

# 직선부와 곡선부를 결합한 파동유도관에서 초음파 전파

## Ultrasonic Propagation in a Waveguide Combining Straight and Curved Parts

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

(Received January 18, 2023 ; Revised March 20, 2023 ; Accepted March 28, 2023)

**Key Words** : Ultrasound(초음파), Propagation(전파), Waveguide(파동유도관), Sensor(센서), Direction(방향)

### ABSTRACT

This study assesses the ultrasonic propagation in a waveguide structure combining straight and curved parts designed to shorten the minimum detectable distance of an ultrasonic sensor used for distance measurement. The straight guide part is necessary for the wave transmitted through a curved part to not deviate from the intended propagation direction; accordingly, its length should be selected suitably. Finite element analysis and experiment were conducted regarding the processes of transmission, reflection at a target, and reception of the wave in a waveguide having straight parts at each end of a curved part. Ultrasonic transmission and reception performances were compared for various length combinations of two straight parts while maintaining the total waveguide length. Implementing a longer straight part at the exit side yielded more advantageous reception of returning wave because of accurate propagation direction. We achieved a basis to design a combination of straight and curved parts to improve the performance of ultrasonic propagation.

### 1. 서 론

초음파를 이용하는 센서 기술과 액추에이터 기술이 다양한 용도에 적용된다<sup>(1)</sup>. 그중 특히 거리측정용 초음파 기술은 수위 측정<sup>(2)</sup>, 차량 장애물 감지<sup>(3)</sup> 등에 활용된다. 수위계용 초음파 센서의 예를 Fig. 1에 보였다. 근거리 측정에 사용되는 초음파 센서가 송신과 수신을 겸하는 경우, 송신신호와 수신신호가 일부 겹치는 수가 있다. 이는 센서 내부 진동관의 여진과 가진 시간 때문인데, 이러면 거리를 제대로 측정할 수 없다. 이로 인해 최소탐지거리가 제한된다<sup>(4)</sup>. 최소탐지거리를 단축하기 위해 불감지 영역을 줄일 필요가 있다.

송·수신 겸용인 초음파 센서의 최소탐지거리를 단축하는 방안으로 파동유도관을 개입하는 방법이 고안되었다<sup>(5)</sup>. 파동유도관은 불감지 영역에 해당하는 거리만큼 설계되어 유도관 출구에서 타겟까지의 거리를 측정함으로써 최소탐지거리를 단축하는 역할을 한다. 기본개념은 Fig. 2(a)처럼 직선형태의 단순 구조인데 파동유도관이 돌출되어 공간 제약을 발생한다. 이를 해결하기 위해 Fig. 2(b)와 같이 45° 반사면으로 전파 경로를 꺾는 방안에 대해 벽면 영향을 줄여서 성능개선 하는 연구가 이루어졌다<sup>(6)</sup>. 45° 반사면의 부작용을 해소하기 위해 2차원 원호형 또는 3차원 나선형으로 고안하여 직선형 파동유도관을 대체한 연구도 Fig. 2(c)와 같이 진행하였다<sup>(7,8)</sup>. 이러한 직선형 파동유도관<sup>(6)</sup>

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

# A part of this paper was presented at the KSNVE 2022 Annual Autumn Conference  
‡ Recommended by Editor Yun Sang Kwak  
© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

과 곡선형 파동유도관<sup>(7,8)</sup>에 장단점이 있으므로 이들의 장점을 취하는 절충안을 연구하게 되었다.

수위계용 초음파 센서에서 직선부와 곡선부를 결합한 파동유도관을 이용하는 경우에 곡선부를 따라 초음파가 꺾여 전파한다. 이 때에 곡선부 출구에서 파가 원하는 방향으로 진행하지 않는 문제가 발생한다. 이를 해결하기 위해 곡선부 다음에 직선부를 결합한다. 이러한 파동유도관 모델을 만들어 유한요소 해석으로 초음파 전파를 해석한다. 그렇게 하여 곡선부 뒤 직선부 길이에 따른 각 파동유도관의 특성을 확인하고, 시제품을 제작하여 실험을 통해 이를 비교 검증한다.

## 2. 유한요소 해석

파동유도관의 곡선부 뒤에 결합되는 직선부의 길이에 따른 초음파 전파 성능을 파악하기 위해 유한요소 해석을 하였다. 해석에는 ANSYS 소프트웨어를 사용하였고 Transient Structural 기능을 선택하였다.

### 2.1 해석 모델 및 조건

해석 모델의 구조는 Fig. 3에 보인 바와 같다. 초음파 센서에 결합되는 파동유도관이 직선부(길이  $L_1$ ) - 곡선부(바깥 원호 길이  $L_2$ ) - 직선부(길이  $L_3$ )로 이어진다.  $L_3$  직선부 끝인 출구에서 공간을 거쳐 타겟면에서 초음파가 반사되어 돌아온다. 초음파 센서의 단면이 원형이므로, 결합되는 파동유도관의 단면도 원형인 것이 타당하다<sup>(6)</sup>. 곡선부의 바깥 원호 길이  $L_2$ 는 파동유도관 단면 지름 57 mm의 2배에 가까운 104 mm로 설정하였다.

초음파 센서에서 방출되는 초음파의 주파수는 센서의



Fig. 1 Ultrasonic sensor for water level measurement

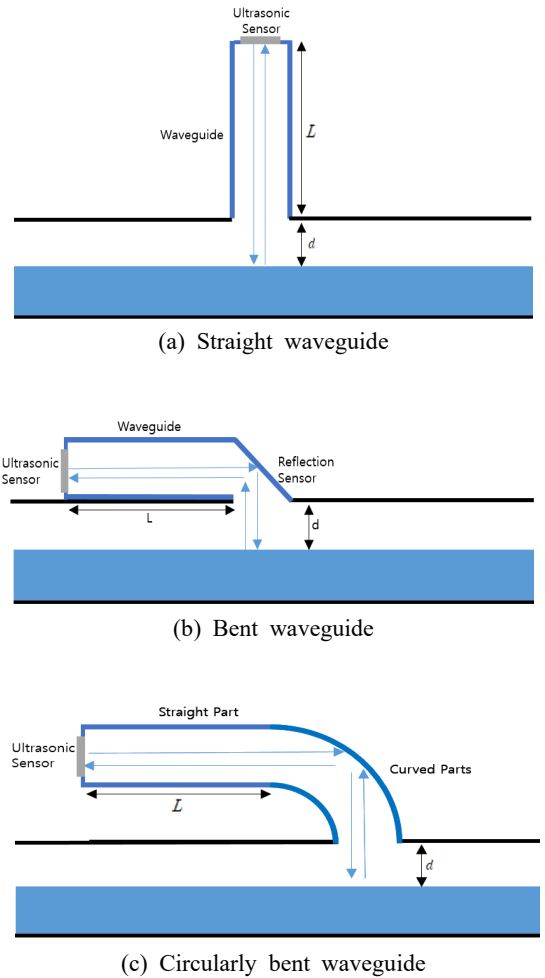


Fig. 2 Several types of waveguides combined with an ultrasonic sensor

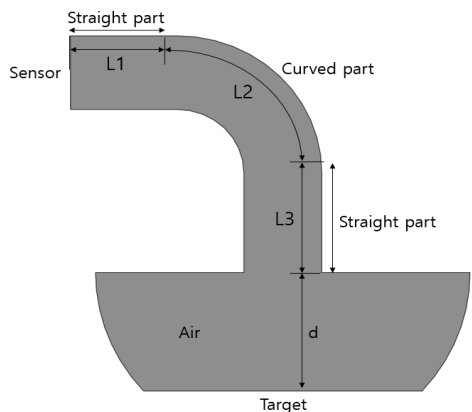


Fig. 3 Schematic diagram of a waveguide combining straight and curved parts

공진주파수인 45 kHz이다. 공기 중 전파속도가 343 m/s 이므로, 이 초음파의 파장은 약 7.6 mm이다. 요소의 크기를 파장의 1/6보다 작은 1 mm 이하가 되도록 조밀하게 하였다. 파동유도관의 전체 길이  $L(= L1+L2+L3)$ 을 315 mm로 일정하게 하였는데, 이 길이는 초음파 수위계의 최소탐지거리인 0.2 m<sup>(6)</sup>보다 크게 한 것이다.

경계조건을 세 면에 설정하였다. 이중에서 타겟면에는 완전 반사가 되도록 하였다. 그리고 출구와 타겟면 사이 횡방향은 무한하지만 해석 모델에서는 유한하므로 방사(radiation)조건을 주었다. 또한 출구에서 반경방향 가상경계에서도 방사하도록 하였다. 센서 가진부에 주파수 45 kHz이고 진폭 1 Pa인 정현파 23주기 신호로 가진하였다.

2.2 해석 결과

출구 쪽 직선부 길이 L3가 76 mm인 모델에서 시간에 따라 초음파가 전파하며 형성하는 음압분포를 Fig. 4에 나타내었다. (a)는 센서에서 초음파가 방출한 직후이고, (b)는 곡선부를 지나가는 때이며, (c)는 출구에 도달하는 때이고, (d)는 타겟면에 도달하는 때이다. 출구 쪽 직선부 길이 L3에 따른 초음파 전파를 유한요소 해석하였다. 해석 결과 중 길이 L3가 38 mm, 76 mm, 114 mm, 152 mm인 경우에 대하여 초음파가

타겟면에 도달하는 때의 음압분포를 Fig. 5에 나타내었다. 곡선부 뒤에 직선부가 결합되어 출구에서 방출되는 파가 출구면에 수직으로 방출되는 것을 확인할 수 있다. 타겟면에서 반사된 후 돌아와 센서에 도달하는 초음파 음압신호를 직선부 길이 L3에 따라 Fig. 6에 나타냈다. 이 신호에서 타겟면 반사파의 크기를 제 4절에서 실험 결과와 비교한다.

3. 실험

유한요소 해석의 결과를 비교 검증하기 위하여 초음파 전파 실험을 하였다.

3.1 실험 방법

곡선부와 두 직선부가 결합된 파동유도관 시제품을 3D 프린터로 제작하였다. 사용한 3D 프린터는 Formlabs사의 form3로서, 광경화(SLA, stereo lithography apparatus) 방식이다. 이는 일반 3D 프린터에 비해 매끈한 곡면을 만드는 데에 유용하다. 실험에 사용된 수위계용 초음파 센서는 아이에스테크놀로지(주)의 LDX-05이고, 실물 사진을 Fig. 1에서 보여주고 있다. 이 센서의 단면 지름은 57 mm이다.

실험 장치를 Fig. 7과 같이 구성하였다. 파동유도관

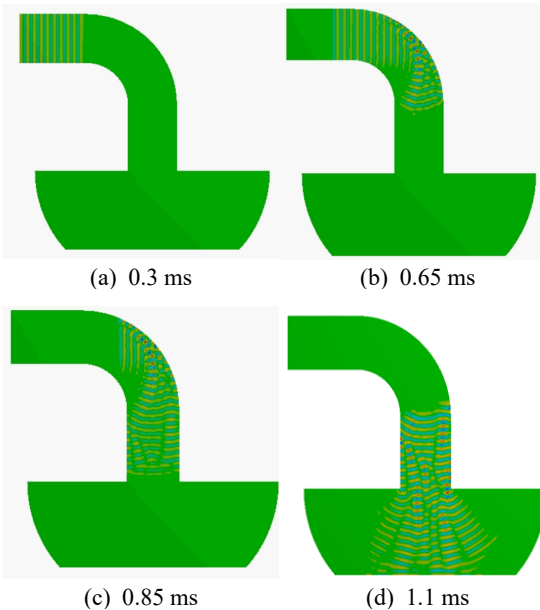


Fig. 4 Ultrasonic wave distribution according to time variation

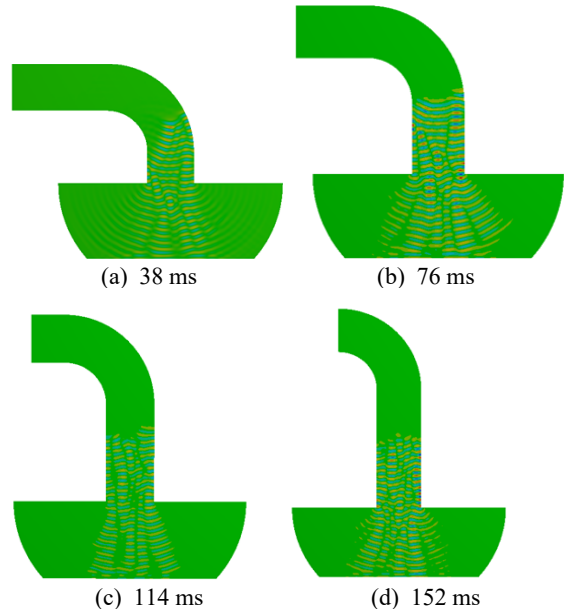


Fig. 5 Ultrasonic wave distribution according to straight part length L3

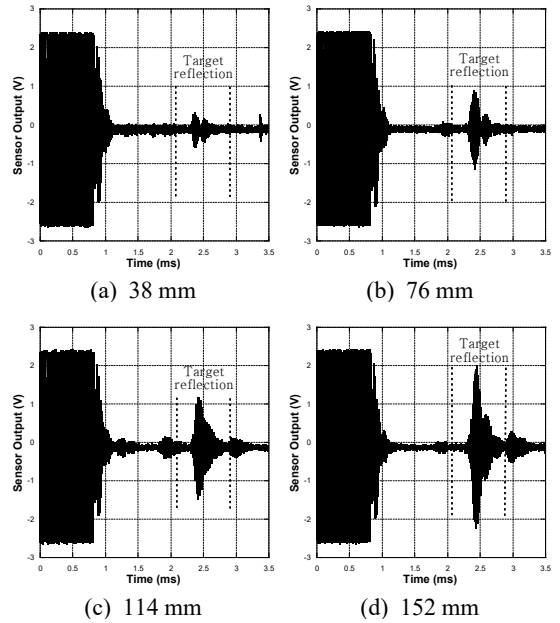
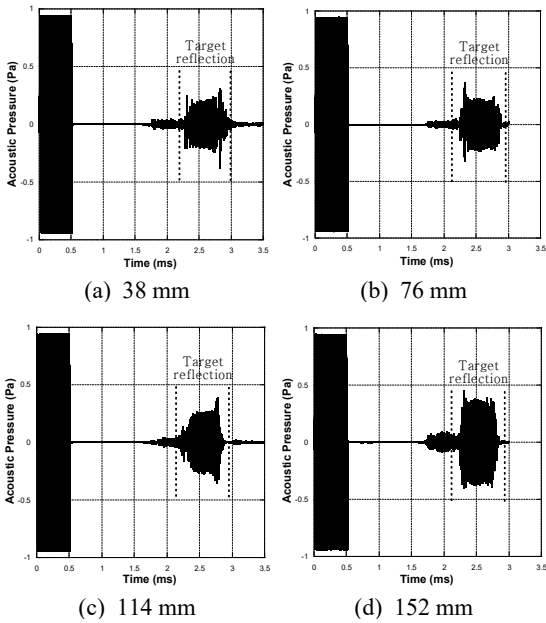


Fig. 6 Ultrasonic wave signals according to straight part length L3 in analysis

Fig. 8 Ultrasonic wave signals according to straight part length L3 in experiment

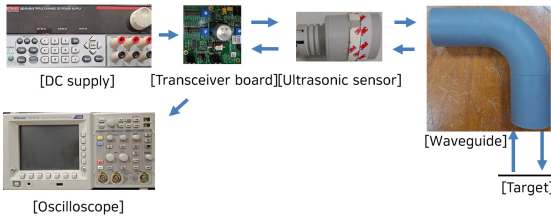


Fig. 7 Instrument configuration of distance measurement test

과 초음파 센서를 결합하였고, 타겟면을 유도관 출구에서부터 90 mm 떨어진 위치에 고정하였다. 전원공급기(Tektronix 2231A-30-3)를 사용해 직류전압을 송·수신보드(AirMar T-1 Development Kit)에 인가하였다. 송·수신보드가 주파수 45 kHz이고 전압 150 V<sub>0p</sub>인 교류 23주기 전기신호를 초음파 센서로 전달한다. 전기신호에 대응하여 초음파 센서가 진동해서 초음파를 방출한다. 방출된 초음파는 파동유도관 내부로 전파하여 곡선부를 따라 이동하며 방향이 꺾인 후 출구에서 방출되어 타겟면에 도달한다. 타겟면에서 반사된 초음파는 돌아와서 센서에서 수신되어 전기신호로 변환된다. 이 신호가 송·수신보드를 거쳐 오실로스코프(Tektronix TDS3012C)에서 관찰된다.

Table 1 Target reflection signals according to straight length L3

Straight length L3 [mm]	Signal magnitude	
	Acoustic pressure by analysis [Pa]	Sensor output by experiment [V]
38	0.124	0.211
76	0.148	0.335
114	0.158	0.489
152	0.288	0.726

### 3.2 실험 결과

송·수신 겸용 초음파 센서에서 감지된 초음파 신호를 Fig. 8에 나타냈다. 해석 결과에 예시한 네 가지 직선부 길이에 대해 실험 결과를 제시하였다. L3 길이가 클수록 타겟면 반사 신호가 큰 경향을 보인다. 실험 결과를 다음 절에서 해석 결과와 비교한다.

### 4. 결과 비교

해석 결과로 Fig. 6에 제시한 음압 신호에서 타겟면 반사파 신호 크기를 RMS 값으로 산출하였다. 출구쪽 직선부 길이별로 Table 1에 나타냈다. 실험 결과로

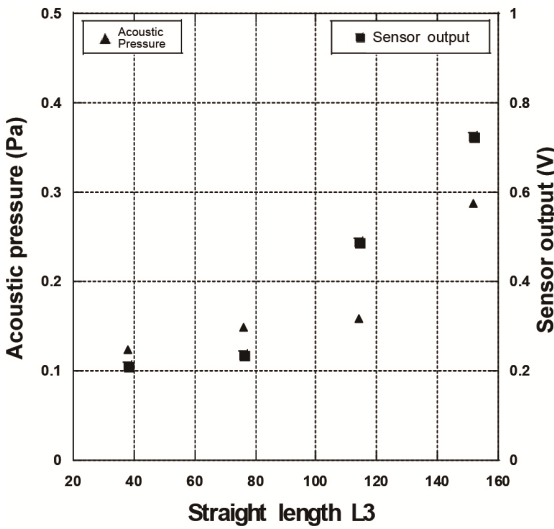


Fig. 9 Target reflection signals according to straight part length L3

Fig. 8에 제시한 초음파 신호에서 타겟면 반사파 신호 크기를 RMS 값으로 산출하여 직선부 길이별로 Table 1에 기재하였다.

유한요소 해석과 실험 결과를 비교하기 위해 Table 1의 데이터를 하나의 그래프로 정리하여 Fig. 9에 나타냈다. 출구 쪽 직선부 길이 L3가 클수록 타겟면 반사파 신호가 큰 경향을 두 가지 결과가 유사하게 보여준다.

### 5. 결 론

이 논문은 송·수신 겸용 초음파 센서에서 방출된 초음파가 곡선부와 두 직선부가 결합된 파동유도관에서 전파하고 타겟면에서 반사되어 수신되는 과정을 다루었다. 곡선부 양쪽에 직선부가 결합된 파동유도관에서 초음파 전파를 유한요소 해석하고 실험하였다.

파동유도관 전체 길이를 일정하게 유지하면서 양쪽 직선부 길이의 비율을 다양하게 하여 초음파 송·수신 성능을 비교하였다. 해석과 실험의 결과에서 모두 곡선부 뒤 직선부 길이가 클수록 타겟면 반사파 신호가 큰 것으로 나타났다. 출구 쪽 직선부 길이가 클수록 전파방향이 정확하여 반사파 수신에 유리한 것을 알 수 있다. 파동유도관의 직선부와 곡선부를 적절히 조합하여 초음파 전파 성능을 향상시키도록 설계하는 근거를 얻었다.

### 후 기

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

### References

- (1) Kim, J. O., 2000, Sensors and Actuators Using Ultrasound, Journal of KSNVE, 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) Hernández, A., Ureña, J., Mazo, M., García, J. J., Jiménez, A. and Álvarez, F. J., 2007, Reduction of Blind Zone in Ultrasonic Transmitter/Receiver Transducers, Sensors and Actuators A: Physical, 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) 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) An, J. H. and Kim, J. O., 2022, Circularly Curved Waveguide for Shortening the Minimum Detectable Distance of Ultrasonic Sensor, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 32, No. 2, pp. 133~140.
- (8) An, J. H. and Kim, J. O., 2022, Improvement in the Detectable Range of an Ultrasonic Sensor by Coupling a Helical Waveguide, Transactions of the

Korean Society for Noise and Vibration Engineering,  
Vol. 32, No. 3, pp. 227~235.



sensors and waves propagation.

**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



**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.