 설계하여 시제품을 제작하였다. 그중 하나를 Fig. 7에 제시하였다. 이는 썸기 길이가 7.5 mm인 경우이다.



(a) Outer shape (b) Inner shape

Fig. 7 Waveguide with wedge angle 25°

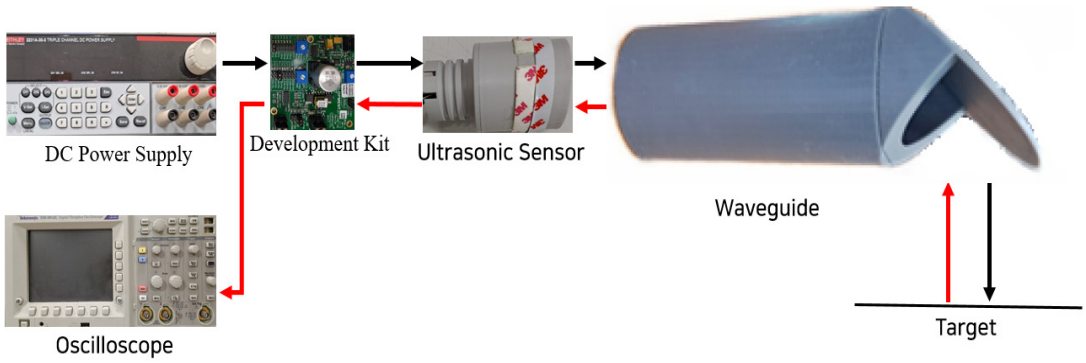


Fig. 8 Instrument configuration of distance measurement test

실험 장치를 Fig. 8과 같이 구성했다. 전원공급기인 tektronix 2231A-30-3를 사용해서 직류 전압 15V를 송·수신보드 airMar T-1 development kit에 인가했다. 인가된 전기신호가 송·수신보드를 통해 주파수 45 kHz, 전압이 150 V_{0,p}인 교류 신호로 되어 초음파 센서로 전달된다. 이 전기신호는 초음파 센서의 압전 소자를 가진하고, 진동하는 센서는 초음파를 방출한다. 방출된 초음파는 파동유도관 내부를 따라 전파하다가 45° 반사면에서 반사되어 진행 방향이 90° 꺾여 타겟면에 도달한다. 타겟면에서 반사된 초음파가 센서의 압전소자로 되돌아와 전기신호로 변환되어 수신된다. 오실로스코프(tektronix TDS3012 C)를 통해서 수신된 신호를 확인했다.

4.2 실험 결과

오실로스코프를 사용하여 초음파 센서에서 송수신된 신호 데이터를 얻었다. 벽면 켤레 길이가 6.5 mm, 7 mm, 7.5 mm, 8 mm, 8.5 mm인 경우의 결과를 Fig. 9에 나타냈다. 여기서 켤레 길이별 출구 반사파와 타겟면 반사파 구간의 신호 크기를 RMS 값으로 구해 Table 2에 기재하였다. 실험을 통해 관찰한 초음파 신호 파형(Fig. 9)이 수치모사를 통해 구한 파형(Fig. 4)과 일치하지는 않는다. 이는 해석 과정에서 고려하지 못한 실제 조건이 있기 때문으로 추정한다. 또한 Table 1의 음압 크기와 Table 2의 신호 크기는 단위가 다르다. 그렇더라도 켤레 길이에 따른 반사파 신호의 크기 변화 경향을 통해 상대적 크기 비교를 할 수는 있다.

Table 2의 데이터를 Fig. 10에 그래프로 나타냈다. 켤레 길이가 증가하면 출구 반사는 근소한 차이로 증가하는 추세를 보인다. 타겟면 반사파는 켤레 길이가

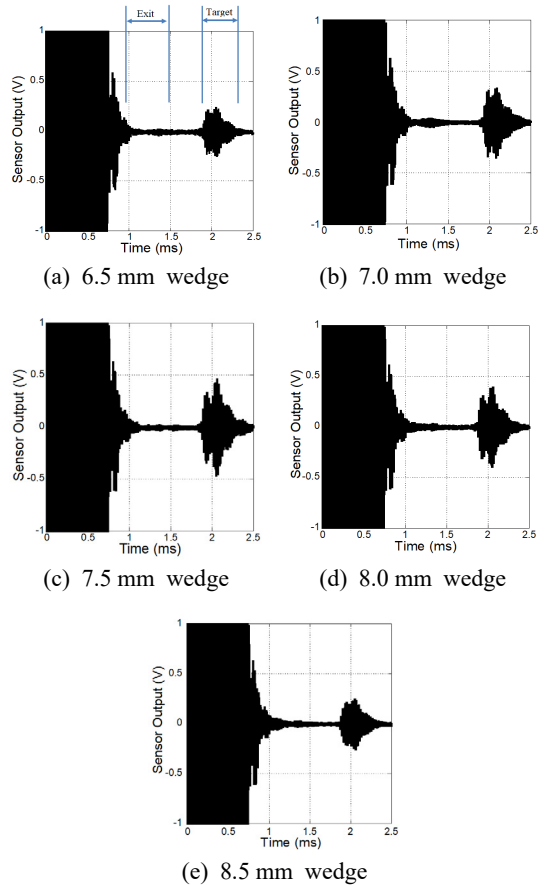


Fig. 9 Ultrasonic wave signals at various waveguides obtained by experiment

7.5 mm일 때 가장 크고 이 길이를 벗어남에 따라서 감소하는 경향을 보인다.

실험에서 구한 데이터의 TER 값을 Table 2의 오

Table 2 Signal magnitudes of exit reflection and target reflection obtained by experiment

Wedge length [mm]	Signal magnitude [V]		TER [dB]
	Exit reflection	Target reflection	
6.5	0.0278	0.098	10.94
7.0	0.0298	0.135	13.12
7.5	0.0295	0.173	15.36
8.0	0.0307	0.149	13.72
8.5	0.0316	0.102	10.18

5. 결 론

이 논문은 초음파 센서와 결합된 파동유도관에서 벽면 켜기 길이에 따른 초음파 전파를 다루었다. 직선형 파동유도관에서 벽면 켜기 길이에 따른 초음파 전파 특성을 유한요소 해석과 실험으로 구하고 결과를 비교하여 검증했다.

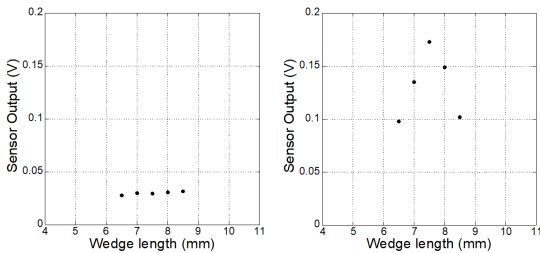
파동유도관 벽면 켜기 길이에 따른 초음파 전파를 확인하기 위해 켜기 각도를 일정하게 하고 켜기 길이를 다양하게 설정하여 유한요소 해석과 실험의 결과를 비교했다. 켜기 각도가 25°일 때 켜기 길이가 파장과 유사한 경우에 타겟면 반사파 신호가 크고 TER 값이 가장 큰 것을 알 수 있었다. 파악된 최적 켜기 길이로 파동유도관 내부 벽면을 설계함으로써 최소탐지거리 단축용 파동유도관의 초음파 전파 성능을 향상시킬 수 있게 되었다.

후 기

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

References

- (1) Zakaria, Z., Idroas, M., Samsuri, A. and Adam, A., 2017, Ultrasonic Instrumentation System for Liquefied Petroleum Gas Level Monitoring, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, Vol. 45, pp. 428-435.
- (2) Xu, W., Yan, C., Jia, W., Ji, X. and Liu, J., 2018, Analyzing and Enhancing the Security of Ultrasonic Sensors for Autonomous Vehicles, *IEEE Internet of Things Journal*, Vol. 5, No. 6, pp. 5015-5029.
- (3) Kim, J. O., 2000, Sensors and Actuators using Ultrasound, *Journal of KSNVE*, Vol. 10, No. 5, pp. 723-728.
- (4) Licznarski, T. J., Jaronski, J. A. and Kosz, D. B., 2011, Ultrasonic System for Accurate Distance Measurement in the Air, *Ultrasonics*, Vol. 51, No. 8, pp. 960-965.
- (5) Lee, S. G., Kim, I. S. and Kwon, N. W., 2014,



(a) Reflection at the exit (b) Reflection at a target

Fig. 10 Magnitudes of received signals after reflection obtained by experiment

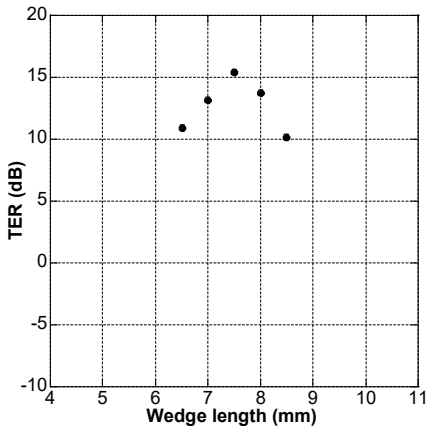


Fig. 11 Target reflection to exit reflection ratio obtained by experiment

른쪽에 기재하고, 이를 Fig. 11에 그래프로 나타내었다. 실험에서도 유한요소 해석과 유사하게 켜기 길이 7.5 mm일 때 TER 값이 가장 크고 이 켜기 길이에서 멀어질수록 TER 값이 작아지는 경향을 확인하였다. 이를 통해 해석 결과를 검증하였다.

Ultrasonic Level Measuring Device without Blanking Distance Zone, Korea Patent 10-1419410.

(6) Heo, I. J. and Kim, J. O., 2022, Ultrasonic Wave Propagation according to the Wall in a Linear Waveguide, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 32, No. 2, pp. 117~123.

(7) Easwaran, V. and Munjal, M. L., 1993, Finite Element Analysis of Wedges Used in Anechoic Chambers, Journal of Sound and Vibration, Vol. 160, No. 2, pp. 333~350.

(8) Sushil, S. K., Garg, M. and Narayanan, S., 2020, Estimation of the Lower Cut-off Frequency of an Anechoic Chamber: An Empirical Approach, International Journal of Aeroacoustics, Vol. 19, No. 1-2, pp. 57~72.

(9) An, B. H., Heo, I. J. and Kim, J. O., 2021, Waveguide Shortening Minimum Detectable Distance in an Ultrasonic Level Meter, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 31, No. 1, pp. 73~8.



Jae Hong Lee received the B.S. degree in the Department of Mechanical Engineering of Soongsil University in 2023. During 2021~2022, as an undergraduate research assistant at the Vibration Laboratory, he worked on ultrasonic

sensors and waves propagation.



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 the University of Pennsylvania in 1989. For ten years he received

research experience at the 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.