

차량용 초음파 센서에서 파동유도관에 의한 최소 탐지거리 단축

Shortening the Minimum Detectable Distance in an Ultrasonic Sensor for Automobiles by a Waveguide

임 성 구* · 안 재 혁* · 김 진 오†
Sung Gu Lim*, Jae Hyuck An* and Jin Oh Kim†

(Received July 6, 2020 ; Revised August 7, 2020 ; Accepted August 7, 2020)

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

ABSTRACT

In this study, a method of shortening the minimum detectable distance of an ultrasonic sensor for the distance measurement of automobiles was developed. It is necessary to overcome the limitations of the minimum detectable distance, which is induced by the residual vibration of an elastic disc in an ultrasonic sensor. The purpose of this study is to design a waveguide to shorten the minimum detectable distance and to improve the performance of proximal measurement by coupling the waveguide with an ultrasonic sensor. We simulated the ultrasound propagation in the designed waveguide through finite element analysis. The analytical results showed clear signals of transmitted and received ultrasound in a wedged-wall waveguide instead of a flat-wall waveguide. Experimental tests were performed to verify the analytical results. The waveguides of the flat and wedged walls were fabricated using a 3D printer and applied during the experiments. The results showed that the ultrasonic sensor coupled with the wedged-wall waveguide measured the proximal distance reasonably.

1. 서 론

초음파에 의한 거리측정 기술은 차량의 장애물 감지에 사용된다⁽¹⁾. 이러한 용도의 초음파 센서들의 성능 항목 중에는 탐지거리 범위가 있다. 최대 탐지거리를 증대시키는 방안으로 센서 진동부 설계 변경^(2,3)이나 혼 가이드 부착^(4,5) 등이 연구되어 있다. 최소 탐지거리는 센서 내부 진동관의 여진으로 인한 불감지 시간 때문에 제한된다. 이를 극복하기 위해 신호처리 방법이 시도되지만 여전히 제약을 받고 있어 다른 방

법이 필요하다.

초음파에 의한 차량 장애물 감지 기술은 처음에 후방감지에 사용되었고, 전방 및 측방 감지가 추가되면서 주차보조 시스템에 사용되고 있으며, 자율주행 차량에도 사용된다⁽⁶⁾. 근거리 측정 성능을 향상시키기 위하여 초음파 주파수를 높여 파장을 짧게하는 방안⁽⁷⁾이 제시되었으나, 이는 최소 탐지거리 뿐만 아니라 최대 탐지거리도 단축시키는 단점이 있다. 센서 여진에 파묻히는 신호를 추출하는 신호처리 방법^(8,9)이 제안되었지만 아직 실용화 되지 않았다. 불감지 영역을 벗어나 센서를 배치하도록 공간을 확보하는 고안⁽¹⁰⁾이 제시되

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

A part of this paper was presented at the KSNVE 2019 Annual Autumn Conference
‡ Recommended by Editor Jae Young Kang

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

었는데, 이 방안은 센서 구조물을 길게 하므로 실질적으로는 최소 탐지거리 단축이라고 간주되지 못한다.

최소 탐지거리를 제한하는 불감지 영역을 벗어나 센서를 배치하되 초음파 전파 경로를 90° 꺾는 방안이 제시되어 있다⁽¹¹⁾. 이 방안은 아이디어로 제시되었지만 실용화에 장애가 되는 문제가 있어서, 이를 해결하는 파동유도관을 저자들이 고안하였다⁽¹²⁾. 이 논문은 고안된 파동유도관을 초음파 센서와 결합하여 근거리 측정 성능 향상을 평가한 결과를 제시한다. 파동유도관을 설계하고, 유한요소 해석으로 성능을 예측하며, 거리 측정 실험을 하여 최소 탐지거리 단축을 확인한다.

2. 파동유도관 설계 및 성능예측

통상적인 차량용 초음파 센서에서 관찰되는 신호의 사례를 Fig. 1에 제시하였다. 압전소자와 탄성판으로 구성되는 초음파 센서^(3,13)의 경우에 송신신호 인가에 의해 압전소자가 탄성판을 진동시키고 이에 따라 초음파가 방출된다. 전파하던 초음파가 타겟면에서 되돌아와 탄성판을 진동시켜 압전소자가 수신신호를 나타낸다. 송신신호와 수신신호의 시간간격에 초음파 전파 속도를 곱하면 왕복거리, 즉 센서 탄성판으로부터 타겟면까지의 거리 L 의 2배이다. 그런데 탄성판은 짧은 펄스 신호에 의해 가진되어도 진동이 잔류하는 여진이 있기 때문에, 수신신호가 여진신호에 겹치면 초음파 전파시간을 제대로 측정할 수 없다. 이러한 현실적 제약조건을 극복해서 근접 거리 측정을 가능하게 하는 파동유도관을 설계하였다.

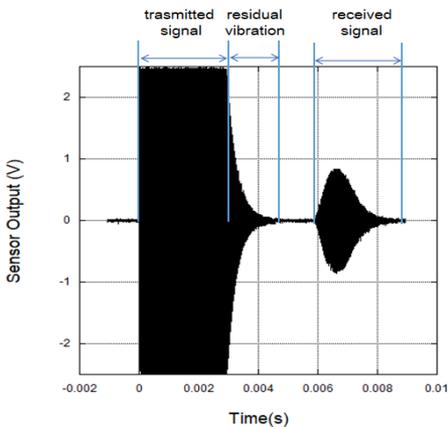


Fig. 1 Signals in a conventional ultrasonic sensor (target distance 1 m)

2.1 파동유도관 설계

파동유도관의 기본 개념⁽¹¹⁾을 Fig. 2(a)에 나타내었다. 초음파 센서에서 생성된 송신파가 파동유도관 내에서 일정거리를 전파한 후에 타겟을 향해 방출되고, 반사되어 돌아오는 수신파가 다시 파동유도관 내에서 일정거리를 전파한 후에 센서에 수신되게 하는 구조이다. Fig. 1에 제시된 여진시간 동안 초음파가 파동유도관 내에서 전파하므로, 수신 신호는 여진신호에 겹치지 않는다. 파동유도관 출입구에서 타겟까지의 거리 d 를 0에 가깝게 할 수 있으므로, 센서 구조물과 타겟 사이의 거리가 0에 근접해도 거리 측정이 가능해지는 개념이다.

Fig. 2(a)에 제시한 기본 개념은 실제 상황에서 실용적이지 않은 문제가 있다. 차량용 초음파 센서는 빔 폭이 크므로 센서에서 생성되는 송신파는 넓게 퍼져나가서 벽면에서 반사되기도 한다. 또한 벽면이 평탄하다더라도 거칠기에 따라 초음파 반사가 복잡해질 수 있다⁽¹⁴⁾. 파동유도관의 벽면에서 반사되며 진행되는 파동이 혼합된다. 제4절에서 설명하는 내용인데, 평탄한 벽면에서 반사되어 바로 센서에 수신되는 파동이 존재하여 거리측정을 어렵게 한다. 이를 회피하기 위하여 Fig. 2(b)에 제시한 바와 같이 파동유도관의 내부 벽면을 흡음형 켜기형태로 하였다.

초음파 센서가 원뿔형이므로 파동유도관은 원뿔형이 바람직하다. 제작의 편의를 위해서 사각통 형태여도 되며, Fig. 3에 횡방향 켜기와 종방향 켜기의 개념도를 제시하였다. 제4절에서 설명하는 실험에서 Fig. 3(b)의 종방향 켜기는 실질적으로 효과가 없는 것으로 나타났다.

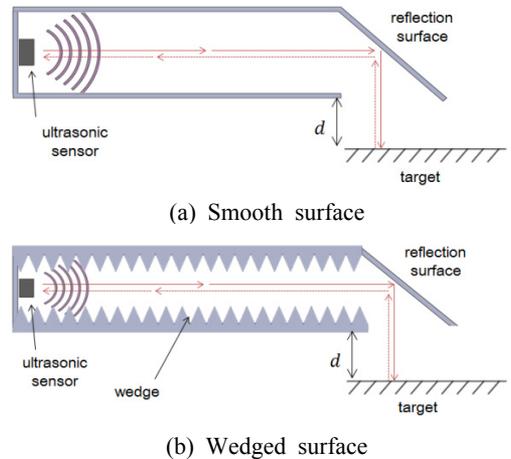
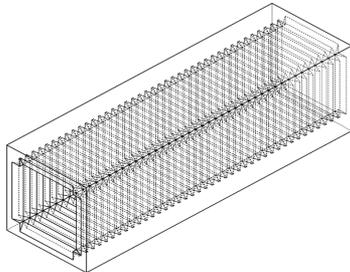


Fig. 2 Concept of a waveguide

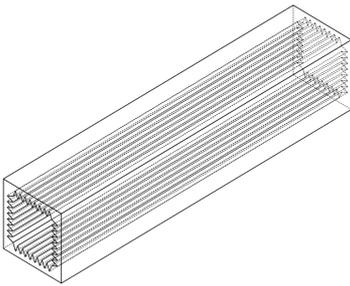
따라서 본 논문은 Fig. 3(a)의 횡방향 켜기가 내부 벽에 형성되어 있는 파동유도관을 주로 다룬다.

2.2 벽 면의 영향

Fig. 2에 제시된 바와 같이 반사면을 갖춘 파동유도관의 성능을 파악하기 위해 앞서, 유도관 벽면의 영향을 조사하였다. 파동유도관이 없는 경우, 평탄한 벽면을 가지는 파동유도관, 켜기형 벽면을 가지는 파동유도관을 유한요소 해석하여 비교하였다. 파동유도관의 길이와 지름은 각각 300 mm와 25 mm로 하였다. 이 길이는 송신신호 폭과 여진 시간을 지나치는 거리이다. 켜기형 면에서 켜기의 높이는 9.3 mm이고, 각도는 30°이며 간격은 5.0 mm로 하였다. 켜기 높이 치수는 50 kHz인 초음파의 파장 1인 6.7 mm 보다 크게 설정된 것이다.



(a) Transverse wedge



(b) Longitudinal wedge

Fig. 3 Design of wedged-surface waveguides

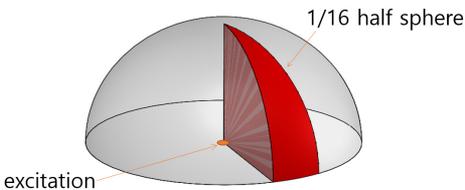
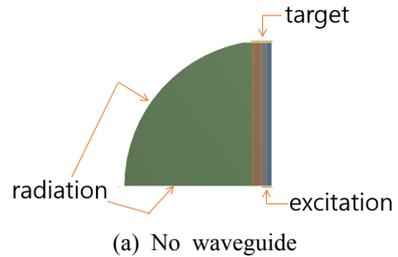


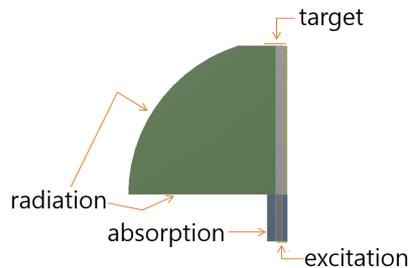
Fig. 4 Model of acoustic analysis

초음파를 송신하고 일정거리에 있는 타겟면에서 반사되어 되돌아오는 초음파의 수신 신호를 관찰하였다. 유도관 출구에서 방출된 이후 초음파 전파는 축대칭으로 간주되므로, 해석 영역을 Fig. 4와 같이 반구를 16등분한 영역으로 하였다. 50 kHz의 초음파 5주기를 가진 부에 가진하였다. 요소 크기를 1/6인 1 mm 이하로 설정하였다. 파동유도관에 의한 초음파의 송·수신 해석 모델과 경계조건을 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5(a)는 파동유도관이 없는 경우의 모델과 경계조건이고, 가진 부로부터 타겟면까지의 거리는 0.9 m이다. Fig. 5(b)는 파동유도관이 있는 경우의 모델과 경계조건이고, 가진 부로부터 타겟면까지의 거리는 1.2 m이다.

시간에 따른 음압분포를 추출하여 초음파의 송신과 수신을 관찰하였다. Fig. 6은 파동유도관이 없는 경우의 음압분포이고, Fig. 7은 파동유도관의 벽면이 평탄한 경우의 음압분포이다. Fig. 8은 파동유도관의 벽면이 켜기형인 경우의 음압분포이다. 초음파 센서에서 초음파 수신에 잘 되는지 관찰하기 위해서 가진 부에서의 시간에 따른 음압을 추출하여 그래프로 제시하였다. Fig. 9에서 (a)는 파동유도관이 없는 경우이고 타겟면에 반사되어 되돌아온 초음파로부터 계산된 거리가 0.92 m로 해석결과가 타당했다. (b)는 파동유도관의 벽면이 평탄한 경우이며, 타겟면에서 반사되어 되돌아온 초음파 신호에 잡음신호(noise)가 포함되어 있지만 추출된 음압으로부터 거리를 계산하면 1.2 m



(a) No waveguide



(b) With waveguide

Fig. 5 Boundary conditions of acoustic analysis

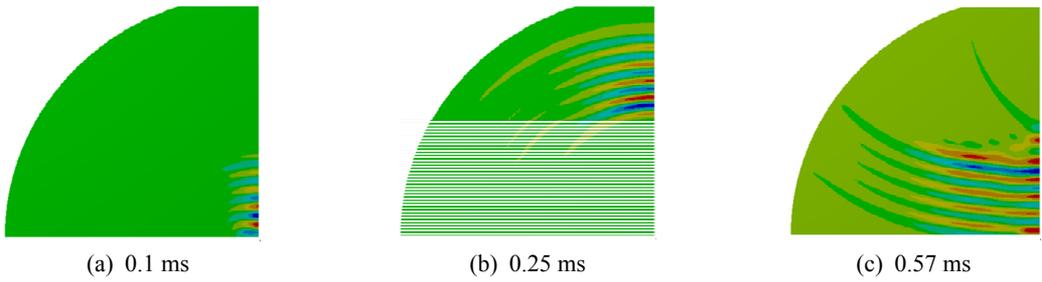


Fig. 6 Sound pressure distribution from transient analysis (without waveguide)

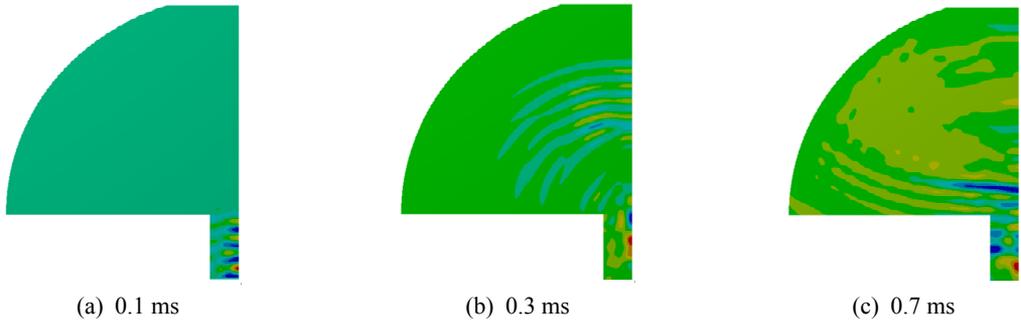


Fig. 7 Sound pressure distribution from transient analysis (with smooth waveguide)

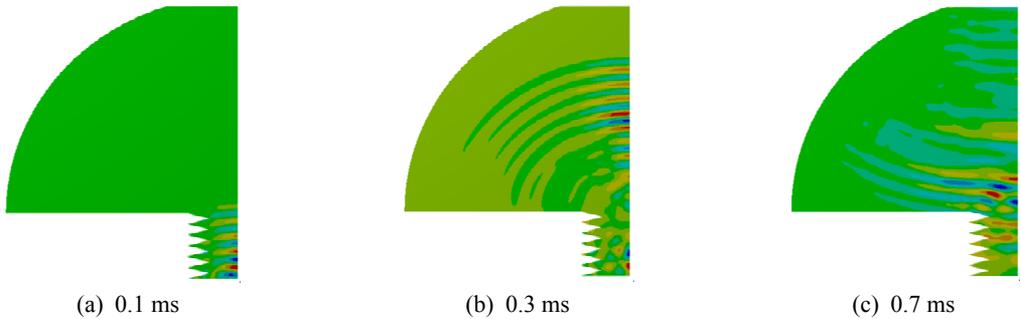


Fig. 8 Sound pressure distribution from transient analysis (with wedged waveguide)

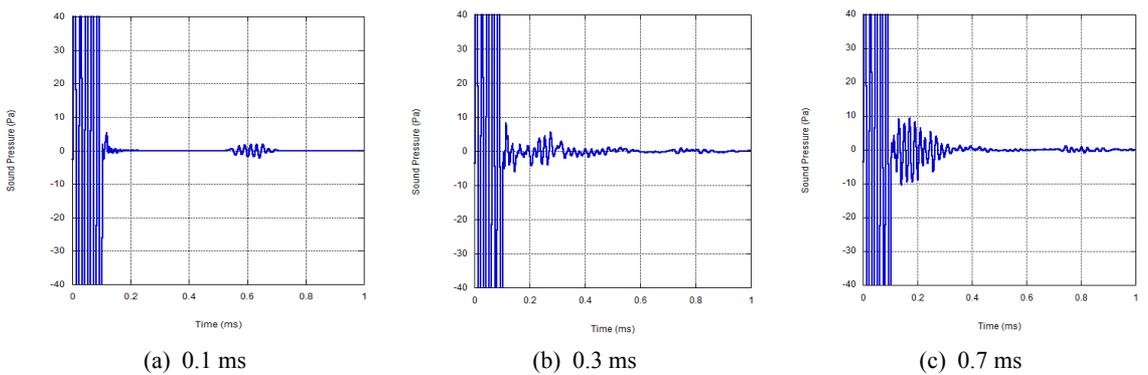


Fig. 9 Acoustic signal from transient analysis

로 거리측정 결과가 타당하다. (c)는 파동유도관의 벽면이 켜기형인 경우인데 벽면이 평탄한 경우와 비교하여 타겟면에 반사되어 되돌아온 초음파 신호에 잡

음신호가 없고, 추출한 데이터로부터 계산된 거리측정 결과도 타당하다.

3. 유한요소 해석에 의한 성능예측

파동유도관에 반사면을 결합하여 초음파 송·수신하는 경우를 유한요소 해석으로 관찰하였다. 평탄한 벽면을 가지는 파동유도관과 켜기형 벽면을 가지는 파동유도관에 Fig. 2와 같이 반사면을 결합한 형상을 모델링하여 해석하였다. 모델링 결과를 Fig. 10에 제시하였다. 해석을 효율적으로 하기 위해 파동유도관의 길이는 짧게 30 mm로 하였다. 반사면의 각도를 45°

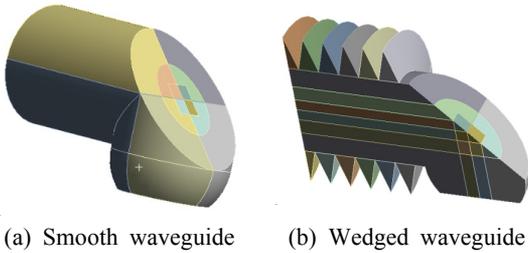


Fig. 10 Acoustic analysis model of a waveguide

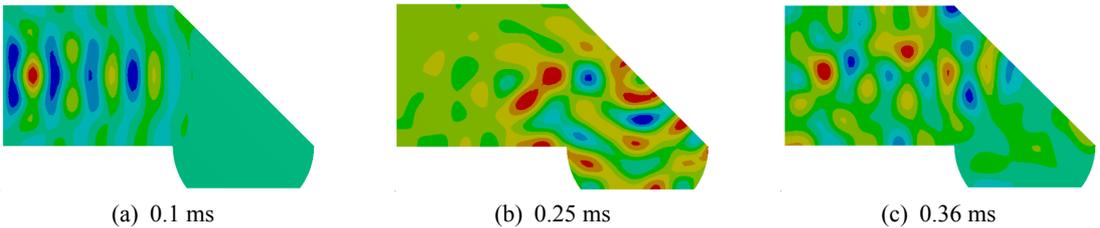


Fig. 11 Sound pressure distribution from transient analysis (with smooth waveguide)

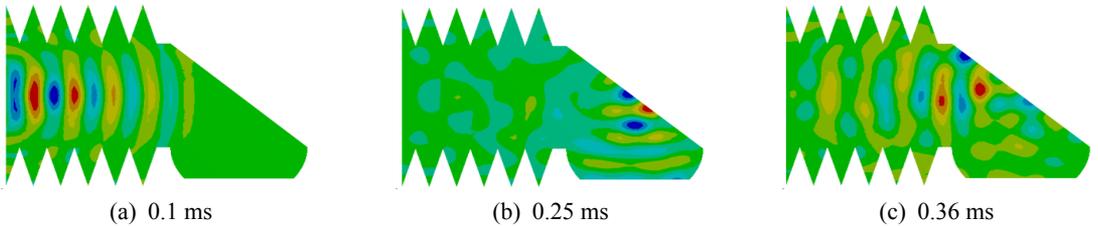


Fig. 12 Sound pressure distribution from transient analysis (with wedged waveguide)

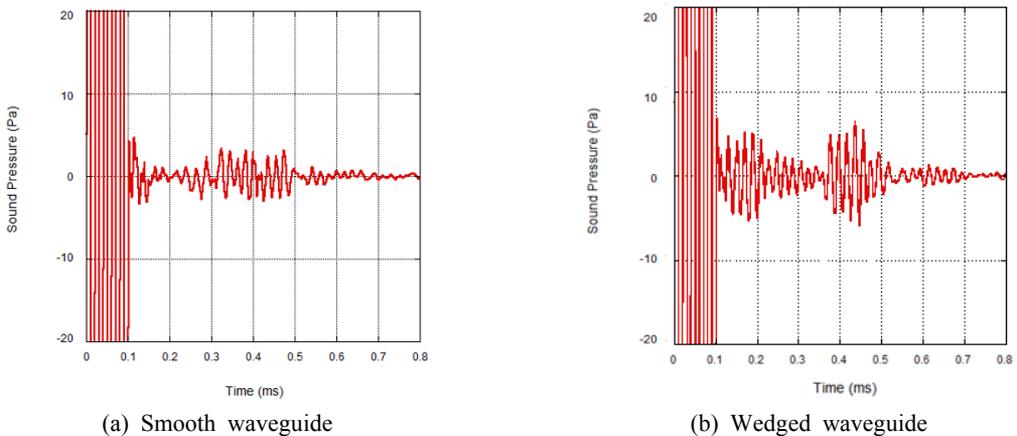


Fig. 13 Signal waveform results from transient analysis

로 하였고 가진부로부터 타겟면까지의 거리는 62.5 mm로 하였다. 초음파를 송신하여 반사면을 거쳐 타겟면에서 반사되어 되돌아온 초음파의 수신 신호를 관찰하였다.

앞선 해석과 마찬가지로 시간에 따른 음압분포를 추출하여 초음파의 송신과 수신을 관찰하였다. Fig. 11은 벽면이 평탄한 파동유도관에서 시간에 따른 음압 분포이다. Fig. 12는 벽면이 췌기형인 파동유도관에서 시간에 따른 음압 분포이다. 가진부에서의 시간에 따른 음압을 추출하여 Fig. 13에 그래프로 제시하였다. Fig. 13(a)는 파동유도관의 벽면이 평탄한 경우이며, 추출된 음압으로부터 거리를 계산하면 30 mm로 거리측정 결과가 타당하지 않다. Fig. 13(b)는 파동유도관의 벽면이 췌기인 경우이며, 추출된 음압으로부터 거리를 계산하면 62.5 mm로 거리측정 결과가 타당하다.

4. 거리 측정 실험

유한요소 해석을 통해 예측한 파동유도관의 성능을 검증하는 실험을 하였다.

4.1 실험장치

실험에 사용된 초음파 센서(SensorTec ST-208W)의 구동주파수는 48.0 kHz이고 지름은 14 mm이다. 실험장치 구성도를 Fig. 14에 제시하였다. 송·수신 보드(AirMar T1 Development Kit)와 DC전원공급기(Keithley 2231A-30-3)를 사용하여 전압이 150 V_{0-p}인 48 kHz 정현파 신호를 초음파 센서에 인가하였다. 전파 후 타겟에서 반사되어 되돌아오는 초음파를 수신하여 오실로스코프(Tektronix TDS 3012C)로 관찰하였다.

4.2 벽 면의 영향

파동유도관 성능 실험에 앞서 유도관 벽면의 영향을 조사하는 예비실험을 하였다. 3D 프린터로 3종류의 파동유도관을 제작하였다. 파동유도관의 내부가 매끈한 면, 횡방향 췌기면, 종방향 췌기면이다. 예비 실험 사례를 Fig. 15에 나타내었다. (a)는 파동유도관이 없는 경우, (b)는 매끈한 파동유도관, (c)는 횡방향 췌기면 파동유도관이다.

초음파 센서로부터 타겟까지의 거리를 0.8 m, 1.0 m, 1.2 m로 하여 초음파 송수신을 각각 3회 반복하였으

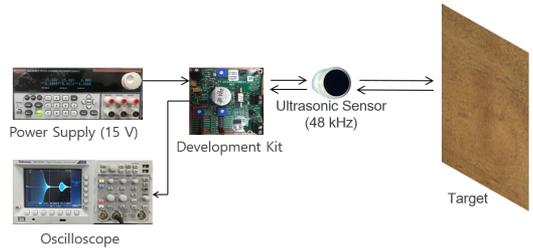
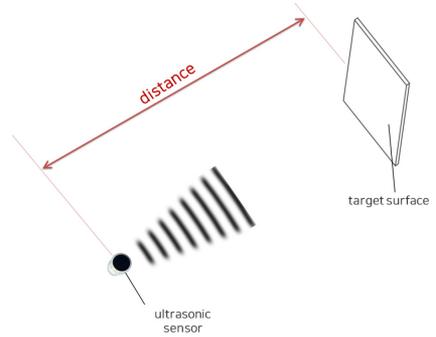
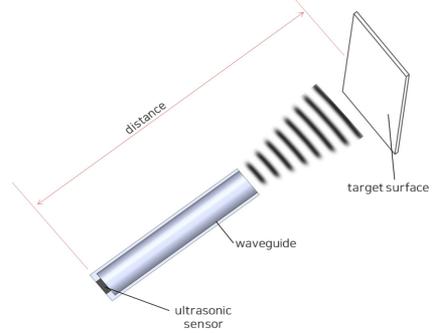


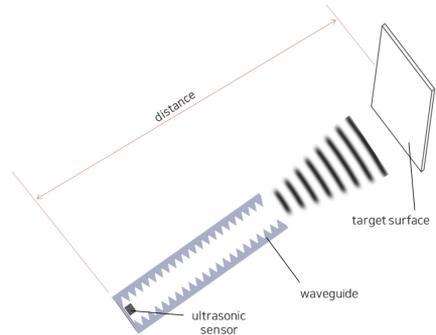
Fig. 14 Experimental apparatus



(a) No waveguide



(b) Smooth waveguide



(c) Wedged waveguide

Fig. 15 Preliminary tests of transmission and reception of ultrasound

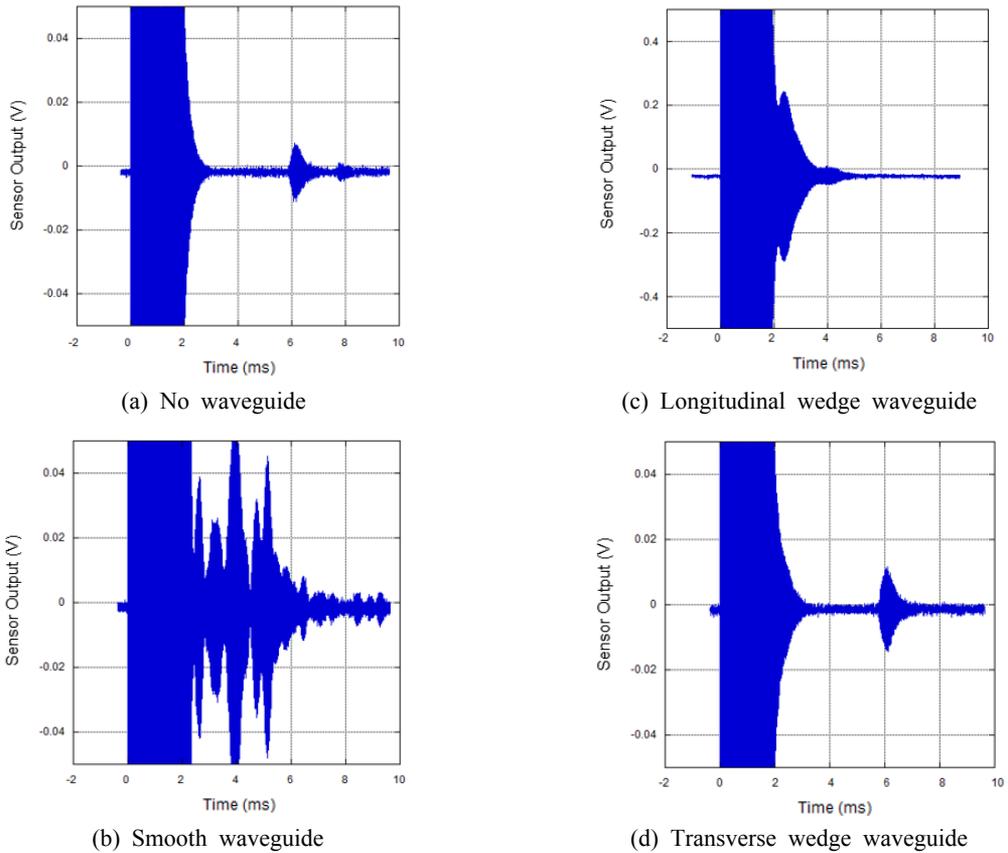


Fig. 16 Received signal of ultrasound at the transmission and reception test (1 m)

Table 1 Distance measured according to waveguides

	Target distance(m)	Measured results	
		Time(ms)	Distance(m)
No waveguide	0.8	4.54	0.78
	1.0	5.87	1.01
	1.2	7.02	1.20
Transverse wedge waveguide	0.8	4.64	0.79
	1.0	5.82	0.99
	1.2	7.00	1.20

며, 1.0 m 거리에서 관찰된 신호를 Fig. 16에 나타내었다. (a)는 파동유도관이 없는 경우이다. (b)는 파동유도관의 벽면이 매끈한 경우이고, (c)는 종방향 췌기면인 경우인데, 이들의 수신신호로는 거리측정이 타당하게 이루어질 수 없다. 초음파 센서에 파동유도관

을 부착하여 거리측정을 하는 경우, (d)에서 보듯이 벽면이 횡방향 췌기 형상이 가장 적합하다.

(a)와 (d)의 방법으로 거리측정을 하여 결과를 Table 1에 제시하였다. 실험결과 파동유도관이 없는 경우와 파동유도관의 벽면이 횡방향 췌기인 경우에는 타겟면에 반사되어 되돌아온 초음파로부터 측정된 거리와 실제 거리가 유사하게 나타났다.

4.3 파동유도관의 성능

파동유도관에 반사면을 결합하여 거리측정 실험을 하였다. 파동유도관이 없는 경우와 파동유도관의 벽면의 형상은 종 방향 췌기 형상인 경우를 비교하였다. Fig. 17에 45도 반사면이 결합된 파동유도관의 단면도와 치수를 제시하였다. 타겟까지의 거리를 0 m부터 1 m까지 0.1 m 간격으로 하여 실험하였고, 결과를 Fig. 18에 제시하였다.

각 지점에서 실측거리 대비 오차를 Fig. 19에 나

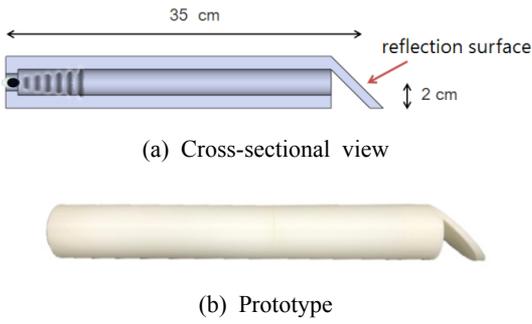


Fig. 17 Waveguide specimen made by a 3D printer

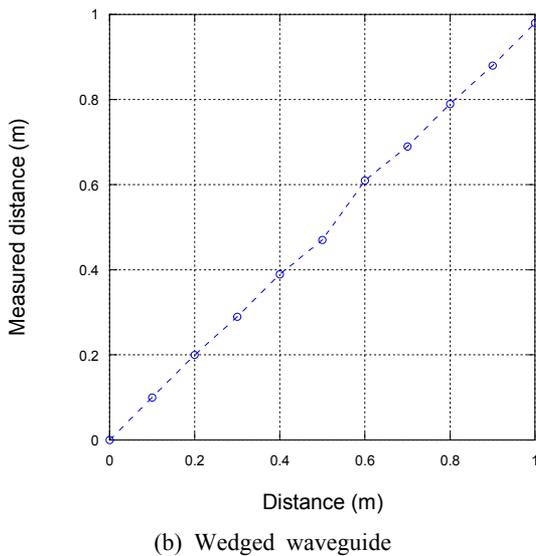
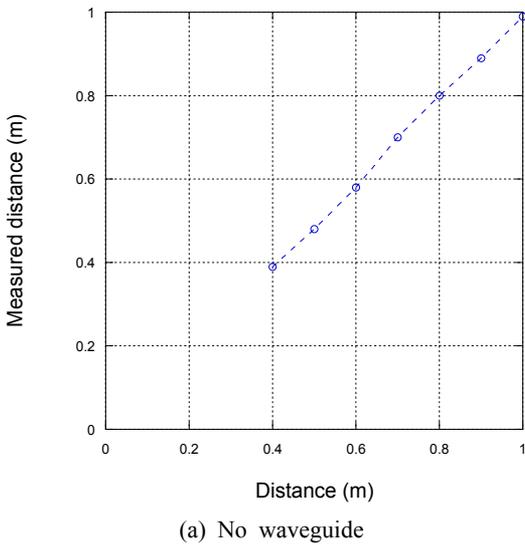


Fig. 18 Distance measurement result with or without waveguide

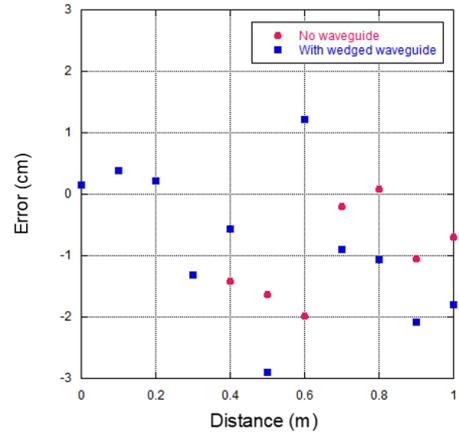


Fig. 19 Error of distance measurement (with wedged waveguide)

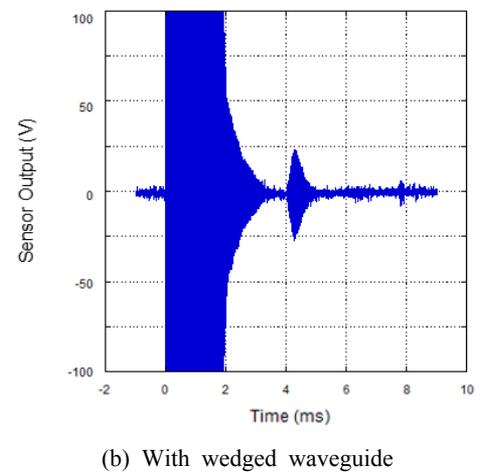
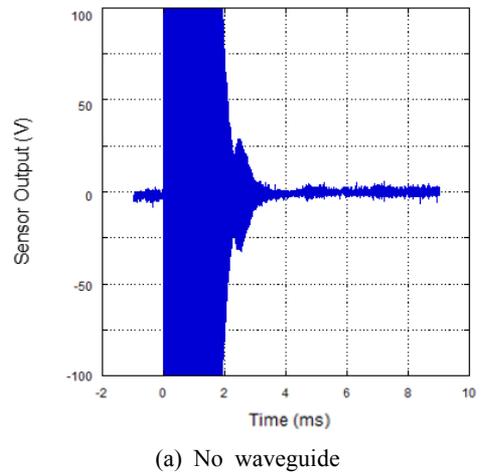


Fig. 20 Received signal of ultrasound at the transmission and reception test (0.35 m)

타내었다. Fig. 20은 초음파 센서와 타겟면까지의 거리가 0.35 m일 때 초음파 송수신 신호이며, 이를 통해 파동유도관이 없는 경우 0 m부터 0.3 m까지는 불감지 영역임을 알 수 있다. 파동유도관이 없는 경우 0.4부터 1 m에서 측정된 거리와 실제거리가 동일하게 나타났고, 파동유도관의 벽면의 형상이 종방향 쉐기 형상인 경우 불감지 영역 없이 측정된 거리와 실제거리가 동일하게 나타나 최소 탐지거리가 단축되었다.

5. 결 론

차량의 장애물 감지에 사용되는 초음파 센서에서 최소 탐지거리 단축 방안을 다루었다. 파동유도관을 설계하고 성능을 입증하는 해석과 실험을 하였다.

초음파 센서에서 생성된 송신파가 파동유도관 내에서 일정거리를 전파한 후에 타겟을 향해 방출되고, 반사되어 돌아오는 수신파가 다시 파동유도관 내에서 일정거리를 전파한 후에 센서에 수신되게 하는 구조이다. 파동유도관의 내부 벽면이 평탄한 경우에 벽면에서 반사된 초음파로 인해 신호가 복잡해지므로, 이를 회피하기 위하여 내부 벽면을 쉐기형으로 울통불통하게 하였다.

유한요소 해석과 실험 결과 파동유도관의 내부 벽면이 평탄한 경우보다 쉐기형인 경우에 초음파 송수신 신호가 명확히 구분되었다. 쉐기형 파동유도관으로 실험한 결과 근거리에서 거리측정이 타당하게 이루어졌다.

후 기

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

References

(1) Kim, J. O., 2000, Sensors and Actuators Using Ultrasound, *Journal of KSNVE*, Vol. 10, No. 5, pp. 723~728.
 (2) Park, J. H., Yoo, G. S., Chae, M. K. and Yoon, J. H., 2015, Ultrasonic Transducer for Long-distance,

Korea Patent 10-1491462.

(3) 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.

(4) 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.

(5) 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.

(6) 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.

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

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

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

(10) Lee, S. H., Jeong, S. G. and Lee, Y. G., 2014, Ultrasonic Sensor for Ultra Short Distance Measurement, Korea Patent 10-1385403.

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

(12) Kim, J. O. and Lim, S. G., 2019, Ultrasonic Wave Apparatus for Measure of Distance, Korea Patent Application 10-2019-0008184.

(13) Yoo, G. S., Lee, T. H. and Chae, M. K., 2017, Ultrasonic Transducer for Vehicle, Korea Patent 10-1728225.

(14) Lim, S. G. and Kim, J. O., 2019, Experiments Characterizing Ultrasound Reflection at a Target Surface Depend on Roughness and Slope, Transactions of the Korean Society on Noise and Vibration Engineering, Vol. 29, No. 6, pp. 677-681.



Sung Gu Lim received the B.S. and M.S. degrees in mechanical engineering from Soongsil University in 2014 and 2019, respectively. During his stay at Soongsil as a graduate student, he was working on ultrasonic sensors and wave propagation.



Jae Hyuck An received the B.S. degree in mechanical engineering from Soongsil 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.