

초음파 유도관에서 꺾임부 형상에 따른 파동 전파

Wave Propagation based on Elbow Shape in an Ultrasonic Waveguide

김 원 목* · 김 진 오†
One Mook Kim* and Jin Oh Kim†

(Received December 28, 2022 ; Revised February 6, 2023 ; Accepted April 14, 2023)

Key Words : Ultrasound(초음파), Sensor(센서), Waveguide(파동유도관), Elbow(꺾임부), Propagation(전파)

ABSTRACT

This study deals with wave propagation based on the elbow shape in a linear waveguide coupled with an ultrasonic sensor. The elbow was introduced to reduce the waveguide length. Three elbow shapes were designed and their wave propagation performance was evaluated. The received wave was monitored, and its amplitude was evaluated using finite element analysis for ultrasonic propagation. Prototypes were manufactured using a 3D printer, and an ultrasonic reflection experiment was conducted to compare the analysis results and verify the similar tendencies. An 'L' shaped waveguide with a circular elbow with curvature exhibited the best performance.

1. 서 론

초음파센서는 크기가 작고 구조가 단순하며 근거리 감지에 적합하다. 그래서 차량의 전후방 탐지⁽¹⁾, 수위 계측⁽²⁾, 로봇의 장애물 감지⁽³⁾ 등 많은 곳에서 사용된다. 초음파 센서의 신호를 이용한 거리 측정 기술에 ToF(time of flight)⁽⁴⁾가 사용된다. 발사된 신호가 되돌아오기까지의 시간인 ToF를 측정하여 거리를 계산한다⁽⁵⁾.

송수신 겸용 초음파센서는 가진 시 내부 진동관의 잔류진동으로 수신신호를 감지하지 못하는 영역이 발생한다. 이러한 불감지 영역으로 최소탐지거리가 제한된다. 초음파센서의 거리 측정 한계를 Fig. 1에 제시하였다. 이를 완화하기 위해 파동유도관을 결합하여 최소탐지거리를 단축하는 연구가 진행되었다⁽⁶⁾. 불감지 영역을 파동유도관 내부에서 해소함으로써 초

음파센서의 최소탐지거리를 단축할 수 있다.

초음파센서와 결합되는 파동유도관은 최소탐지거리를 단축시키지만, 파동유도관의 부피로 인해 공간적인 제약이 따른다. 따라서 파동유도관의 부피를 줄이기 위한 방안이 필요하다. 해결방안으로 파동유도관의 끝에 45° 반사판을 부착하여 돌출부 길이를 줄이기 위한 연구⁽⁷⁾가 진행된 바 있다. 또한 파동유도관을 원호형⁽⁸⁾ 또는 나선형⁽⁹⁾으로 설계하는 연구가 진행되었다.

이 논문은 길이를 줄이기 위해 직선형 파동유도관의 내부에 1개 이상의 꺾임부를 추가하여 파동유도관이 차지하는 길이를 줄이는 방안을 다룬다. 또한 꺾임부의 형태를 설계하여 초음파 전파를 원활하게 하는 고안을 제시한다. 2개의 꺾임부 형상을 가진 'U'자형 파동유도관과 결합된 초음파 센서의 신호 전파 과정 개략도를 Fig. 2에 나타내었다. 이 논문에서 이러한 꺾임부의 형상에 따른 초음파 전파 특성을 확인하고자 한다. 이를 위해 몇 가지 모델을 선정하여

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

‡ Recommended by Editor Gun Woo Noh
© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

유한요소 해석을 통해 성능을 확인하고, 제작한 시제품으로 실험하여 검증한다.

2. 파동유도관 꺾임부 설계

파동유도관이 차지하는 길이를 줄이기 위해 여러 가지 형태의 꺾임부를 도입하였다. 꺾임부의 개수에 따라 1개의 꺾임부를 가진 ‘L’자형 파동유도관과 2개의 꺾임부를 가진 ‘U’자형 파동유도관으로 구분한다. 파동유도관의 지름 ϕ 는 부착되는 차량용 초음파센서

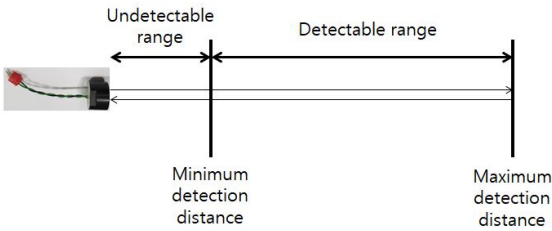


Fig. 1 Distance detection range of an ultrasonic sensor

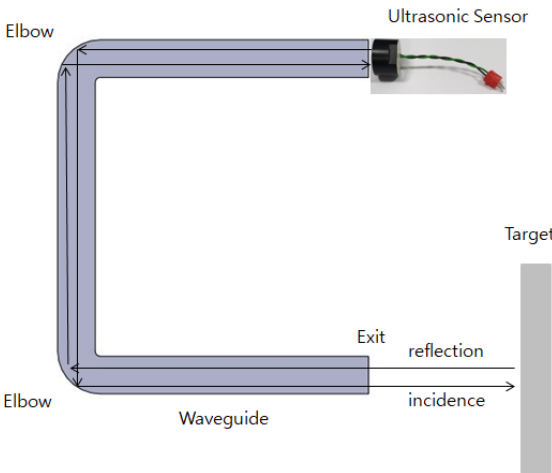


Fig. 2 Schematic diagram of a waveguide with two elbows

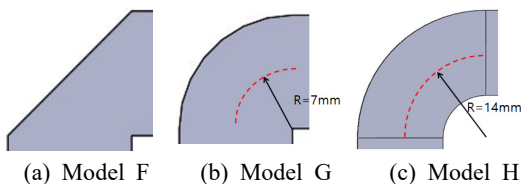


Fig. 3 Elbow shapes

의 지름 14 mm와 동일하게 하였다.

2.1 ‘U’자형 파동유도관

Fig. 2에 보인 바와 같이 파동유도관의 꺾임부의 개수가 2개인 ‘U’자형의 꺾임부를 먼저 고안하였다. 꺾임부의 형태는 Fig. 3에 제시한 3가지이다. (a)는 바깥쪽이 45° 반사면이고 안쪽이 직각으로 꺾여 있고, (b)는 중앙 곡률 반지름이 ϕ 의 1/2 (= 7 mm)인 원호형이고 안쪽이 직각으로 꺾여있으며, (c)는 중앙 곡률 반지름이 ϕ (= 14 mm)인 원호형이다. 직선부분의 길이 총합은 300 mm로 하여 전체 거리를 동일하게 하였다. 유한요소 해석 결과 반사파 도달시간을 계산하여 (b)와 (c)의 원호형의 꺾임부에서 중앙 길이와 바깥 길이의 평균값을 등가 길이로 간주하였다. 직선부분의 길이 분배와 꺾임부 형태에 따라 Table 1과 같이 총 5가지로 파동유도관을 설계하였다.

2.2 ‘L’자형 파동유도관

‘U’자형 파동유도관보다 꺾임부의 개수가 적도록 ‘L’자형 파동유도관을 고안하였다. 직선부분의 길이는 가진면 쪽 277.5 mm, 출구 쪽 50 mm로 설정하여 직선부 길이 총합이 325.5 mm로 설정하였다. 꺾임부의 형태는 ‘U’자형 파동유도관과 동일하게 Fig. 3에 제시된 F, G, H 3가지를 설계하였다. 또한 파동유도관 끝에 혼 가이드가 부착된 해석 모델 F’, G’, H’ 3가지를 설계하였다.

Table 1 Dimensions of ‘U’ shape waveguides

Model	Elbow type	Curvature radius [mm]	Straight part length [mm]		
			First	Second	Third
A	45° plane	∞	100	100	100
B	1/4 circle	7	100	100	100
C	1/4 circle	14	100	100	100
D	1/4 circle	14	125	50	125
E	1/4 circle	14	50	200	50

Table 2 Dimension of ‘L’ shape waveguides

Model	Elbow type	Curvature radius [mm]	Straight part length [mm]	
			First	Second
F	45° plane	∞	277.5	50
G	1/4 circle	7	277.5	50
H	1/4 circle	14	277.5	50

3. 유한요소 해석

성능을 검증하기 위해 초음파센서의 거리측정 과정을 유한요소 해석하였다. 실제 물체는 3차원 입체이지만 앞선 연구⁽⁹⁾에서 검증한 방법으로 해석 시간과 수량을 줄이기 위해 두께 1 mm인 2차원 모델에 대하여 해석을 하였다. 해석에는 ANSYS 소프트웨어의 transient structural 기능을 사용하였다.

3.1 해석 모델 및 조건

대표 모델인 45° 반사면 꺾임부를 가진 ‘U’자형 파동유도관과 ‘L’자형 파동유도관의 해석모델 사례를

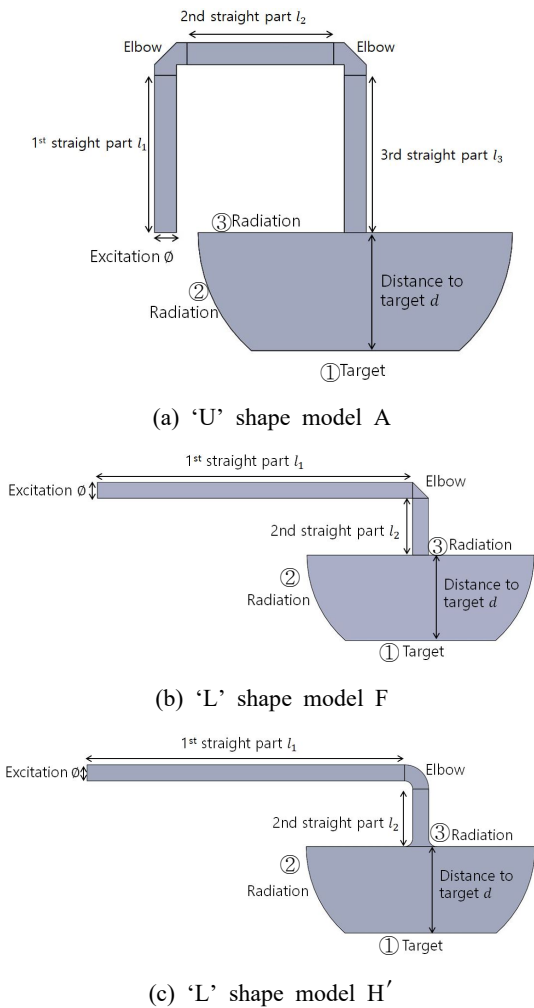


Fig. 4 Representative diagram of the analysis model

Fig. 4의 (a)와 (b)에 각각 제시하였다. 파동유도관 출구에서 초음파 반사파가 생겨 투과파가 작아진다. 이를 보완하기 위해 파동유도관의 출구부분에 혼 가이드를 부착하여 투과율을 향상하는 설계를 연구한 바 있다.⁽¹⁰⁾ 혼 가이드가 부착된 ‘L’자형 파동유도관 해석모델 사례를 Fig. 4(c)에 제시하였다. 혼 가이드의 축방향 길이와 입구 단면 반지름은 가진면의 반지름과 동일한 길이인 7 mm, 출구 지름은 가진면 지름의 2배가 되도록 설정하였다.

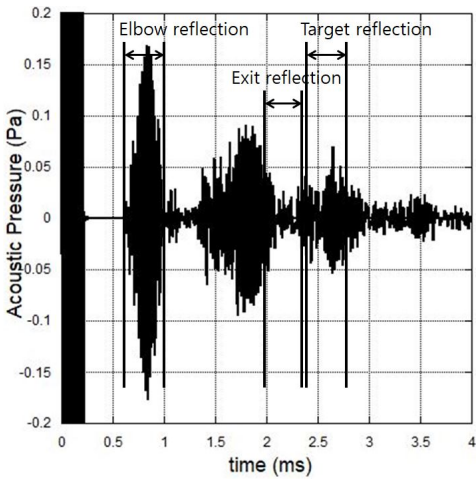
Table 1과 2에 제시한 ‘U’자형 파동유도관과 ‘L’자형 파동유도관의 해석모델을 작성하였다. 가진부의 지름 ϕ 는 차량용 초음파센서의 지름 ϕ 와 동일한 14 mm로 설정하였다. 파동유도관의 세부 길이 $l_1 \sim l_3$ 와 꺾임부 형태는 Table 1과 Table 2를 참조하였다. 출구에서 타겟면까지의 거리 d 는 75 mm로 설정하였다.

경계조건을 세 면에 설정하였다. ① 타겟면에는 완전 반사가 되도록 하였다. ② 파동유도관 끝과 타겟면 사이 횡방향은 원래 무한하지만 해석 모델에서는 유한해야 하므로 방사(radiation)하도록 하였다. ③ 파동유도관 끝에서 유도관에 직각인 반경방향 면에서도 방사하도록 하였다. 초음파센서가 부착되는 가진부에 주파수가 45 kHz이고 진폭이 1 Pa인 정현파의 10주기 신호로 가진하였다. 45 kHz 초음파의 파장인 7.62 mm의 1/6 이하가 되도록 요소의 크기를 1 mm 이하로 조밀하게 설정하였다. 해석 모델의 내부물질은 공기층이다.

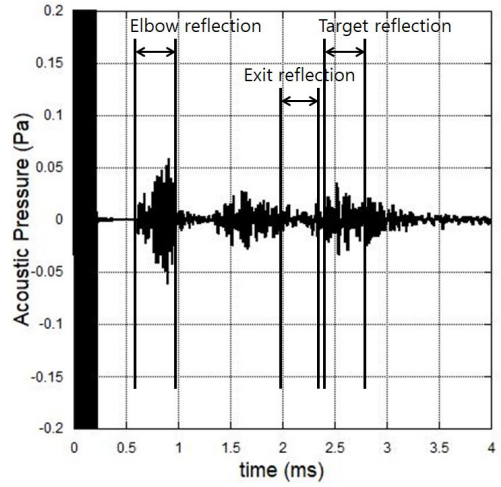
3.2 해석 결과

‘U’자형 파동유도관의 형태에 따라 설계한 해석 모델에 대해 초음파 전파 과정을 transient structural 해석한 결과로서 시간에 따른 음압 신호를 Fig. 5에 제시하였다. 동일한 직선부 길이 $l_1 \sim l_3$ 를 가지는 A, B, C 모델의 해석결과를 비교해보면 꺾임부에서 되돌아오는 꺾임부 반사파의 크기는 45° 반사면, 곡률 반지름 7 mm, 곡률반지름 14 mm의 순서이다. 즉 꺾임부에서 투과율은 원호형이 45° 반사면보다 좋고, 원호형 중에서 곡률반지름이 큰 것이 가장 좋다.

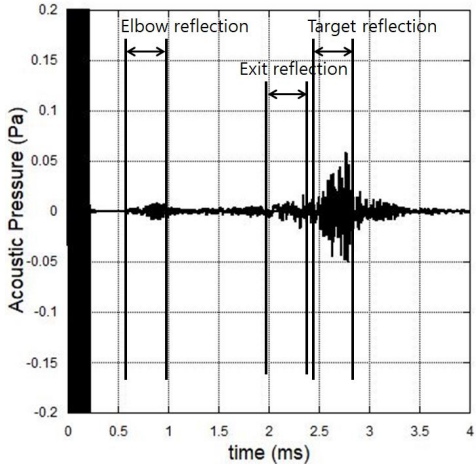
‘L’자형 파동유도관의 해석결과를 Fig. 6에 제시하였다. 이로부터 꺾임부 반사파, 출구 반사파, 타겟면 반사파의 음압 크기를 구하여 Table 3에 정리하였다. 혼 가이드가 부착되면 기존의 꺾임부 반사파와 타겟면 반사파 사이에 있는 출구반사파의 크기가 모든 해석모델에서 크게 줄어든 것을 확인할 수 있었다.



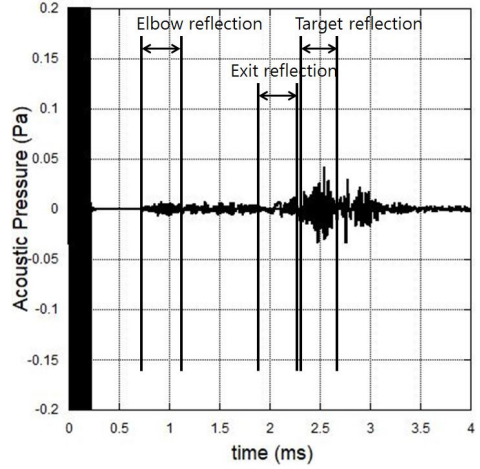
(a) Model A



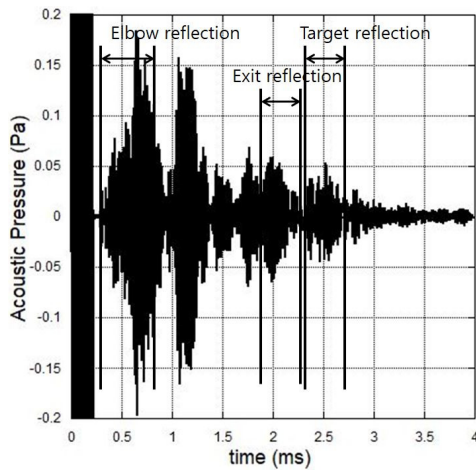
(b) Model B



(c) Model C

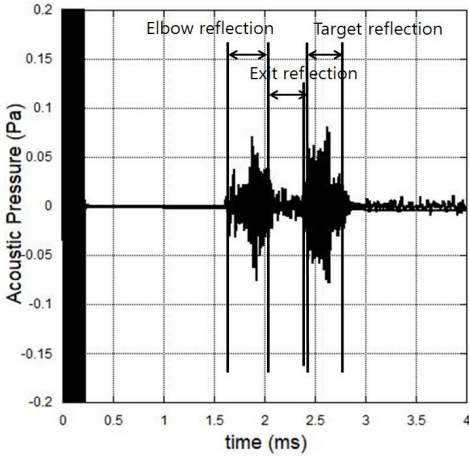


(d) Model D

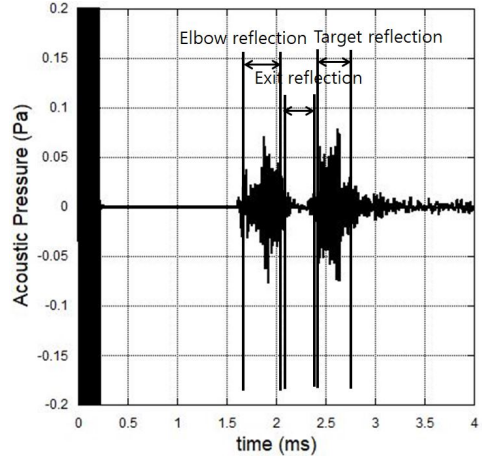


(e) Model E

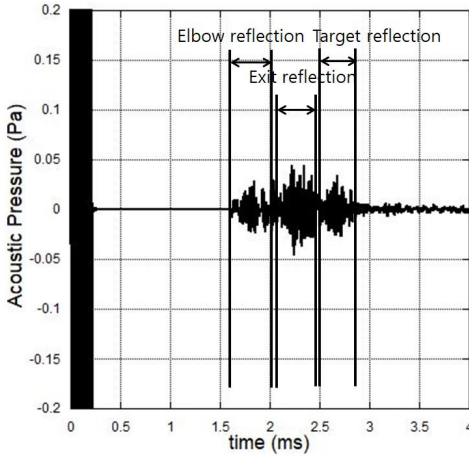
Fig. 5 Acoustic signals at various 'U' shape waveguide obtained by transient analysis



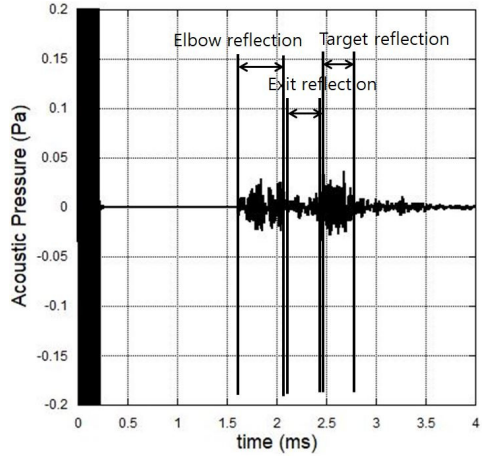
(a) Model F



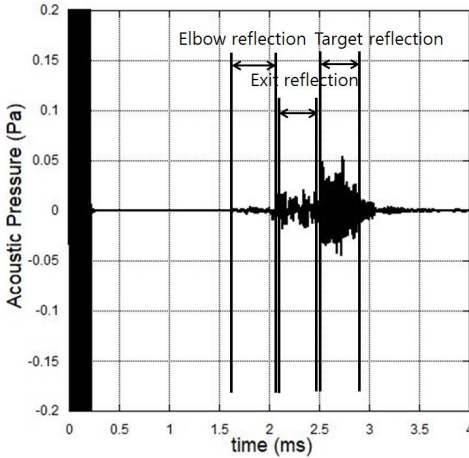
(b) Model F'



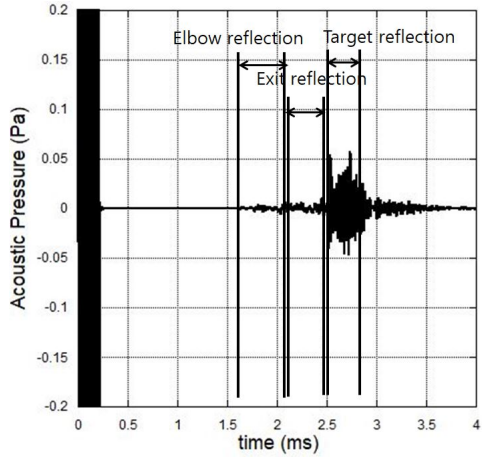
(c) Model G



(d) Model G'



(e) Model H



(f) Model H'

Fig. 6 Acoustic signals at various 'L' shape waveguide obtained by transient analysis

Table 3 Acoustic pressure and TER of the received signal obtained by analysis

Elbow	Model	Acoustic pressure [Pa]			Reflection ratio [dB]	
		Elbow	Exit	Target	TEIR	TE _{ExR}
‘U’ shape	A	0.076	0.089	0.028	-8.87	-10.22
	B	0.019	0.022	0.014	-2.69	-4.22
	C	0.003	0.003	0.021	16.10	16.04
	D	0.002	0.003	0.013	13.46	12.01
	E	0.048	0.044	0.021	-7.21	-6.34
‘L’ shape	F	0.024	0.014	0.041	4.42	9.01
	G	0.010	0.015	0.016	3.62	0.67
	H	0.001	0.008	0.025	27.19	9.87
	F’	0.024	0.010	0.041	4.42	12.26
	G’	0.010	0.007	0.016	3.62	7.58
	H’	0.001	0.002	0.025	27.19	19.84

출구에서의 투과율을 비교하기 위해 TE_{ExR}(target reflection to exit reflection ratio)을 식 (1)과 같이 정의하였다⁽⁷⁾.

$$TE_{ExR} = 20 \log \frac{P_{target}}{P_{exit}} \quad (1)$$

이 연구에서는 출구에서의 투과율을 혼 가이드를 통해 크게 높여 출구반사파의 크기를 작게 하였으므로, 첫 번째 꺾임부 반사파와 타겟면 반사파의 크기를 이용하여 꺾임부의 투과율을 비교하기 위한 TEIR (target reflection to elbow relection ratio)를 식 (2)와 같이 정의한다.

$$TEIR = 20 \log \frac{P_{target}}{P_{elbow}} \quad (2)$$

꺾임부의 형상과 개수에 따른 수신파의 음압 크기로 부터 TEIR과 TE_{ExR}값을 계산하여 Table 3에 제시하였다. 45° 반사면 꺾임부의 경우 투과율이 좋지 못하여, 꺾임부 반사파가 크게 나타나고 TE_{ExR}값이 좋지 않게 나타나 꺾임부의 형태로 좋지 않다. 또한 꺾임부의 개수가 적은 ‘L’자형 파동유도관이 ‘U’자형 파동유도관에 비해서 대체적으로 TE_{ExR}값이 크다. 즉, 꺾임부의 개수가 적을수록 파의 투과율이 좋다. ‘U’자형의 경우에 가진면에 가까운 직선부가 길수록 꺾임부에 도달하는 초음파가 작아서 꺾임부 반사파의 크기도 작다.

‘U’자형 A, B, C 모델과 ‘L’자형 F, G, H 모델의 결과들로부터 다음과 같은 경향을 파악하였다. 곡률

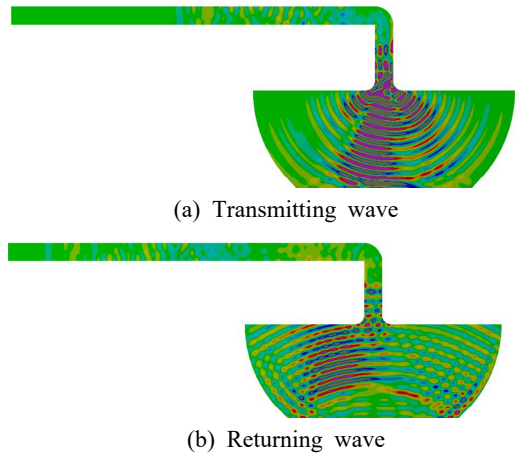


Fig. 7 Acoustic pressure distribution in a waveguide with 7 mm radius elbow

반지름 7 mm인 꺾임부의 경우 꺾임부 반사파의 크기가 작아 투과율은 크지만 전체적으로 되돌아오는 파의 크기는 작게 나타났다. 이러한 이유는 Fig. 7에 음압분포를 통해 확인할 수 있었다. 수신파가 꺾임부를 지나면서 평면파가 변형되어 Fig. 7(a)와 같이 출구에서 수직하지 않은 방향으로 대부분의 파가 투과한다. 이후 (b)와 같이 타겟면에서 반사된 파의 대부분이 출구로 되돌아오지 못하는 것을 확인하였다. 이러한 현상은 곡률 반지름이 14 mm인 꺾임부의 경우에도 나타났다. Fig. 8에서 관찰되듯이 타겟면에서 반사파 중에 출구로 되돌아오지 못하는 부분이 있는데 곡률 반지름이 7 mm인 꺾임부의 경우 보다는 적다. 꺾임부 곡률 반지름이 큰 경우가 꺾임부에서의 투과율이

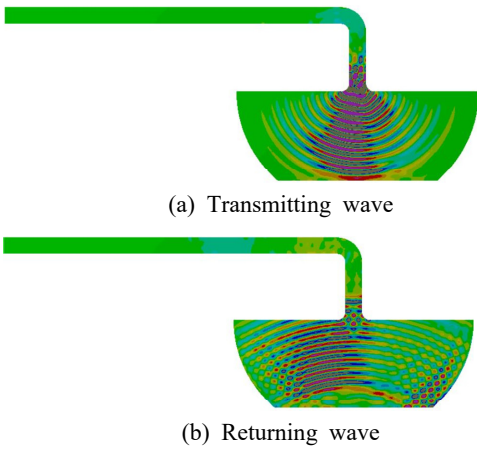


Fig. 8 Acoustic pressure distribution in a waveguide with 14 mm radius elbow

커서 TEIR과 TExR 값이 가장 크고 꺾임부의 형태로 가장 적합하다. 45° 반사면 꺾임부의 경우에는 타겟면 반사파가 대부분 출구로 되돌아와서 마치 타겟면 반사파가 큰 것처럼 오해를 준다. 따라서 단순히 타겟면 반사파 크기를 비교하는 것보다는 TEIR 또는 TExR 값을 비교하는 것이 타당하다.

결론적으로 파동유도관에 꺾임부가 1개인 ‘L’자 형이면서 곡률 반지름이 크며 혼 가이드가 부착된 경우에 초음파 전파성능이 가장 좋다.

4. 실험

유한요소 해석 결과를 검증하기 위해 초음파 전파 과정 실험을 하였다. 혼 가이드가 부착된 ‘L’자형 파동유도관에 초음파센서를 연결하여 초음파를 송신하고 타겟면에서 반사하여 되돌아오는 파를 수신하였다.

4.1 실험 장치

혼 가이드가 부착된 ‘L’자형 파동유도관을 3D 프린터를 사용하여 제작하였다. 사용한 3D 프린터는 Formlabs사의 Form3로서 SLA(stereo lithography apparatus) 방식이다. 대표 모델인 45° 반사면 형태의 꺾임부를 가지는 시제품을 Fig. 9에 제시하였다. 실험에 사용된 차량용 초음파센서는 가진면의 지름이 14 mm 인 센서텍(주)의 ST-208W-T3 제품이다.

실험장치의 구성도를 Fig. 10에 제시하였다. power supply는 tektronix사의 231A-30-3로서, 15 V 교류



Fig. 9 Prototype of ‘L’ shape waveguide coupled with a horn guide

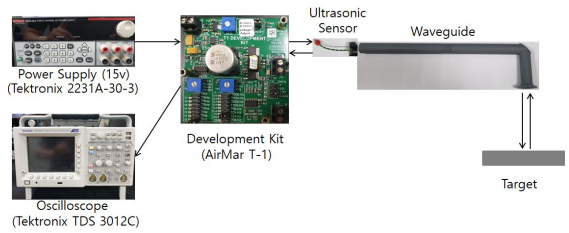


Fig. 10 Experimental devices

전압을 송·수신 보드를 통해 45 kHz 정현파 교류 전압으로 초음파센서를 가진하여 송신한다. 전파된 초음파는 꺾임부와 출구를 통과하고 타겟면에서 반사되어 되돌아와 센서에서 수신된다. 수신된 신호를 오실로스코프(Tektronix TDS3012C)로 관찰하였다.

4.2 실험 결과

초음파센서의 가진면에서 타겟면까지의 거리를 1750 mm로 길게 설정하였다. 이는 차량용 초음파센서의 가진시간 2 ms 동안 공기중에서 전파거리의 2.5 배에 해당하는 거리이다. 출구와 꺾임부 반사파와 타겟면 반사파의 간섭 영향을 줄이기 위해 전파거리를 길게 설정하였다. 꺾임부의 형상에 따라 45° 반사면, 중앙 곡률 반지름 7 mm 및 14 mm의 3가지 시제품으로 실험하고, 타겟면에서 되돌아오는 반사파를 측정하였다. 꺾임부 형상에 따른 실험 결과를 Fig. 11에 제시하였다.

꺾임부 반사파의 RMS 값을 계산하고 타겟면 반사파의 최대값, TEIR 값을 Table 4에서 비교하였다. 꺾임부가 45° 반사면인 경우 유한요소 해석과 마찬가지로 꺾임부 반사파가 크게 나타났다. 중앙 곡률 반지름이 7 mm인 경우 파의 투과율이 좋아 꺾임부 반사파가 작고 타겟면 반사파가 작다. 중심 곡률 반지름 14 mm인 경우 투과성이 좋고 타겟면 반사파의 관찰이 원활하다. 곡률 반지름 14 mm의 꺾임부가 TEIR

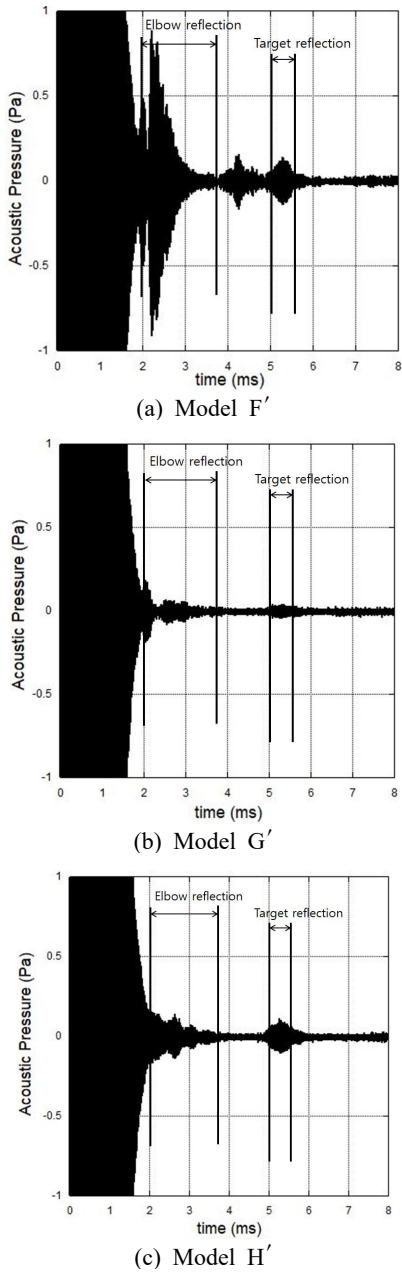


Fig. 11 Acoustic signals obtained by experiment

Table 4 Acoustic pressure and TEIR

Model	Acoustic pressure [Pa]		TEIR [dB]
	Elbow	Target	
F'	0.258	0.132	-5.8
G'	0.042	0.032	-2.4
H'	0.059	0.104	5.0

값이 5.0으로 가장 좋게 나타났다.

5. 결 론

초음파센서와 결합되는 파동유도관에 하나 이상의 꺾임부를 추가하여 길이를 줄이고 파동 전파가 원활한 꺾임부 형상을 고안하고 성능 평가를 하였다. 꺾임부의 형상은 45° 반사면, 중앙 곡률 반지름 7 mm 및 14 mm를 가지는 원호 형으로 3가지를 설계하였다. 또한 파동유도관의 출구 부분에 혼 가이드를 부착하여 출구에서 투과율을 높였다.

직선부 길이 분배에 따른 3가지 모델을 나눠서 작성하였다. 해석 모델을 대상으로 유한요소 해석을 하여 반사파 크기를 비교하였다. 시제품을 제작하고 초음파 반사 실험을 하였다. 해석 결과와 실험 결과가 경향성이 유사하였다. 곡률 반지름이 크며 꺾임부가 1개이고 혼 가이드가 부착된 파동유도관이 파동 전파 성능이 가장 좋았다.

후 기

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

References

- (1) Choi, H. and Jang, S.-W., 2012, Front and Rear Vehicle Monitoring System using Ultrasonic Sensors, Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering, Vol. 16, No. 6, pp. 1125~1132.
- (2) 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.
- (3) Moon, I., Hong, W.-K. and Ryu, J.-T., 2011, Design of Ultrasonic Sensor Based Obstacle Recognition Mobile Robot, IEMEK Journal of Embedded Systems and Applications, Vol. 6, No. 5, pp. 327~333.
- (4) Vargas, J., Alswiss, S., Toker, O., Razdan, R. and Santos, J., 2021, An Overview of Autonomous

Vehicles Sensors and Their Vulnerability to Weather Conditions, *Sensors*, Vol. 21, No. 16, 5397.

(5) Choe, J.-H., Cho, W. and Choy, I., 2017, Ultrasonic Distance Measurement Method Based on Received Signal Model, *The Journal of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, Vol. 12, No. 1, pp. 53~60.

(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) 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.

(8) 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.

(9) 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. 2, pp. 227~235.

(10) 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.



One Mook Kim 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 sensors and

waves propagation.



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.