

송수신 겸용 초음파센서에 결합되는 혼 가이드의 수신성능 향상

Improving Reception Performance of a Horn Guide Coupled with an Ultrasonic Sensor for Transmission and Reception

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

(Received December 14, 2022 ; Revised January 5, 2023 ; Accepted January 9, 2023)

Key Words : Ultrasound(초음파), Sensor(센서), Waveguide(파동유도관), Horn Guide(혼 가이드), Reception(수신)

ABSTRACT

This study analyzes the transmission and reception performance of a step-shape horn guide. We designed a step-shape horn guide whose reflection would not affect the received waves while maintaining transmission performance at the gradually expanded exit. The step size is defined as a factor of the radius of the sensor face. The received waves are identified using finite element analysis for ultrasound propagation. Experiments were performed with 3D-printed prototypes, and the results of finite element analysis were compared and verified. We found that a step size of half the wavelength improves reception while maintaining transmission performance.

1. 서 론

초음파센서는 20 kHz 이상의 음파인 초음파를 이용하여 수위계, 우량계, 세척기 등 산업분야의 많은 곳에서 사용된다. 초음파는 지향성이 크고 사람이 들을 수 없기 때문에, 초음파센서로 거리를 측정하는 기술⁽¹⁾이 어군 탐색⁽²⁾, 수위 측정⁽³⁾, 비파괴 검사, 자율주행차의 장애물 탐지⁽⁴⁾ 등에 널리 이용된다. 초음파센서의 ToF(time of flight) 방식은 가진 신호가 발사된 기준 시점과 측정 대상물에 반사되어 되돌아온 신호를 검출하는 시점 사이의 시간을 측정하여 거리를 파악한다^(4,5).

초음파센서는 가진할 때 내부 진동관의 잔류진동 때문에 불감지 영역이 존재하는데, 이로 인해 최소탐지 거리에 한계가 있다. 이를 해결하기 위해 파동유도관을 결

합하여 최소탐지거리를 단축하는 연구를 해왔다⁽⁶⁾. 초음파센서에 파동유도관을 결합하면 불감지 영역을 파동유도관 내부에서 해소하여 파동유도관 출구에서부터 거리 측정을 바로 할 수 있다. 다만, 파동유도관 출구에서 반사파가 생겨서 투과파가 작아지는 단점이 있다.

파동유도관의 출구부분에서 투과율을 향상시키기 위해 혼 가이드를 결합하여 사용할 수 있다. 초음파센서의 최대 측정 거리를 향상하기 위한 혼 가이드에서 지향성을 향상하는 설계를 연구 한 바 있다⁽⁷⁾. 송수신 겸용 초음파센서가 초음파를 수신할 때 Fig. 1과 같이 매끈한 혼 가이드에서 여러 방향으로 반사가 일어나면서 수신과가 혼잡해진다.

기존 혼 가이드의 송신 성능을 유지하면서 수신 때 혼에서 반사하는 파의 간섭을 줄이기 위해 새로운 형상의 혼 가이드가 필요하다. 이 연구는 혼 가이드가 결합된 송수신 겸용 초음파 센서가 송신할 때의 투과

† 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 Spring Conference

‡ Recommended by Editor Jung Woo Sohn

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

성과 지향성을 유지하면서, 수신할 때 혼 가이드 면에서의 반사로 인한 수신파의 혼잡을 줄이기 위해 계단형 혼 가이드를 설계하고 성능을 검증한다.

2. 혼 가이드 설계

2.1 매끈한 혼 가이드

과동유도관에 부착된 초음파센서는 송신할 때, 급격하게 공간이 넓어지는 출구부분에서는 음이 되돌아오는 반사파가 발생한다. 출구반사파는 파동의 투과율을 줄이므로 초음파전파를 약화시켜 물체까지의 정확한 거리 판단을 방해한다. 과동유도관의 출구부분에 부착되는 혼 가이드는 공간이 급격하게 넓어지지 않고 서서히 넓어지게 함으로써, 송신할 때 출구에서 반사파 생성을 줄이고 투과파가 크게 한다. 이러한 매끈한 혼 가이드의 형상에 관한 연구가 앞서 진행되었다⁽⁷⁾. 콘 형상, 지수함수 형상, 포물선 형상의 매끈한 혼 가이드를 부착한 초음파센서의 지향성을 비교하였다. 이러한 혼 가이드는 지향성 향상을 통해 최대 측정 거리를 증가시킨다. 하지만 수신할 때 Fig. 1에 보인 바와 같이 혼 가이드에서 여러 방향으로 파의 반사가 일어나서 수신파가 혼잡해진다.

원호형 혼 가이드에 수신파가 평면파의 형태로 혼 가이드에 입사할 때, 혼에서의 반사를 Fig. 1의 (a), (b), (c)와 같이 3가지로 분류할 수 있다. 혼 가이드에서 입사각을 θ_i , 반사각을 θ_r 이라고 할 때, $\theta_i < 45^\circ$ 일 경우 반사파는 과동유도관에서 멀어지므로 수신되지 않는다. $\theta_i = 45^\circ$ 일 때 반사파는 입사파와 수직방향으로 나타난다. $\theta_i > 45^\circ$ 인 경우 혼에서 반사된 파가 과동유도관의 내부로 들어와 수신파를 혼잡하게 한다. 가진 신호가 타겟면에서 반사되어 나타나는 타겟면 반사파로 인해 혼에서는 세 가지 반사가 동시에 일어날 수 있으며 이중 $\theta_i > 45^\circ$ 인 경우가 가장 많은 수신파의 혼잡을 야기한다. 송신만을 고려하면 곡선형 혼 가이드가 좋으나 송신과 수신을 모두 고려하면 단면이 직선인 콘형 혼 가이드가 더 좋다⁽⁷⁾. 과동유도관에 결합된 45° 콘형 혼 가이드의 개념도를 Fig. 2에 제시하였다.

2.2 계단형 혼 가이드

콘형 혼 가이드에서 수신 성능 향상을 위해 직선면을 계단형으로 변형하는 고안을 하였다.⁽⁸⁾ 과동유도관의 끝 부분에서 단면적을 계단의 형태로 천천히 넓히면서 출구반사파를 줄이고, 타겟면 반사파가 혼 가이드

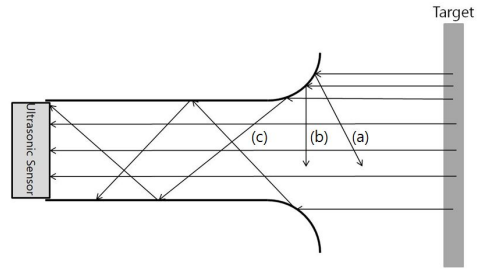


Fig. 1 Multi-directional reflections on a smooth horn guide

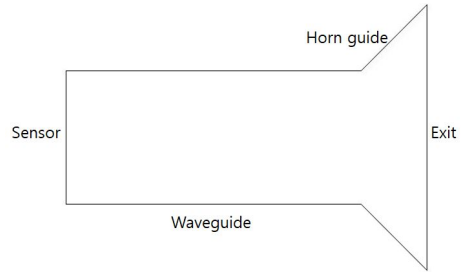


Fig. 2 Schematic diagram of a cone shape horn guide coupled with a waveguide

드로 들어올 때 매끈한 혼에서 여러 방향으로 일어난 반사를 줄였다. 계단의 크기는 1 mm, 2 mm, 4 mm, 7 mm, 14 mm로 정하였다. 이는 가진면의 반지름과 혼 가이드의 축 방향 길이와 반경 방향 길이인 28 mm의 약수이다. 45° 콘형 혼 가이드와 계단형 혼 가이드의 형상을 Fig. 3에 제시하였다.

3. 유한요소 해석

고안한 계단형 혼 가이드의 초음파 수신성능을 검증하기 위해 송수신 겸용 초음파센서의 거리측정 과정을 유한요소 해석하였다. 해석에는 ANSYS 소프트웨어의 Transient Structural 기능을 사용하였다.

3.1 해석 모델 및 조건

대표 모델인 45° 콘형 혼 가이드가 부착된 과동유도관 단면을 Fig. 4 (a)에 나타내었다. 과동유도관의 길이 l 은 수위계용 초음파센서의 최소탐지거리인 152.5 mm, 가진부의 반지름 r 은 센서의 가진부 반지름과 동일한 28 mm로 설정하였다. 혼 가이드의 축방향 길이 w 와 반경방향 길이 h 는 모두 가진부 반지

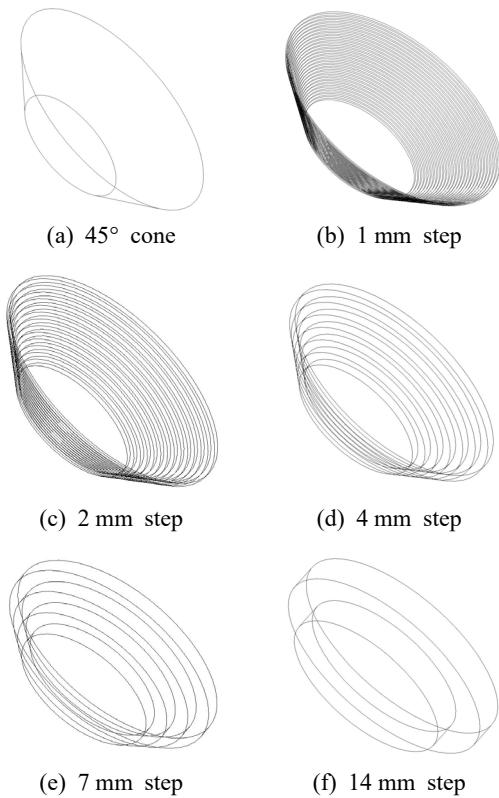


Fig. 3 Examples of horn guides

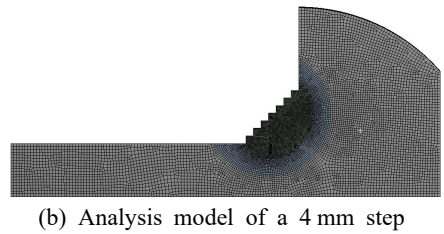
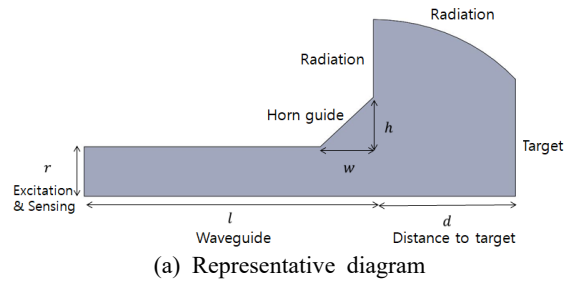


Fig. 4 Diagram of the horn guide model

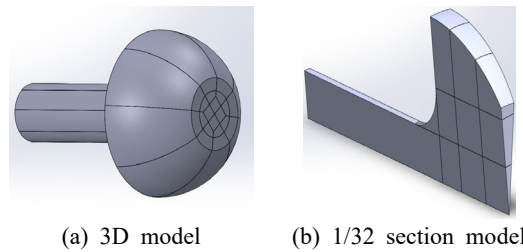


Fig. 5 Three-dimensional view of an analysis model

를 길이와 동일하게 28 mm로 설정하였다. 파동유도관의 출구에 해당하는 혼 가이드의 끝 부분에서 타겟면까지의 거리 d 를 75 mm로 설정하였다. 이 거리는 실험할 때의 거리 875.5 mm보다 훨씬 짧다. 그 이유는 해석 시간과 수량을 크지 않게 해석모형을 작성하기 위함이다. 실제 물체는 Fig. 5 (a)에 보인 그림과 같이 3차원 입체이지만 해석 시간과 수량을 줄이기 위해 Fig. 5 (b)와 같이 중심축 기준 32등분 분할 모델을 설정하였다.

경계조건을 세 면에 설정하였다. 타겟면에는 완전 반사가 되도록 하였다. 혼 가이드 끝과 타겟면 사이는 원래 무한하지만 해석 모델에서는 유한해야 하므로 방사(radiation)하도록 하였다. 혼 가이드 끝에서 반경방향 면에서도 방사하도록 하였다. 수위계용 초음파센서의 가진 신호로 사용되는 45 kHz 초음파의 파장인 7.62 mm의 1/6 이하가 되도록 요소의 크기를 1 mm 이하로 설정하였다. 그러한 예를 Fig. 4 (b)에 나타내었다. 해석 모델의 내부물질은 공기층이고, 해석에 사용된 물성치가 Table 1에 정리되어있다.

Table 1 Physical properties of air

Property	Value
Mass density	1.204 kg/m ³
Sound speed	343 m/s
Dynamic viscosity	17.83 × 10 ⁻⁶ Pa · sec
Bulk viscosity	10.96 × 10 ⁻⁶ Pa · sec
Thermal conductivity	25.7 × 10 ⁻³ W/m · K
Specific heat, C_p	1.005 J/kg · K
Specific heat, C_v	0.718 J/kg · K

(1) 매끈한 혼 가이드

직선형 파동유도관에 혼 가이드가 없는 경우, 1/4 원호형의 혼 가이드가 부착된 경우와 지수함수형의 혼 가이드 및 45° 콘형 혼 가이드가 부착된 경우에 대하여 32등분 해석 모델을 Fig. 6에 제시하였다. 초음파

센서가 부착되는 가진부에 주파수가 45 kHz이고 진폭이 1 Pa인 정현파의 10주기 신호로 가진하였다.

(2) 계단형 혼 가이드

단계적으로 혼의 단면적이 증가하는 계단형 혼 가이드를 2.2절에 설명한 바와 같이 설계하였다. 정밀한 해석을 위해, 반사가 일어나는 혼 가이드 부분의 요소를 계단 크기의 1/6 이하로 조밀하게 형성하였다. 대표적인 해석 모델에 해당하는 4 mm 계단형 혼 가이드가 결합된 파동유도관을 Fig. 4 (b)에 나타내었다.

3.2 해석 결과

(1) 매끈한 혼 가이드

설계한 매끈한 혼 가이드의 초음파 전파 과정의 해석 결과로서 센서부에서 시간에 따라 감지되는 음압 신호를 Fig. 7에 나타내었다. 해석 결과를 보면 1/4 원호형의 혼 가이드가 있는 경우 송신할 때 투과율이 높아서 파동유도관의 출구 부분에서 되돌아오는 출구 반사파의 크기가 작다. 하지만 타겟면에 반사되어 되돌아오는 타겟면 반사파가 매끈한 혼 가이드에서 Fig. 8에 보인 바와 같이 혼 가이드에서 여러 방향으로 반사를 일으켜 수신파가 혼잡해진다. 각 모델의 해석 결과인 수신파 신호에서 출구 반사파, 타겟면 반사파, 파동유도관 벽면 반사파의 크기를 RMS로 계산하여 Table 2에 기재하였다.

(2) 계단형 혼 가이드

설계한 계단형 혼 가이드 형상에 따른 해석 모델의 초음파 전파 과정을 transient structural 해석하였다. 해석 결과로서 센서부에서 시간에 따라 감지되는 음압 신호를 Fig. 9에 제시하였다. 계단형 혼 가이드가 부착된 경우 Fig. 10의 음압분포로 관찰 한 바와 같이 혼에서의 반사파가 내부로 거의 들어오지 못하는 것을 확인하였다. 각 모델의 해석 결과에서 각 지점에서 반사된 수신파를 RMS로 계산하여 Table 2에 기재하였다.

(3) 각 지점 반사파 크기 비교

TER(target reflection to exit reflection ratio)을 식 (1)과 같이 정의하였다⁽⁹⁾.

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

출구반사파의 크기에 대비해 타겟면에서 반사되어 돌아온 파의 크기를 나타낸다. 이 값이 클수록 출구에서 초음파 투과성이 좋다. 한편 TWR(target reflection to waveguide reflection ratio)을 다음과 같이 정의한다.

$$TWR = 20 \log \frac{P_{target}}{P_{waveguide}} \quad (2)$$

유도관 벽 반사파의 크기에 비해 타겟면에서 반사되어 돌아온 파의 크기를 나타낸다. 유도관 벽 반사파는 타겟면 반사파 이후에 나타나는 신호로서, 수신파가 혼 가이드에서 반사되어 파동유도관 내부로 들어와 혼잡해지는 신호이다. 이 값이 클수록 수신신

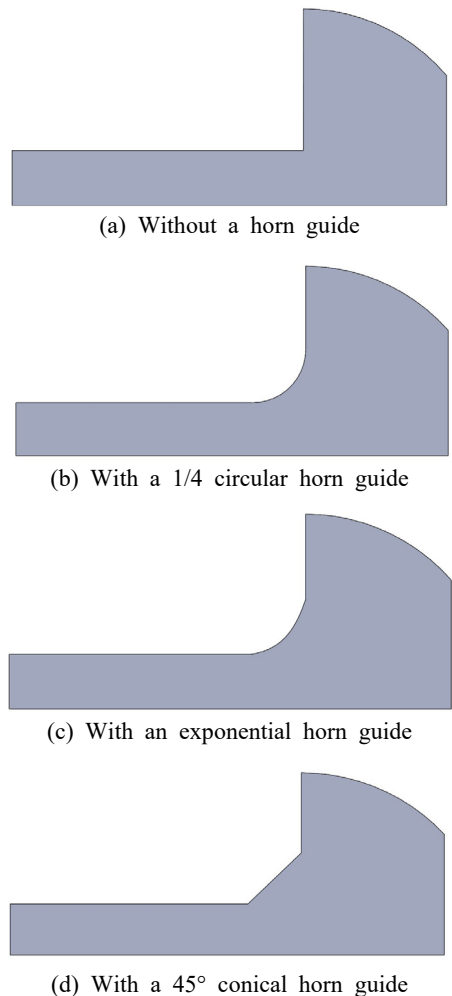


Fig. 6 Examples of smooth horn guides

호 혼잡도가 작다.

Table 2에서 각 지점 반사파 음압 크기들을 식 (1) 과 (2)에 적용하여 계산한 TER값과 TWR값을 오른쪽 열에 기재하였다. 1/4 원호형 혼 가이드가 부착된 경우 출구반사파가 거의 나타나지 않으므로 TER값이

가장 크다. 하지만 타겟면 반사파 이후에 나타나는 유도관 벽 반사파가 커서 TWR값이 작아 수신파의 성능이 떨어지는 단점이 있다. 반면에 4 mm 계단형의 경우 TER값이 크게 나타났을 뿐만 아니라, TWR 값이 가장 크게 나타났다. 따라서 4 mm의 계단형의

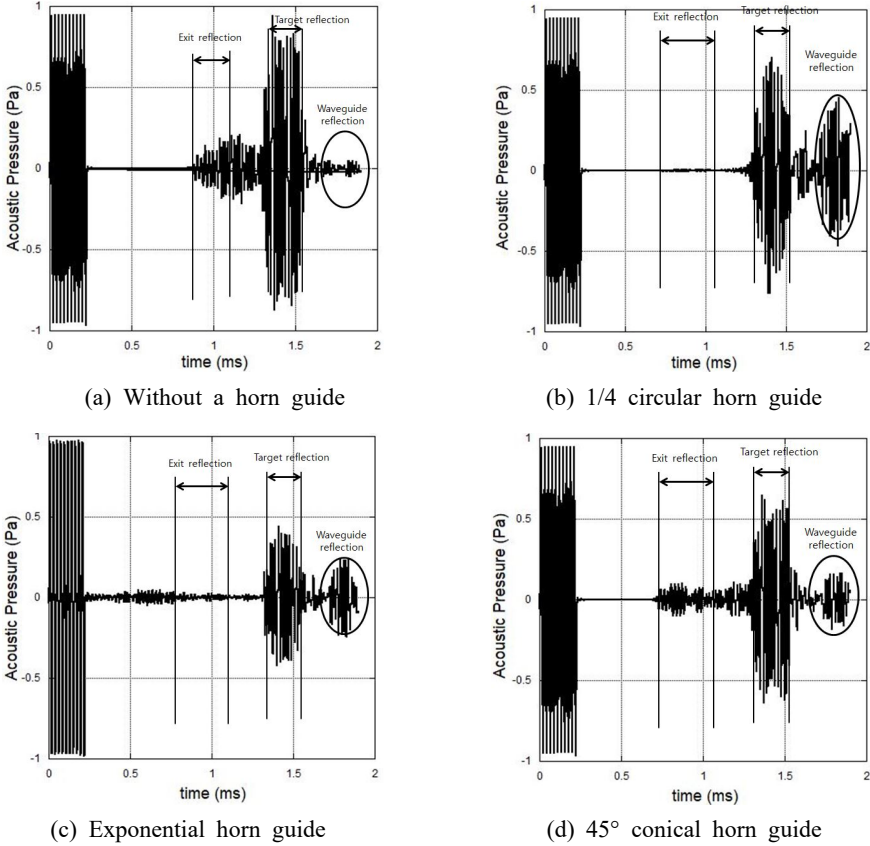


Fig. 7 Acoustic signals at smooth horn guides obtained from transient analysis

Table 2 Magnitude of each signals obtained by analysis

Horn guide		Acoustic pressure [Pa]			Ratio [dB]	
		Exit reflection [RMS]	Target reflection [RMS]	Waveguide reflection [RMS]	TER	TWR
No horn		0.075	0.533	0.041	17.3	22.3
Smooth	1/4 circular	0.003	0.372	0.450	42.7	-1.7
	Exponential	0.013	0.243	0.239	25.7	0.1
	Conical	0.046	0.377	0.158	18.2	7.6
Step	1 mm	0.036	0.255	0.158	17.0	4.1
	2 mm	0.107	0.244	0.212	7.2	1.2
	4 mm	0.034	0.281	0.086	18.3	10.3
	7 mm	0.035	0.280	0.181	18.1	3.8
	14 mm	0.037	0.262	0.101	16.9	8.3

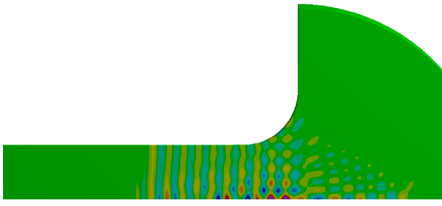


Fig. 8 Acoustic pressure distribution in multiple directions from a smooth horn guide

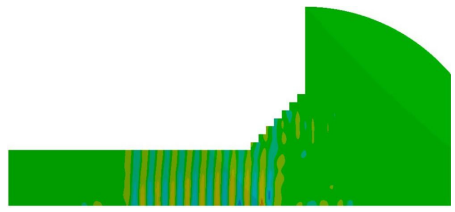


Fig. 10 Acoustic pressure distribution inward directions from a step-shape horn guide

4. 실험

해석 결과를 검증하기 위해 실험을 하였다. 혼 가이드가 부착된 파동유도관에 초음파센서를 연결하여 송신하고 타겟에서 반사되어 되돌아오는 음압을 수신하였다.

4.1 실험 장치

혼 가이드가 부착된 파동유도관 시제품을 SLA (Stereo Lithography Apparatus) 방식의 3D 프린터로 제작하였다. 그중 대표 모델인 4 mm 계단형 혼 가이드 시제품을 Fig. 11에 제시하였다. 실험에 사용된 수위계용 초음파센서는 가진면의 반지름이 28 mm인 아이에스테크놀로지(주)의 LDX-05이다. 이 초음파센서의 구동주파수 45 kHz를 송·수신보드(AirMar T-1 Development Kit)에서 설정하였다.

장치의 구성도를 Fig. 12에 제시하였다. Power Supply는 Tektronix의 231A-30-3로 15 V 직류전압을 Development Kit에 인가한다. 이후 송·수신 보드를 통해 45 kHz 정현파 교류 전압으로 압전 초음파센서를 가진하여 송신한다. 전파된 초음파는 타겟면에서 반사되어 되돌아와 초음파센서에서 수신한다. 수신된 신호를 오실로스코프(Tektronix TDS 3012C)로 관찰하였다.

4.2 실험 결과

초음파센서의 가진면부터 타겟면까지의 거리는 857.5 mm로 설정하였다. 지면으로부터 파동유도관의 끝에서 타겟면까지의 거리 705.5 mm보다 높은 800 mm 높이에서 실험을 하여 지면의 영향을 최소화 하였다. 혼 가이드의 형상에 따라 실험을 하고 타겟면에서 되돌아오는 반사파를 측정하였다. 혼 가이드가 없는 경우와 원호형 혼 가이드가 부착된 경우의 시간에 따른 음압 그래프를 Fig. 13에 제시하였다. 출구반사파의

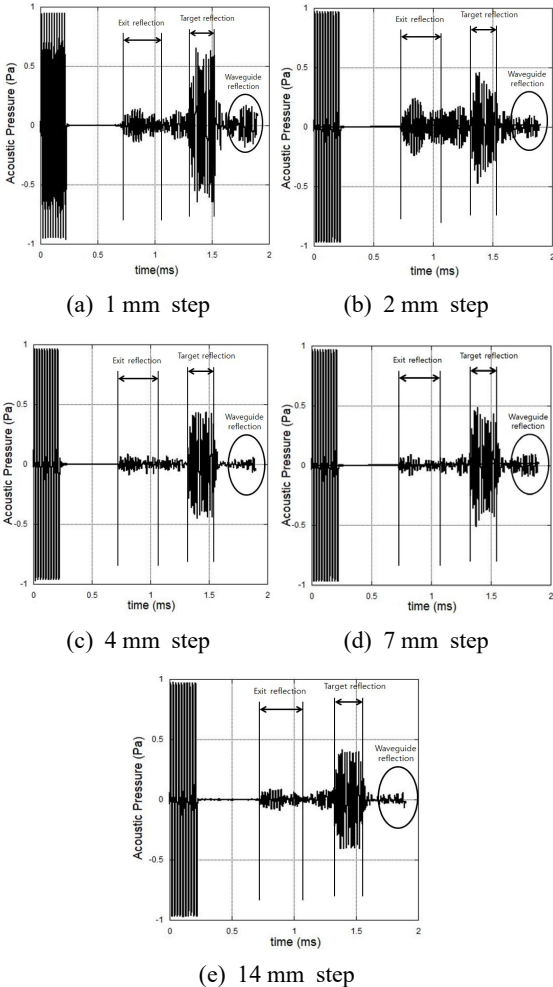


Fig. 9 Acoustic signals at various step-shape horn guides obtained from transient analysis

경우 출구반사파를 줄여준다는 혼 가이드의 성능을 유지하면서 타겟면 반사파 이후의 매끈한 혼에서의 반사로 인해 수신파가 혼잡해지는 현상을 줄여주는 유효요소 해석 결과를 확인할 수 있다.

RMS값, 타겟면 반사파의 최대값, 유도관 벽 반사파 최대값, 식 (1)과 (2)에서 각각 정의한 TER값 및 TWR값을 Table 3에 제시하였다. 혼 가이드가 없는 경우 출구반사파가 크게 나타난다. 반면 원호형 혼 가이드가 부착된 경우 출구반사파의 최대값이 약 38% 만큼 작다. 반면 혼에서의 반사로 인해 유도관 벽 반사파 최대값은 오히려 약 31% 크다.

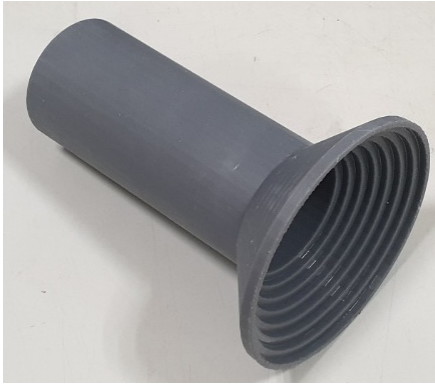


Fig. 11 Prototypes of 4 mm step horn guide

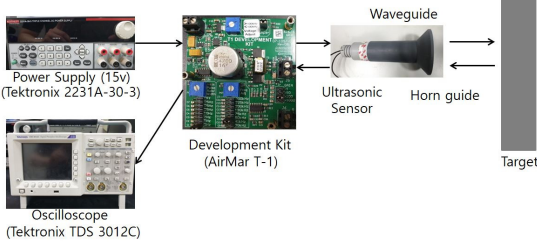
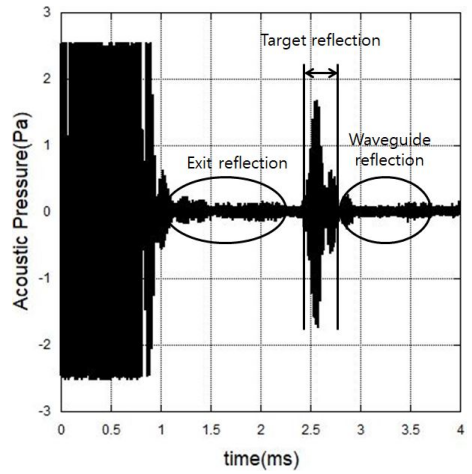
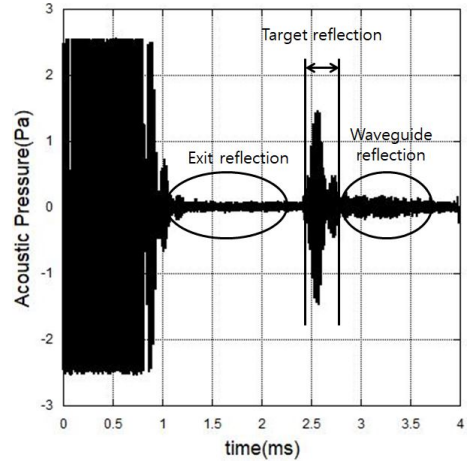


Fig. 12 Experimental devices



(a) Without a horn guide

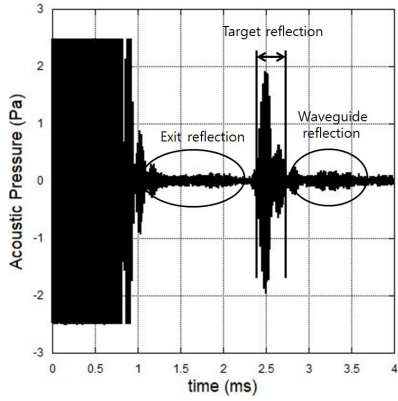


(b) 1/4 circular horn guide

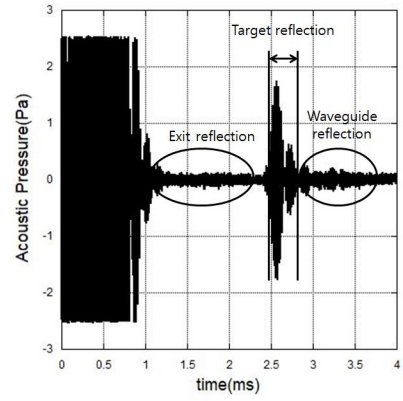
Fig. 13 Acoustic signals at smooth horn guides obtained by experiments

Table 3 Magnitude of each signals obtained by experiment

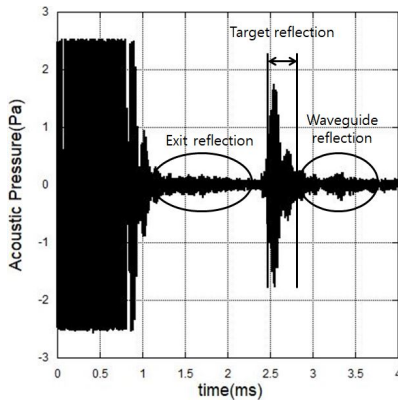
Horn guide		Acoustic pressure [Pa]			Ratio [dB]	
		Exit reflection [RMS]	Target reflection [Max]	Waveguide reflection [Max]	TER	TWR
No horn		0.16	1.89	0.13	19.5	23.3
Smooth	1/4 circular	0.11	1.45	0.17	22.2	18.6
	0 mm	0.17	1.90	0.17	21.2	21.0
Step	1 mm	0.14	1.74	0.20	21.8	18.8
	2 mm	0.17	1.74	0.20	20.0	18.8
	4 mm	0.12	1.96	0.14	23.9	22.9
	7 mm	0.13	1.66	0.20	21.6	18.3
	14 mm	0.15	1.76	0.16	21.0	20.8



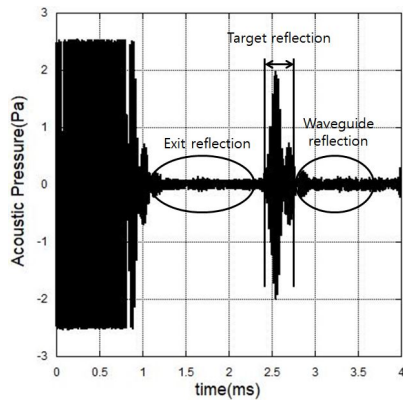
(a) 0 mm step (45° cone)



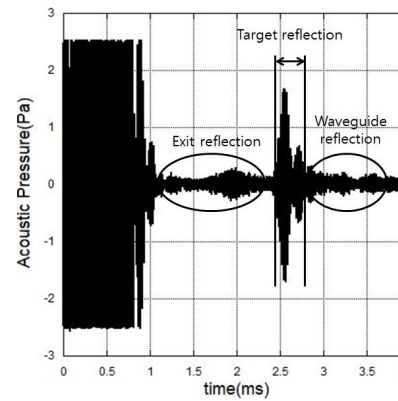
(b) 1 mm step



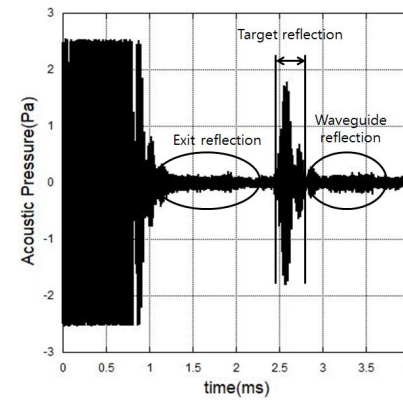
(c) 2 mm step



(d) 4 mm step



(e) 7 mm step

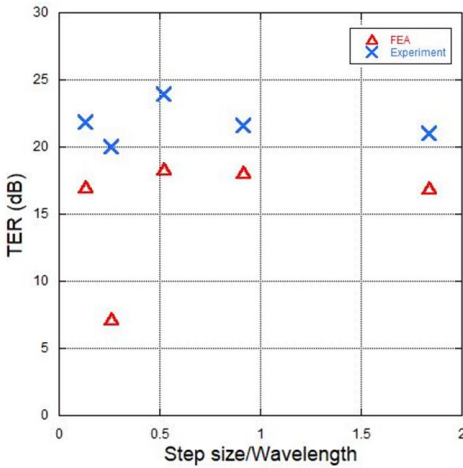


(f) 14 mm step

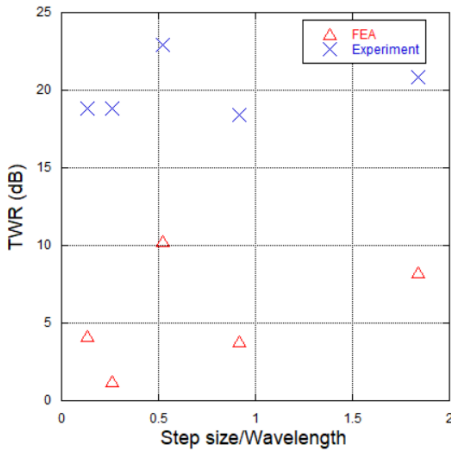
Fig. 14 Acoustic signals at various step-shape horn guides obtained by experiment

계단형 혼 가이드의 시간에 따른 음압 그래프를 Fig. 14에 나타내었다. 출구반사파의 RMS값, 타겟면 반사파의 최댓값, 유도관 벽 반사파 최댓값, TER값

및 TWR값을 Table 3에 제시하였다. 계단형 혼 가이드의 경우 파장 대비 계단의 크기가 약 1/2에 근접한 4 mm 계단형의 경우가 TER값과 TWR값이 가장 크



(a) TER



(b) TWR

Fig. 15 Comparison of the results obtained by finite element analysis and experiment

다. 이 경우에 유도관 벽 반사파 최댓값은 원호형 혼 가이드보다 약 17.6% 감소하였다.

4.3 결과 비교 및 고찰

유한요소 해석과 실험 결과에 대한 TER값 및 TWR값 비교 그래프를 Fig. 15에 제시하였다. 4 mm 계단형의 경우 TER값과 TWR값이 커서 성능이 가장 좋다. 반면에 2 mm 계단형의 경우 TER값과 TWR값이 작아서 성능이 가장 나쁘다. 그 이유는 계단에서 반사되는 회절파의 경우 계단의 크기의 2배만큼의 이동거리가 발생하여 파의 간섭이 발생하기 때문이다. 파장대비 계단의 크기가 1/2인 4 mm 계단형 혼 가

이드의 끝에서의 반사파와 시작부에서의 반사파는 위상이 다른 파의 중첩으로 상쇄된다. 파장 대비 계단의 크기가 1/4인 2 mm 계단형 혼 가이드의 끝에서의 반사파와 시작부에서의 반사파는 위상이 같은 파의 중첩으로 보강되어 수신파가 혼잡하다.

해석과 실험의 경향성이 비슷하지만 오차가 발생하였다. 오차의 발생 원인은 시간 구간 때문이다. 유한요소 해석의 경우 출구반사파와 타겟면 반사파의 시간을 정확히 예측 가능하여 RMS값으로 계산하였다. 반면 실험에서는 초음파센서의 여진신호로 정확한 구간을 나누는 것이 어려워 타겟면 반사파의 최대 압력값을 사용하여 비교하였다. 또한 유한요소 해석은 해석 시간과 용량의 단축을 위해 타겟면까지의 거리가 75 mm로 짧다. 반면 실험의 경우 초음파센서의 여진신호로 출구반사파와 타겟면 반사파를 관찰하기 위해 타겟면까지의 거리가 더 길게 하였다. 이로 인해 유한요소 해석과 실험에서 차이가 발생하였다.

5. 결 론

초음파센서의 수신성능을 향상하기 위하여 계단형 혼 가이드를 고안하고 성능 평가를 하였다. 가진부 반지름 만큼의 길이와 폭을 갖는 45° 콘형 혼 가이드에 계단을 형성하였다. 계단 크기는 혼 가이드 폭의 약수로 여러 가지를 설정하였다. 축 대칭 모델을 32 등분한 해석 모델을 대상으로 유한요소 해석을 하여, 반사파 크기를 비교하였다. 시제품을 3D 프린터로 제작하고 초음파 전파 실험을 하였다. 해석 결과와 실험 결과의 경향이 유사하였다. 계단의 크기가 초음파 파장의 1/2에 근접한 경우에 기존 송신성능을 유지하면서 수신성능이 좋은 것으로 나타났다.

후 기

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

References

(1) Kim, J. O., 2000, Sensors and Actuator using Ultrasound, Journal of KSNVE, Vol. 10, No. 5,

pp. 723~728.

(2) Kim, J. G., Kim, W. J., Yang, H. S. and Jeong, C. J., 1998, A Study on the Ultrasonic Signals Analysis for Sacan Fish Chools and Seabed Targets, Management Information Systems Review, Vol. 2, pp. 95~106.

(3) 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.

(4) Vargas, J., Alsweiss, 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, p. 5397.

(5) Choe, J. H., Cho, W. and Choy, I., 2017, Ultrasonic Distance Measurement Method based on Received Signal Model, 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) 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.

(8) Kim, J. O. and Kim, O. M., 2022, Step-type Horn Guide for Improving Transmission/Reception

Performance of Ultrasonic Sensor and Ultrasonic Sensor Device Including the Same, Korea Patent Application 10-2022-0163759.

(9) 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.



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.