Check for updates

Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng., 32(2) : 133~140, 2022
https://doi.org/10.5050/KSNVE.2022.32.2.133

한국소음진동공학회논문집 제 32 권 제 2 호, pp. 133~140, 2022
ISSN 1598-2785(Print), ISSN 2287-5476(Online)

초음파센서의 최소탐지거리 단축용 원호형 파동유도관

Circularly Curved Waveguide for Shortening the Minimum Detectable Distance of Ultrasonic Sensor

안 재 혁* · 김 진 오†
Jae Hyuck An* and Jin Oh Kim†

(Received December 14, 2021 ; Revised February 7, 2022 ; Accepted February 7, 2022)

Key Words : Ultrasound(초음파), Sensor(센서), Distance(거리), Waveguide(파동유도관), Circular Curve(원호)

ABSTRACT

This study proposes a method to reduce the minimum detectable distance of an ultrasonic sensor by combining a circularly curved waveguide. The minimum detectable distance of ultrasonic sensors for distance measurement is limited because of the blind zone time caused by residual vibration of the sensor plate. The purpose of this study is to design a variety of waveguides and evaluate their performance of shortening the minimum detectable distance. Ultrasonic wave propagation in the designed waveguides was analyzed by finite elements and tested by fabricated prototypes. The performance was evaluated by comparing the sound pressure magnitude of the received signal. The received signal of the circularly curved waveguide was greater than that of the linear waveguide. Using a circularly curved waveguide with constant curvature, we achieved the shortening effect of the minimum detectable distance in addition to reducing the effective length of the waveguide.

1. 서 론

초음파에 의한 거리측정 기술[1]은 자동차의 전후방 감지[2], 드론의 장애물 탐지, 수위 측정 등에 사용된다[3]. 이러한 용도의 초음파센서들의 성능 항목 중에는 탐지거리 범위가 있다. 특히 송·수신 겸용 초음파 센서의 경우에 최소로 탐지할 수 있는 거리가 제한되는데, 이는 가진 시간과 센서 내부 진동판의 여진으로 인한 불감지 시간 때문이다[4].

이러한 문제를 해결하기 위하여 최소 탐지거리를 제한하는 불감지 영역을 벗어나 센서를 배치하도록 직선형 파동유도관을 개입시키는 방안이 제시되어 있다[5]. 이 방안은 유도관 내부의 매끈한 벽으로 인한 반사 때문에 파동이 혼합되므로 원하는 타겟면 반사파 신호를 구별하는 데 지장이 있어 실용화가 어렵다. 유도관 벽면에서 초음파 반사를 줄이기 위해 벽 내부를 쐐기형으로 하는 방안이 제시되었다[6,7]. 이러한 직선형 파동유도관은 공간에 제약이 없는 수위 측정에는 적용될 수 있지만 길이 제한이 있는 좁은 공간에서는 활용이 적절하지 않다. 그래서 곡선형 파동유도관을 고안하였다[8]. 이 논문은 곡선형의 일종인 원호형 파동유도관의 성능을 평가한다.

파동유도관을 일정한 곡률의 원호형으로 만들어 유효길이를 줄이고 직선형 파동유도관에서는 불가피한 45° 반사면을 제거하여 불필요한 반사파를 회피한다.

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

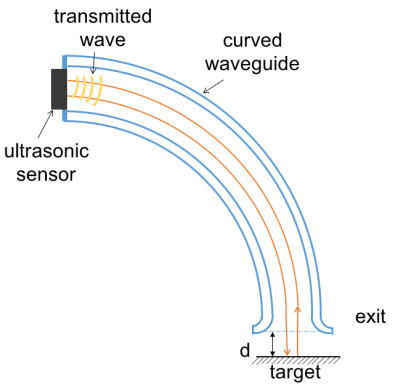
A part of this paper was presented at the KSNVE 2021 Annual Spring Conference
‡ Recommended by Editor Nam Keun Kim
ⓒ The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

Fig. 1에 보인 2 종류의 원호형 파동유도관을 초음파 센서에 결합하여 근거리 측정성능 향상을 평가한다. (a)는 1/4 원호(90° 원호)형이고 (b)는 1/2 원호(180° 원호)형이다. 설계한 파동유도관에서 초음파 전파를 유한요소 해석하여 성능을 예측하고, 제작한 시제품으로 거리측정 실험을 하여 최소 탐지거리 단축 효과를 확인한다.

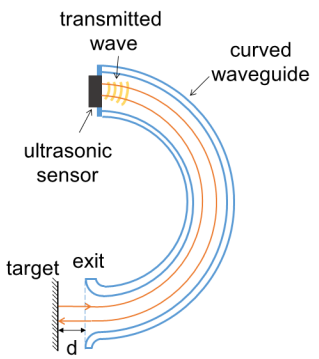
2. 이론적 배경

원호형 파동유도관에서 초음파가 원활하게 전파한다는 사실을 참고문헌[9,10]에서 확인하였다. 그 내용을 요약하여 이론적 근거로 대신한다.

직선관-원호관-직선관으로 구성되는 유도관에서 직선부의 파동 전파는 식 (1)과 같이 일반 파동방정식으로 구해져 있다[11].



(a) Quarter-circle waveguide



(b) Half-circle waveguide

Fig. 1 Schematic diagram of circularly curved waveguides

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \tag{1}$$

여기서 p는 음압이고 ∇^2는 라플라시안이다. 원호형 유도관 내에서의 파동을 해석하는 데에는 Fig. 2에 보인 원호형 좌표계 (r,θ,ϕ)가 사용된다. 이에 의해 파동방정식이 식 (2)와 같이 표현된다[9].

$$\begin{aligned}&\frac{\partial^2 p}{\partial r^2}+\left(\frac{1}{r}-\frac{\cos\theta}{R-r\cos\theta}\right)\frac{\partial p}{\partial r}+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 p}{\partial\theta^2}\\&+\frac{\sin\theta}{r(R-r\cos\theta)}\frac{\partial p}{\partial\theta}+\frac{1}{(R-r\cos\theta)^2}\frac{\partial^2 p}{\partial\phi^2}\\&=\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 p}{\partial t^2}\end{aligned} \tag{2}$$

여기서 R은 원호 중앙의 반지름이다. 음압 p를 원호형 좌표로 식 (3)과 같이 변수분리한다.

$$\begin{aligned}p(r,\theta,\phi,t) &= \psi(r,\theta,\phi)\,e^{j\omega t}\\&= \Psi(r,\theta)\,\Phi(\phi)\,e^{j\omega t}\end{aligned} \tag{3}$$

원호방향 전파 상수 m_ϕ를 적용하여 $\Phi(\phi)$를 식 (4)와 같이 표현한다.

$$\Phi(\phi) = \cos(m_\phi\phi+\alpha_\phi) \tag{4}$$

식 (3)과 식 (4)를 파동방정식 (2)에 대입하여 식 (5)와 같이 Helmholtz 방정식을 얻는다.

$$\begin{aligned}&\frac{\partial^2\Psi}{\partial r^2}+\left(\frac{1}{r}-\frac{\cos\theta}{R-r\cos\theta}\right)\frac{\partial\Psi}{\partial r}+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2\Psi}{\partial\theta^2}\\&+\frac{\sin\theta}{r(R-r\cos\theta)}\frac{\partial\Psi}{\partial\theta}+\frac{m_\phi^2}{(R-r\cos\theta)^2}\Psi\\&+k^2\Psi=0\end{aligned} \tag{5}$$

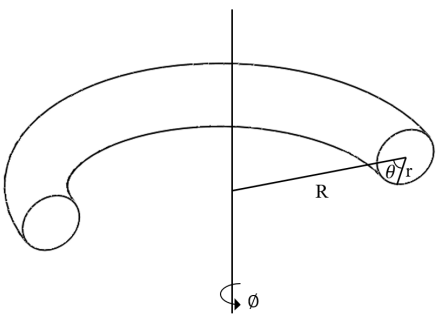


Fig. 2 Circular co-ordinate

여기서 k는 파동수이다. 식 (5)의 해의 형태는 식 (6)과 같이 표현된다.

$$\Psi(r,\theta) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n(r)\cos n\theta \tag{6}$$

파동유도관 벽면에서 음파에 변화가 없기 때문에 경계조건이 식 (7)과 같다.

$$\frac{\partial \Psi}{\partial r}|_{r=a} = 0 \tag{7}$$

운동방정식 (5)와 경계조건 (7)을 만족하는 해 (6)를 구하여, Fig. 3의 직선관-원호관의 투과계수 B^+와 직선관-원호관-직선관의 투과계수 C^+를 구한 결과 각각 1에 가까운 것으로 확인되었다[9]. 따라서 원호형 파동유도관에서도 직선형 유도관에서처럼 초음파 전파가 원활하다.

3. 유한요소 해석

초음파센서에 결합된 파동유도관에서 초음파가 송·수신 전파하는 과정을 유한요소 해석하였다. Fig. 1에 보인 2종류의 원호형 파동유도관을 대상으로 하였다. 해석 대상이 3차원 물체이지만 해석 시간을 줄이기 위해 대칭면에 대한 2차원 해석을 하였다.

3.1 해석 모델 및 조건

해석 모델을 Fig. 4에 제시하였다. 해석영역은 파동유도관 내부공간과 파동유도관 출구에서 타겟면까지의 공간이다. 2가지 파동유도관의 원호 길이를 동일하게 최소탐지거리 30 cm로 하고, 단면 반지름을 7 cm로 하였으며, 파동유도관 출구부터 타겟면까지 거리를 12 cm로 하였다. 이때 곡률 반경은 1/4 원호형 파동유도관의 경우 191.0 mm이고, 1/2 원호형 파동유도관의 경우 95.5 mm이다. 파동유도관 출구부터 외부공간은 초음파가 방출되는 상황을 감안하여 반원 모양으로 하였다.

Fig. 4에 보인 바와 같이, 반경 방향과 반원 지름면 방향으로 방사 경계조건을 설정하였다. 타겟면과 파동유도관 벽면에서는 완전 반사되는 조건을 설정하였다. 전파속도에 공기 중 음속 343 m/s를 입력하여, 전파시간을 곱하면 전파거리를 환산할 수 있도록 하였다.

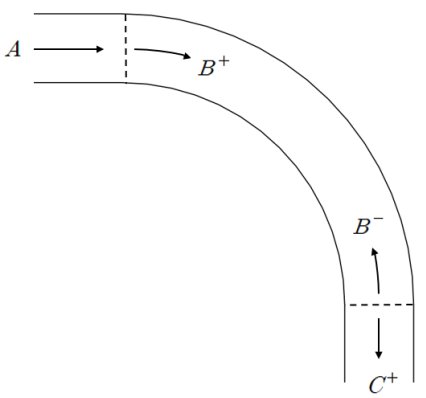
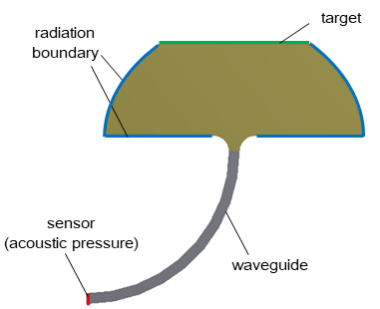


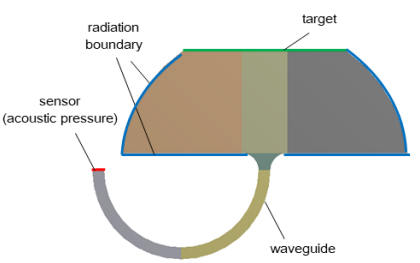
Fig. 3 Transmission at the entrance and exit of circular waveguide

3.2 해석 결과

파동유도관 내부 영역과 출구부터 타겟면까지 외부영역에서 초음파 전파를 과도(transient)해석하였다. 해석결과인 음압 분포를 0.5 ms 간격으로 Fig. 5와 Fig. 6에 제시하였다. Fig. 5는 1/4 원호형 파동유도관의 경우이고, Fig. 6은 1/2 원호형 파동유도관의 경우이다. Fig. 4의 센서에서 방출된 초음파가 원호형 파

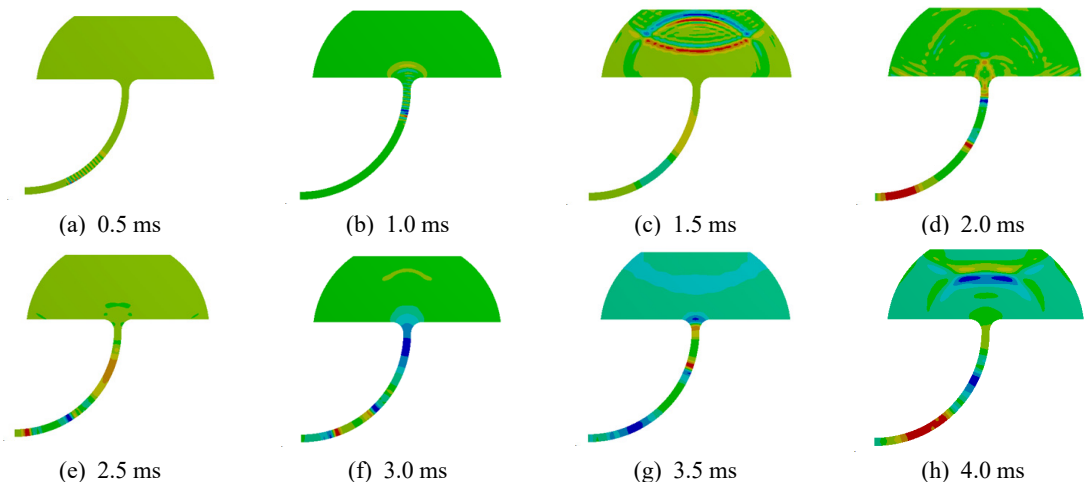


(a) Quarter-circle waveguide



(b) Half-circle waveguide

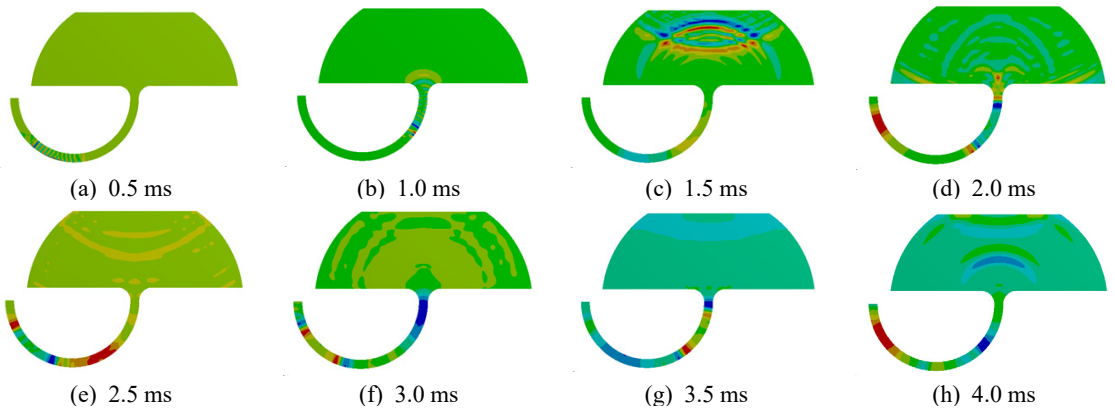
Fig. 4 Analysis models



(a) 0.5 ms (b) 1.0 ms (c) 1.5 ms (d) 2.0 ms

(e) 2.5 ms (f) 3.0 ms (g) 3.5 ms (h) 4.0 ms

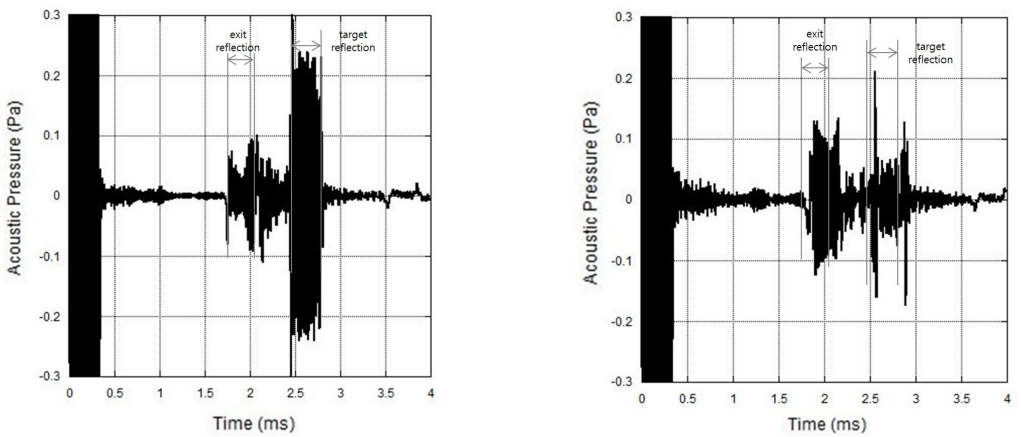
Fig. 5 Acoustic pressure distribution obtained by transient analysis for quarter-circle waveguide



(a) 0.5 ms (b) 1.0 ms (c) 1.5 ms (d) 2.0 ms

(e) 2.5 ms (f) 3.0 ms (g) 3.5 ms (h) 4.0 ms

Fig. 6 Acoustic pressure distribution obtained by transient analysis for half-circle waveguide



(a) Quarter-circle waveguide (b) Half-circle waveguide

Fig. 7 Signals obtained by transient analysis

동유도관을 통해 전파한다. 파동유도관의 출구에서 무한 공간 외부영역으로 단면적이 급격히 변하므로 출구로부터 초음파가 일부 반사하여 센서로 돌아온다. 또한 나머지 초음파는 투과하여 타겟면에서 반사하여 돌아온다.

센서에서 감지되는 초음파 신호를 Fig. 7에 나타내었다. 초음파의 가진과 여진 시간 이후에 파동유도관의 출구에서 반사한 파가 관찰되고 이후에 타겟면에서 반사한 파가 관찰된다. Fig. 7의 수신신호에서 1.74 ms 시점에 출구 반사파, 2.5 ms 시점에 타겟면 반사파가 관찰된다. 거리로 환산하면 센서로부터 출구까지가 30 cm이고 타겟면까지가 42.9 cm로 측정되어 출구로부터 타겟면까지 거리는 12.9 cm로 관찰되므로 측정거리 12 cm에 대한 오차가 1 cm 미만이다. 원호형 파동유도관이 초음파센서와 결합되어 거리측정에 사용될 수 있음을 확인하였다.

4. 실 험

유한요소 해석을 통해 예측한 파동유도관의 성능을 검증하는 실험을 하였다.

4.1 실험 장치 및 방법

파동유도관용 튜브의 재질을 3가지(A : silicon, B : PVC, C : EPDM) 선택하였다. 파동유도관 튜브를 Fig. 8에 보인 바와 같이 3D 프린터로 출력한 지지대에 결합하여 일정한 곡률을 유지시켰다. 실험에 사용된 초음파센서는 센서텍(주) 제품 ST-208W로서 구동주파수는 48.0 kHz이고 가진면 지름은 14 mm이다. Fig. 1에 제시된 형상의 파동유도관을 초음파센서에 결합하였다.

Fig. 8 Combination of a waveguide tube and a supporter (A : silicon, B : PVC, C : EPDM)

실험장치 구성도를 Fig. 9에 제시하였다. 송·수신 보드(airMar T1 development kit)와 DC전원공급기(keithley 2231A-30-3)를 사용해서 정현파 신호를 센서에 인가하여 초음파를 발생시켰다. 신호의 주파수는 48 kHz이고 전압은 150 $V_{0\text{-}p}$이다. 전파 후 타겟면에서 반사하여 돌아오는 초음파를 센서에서 수신해서 오실로스코프(tektronix TDS 3012C)로 관찰하였다.

4.2 실험 결과

송·수신 겸용 초음파센서에서 수신하는 타겟면 반사파 신호의 전파시간은 초음파 가진 시간과 여진시간 이후에 측정할 수 있다. 파동유도관이 부착되었을 때는 관의 출구 반사파 신호 이후에 타겟면 반사파 신호를 관찰할 수 있다. 타겟면 반사파 신호를 구별할 수 있는 최소 거리일 때 초음파센서에서 수신된 신호를 Fig. 10에 나타내었다. (a)에 보인 바와 같이 1/4 원호형 파동유도관에 대한 결과에서 최소 거리가 재질별로 A 23 cm, B 23 cm, C 17 cm로 측정되었고, (b)에 보인 바와 같이 1/2 원호형 파동유도관에 대한 결과에서 최소거리가 재질별로 A 22 cm, B 20 cm, C 19 cm로 측정되었다.

타겟면 거리와 측정된 거리의 관계를 Fig. 10에 나타내었다. 여기서 에러바(error bar)가 큰 위치에서는 거리측정이 제대로 이루어지지 않았음을 알 수 있다. 거리측정이 제대로 이루어진 구간은 Fig. 11(a) 1/4 원호형 파동유도관의 경우에 재질별로 A 23 cm ~

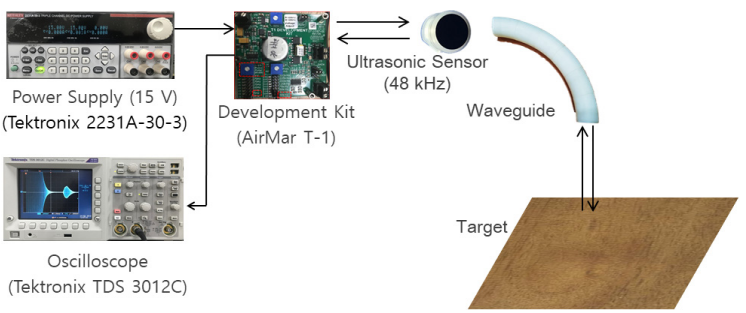
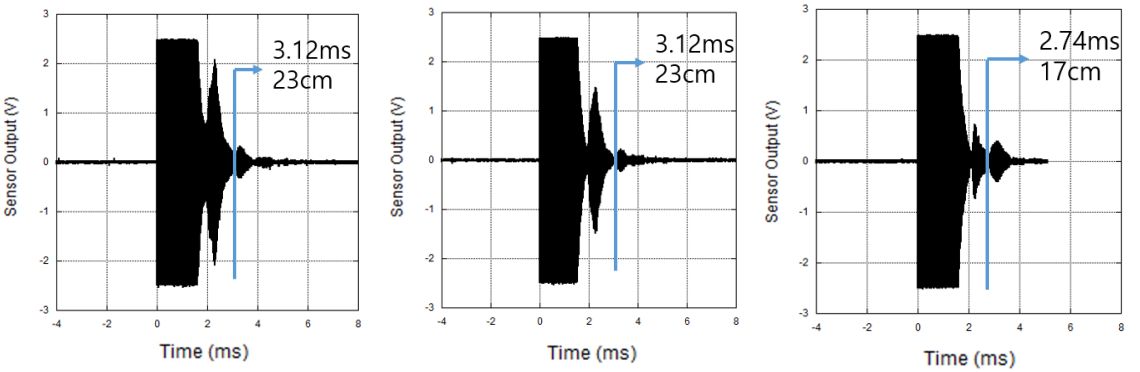
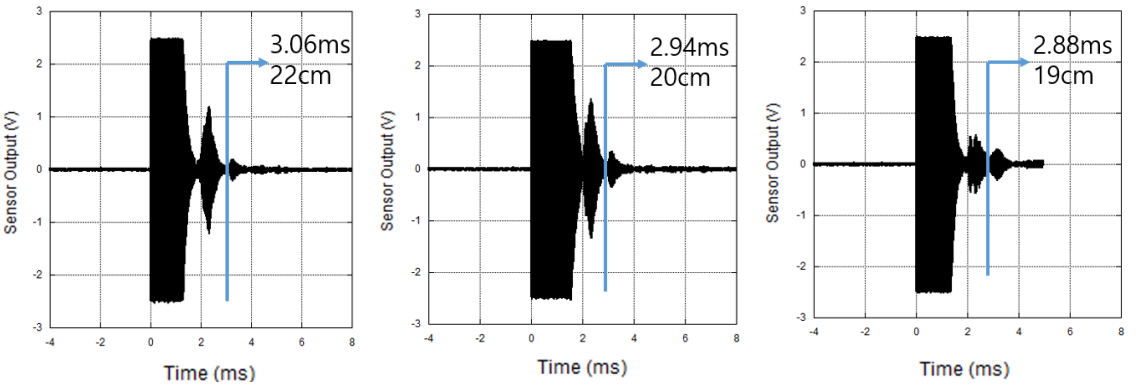


Fig. 9 Experimental apparatus



(a) Quarter-circle waveguide



(b) Half-circle waveguide

Fig. 10 Signals obtained by experiment (A : Silicon, B : PVC, C : EPDM)

136 cm, B 23 cm ~ 142 cm, C 17 cm ~ 200 cm 이고, (b) 1/2 원호형 파동유도관의 경우에 재질별로 A 22 cm ~ 125 cm, B 20 cm ~ 138 cm, C 19 cm ~ 185 cm 이다. 이 결과는 20회 측정 데이터의 평균값이다. 파동유도관을 결합하지 않을 때 초음파센서의 측정범위가 40 cm ~ 220 cm[12]인 것과 비교가 된다.

4.3 결과 비교 및 고찰

3.2절에서 서술했듯이 해석에서 1/4 원호형 파동유도관과 1/2 원호형 파동유도관에서 출구 반사파 이후에 타겟면 반사파 전파시간의 오차가 0.06 ms로 거리 측정의 오차는 1 cm 미만이 예상되었다. 이를 토대로 실험을 한 결과 출구 반사파가 크게 관찰되었고 유도관에 의한 파동 흡수가 일어나 반사파 크기가 상대적으로 줄어들었다.

실험에서는 해석처럼 최소 탐지거리가 0 cm에 가깝게 줄어들지는 않았다. 하지만 실험에서 파동유도관이 없는 경우보다 파동유도관을 부착하였을 때 40 cm에서 17 cm로 절반 이하로 줄었고, 특정 거리 범위에서 원호형 파동유도관을 통한 거리측정이 적절히 이루어졌다. 또한 최소탐지거리가 C재료에서는 큰 폭으로 단축되면서도 최대 탐지거리에는 영향이 별로 없었다.

Fig. 7의 유한요소 해석의 결과와 Fig. 10의 실험의 결과를 비교할 때, 실험에서는 센서의 가진으로 인한 여진신호가 관찰된다. 실험에서는 혼을 설치하지 않아 좁은 공간에서 급격히 넓은 공간으로 나가면서 음향 임피던스 차이로 인해 출구 반사파의 크기가 해석에 비하여 증가하였다. 하지만 타겟면 위치에 대한 반사

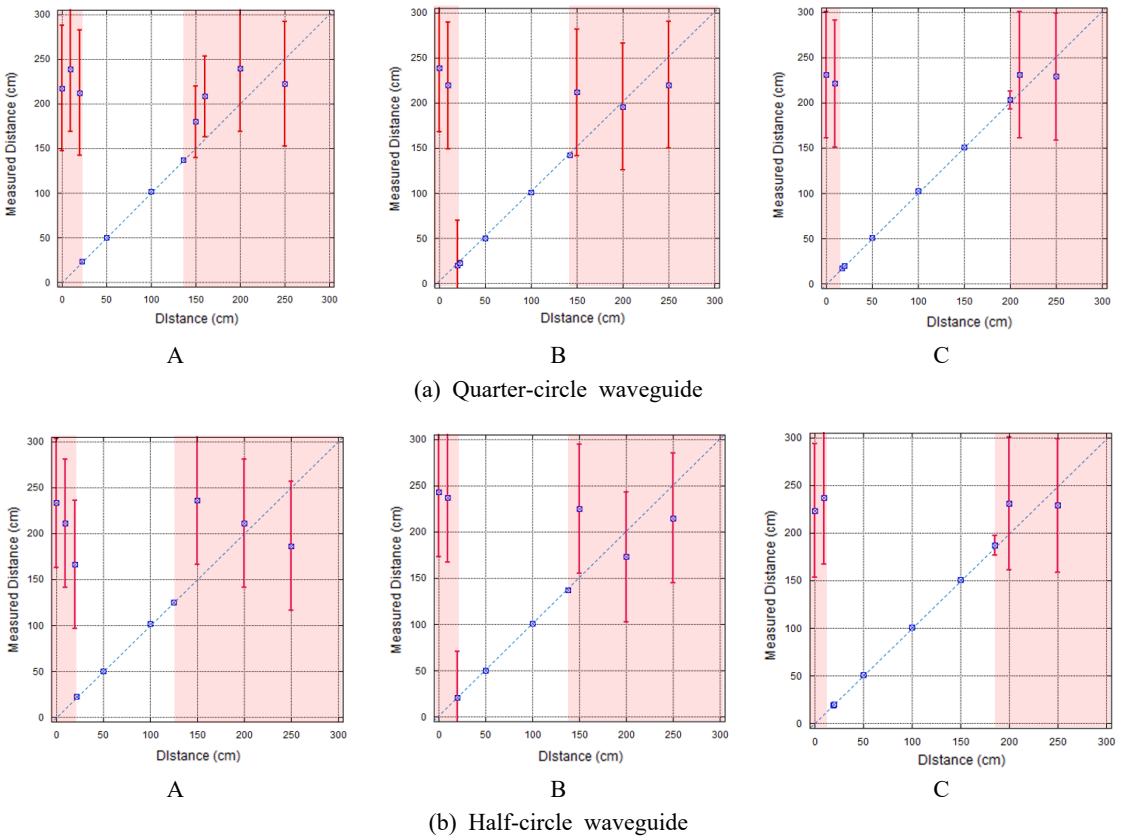


Fig. 11 Distance measurement result (A : Silicon, B : PVC, C : EPDM)

파 신호의 측정 시간은 해석과 같이 오차가 작았다.

직선형[6]과 원호형의 파동유도관의 타겟면 거리를 20 cm로 할 때 타겟면 반사파 신호의 크기를 비교하였다. 직선형 유도관의 경우에 타겟면 반사파 신호의 크기는 0.23 V인 반면 원호형 유도관의 경우에는 0.30 V ~ 0.38 V로, 직선형에서 원호형으로 변경하였을 때 타겟면 반사파 신호의 크기가 증가하였다. 또한 직선 유효길이는 직선형의 경우 반사면을 포함하여 35 cm이고 1/4 원호형은 곡률반경과 관의 반지름과 두께를 포함하여 20.3 cm로 줄었고, 1/2 원호형은 지름방향으로 길기 때문에 곡률반경과 관의 반지름 및 두께의 2배를 포함하여 22 cm로 줄었다.

5. 결 론

원호형 파동유도관을 이용하여 차량의 장애물 거리 측정에 사용되는 초음파 센서의 최소 탐지거리를 단축하는 방안을 다루었다. 초음파 센서에서 송신파를 발생시키고 원호형 파동유도관을 따라 기존의 불감지 영역 만큼의 거리를 전파한 후에 파동유도관 출구로부터 타겟을 향해 방출되고, 타겟에서 반사된 초음파가 다시 파동유도관을 따라 센서에 수신되게 한다. 파가 관을 따라 이동하도록 일정한 원형 단면의 파동유도관을 설계하였다. 원호형 파동유도관을 통한 거리측정의 적절성을 확인하기 위하여 일정한 곡률의 1/4 원호형과 1/2 원호형 파동유도관을 사용하였다.

유한요소 해석에서 원호형 유도관을 통하여 일정하게 전파되고 타겟에서 반사된 파가 유도관을 통해 돌아오는 것을 확인하였다. 실험에서 3가지 재료로 제작한 파동유도관 시제품을 사용하였다. 모든 시제품에서 거리측정이 가능하고 최소탐지거리가 줄어듦을 확인하였다. 최대 탐지거리를 유지하면서 최소 탐지거리를 40 cm에서 17 cm로 줄였다.

1/4 원호형 파동유도관과 1/2 원호형 파동유도관을

비교하였다. 1/4 원호형 파동유도관에 비하여 1/2 원호형 파동유도관은 전체 측정 범위가 줄어드는 경향을 보였다. 하지만 최소 탐지거리 또한 감소하였다. 원호형 파동유도관으로 실험하여 해석 결과를 검증하였고 거리측정에서 불감지 영역을 절반 이하로 줄일 수 있음을 확인하였다.

후 기

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2020R1F1A1048453).

References

(1) Licznerski, 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.

(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 the KSNVE, Vol. 10, No. 5, pp. 723~728.

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

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

(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) 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.

(8) An, J. H. and Kim, J. O., 2021, Waveguide for Ultrasonic Sensor, Korea Patent 10-1419410.

(9) Firth, D. and Fahy, F. J., 1984, Acoustic Characteristics of Circular Bends in Pipes, Journal of Sound and Vibration, Vol. 97, No. 2, pp. 287~303.

(10) Furnell, G. D. and Bies, D. A., 1989, Characteristics of Modal Wave Propagation within Longitudinally Curved Acoustic Waveguides, Journal of Sound and Vibration, Vol. 130, No. 3, pp. 405~423.

(11) Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B. and Sanders, J. V., 2013, Fundamentals of Acoustics, 4th Ed., Hongreung Publishing Company, pp. 204~211.

(12) SensorTec, Specification Ultrasonic Transducer ST-208W-T3, http://www.st4u.com (accessed 12. 14. 2021).

Jae Hyuck An received the B.S. and M.S. degrees in mechanical engineering from Soongsil University in 2020 and 2022, respectively. 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.