

직선형 파동유도관에서 벽면에 따른 초음파 전파

Ultrasonic Wave Propagation according to the Wall in a Linear Waveguide

허인재* · 김진오†
In Jae Heo* and Jin Oh Kim†

(Received December 1, 2021 ; Revised January 3, 2022 ; Accepted January 6, 2022)

Key Words : Ultrasound(초음파), Propagation(전파), Waveguide(파동유도관), Wall(벽면), Wedge(쐐기)

ABSTRACT

This study deals with the ultrasonic propagation characteristics according to the wall in a linear waveguide combined with an ultrasonic sensor for distance measurement. The purpose is to reduce the wall reflection by a rough surface because the wave reflecting on a smooth wall of the waveguide would interfere with straightly travelling wave. Wedges were designed on the waveguide wall. Ultrasonic wave propagation in a linear waveguide with the wedged wall was analyzed by finite elements, and the magnitude of the wave signals was evaluated according to the wedge angle for distance measurement. Experiments were carried out and the analysis results were verified by comparison. Wedge angle maximizing the wave signal magnitude was obtained.

1. 서론

초음파 기술로 개발된 센서와 액추에이터가 다양하게 활용되어 왔다⁽¹⁾. 특히 거리측정용 초음파센서가 농업용 및 공업용 수위 측정⁽²⁾과 자동차의 전후방 감지⁽³⁾ 등에 사용되고 있다. 초음파센서에서 송신부와 수신부가 구별되는 경우에는 두 부분의 위치가 어긋나 있기 때문에 최소 탐지거리가 제한된다. 송수신 겸용인 경우에도 최소 탐지거리가 제한되는데, 이는 신호 가진과 진동관 여진으로 인하여 불감지 시간이 생기기 때문이다. 송수신 겸용 초음파센서에서 최소 탐지거리를 단축하기 위하여, 불감지 영역 거리 만큼의 파동유도관을 개입시키는 방안⁽⁴⁾이 고안되었다.

기본 개념은 Fig. 1(a)에 보인 바와 같이 불감지 영역 거리에 해당하는 길이를 갖는 파동유도관(waveguide)을

개입하여 타겟면까지의 거리 d 를 측정하는 것이다. 그런데 이 구조는 파동유도관이 돌출하여 거추장스러울 수 있으므로 Fig. 1(b)와 같이 90° 꺾어 놓는 방안⁽⁴⁾이 고안된 것이다. 이 경우에 반사판이 추가되는 단점이 있지만 파동유도관이 측정 대상체에 밀착되는 장점이 있다. 유도관 벽면이 매끈하면 벽면에서 반사하며 진행하는 파가 직선 진행과에 간섭하여 신호 모양이 변형되고 신호 시간이 길어진다. 따라서 유도관 벽면에서 반사를 줄이는 방안이 필요하다.

이 연구는 파동유도관 벽면에서 반사를 줄이기 위하여 벽면 흡음률을 조정하는 방안과 벽면 거칠기를 조정하는 방안을 검토하고, 궁극적으로 벽면에 쐐기를 형성하는 방안을 택하여 쐐기 치수를 설계한다. 앞선 연구에서 파동유도관 벽면에 쐐기를 형성하여 수위계용 초음파센서⁽⁵⁾와 자동차용 초음파센서⁽⁶⁾에 적용한 바 있다. 벽면 쐐기가 효과 있음을 확인하였

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

A part of this paper was presented at the KSNVE 2021 Annual Spring Conference
‡ Recommended by Editor Pyung Sik Ma

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

는데, 음향학적으로 썸기 치수를 결정하지는 않았고 썸기 치수에 따른 성능 차이를 파악하지 않았다.

이 논문은 벽면에 썸기가 형성된 직선형 파동유도관에서 초음파 전파 특성을 유한요소 해석하고, 썸기 각도에 따라 거리측정용 초음파 신호 크기를 평가한다. 실험을 하여 해석 결과를 비교 검증한다.

2. 파동유도관 구조

파동유도관의 구조와 치수를 선정하고 벽면 조건의 영향을 파악하였다. 또한 벽면 썸기 치수를 음향학적 측면에서 선정하였다.

2.1 구조 및 치수

파동유도관의 기본 개념은 초음파 신호가 불감지 영역 시간 동안 초음파가 유도관 내에서 전파한 후에 출구에서 타겟면을 향해 방출되고 반사파가 수신되는 방식이다. Fig. 1(a)와 같이 파동유도관이 돌출하는데 이를 최소화 하기 위하여 Fig. 1(b)와 같이 초음파 전파가 90° 꺾이도록 반사면을 설치하였다.

초음파센서는 원통형이므로 결합되는 파동유도관도 단면이 원형인 것이 바람직하다. 다만, 제작상의 편의를 위해 사각형 단면도 사용될 수 있다. 수위계용 초음파센서의 지름에 맞추어 파동유도관 내부 지

름을 57 mm로 설정하였다.

수위계용 초음파센서의 최소 탐지거리 0.2 m⁽³⁾를 파동유도관의 길이 L 로 설정하였다. 유도관 길이 만큼 송신 신호와 여진 신호가 전파한다. 유도관 출구에서 타겟면까지의 거리 d 가 측정거리이다.

예비적으로 구해본 신호의 사례를 Fig. 2에 제시하였다. 이 결과는 측정거리가 0.1 m인 경우이다. Fig. 2(a)는 실험으로 구한 결과로서 그 과정은 제4절에서 다룬다. 송신 신호와 여진 신호 이후에 수신되는 신호를 관찰할 수 있다. Fig. 2(b)는 유한요소 해석으로 시뮬레이션한 결과로서 그 과정은 제3절에서 다룬다. 여진을 고려하지 않은 경우이고, 파동유도관 출구에서 일부 반사되는 파동과 타겟면에서 반사되는 파동이 수신되어 신호에 나타난다.

2.2 벽면의 영향

유도관 벽면에서 반사에 따른 송수신 영향을 파악하기 위해, 유도관 벽면에 흡음 조건을 주어 해석하였다. 벽면이 매끈한 파동유도관에서 벽면에 흡수 경계조건을 설정하였다. 벽면 흡음률에 따른 초음파 전파를 해석하여 비교하였다.

흡음률이 0인 경우의 신호는 Fig. 2(b)에 제시되어 있고, 이와 비교하기 위하여 흡음률이 0.25, 0.5, 0.75, 1.0인 경우의 신호를 구하여 Fig. 3에 나타내었다. 흡음률이 클 때 출구 반사파 신호가 작고 타겟면 반사파 신호가 크다. 출구 부근의 반사판에서 되돌아오는 파가 출구 반사파에 포함되어 있는데, 벽면에서 반사하며 진행되는 파가 작으면 그중에는 반사판에서 되돌아오는 파가 작다는 것을 알 수 있다. 반면에 직선 진행파에 간섭이 작아서 타겟면 반사파가 훼손되지 않고 크게 유지되는 것으로 판단된다.

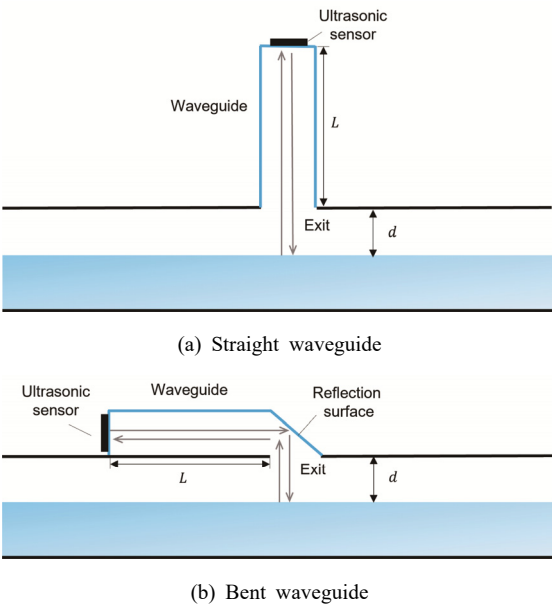


Fig. 1 Schematic diagram of linear waveguides

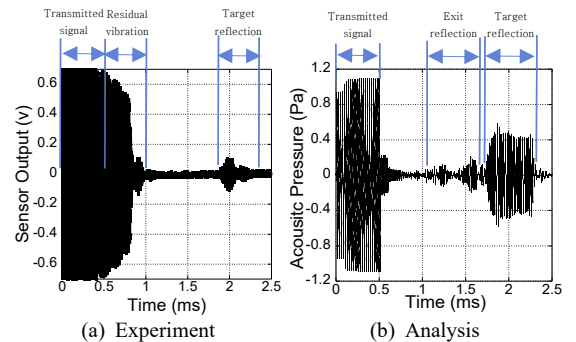


Fig. 2 Examples of transmitted and received signals

2.3 썩기 고안

유도관 벽면에 흡음률을 인위적으로 크게 하는 방안으로 썩기를 형성하였다. 썩기 치수로는 Fig. 4에 보인 바와 같이 썩기 각도 α 와 썩기 길이 β 가 있다. 썩기 길이 β 는 7.5 mm를 선정하였다. 이 길이는 파장 λ 의 1/4 보다 크게 해야 흡음 효과가 있다는 이론⁽⁷⁾에 근거한 것이다. 썩기가 길면 썩기 구석에서 음파가 다중 반사하는 횟수가 많기 때문이다. 수위계용 초음파센서의 구동주파수 45 kHz에서 음속 340 m/s와의 관계에서 파장 λ 가 7.5 mm이므로, $\lambda/4$ 보다 충분히 크다. 썩기 각도 α 를 다양하게 설정하여 해석과 실험으로 비교하였다.

3. 유한요소 해석

최소탐지거리 단축을 위해 사용된 파동유도관에서 초음파 전파에 대해 유한요소 해석을 하였다. 상용 프로그램인 ANSYS를 사용하였다.

3.1 해석 모델 및 조건

초음파 전파를 해석하는 모델의 예를 Fig. 5에 제시

하였다. 유도관의 출구부터 타겟면까지의 공간을 반구형으로 하였는데, 이는 실제로는 무한한 경계면에 방사(radiation) 경계조건을 설정하기 위함이다. 파동유도관의 벽면은 2.3절에서 서술한 바와 같이 썩기형이다. 썩기 길이는 일정하게 유지하고 썩기 각은 8°부터 100°까지 여러 모델을 설정하였다. 이는 썩기 간격 1.04 mm부터 17.8 mm까지로서, 파장 λ 대비 간격이 0.12부터 2.4까지에 해당한다.

해석 영역의 매질은 공기이고, 파장 7.5 mm의 1/5인 1.5 mm보다 작은 격자를 설정하였다. Fig. 5에 보인 모델은 128 941개의 절점으로 구성되어 있다. 센서 위치에서 인가하는 가진신호는 주파수 45 kHz인 정현파 23주기이다. 센서 위치에서 초음파가 발생하여 유도관을 따라 전파하고 45° 반사판에서 90° 꺾여 출구 밖으로 방출되어 타겟면에서 반사하여 되돌아오는 과정을 해석하였다.

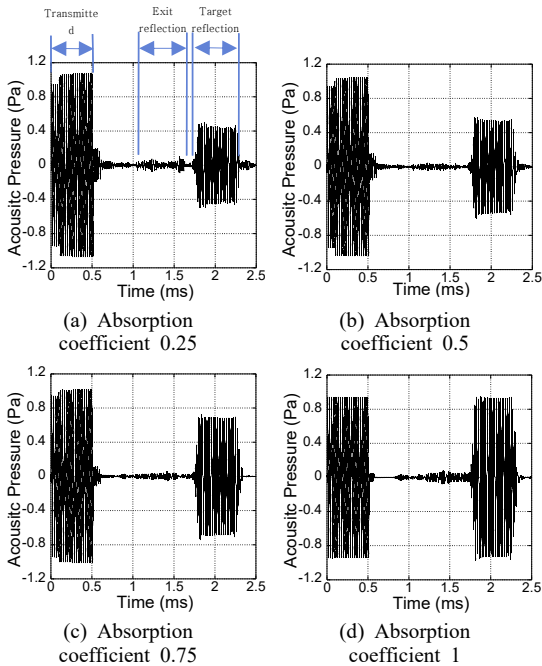


Fig. 3 Ultrasound signals simulated according to wall absorption

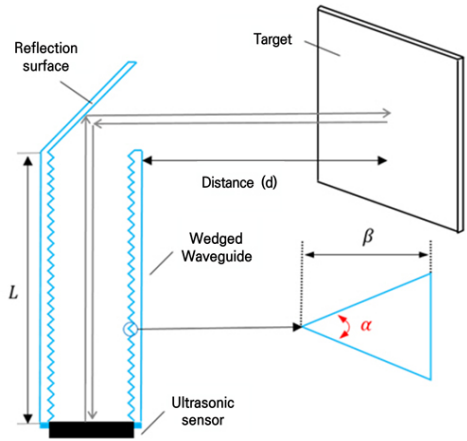


Fig. 4 Dimensions of the wall wedges

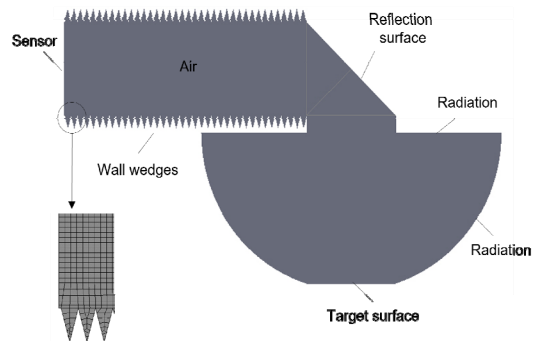


Fig. 5 Analysis model and boundary conditions

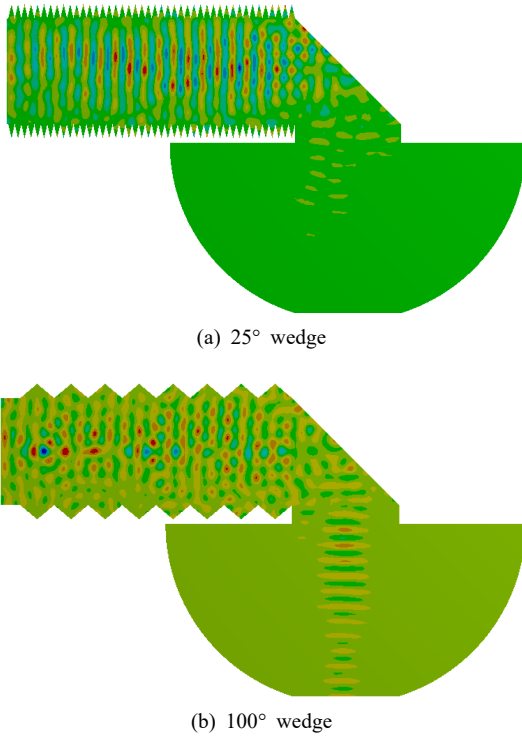


Fig. 6 Acoustic pressure distribution at 1.8 ms

3.2 해석 결과

과도(transient)해석을 하여 시간에 따른 음압 분포를 구하였다. 그러한 예로서 썰기 각 25°인 경우와 100°인 경우에 초음파 발생 후 1.8 ms일 때, 즉 센서에서 수신되기 시작할 때 음압 분포를 Fig. 6에 제시하였다. 썰기 각 25°인 결과 (a)는 직선 진행과 위주로 초음파가 전파함을 보여준다. 썰기 각 100°인 결과 (b)는 벽면에서 반사하며 진행되는 파가 직선 진행파에 혼합됨을 보여준다.

센서에서 수신되는 초음파 음압 신호를 시간의 함수로 구하였다. 여러 썰기 각에 대해 해석하였고 그중 8°, 10°, 15°, 20°, 25°, 30°인 경우의 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 공기 중 전파속도를 감안하여 시간 0.5 ms~0.9 ms에서는 썰기 벽면 반사와 신호이고, 0.9 ms~1.7 ms에서는 출구 반사와 신호이며, 1.8 ms~2.3 ms에서는 타겟면 반사와 신호이다.

3.3 성능 예측

출구 반사와 신호 크기와 타겟면 반사와 신호 크기를 구하였다. Fig. 7에 제시된 신호 그래프에서 해당 신호 구간 동안 RMS 값을 구하였고, 이를 Fig. 8에 나타내었다.

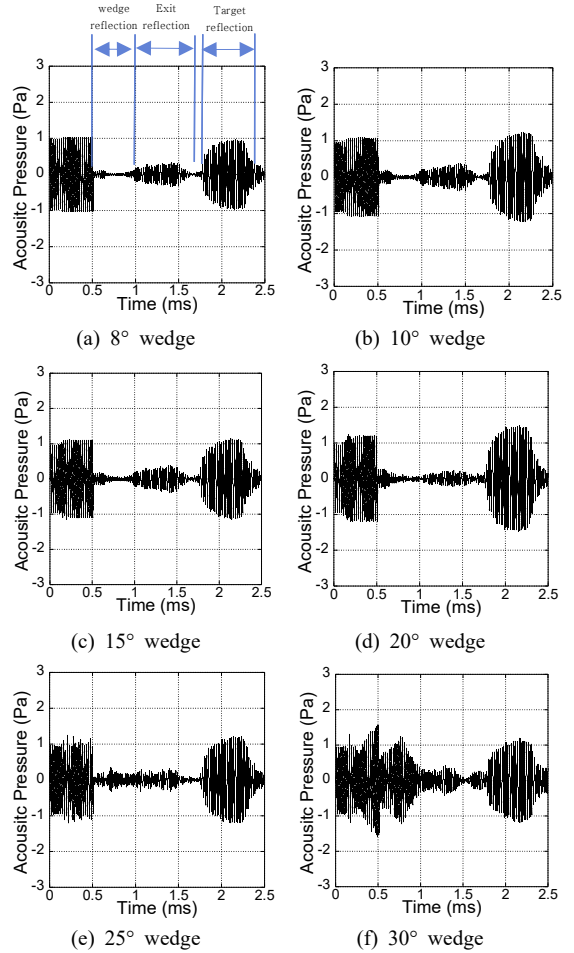


Fig. 7 Ultrasonic wave signals at various waveguides

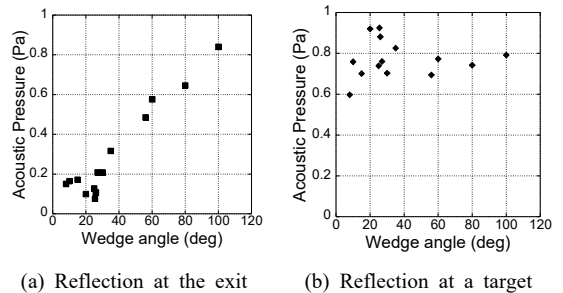


Fig. 8 Magnitudes of received signals after reflection

Fig. 8(a)는 출구 반사와 신호 크기로서, 초음파가 파동유도관에서 외부로 방출될 때 전파 경로 단면적이 급격하게 달라지기 때문에 생긴다. 썰기 각도가 작을 때 출구 반사와 크기가 작은 경향을 보여준다. 출구 반사와

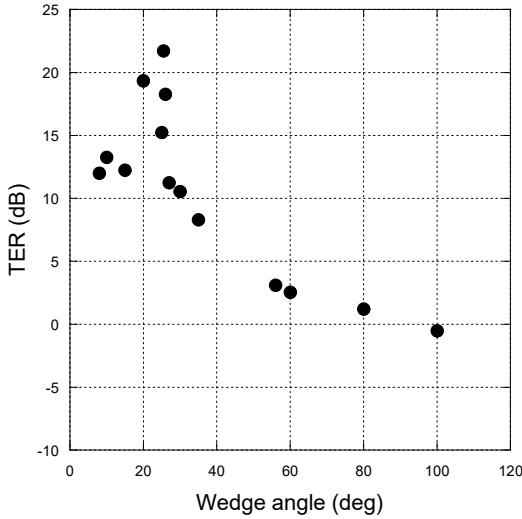


Fig. 9 Target reflection to exit reflection ratio

신호는 타겟면 반사와 신호에 중첩되면 구별하기 어렵게 되기 때문에 작을수록 좋다. Fig. 8(b)는 타겟면 반사와 신호 크기이다. 쐐기 각 25°에서 가장 크고, 이 각도에서 멀수록 신호 크기가 작다. 음파가 쐐기 벽면에 입사하면 쐐기 구석에서 다중 반사하므로 반사 횟수가 많을수록 흡음이 크다⁷⁾. 쐐기 각도 25° 정도에서 다중 반사 횟수가 많아 흡음률이 큰 것으로 판단된다.

타겟면 반사와 신호 크기와 출구 반사와 신호 크기의 비를 구하여, 거리측정용 초음파 신호 크기를 평가하였다. 다음과 같이 TER(target reflection to exit reflection ratio)을 정의하였다.

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

Fig. 8에 나타난 데이터로부터 계산한 결과를 Fig. 9에 제시하였다. 쐐기 각 25° 부근에서 최대값을 나타내고 이 각도에서 멀수록 작다. 쐐기 각도가 적절할 때 벽면 반사파를 감축하여 직선으로 진행되는 신호에 부정적 간섭이 작아 타겟면 반사와 신호가 증대함을 알 수 있다. 출구 반사파는 작고 타겟면 반사파는 큰 쐐기 각도를 찾았다.

4. 실험

유한요소 해석 결과를 검증하기 위해 수위계용 초음파센서와 파동유도관을 결합하여 초음파 송·수신

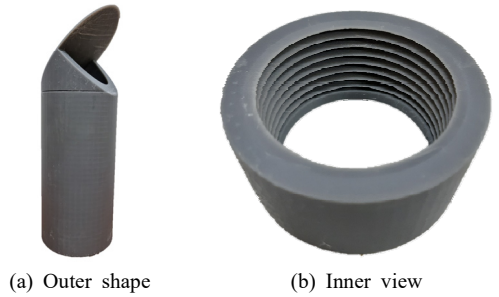


Fig. 10 Waveguide with wedge angle 30°

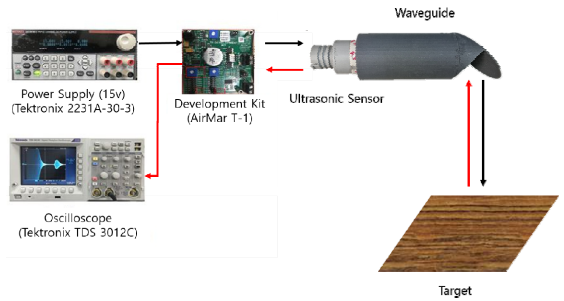


Fig. 11 Instrument configuration of distance measurement test

실험을 하였다.

4.1 장치 및 방법

실험에서 사용된 수위계용 초음파센서는 아이에스 테크놀로지(주)의 LDX-05이다. 이 초음파센서의 구동주파수는 45 kHz이고, 지름은 57 mm이다. 초음파센서와 결합되는 파동유도관을 Formlabs의 3D 프린터 Form 3으로 제작하였다. 일반적인 3D 프린터는 FDM(fused deposition modeling) 방식이지만, Form 3은 SLA(stereo lithography apparatus)로서 광경화 방식이다. 이 방식의 장점은 면의 기울기에 상관없이 표면이 매끄럽다.

쐐기 길이는 7.5 mm로 일정하게 하고, 쐐기 각은 15°부터 35°까지 5° 간격으로 설계하여 시제품을 제작하였다. 이 중에서 예를 들어 쐐기 각 30° 시제품의 사진을 Fig. 10에 나타내었다. 내부에 쐐기가 적절하게 형성된 것을 확인할 수 있다.

실험 장치 구성도를 Fig. 11에 나타내었다. 전원 공급기(Tektronix 2231A-30-3)로 15 V 직류 전기신호를 송·수신보드(AirMar T-1 Development Kit)에 인가한다. 송·수신보드를 통해 교류 전기신호가 초음파

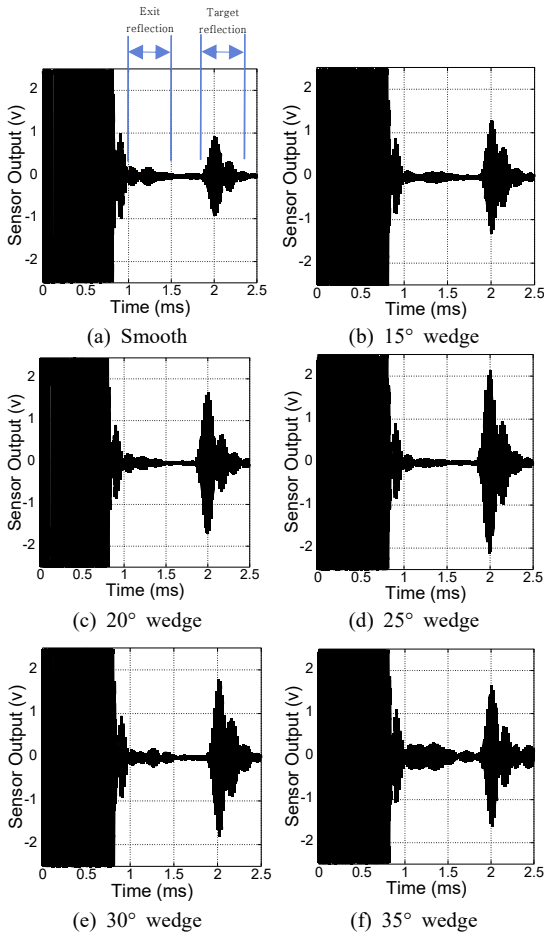


Fig. 12 Ultrasonic wave signals at various waveguides

센서를 가진다. 이 교류 신호는 주파수가 45 kHz이고 전압이 150 V_{0-p}이다. 초음파센서의 구성요소인 압전소자가 가진되어 진동하고 초음파를 방출하게 된다. 파동유도관 내부에서 초음파가 전파하고 45° 반사판에서 반사되어 90° 꺾여 전파한다. 초음파가 타겟면에서 반사되어 되돌아와 압전소자에서 전기신호로 변환되어 수신된다. 수신된 신호를 오실로스코프 (Tektronix TDS3012C)로 확인하였다.

4.2 실험 결과

초음파센서에서 송신과 수신된 신호를 오실로스코프로 데이터를 추출하였다. 벽면이 매끈한 경우와 췌기 각 15°, 20°, 25°, 30°, 35°인 경우의 결과를 Fig. 12에 나타내었다. 또한, 출구와 타겟면 반사파의 왕복거리를 계산하여 그림에 표시하였다.

Table 1 Experiment result of measuring the signal voltage of the exit/Target reflected

Wedge angle (deg)	Signal magnitude (V)	
	Exit reflection	Target reflection
15	0.054	0.429
20	0.061	0.560
25	0.047	0.717
30	0.064	0.609
35	0.136	0.529

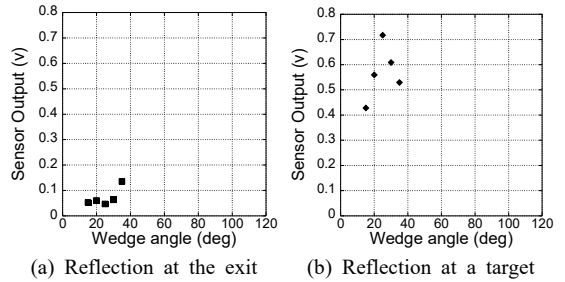


Fig. 13 Magnitudes of received signals after reflection

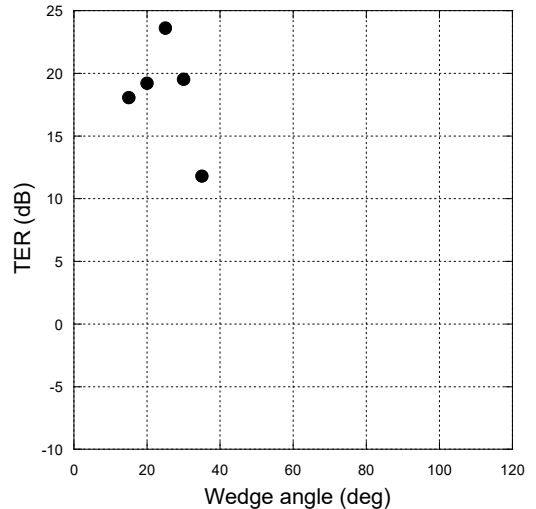


Fig. 14 Target reflection to exit reflection ratio according to the wedge angle

4.3 성능 검증

유한요소 해석과 비교 분석하기 위해 출구와 타겟면 반사파 구간 음압 신호의 크기를 RMS값으로 구

하여 Table 1에 기재하였다. 이 데이터를 Fig. 13에 기호로 나타내었다.

출구 반사파는 썸기 각도가 작을 때 작은 추세이다. 또한, 타겟면 반사파는 썸기 각 25° 에서 큰 추세이다. 이는 앞서 유한요소 해석 결과에서 출구 및 타겟면 반사파들의 경향과 유사하다.

실험에서도 TER을 구하여 Fig. 14에 나타내었다. 유한요소 해석과 유사하게 썸기 각 25° 에서 TER이 가장 크다. 이 썸기에서 TER이 크므로 출구 반사파에 비해 타겟면 반사파가 크다는 해석결과를 검증하였다.

5. 결 론

초음파센서에 결합되는 파동유도관에서 벽면에 따른 초음파 전파를 다루었다. 직선형 파동유도관을 설계하고 파동전파 특성을 유한요소 해석과 실험으로 구하여 결과를 비교 검증하였다.

파동유도관 벽면에서 반사 때문에 진행파에 가해지는 부정적 영향을 줄이기 위하여 벽면에 형성한 썸기에 대해서 조사하였다. 벽면 썸기 치수를 음향학적인 관점에서 설정하고, 썸기 각도를 다양하게 설정하여 결과를 비교하였다. 썸기 각 25° 부근에서 타겟면 반사파 신호 크기가 크다는 결과를 얻었다.

후 기

이 논문은 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 the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 10, No. 5, pp. 723~728.
- (2) 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.
- (3) 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.

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

(5) 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. 73-81.

(6) 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.

(7) Singh, S. K., Garg, N. and Subramanian, N., 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.



In Jae Heo received the B.S. degree in Automation Engineering from Dongyang Mirae University in 2020. He received the M.S. degree in Mechanical Engineering from Soongsil University in 2022. During his stay at Soongsil as a graduate student, he was 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.