Check for updates

Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng., 32(3) : 227~235, 2022
https://doi.org/10.5050/KSNVE.2022.32.3.227

한국소음진동공학회논문집 제 32 권 제 3 호, pp. 227~235, 2022
ISSN 1598-2785(Print), ISSN 2287-5476(Online)

나선형 파동유도관 결합을 통한 초음파센서의 탐지범위 개선

Improvement in the Detectable Range of an Ultrasonic Sensor by Coupling a Helical Waveguide

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

(Received December 30, 2021 ; Revised February 14, 2022 ; Accepted February 14, 2022)

Key Words : Ultrasound(초음파), Sensor(센서), Distance(거리), Waveguide(파동유도관), Helical(나선)

ABSTRACT

This paper presents a method to improve the detectable range of an ultrasonic sensor for distance measurements by coupling the sensor with a helical waveguide. In particular, this study aimed to decrease the effective length of circularly curved waveguides, in addition to reducing the minimum and maintaining the maximum detectable distances. To this end, finite element analyses were used to predict the ultrasound propagation in a waveguide with a uniform circular cross-section along the spiral path. Two types of cross-sectional sizes were compared: one with a diameter identical to that of the sensor face and another with a diameter twice this value. Furthermore, experiments were performed with fabricated prototypes to evaluate the detectable range by measuring the minimum and maximum detectable distances. Notably, by coupling the helical waveguide with the ultrasonic sensor, the minimum detectable distance was reduced to 1/3 times that for a sensor without the waveguide, while the maximum detectable distance was maintained. Moreover, the effective length of the helical waveguide was decreased, as compared with that of linear or circularly curved waveguides.

1. 서 론

초음파센서에 의한 장애물 탐지 또는 거리 측정이 활용되는 분야가 다양해지고 있다[1]. 그 중에서 특히 자동차 분야에서는 처음에 후방 장애물 감지[2]에 사용되었고, 전방 감지 기능이 합쳐져 주차 보조 시스템에 사용되고 있으며, 측면 감지 기능도 포함하여 자율주행차의 근거리 장애물 탐지용[3]으로 개발되고 있다. 이러한 용도로 사용되는 초음파센서는 송·수신 겸용[4]이므로, 불감지 영역이 있어서 탐지할 수 있는 최소 거리가 제한되어서[5], 이를 단축할 필요가 있다.

송·수신 겸용 초음파센서의 최소탐지거리를 짧게 하는 연구가 여러 가지 방법으로 이루어지고 있다. 그 중에 파동유도관을 개입하는 방안이 있다[6]. 그 개념은 불감지 영역에 해당하는 거리를 파동유도관 내에서 해소하고 유도관 출구에서 타겟까지의 거리를 바로 측정하는 것이다[7,8]. 애초에 고안된 파동유도관은 직선형으로서, 돌출부를 줄이기 위해서 45도 반사면을 개입시켰다[6~8]. 직선형 파동유도관에 개입된 45도 반사면을 회피하고 유효길이를 줄이기 위해 원호형 파동유도관을 고안하여 관 설치 이전과 비교하여 성능 확인을 한 바 있다[9]. 이를 토대로 유효길이를 더욱 줄이기 위해 나선형 파동유도관을 고안하였다[10]. 원호형

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

‡ Recommended by Editor Jung Bin Im
ⓒ The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

으로 굽은 관 내에서도 파동 전파가 원활함을 확인한 문헌[11]이 이론적 뒷받침을 해주고, 앞선 논문[9]에서 물리적으로 설명되었다.

나선형 파동유도관의 기본 개념을 Fig. 1에 제시하였다. 이를 활용하는 사례로서 자동차 범퍼에 설치하는 방안을 Fig. 2에 나타내었다. 이 논문은 초음파센서에 결합되는 나선형 파동유도관을 대상으로 초음파 전파 특성을 평가하고자 한다. 설계한 파동유도관에서의 초음파 전파를 유한요소기법으로 해석하고, 시제품을 제작하여 실험한 결과를 제시한다.

2. 유한요소 해석

초음파센서에 결합된 나선형 파동유도관에서 초음파의 송·수신에 의한 거리측정 과정을 유한요소 해석하였다. 실제 대상은 3차원 물체이지만 해석 시간을 줄이기 위해 나선형 경로를 따른 대칭면에 대한 입체 2차원 해석을 하였다. 해석에 상용 소프트웨어 ANSYS를 사용하고 acoustic 해석 기능을 적용하였다.

2.1 해석 모델 및 조건

나선형 파동유도관의 해석 모델을 Fig. 3에 제시하였다. Fig. 3에 보인 2종류 감김수의 나선형 파동유도관을 대상으로, 파동유도관의 지름을 센서와 동일한 것과 센서의 2배인 것으로 하였다. 파동유도관의 지름이 센서의 가진면보다 작은 경우는 유도관에서 벗어나는 센서의 면에서도 송·수신이 발생하여 혼란과 오류가 발생할 수 있기 때문에 고려하지 않았다. 해석영역은 나선형 파동유도관의 내부공간과 파동유도관 출구에서 타겟면까지의 반원 공간이다. 파동유도관 출구 끝부터 타겟까지의 외부공간은 초음파가 방출되는 상황을 감안하여 짤린 반원 모양으로 하였다. 출구가 허공에 노출되는 경우에는 출구 부근 경계면에 방사조건이 타당하고, 범퍼면에 설치되는 경우에는 반사조건이 타당한데, 유도관으로 수신되는 파형에는 영향이 없다. Fig. 3에서 r은 유도관 단면의 반지름을 나타내고 d는 유도관 출구부터 타겟면까지 거리를 나타낸다. 2가지 파동유도관의 나선 길이를 최소탐지거리 30 cm로 하고, 단면 반지름을 센서와 동일한 경우에는 7 cm, 센서의 2배인 경우 14 cm로 하였으며, 파동유도관 출구 끝부터 타겟면까지 편도 거

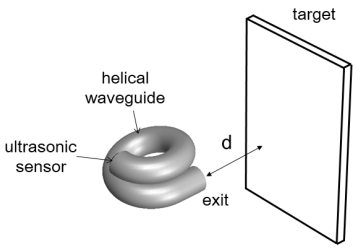


Fig. 1 Schematic diagram of a helical waveguide

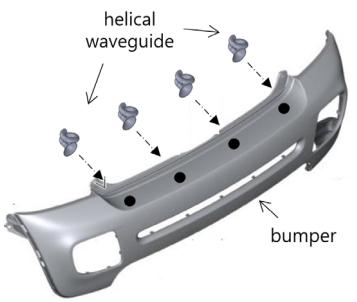
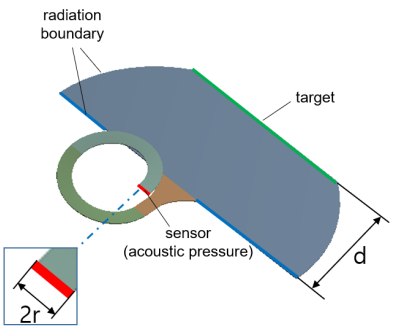
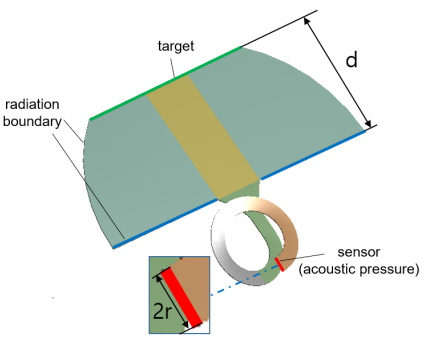


Fig. 2 Installation example of a helical waveguide



(a) 4/4 helical waveguide



(b) 5/4 helical waveguide

Fig. 3 Analysis models

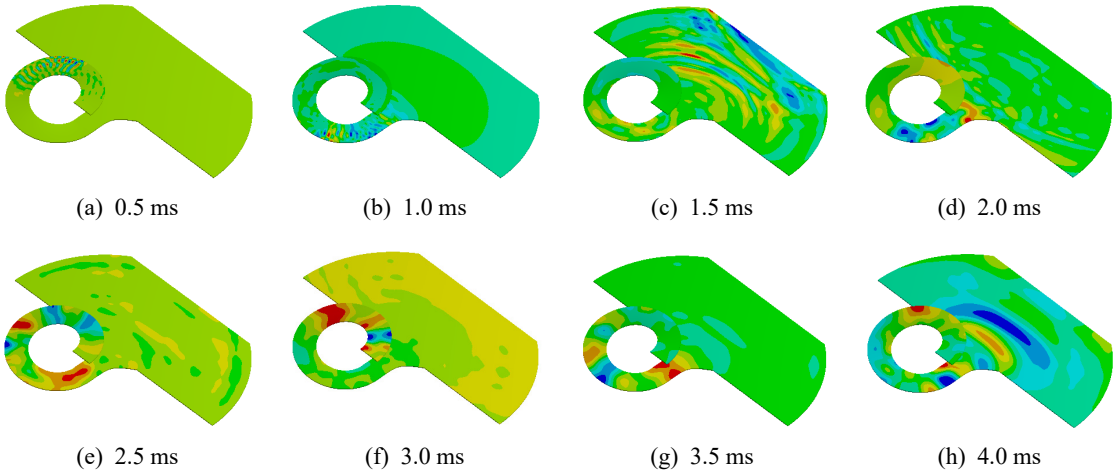


Fig. 4 Acoustic pressure distribution obtained by transient analysis for 4/4 helical waveguide (twice diameter)

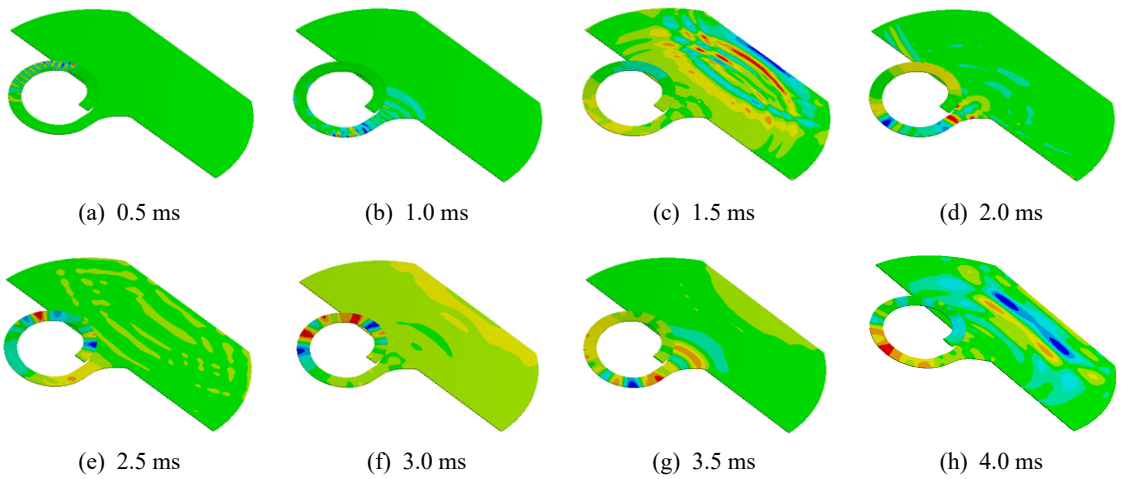


Fig. 5 Acoustic pressure distribution obtained by transient analysis for 4/4 helical waveguide (same diameter)

리를 12 cm로 하였다.

Fig. 3에 보인 바와 같이, 파동유도관의 입구에 실제 차량용 센서의 가진을 모방하기 위하여 50 kHz, 3 Pa, 12펄스의 음압을 주었고, 출구 이후의 반원에서는 반경 방향과 반원 지름면 방향으로 경계조건 방사로 하였다. 파동유도관 벽면과 타겟면에서는 완전 반사되는 조건을 설정하였다. 요소의 크기는 50 kHz 파장의 1/6인 1 mm 이하로 설정하였다.

2.2 해석 결과

모델링한 나선형 파동유도관을 통한 초음파 전파를 과도(transient)해석의 음압(acoustic pressure)분포 결과를 Figs. 4~7에 0.5 ms 간격으로 나타내었다. Fig. 4와 Fig. 5는 감김수가 4/4인 나선형 파동유도관에 대한 결과이다. Fig. 4는 파동유도관의 지름이 센서 가진면의 2배인 경우이고, Fig. 5는 파동유도관의 지름이 센서 가진면과 동일한 경우이다. Fig. 6과 Fig. 7은 감김수가 5/4인 나선형 파동유도관에 대한 결과이다. Fig. 6은 파동유도관의 지름이 센서 가진면의 2배인 경우이고, Fig. 7은 파동유도관의 지름이 센서 가진면과 동일한 경우이다. 센서에서 방출된 초음파가 나선형 파동유도관의 경로를 통해 출구로부터 타겟으로

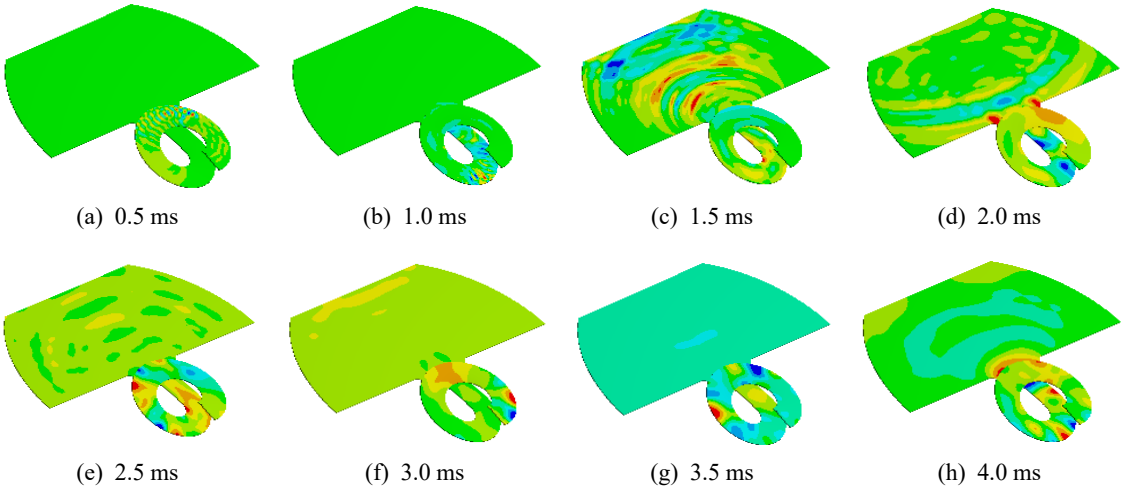


Fig. 6 Acoustic pressure distribution obtained by transient analysis for 5/4 helical waveguide (twice diameter)

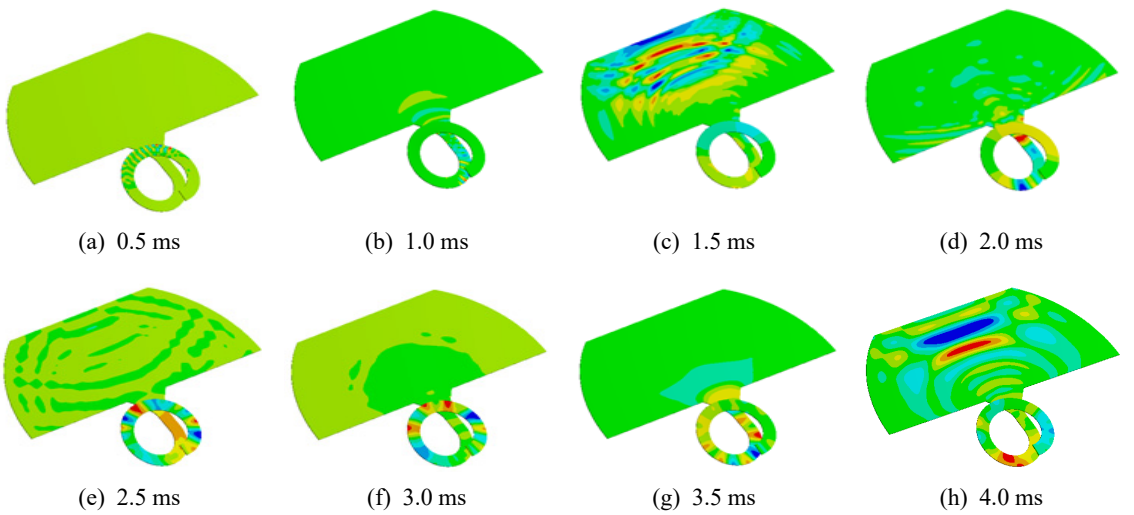
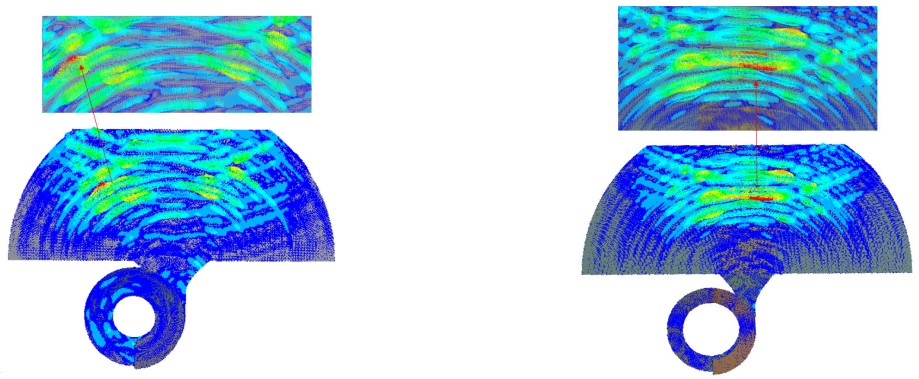


Fig. 7 Acoustic pressure distribution obtained by transient analysis for 5/4 helical waveguide (same diameter)

전파한다. 파동유도관의 출구에서 음파가 전달되는 단면적이 급격히 변하여 출구에서 초음파가 일부 반사하여 센서로 돌아오고 대부분은 투과한다. 출구에서 투과한 초음파는 타겟면에서 반사하여 다시 나선형 파동유도관을 통하여 센서로 돌아온다.

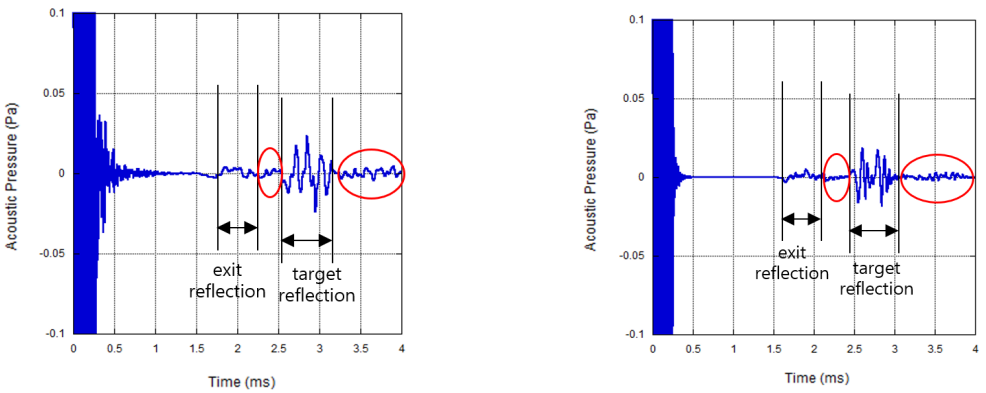
파동유도관의 지름이 센서 가진면의 2배인 것과 동일한 것을 비교하였는데 Figs. 4~7의 1.5 ms에서 차이가 두드러지게 나타난다. 이는 Fig. 8의 acoustic pressure gradient를 통하여 확인하면, (a) 파동유도관의 단면 지름이 센서 가진면의 2배일 때 출구에 수직하게 전파되지 않는 반면, (b) 센서 가진면과 동일할 때 출구에서 타겟면을 향하여 수직하게 전파되는 것을 파악할 수 있다.

거리측정의 결과를 비교하기 위하여 초음파센서에서 관찰한 시간별 음압의 크기를 Fig. 9와 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 9는 감김수가 4/4인 나선형 파동유도관에 대한 결과이고, Fig. 10은 감김수가 5/4인 나선형 파동유도관에 대한 결과이다. 여기서 (a)는 파동



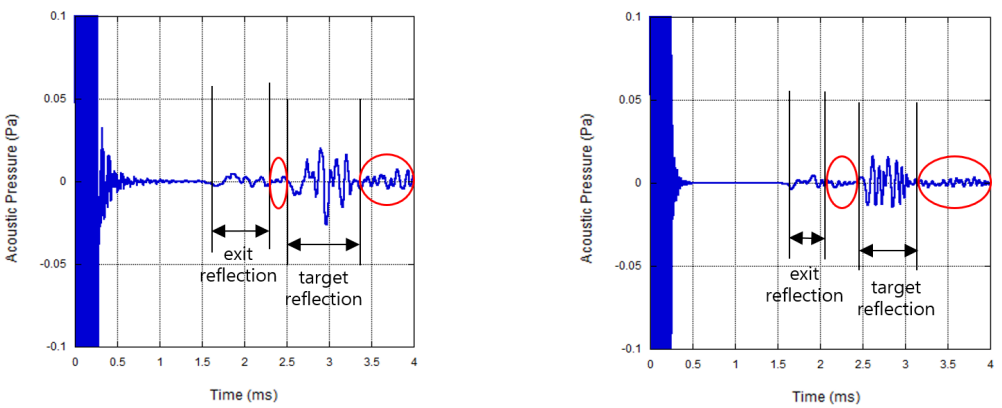
(a) Twice diameter (b) Same diameter

Fig. 8 Acoustic pressure gradient obtained by transient analysis



(a) Twice diameter (b) Same diameter

Fig. 9 Signals obtained by transient analysis for 4/4 helical waveguide



(a) Twice diameter (b) Same diameter

Fig. 10 Signals obtained by transient analysis for 5/4 helical waveguide

유도관 단면 지름이 센서의 2배인 경우이고 (b)는 같은 경우이다. Fig. 9와 Fig. 10의 수신신호에서 (a)의 경우에 각각 2.52 ms와 2.50 ms 시점에, (b)의 경우에 각각 2.45 ms와 2.46 ms 시점에 타겟면 반사파가 관찰된다. 거리측정 결과를 확인하면 (a)의 경우에 타겟면까지 거리는 각각 13.2 cm와 12.9 cm로 측정거리 12 cm에 대한 오차가 1 cm 전후이고, (b)의 경우에 각각 12.0 cm와 12.1cm로서 측정거리 12 cm에 대한 오차가 0.1 cm 이하이다. 나선형 파동유도관의 지름이 센서 가진면과 동일한 것이 초음파센서와 결합되어 거리측정에 사용되기에 적절함을 파악하였다.

3. 실 험

나선형 파동유도관의 지름이 센서의 가진면 지름과 동일한 경우에 대하여, 유한요소 해석을 통해 예측한 거리측정 성능을 확인하는 실험을 하였다.

3.1 실험 장치 및 방법

해석과의 일관성을 위하여 나선형 파동유도관의 해석 모델과 동일한 입체 모델로 Formlab사의 Form3 3D 프린터로 resin 재질의 시제품을 제작하였다. 실험에 사용된 초음파센서는 센서텍 제품 ST-208W로써 구동주파수는 48.0 kHz, 가진 펄스 수는 12개, 가진면 지름은 14 mm이다. Fig. 11에 제시된 형상의 4/4와 5/4 감김수의 나선형 파동유도관을 초음파센서에 결합하였다.

Fig. 12에 실험장치 구성도를 제시하였다. DC전원공급기(Keithley 2231A-30-3)와 송·수신 보드(AirMar T1 development kit)를 사용해서 정현파 신호를 통해 초음파를 발생시켰다. 나선형 유도관을 통하여 전파되는 초음파를 센서에서 오실로스코프(Tektronix TDS 3012C)로 관찰하여 전압-시간 그래프에서 시간을 측정해서 거리로 환산하였다.

3.2 실험 결과

송·수신 겸용 초음파센서를 나선형 유도관과 결합

(a) 4/4

(b) 5/4

Fig. 11 Prototypes of helical waveguides

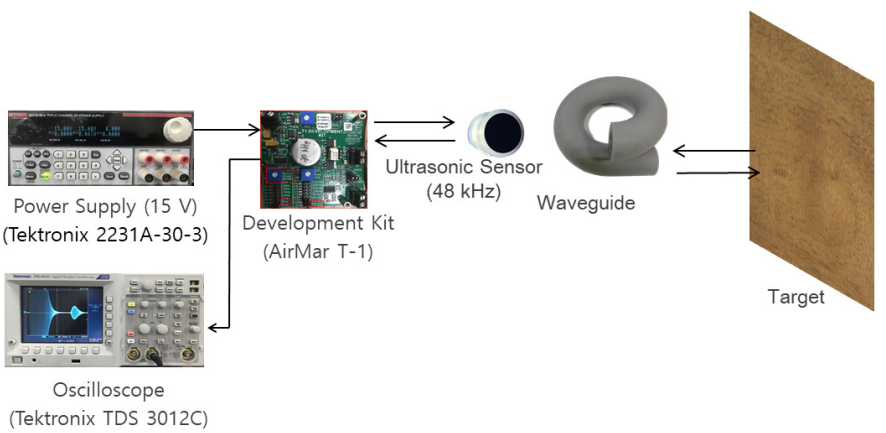


Fig. 12 Experimental apparatus

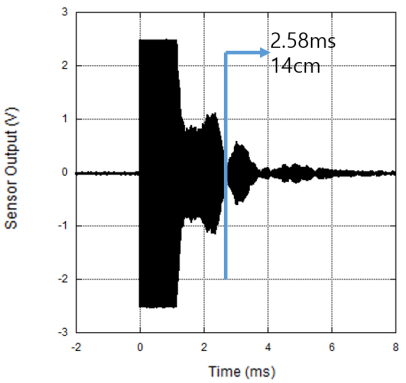
하여 측정된 타겟면 반사파 신호를 관의 출구 반사파 신호 이후에 관찰하였다. 출구 반사파와 구분되는 신호를 측정하여 최소탐지거리를 확인하였다. 초음파센서에서 수신된 신호를 Fig. 13에 나타내었다. (a)에 보인 바와 같이 4/4 나선형 파동유도관에 대한 결과에서 최소 거리가 14 cm로 측정되었고, (b)에 보인 바와 같이 5/4 나선형 파동유도관에 대한 결과에서 25 cm로 측정되었다.

실제 타겟의 거리와 실험을 통하여 측정된 거리의 관계를 Fig. 14에 나타내었다. 에러바(error bar)가 작은 결과에서는 거리 측정이 제대로 이루어지고, 큰 결과에서는 거리측정이 제대로 이루어지지 않음을 음영을 통해 표시하였다. 거리측정이 적절히 이루어진 구간은 Fig. 13(a) 4/4 나선형 파동유도관의 경우에 14 cm ~ 220 cm이고, (b) 5/4 나선형 파동유도관의 경우에 25 cm ~ 215 cm이다. 파동유도관을 결합하지 않을 때 초음파센서의 측정범위가 40 cm ~ 220 cm[9] 인 것을 감안하면 최대 탐지거리가 유지되고 최소 탐지거리가 4/4 나선형 파동유도관의 경우에 대략 1/3로 줄어들었다.

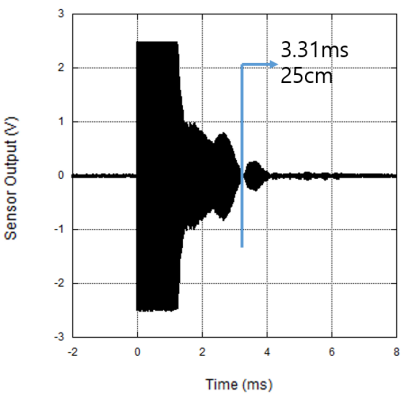
3.3 결과 비교 및 고찰

2.2절 해석 결과에서 4/4 나선형 파동유도관과 5/4 나선형 파동유도관에서 타겟의 신호가 0.1 cm 오차로 측정됨을 확인하였다. 이를 토대로 나선형 유도관을 결합하여 거리측정 실험을 한 결과 Fig. 14에서 제시했듯이 특정 구간에서 오차가 적음을 확인하였다.

실험에서 최소탐지거리는 센서 자체로 측정한 경우보다 나선형 파동유도관을 결합하였을 때 40 cm에서 14 cm로 1/3 이하로 줄었고, 최대탐지거리가 220 cm로 동일하게 유지되어 전체 탐지 범위가 증가하였다. 특히 센서의 근접 불감지 영역을 개선하였다.

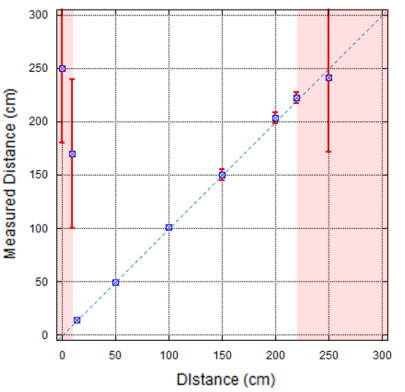


(a) 4/4 helical waveguide

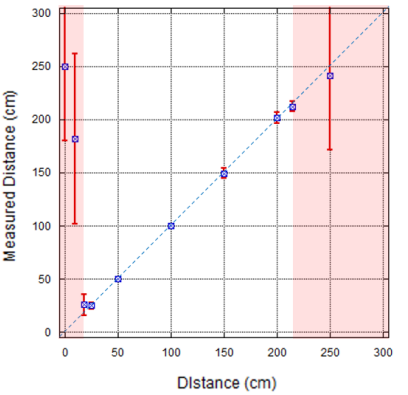


(b) 5/4 helical waveguide

Fig. 13 Signals obtained by experiment



(a) 4/4 helical waveguide



(b) 5/4 helical waveguide

Fig. 14 Distance measurement result

직선형[7] 및 원호형[9]에 동일하게 나선형 파동유도관의 타겟면 거리를 20 cm로 할 때 타겟 신호의 크기를 비교하였다. 타겟 신호의 크기는 직선형 유도관의 경우 0.23 V, 원호형 유도관의 경우 0.30 V ~ 0.38 V인 반면 4/4 나선형 유도관의 경우 0.47V로 타겟면 반사파 신호의 크기가 증가하였다. 또한 직선 유효길이는 직선형의 경우 35cm이고 1/4 원호형의 경우 20 cm였지만 4/4 나선형 파동유도관과 5/4 나선형 파동유도관에서 각각 11 cm와 9 cm로 줄었다.

4. 결 론

나선형 파동유도관을 차량용 초음파센서와 결합하여 센서의 탐지범위를 개선하는 방안을 다루었다. 특히 근접 불감지 영역을 줄이면서 최대 탐지거리를 유지하는 방안을 제시하였다. 초음파가 유도관을 따라 나선형 경로로 이동하도록 경로에 수직한 원형 단면의 나선형 파동유도관을 설계하였다. 나선형 파동유도관을 통한 초음파센서의 거리측정 적절성을 확인하기 위하여 일정한 곡률의 4/4 나선형과 5/4 나선형 유도관을 사용하였다.

유한요소 해석에서 파동유도관 지름이 센서 가진면과 동일한 것과 센서 가진면의 2배인 것을 비교하였다. 전자가 후자보다 유도관 출구에서 초음파가 수직하게 전파되어 거리측정이 적절히 이루어졌다.

감김수를 증가시켜 나선형 유도관의 유효길이를 감소시켰고, 감김수에 관계없이 유도관을 통하여 초음파가 일정하게 전파되어 출구에서 수직으로 전달되고 타겟에서 반사된 파가 다시 출구로 수직으로 돌아와 거리측정이 적절히 이루어지는 것을 확인하였다. 특히 4/4 나선형 유도관을 사용하는 경우에는 유도관이 없을 때의 최대 탐지거리가 유지되면서 최소 탐지거리가 40 cm에서 14 cm로 2/3 가량 감소되었다.

나선형 파동유도관으로 거리측정 실험을 하여 해석 결과를 검증하였고, 최대 탐지거리를 유지하면서 최소 탐지거리를 줄임으로써 거리측정에서 전체 탐지가능 범위를 증가시킬 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, pp. 960~965.

(2) Kim, J. O., 2000, Sensors and Actuators using Ultrasound, Journal of KSNVE, Vol. 10, No. 5, pp. 723~728.

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

(5) 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: Physical, Vol. 133, pp. 96~103.

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

(7) 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.

(8) 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.

(9) An, J. H. and Kim, J. O., 2022, Circularly Curved Waveguide for Shortening the Minimum Detectable Distance of an Ultrasonic Sensor, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 32, No. 2, pp. 133~140.

(10) Kim, J. O. and An, J. H., 2021, Waveguide for

Ultrasonic Sensor, Korea Patent 10-2302252.

(11) 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.

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.