

# 초음파 센서의 혼 가이드 치수에 따른 음향 지향성

## Acoustic Directivity of an Ultrasonic Sensor Depending on Horn Guide Dimension

임 성 구\* · 김 진 오†  
Sung Gu Lim\*, Jin Oh Kim†

(Received February 26, 2019 ; Revised April 23, 2019 ; Accepted April 23, 2019)

**Key Words** : Ultrasound(초음파), Sensor(센서), Directivity(지향성), Horn(혼), Dimension(치수)

### ABSTRACT

This study investigates the ultrasonic transmission and reception characteristics of an ultrasonic sensor combined with a horn guide to improve its acoustic directivity. Because an ultrasonic sensor with better directivity can measure longer distances, the purpose of this study is to determine the length and angle in the design of a horn guide to be combined with an ultrasonic sensor, which provides the best transmission and reception directivity. Finite element analysis and experiments were conducted to evaluate the ultrasonic transmission and reception characteristics of the horn guide. For the sensor with a driving frequency of 30 kHz, angles of 10°, 20°, and 30° and lengths of 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm, and 50 mm of the horn guide were considered. The commercial program ANSYS was used for sound pressure analysis and the results provided the axial sound pressure level and the beam pattern of the ultrasound at a specified distance from the sensor according to the horn guide geometry. In the experiment, the ultrasonic sensor with horn guide transmitted ultrasounds and measured the sound pressure of the ultrasounds reflected from a cylindrical wall. The results of the finite element analysis and the experiments showed that horn guides with an angle of 20° and a length of 50 mm exhibited the best transmission and reception performance. Experimental results of the ultrasonic sensor with a horn guide of this dimension were compared with the case without the horn guide, and it was confirmed that the angle of the nodal plane in the beam pattern was reduced by as much as 30 %, and thus the acoustic directivity was improved.

### 1. 서 론

거리측정용 초음파 센서는 장애물 감지나 수위계 등에 사용된다<sup>(1)</sup>. 이는 공기 중에 초음파를 발생시켜 측정 타겟에서 반사되어 돌아오는 초음파를 수신하여, 왕

복에 소요된 시간으로부터 거리를 환산한다. 지향성은 거리측정용 초음파 센서에서 중요한 인자이며, 지향성이 좋을수록 측정가능한 거리범위는 길어진다<sup>(2)</sup>. 혼 가이드를 부착하여 초음파 센서의 빔 폭을 줄여서 지향성을 좋게 하면 최대 탐지거리를 확대시킬 수 있으므로, 이를 위한 혼 가이드 설계가 필요하다.

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

# A part of this paper was presented at the KSNVE 2019 Annual Spring Conference.

‡ Recommended by Editor Won Ju Jeon

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

초음파 센서를 이용하여 장애물을 인식하는 연구가 꾸준히 진행되어 왔다. 이동로봇이나 드론에서 장애물 탐지 및 회피에도 사용된다<sup>(3)</sup>. 차량에서 주변 장애물 감지에 사용되는 초음파 센서의 지향성 향상을 위해서 센서의 진동면위분포와 초음파 지향성의 상관관계를 파악한 사례가 있다<sup>(2)</sup>. 혼 가이드를 거리측정용 초음파 시스템에 적용한 사례가 있지만<sup>(4,5)</sup>, 구체적인 설계 근거는 제시되어 있지 않다.

이 연구는 음향 송·수신 지향성이 향상된 초음파 센서를 제작하기 위하여, Fig. 1에 보인 바와 같이 초음파 센서에 부착하는 콘 형상 혼 가이드를 설계하는 과정이다. 이 연구에 앞서 혼 가이드의 형상에 따른 음향 송·수신 지향성에 대해 유한요소 해석과 실험을 하여, 지향성 크기가 콘 형상, 지수함수 형상, 포물선 형상 혼의 순서임을 확인하였다<sup>(6)</sup>. 혼 가이드의 치수 선정을 위하여, 이 연구에서는 여러 치수의 콘 형상 혼 가이드가 부착된 초음파 센서를 대상으로 음향 지향성을 비교하였다.

해석모델을 두 가지로 구분하였다. 하나는 Fig. 2에 보인 바와 같이 혼 가이드 길이에 따른 모델이고, 다른 것은 Fig. 3에 보인 바와 같이 각도에 따른 모델이다. 초음파가 혼 가이드를 지나 외부로 방사하여 형성된 음

압분포를 유한요소 해석으로 구하였다. 센서 진동면으로부터 0.3 m 떨어진 지점에서의 음압 및 음압레벨을 비교하였고, 음압레벨분포 결과를 바탕으로 빔 패턴을 작성하여 비교하였다. 실험을 하여 해석결과를 검증하였다.

## 2. 이론적 배경

음향학 이론<sup>(7)</sup>에서 음향특성을 표현하는 변수들을 선정하였으며, 이들을 해석과 실험에서 초음파 지향성의 정량적 비교에 사용하였다.

### 2.1 지향성 인자 및 빔 패턴

반경이  $a$ 인 진동 원판에서 방사하는 초음파 음장의 해석에 사용하는 기하학 모델을 Fig. 4에 나타내었다. 여기서  $ds$ 는 원판의 미소면적,  $\phi$ 는 원판 내부의 각도,  $r$ 은 원판 중심부터 음장 내 한 지점까지의 거리,  $r'$ 은 의 중앙으로부터의 거리이다.

원거리에서 초음파의 음압은  $z$ 축( $\theta = 0$ )상의 음압  $P_{ax}(r)$ 과 지향성 인자(directionality factor)  $H(\theta)$ 의 곱으로 표현된다. 지향성 인자는 음원으로부터 일정거리에서 방향별 음압분포를 나타내며 다음과 같이 정의된다<sup>(7)</sup>.

$$H(\theta) = \left| \frac{2J_1(ka \sin\theta)}{ka \sin\theta} \right| \tag{1}$$

여기서  $J_1$ 은 1종 베셀함수이고,  $k$ 는 파동수(wave number)이며, 방향 각도  $\theta$ 의 기준은 중심축이다. 지향성 인자를 dB 단위로 환산하여 방향에 따라 표현하면 빔

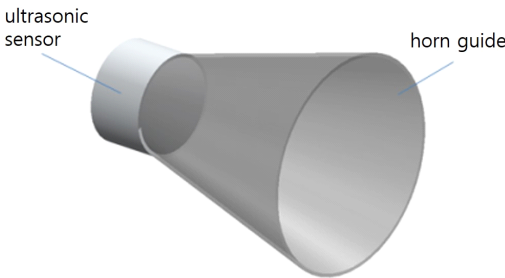


Fig. 1 Schematic diagram of a horn guide attached to an ultrasonic sensor

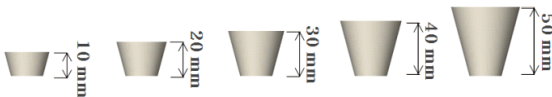


Fig. 2 Analysis models of horn guides with various lengths (horn guide angle 20°)



Fig. 3 Analysis models of horn guides with various angles

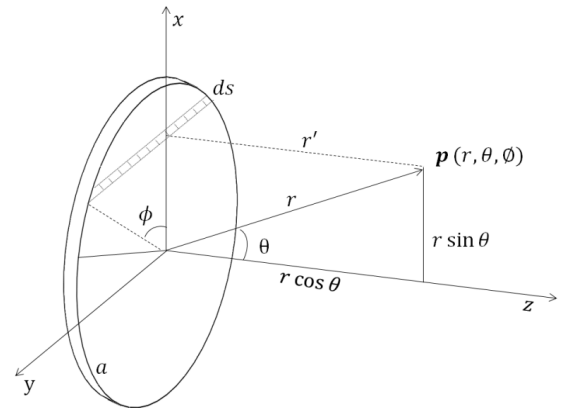


Fig. 4 Geometry used in acoustic far field of ultrasound radiating from a vibration disc

패턴(beam pattern)<sup>(7)</sup>이 된다.

$$b(\theta) = 20 \log H(\theta) \tag{2}$$

중심축 방향( $\theta = 0$ )에서  $H(0) = 1$ 이고  $b(0) = 0$ 이다.

### 2.2 지향성 및 지향성 지수

음향 파워를 원하는 방향으로 집중시키는 정도를 보여주는 지향성(directivity)  $D$ 는 음향강도의 비로 정의되며 다음과 같다<sup>(7)</sup>.

$$D = \frac{I_{ax}(r)}{I_s(r)} = \frac{[P_{ax}(r)]^2}{[P_s(r)]^2} = \frac{4\pi r^2}{\iint [H(\theta)]^2 r^2 d\Omega} \tag{3}$$

여기서  $I_s(r)$ 과  $P_s(r)$ 은 각각 구면파를 발생시키는 점 음원의 중심에서 거리  $r$ 만큼 떨어진 위치의 음향강도와 음압이고,  $I_{ax}(r)$ 과  $P_{ax}(r)$ 은 각각 원판 중심에서 축방향으로 거리  $r$ 만큼 떨어진 위치의 음향강도와 음압이다. 또한  $d\Omega$ 는 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 구의 미소 입체각이며 단위 반지름의 구면에서  $\sin\theta d\theta d\phi$ 이다.  $\phi$ 의 구간은 0부터  $2\pi$ 까지이고  $\theta$ 의 구간은 0부터  $\pi/2$ 까지이다.  $z$ 축 대칭일 때 식 (3)의 분모는 다음과 같이 된다.

$$\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} [H(\theta)]^2 r^2 \sin\theta d\theta d\phi = \int_0^{\pi/2} [H(\theta)]^2 2\pi r^2 \sin\theta d\theta \tag{4}$$

유한요소 해석결과로부터 지향성을 계산할 때 식 (4)을 다음과 같이 이산화하여 사용한다.

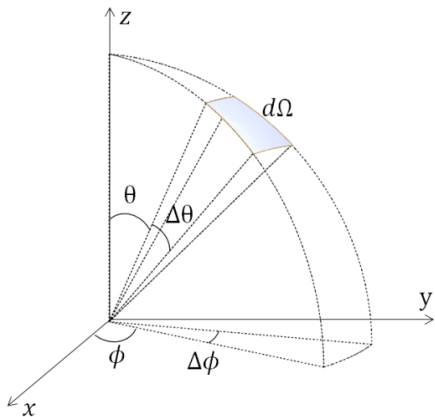


Fig. 5 Solid angle  $d\Omega$  on a spherical element of a unit radius

$$D \approx \frac{4\pi}{\sum [H(\theta)]^2 (2\pi \sin\theta) \Delta\theta} \tag{5}$$

지향성  $D$ 로부터 지향성 지수(directivity index)  $DI$ 는 다음과 같이 정의된다<sup>(7)</sup>.

$$DI = 10 \log D \tag{6}$$

## 3. 유한요소 해석

혼 가이드의 치수를 여러가지로 모델링하고, ANSYS를 사용하여 유한요소 해석을 하였다. 해석결과인 음압분포 데이터로부터 지향 특성을 산출하여 비교하였다.

### 3.1 해석모델

혼의 치수를 Fig. 6과 같이 나타내어, 혼의 각도를  $\alpha$ , 혼의 목(throat) 지름을  $\beta$ , 혼의 길이를  $\gamma$ 로 표현하였다.  $\beta$ 의 치수는 일정하게 유지하면서  $\alpha$  또는  $\gamma$ 를 변경하며 해석하였다.

해석 영역을 Fig. 7과 같이 반 구를 16등분한 영역으로 하였다. 가진주파수 30 kHz인 정현파 신호로 혼의 목을 가진하였다. 음속이 343 m/s라면 이때 파장  $\lambda$ 는 11.4 mm 정도이므로, 요소 크기를  $\lambda/8$ 인 1.4 mm 이

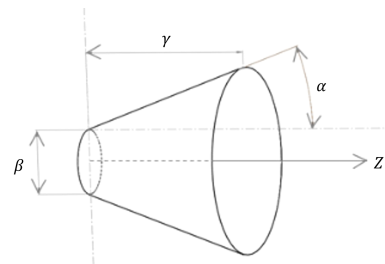


Fig. 6 Horn guide geometry

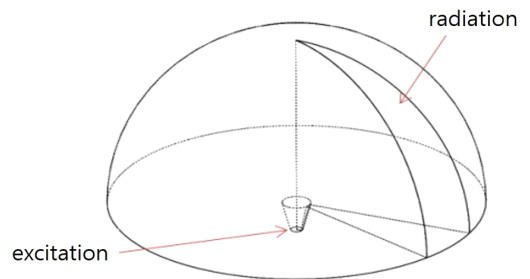


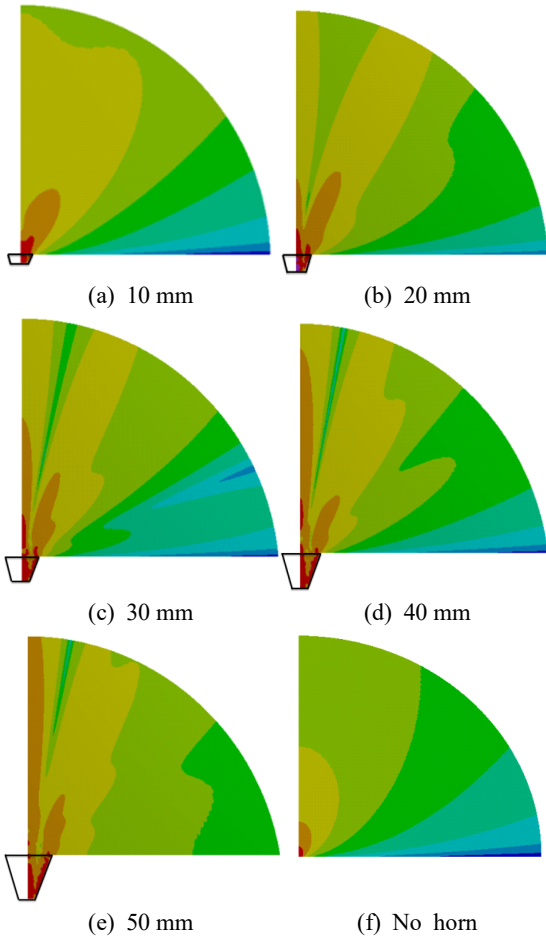
Fig. 7 Acoustic analysis domain with radiation boundary

하로 설정하였다. 혼의 목에 최대 진동속도 10 m/s<sup>2</sup> 인 종모양 분포로 가진하였다.

**3.2 혼 가이드 길이에 따른 해석결과**

해석결과인 음압레벨분포를 Fig. 8에 나타내었다. 혼 가이드가 없는 경우를 Fig. 8(f)에 포함하여 해석 결과를 비교하였다. Fig. 4의 z축(중심축)에서 추출한 음압을 Fig. 9에 그래프로 나타내었다. 중심축 방향 0.3 m 지점에서 음압과 음압레벨을 Table 1에 기재하여, 혼 가이드 길이에 따라 비교하였다. 혼 가이드가 길수록 음압과 음압레벨이 크다. 길이가 10 mm인 경우에는 음압이 혼 없는 경우에 비해 작는데, 파장보다 짧은 혼 가이드는 지향성 향상에 불리하게 작용함을 보여준다.

거리 0.3 m 원호에서의 음압을 추출하고 식 (2)에서



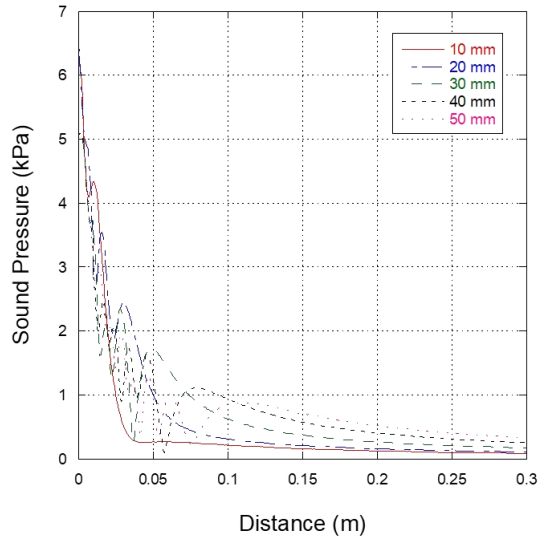
**Fig. 8** Sound pressure level distribution according to horn guide length (angle 20°)

정의한  $b(\theta)$ 를 계산하여 Fig. 10에 나타내었다. 이를 통해 빔 폭(beamwidth)을 Table 2에 기재하였다. 혼 가이드가 길수록 빔 폭이 작아졌다. 식 (5)와 식 (6)을 활용하여 계산한 지향성과 지향성 지수도 Table 2에 기재하였다. 음압의 경우와 마찬가지로 지향성과 지향성 지수가 혼 가이드가 길수록 크게 나타났다.

**3.3 혼 가이드 각도에 따른 해석결과**

혼 가이드 각도에 따른 음압레벨분포를 Fig. 11에 나타내었다. 축방향 거리별 음압을 Fig. 12에 그래프로 나타내었고, 중심축 방향 0.3 m 지점에서 음압과 음압레벨을 Table 3에 기재하여 혼 가이드 각도에 따라 비교하였다. 음압 크기가 혼 가이드 각도 20°, 10°, 30° 순서로 나타났다.

거리 0.3 m 원호에서 추출한 음압으로 빔 패턴을 작



**Fig. 9** Sound pressure along the central axis (horn guide angle 20°)

**Table 1** Sound pressure and sound pressure level at 0.3 m in the central axis (angle 20°)

Horn guide length (mm)	Sound pressure (Pa)	Sound pressure level (dB)
10	87.2	129.8
20	108.4	131.7
30	169.7	135.7
40	251.8	139.0
50	331.1	141.4
No horn	108.0	131.6

성하여 Fig. 13에 나타내었다. 빔 폭을 Table 4에 기재하였고 혼 가이드의 각도가 클수록 빔 폭이 작게 나타났다. 지향성과 지향성 지수를 계산하여 Table 4에 기재하였다. 음압의 경우와 마찬가지로 지향성과 지향성 지수 크기가 혼 가이드 각도 20°, 10°, 30° 순서로 나타났다.

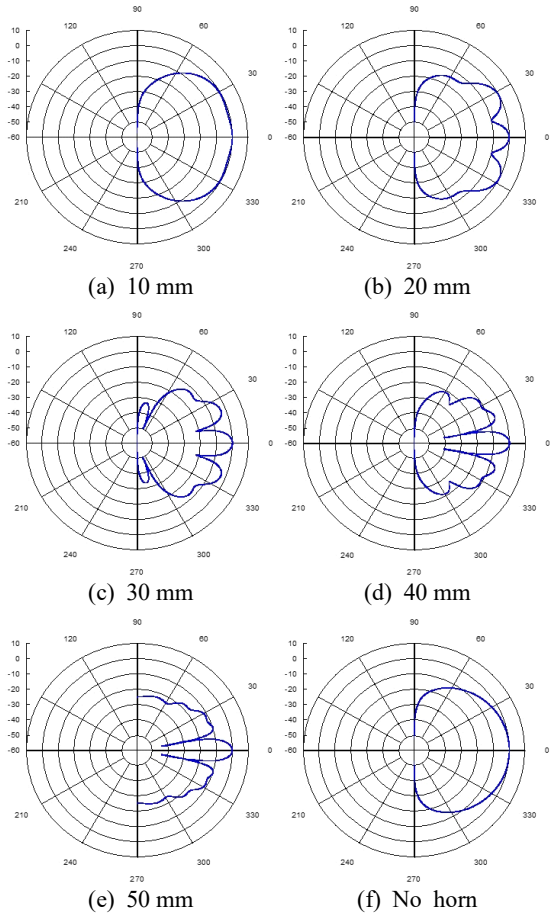


Fig. 10 Beam pattern according to horn guide length (angle 20°)

Table 2 Beamwidth, directivity, and directivity index according to horn guide length (angle 20°)

Horn guide length (mm)	Beamwidth (°)	Directivity	Directivity index (dB)
10	49.7	7.5	8.8
20	9.0	11.9	10.7
30	7.7	33.8	15.3
40	7.0	67.6	18.3
50	6.5	97.0	19.9

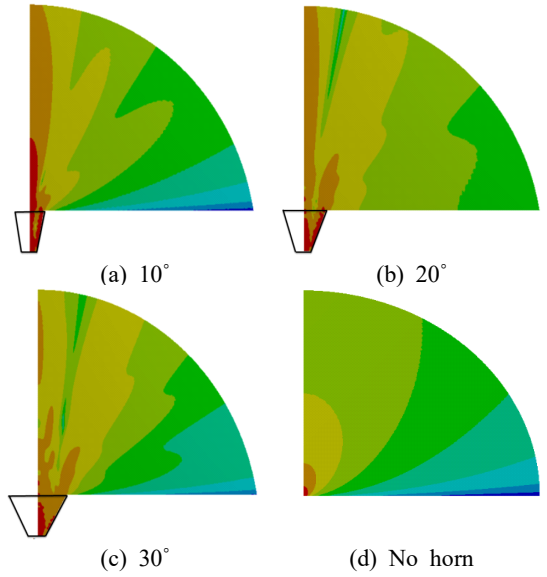


Fig. 11 Sound pressure level distribution according to horn guide angle (length 50 mm)

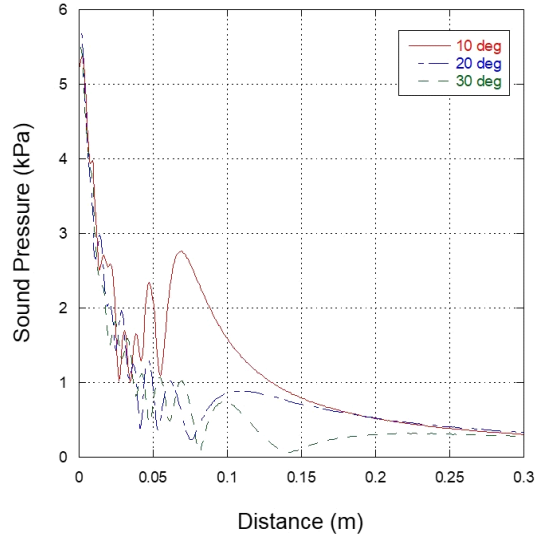


Fig. 12 Sound pressure along the central axis (horn guide length 50 mm)

Table 3 Sound pressure and sound pressure level at 0.3 m in the central axis (length 50 mm)

Horn guide length (mm)	Sound pressure (Pa)	Sound pressure level (dB)
10	301.8	140.6
20	331.1	141.4
30	273.2	139.7
No horn	108.0	131.6

### 4. 실험

유한요소 해석을 통해 구한 음향 지향성을 검증하기 위해 실험을 하였다.

#### 4.1 실험장치

3D 프린터로 혼 가이드를 제작하였고, 제작된 혼 가이드를 Fig. 14에 제시하였다. 실험에 사용된 초음파 센서의 지름은 19 mm이며, 임피던스 분석기(Agilent 4192A)로 측정한 결과 구동주파수는 30.0 kHz이다.

송·수신 보드(development kit)를 사용하여 초음파의 송·수신 신호를 측정하였다. 전원공급기(Tektronix PWS2323, DC 12V)를 사용하여 보드에 전압을 인가하였다. 초음파 센서에 30 kHz 정현파 신호를 입력으로 인가하였으며, 전압은 150 V<sub>0-p</sub>이다. 송신 후 반사되어 되돌아온 초음파를 오실로스코프(Tektronix TDS

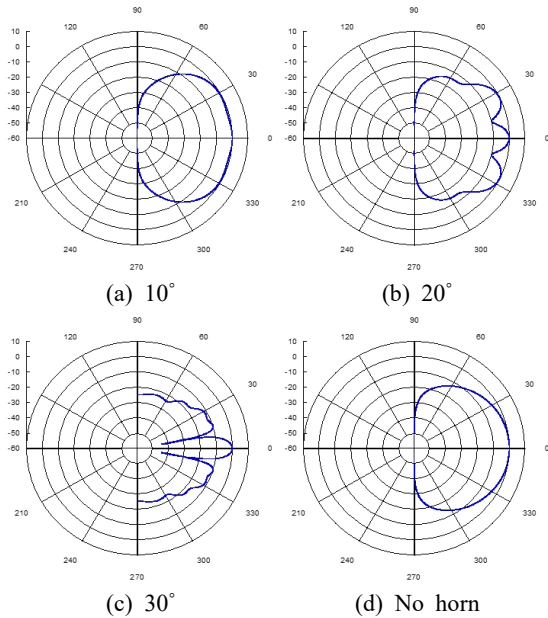


Fig. 13 Beam pattern according to horn guide angle (length 50 mm)

Table 4 Beamwidth, directivity, and directivity index according to horn guide angle (length 50 mm)

Horn guide length (mm)	Beamwidth (°)	Directivity	Directivity index (dB)
10	11.0	91.3	19.6
20	6.5	97.0	19.9
30	5.7	69.1	18.4

3012C)로 관찰하였다.

#### 4.2 송신 실험

송신성능을 파악하기 위해 송신부 혼 가이드를 교체하며 송신 실험을 하였다. 송신부 혼 가이드를 교체하며 실험하고 수신부에 초음파 센서로 초음파의 음압을 측정하였다. 수신음압 관찰이 용이하도록 수신용 초음파 센서에 혼 가이드를 설치하였고, 계측기 구성도를 Fig. 15에 나타내었다. 송신부 혼 가이드 치수에 따른 수신 신호를 오실로스코프로 계측하였고, 송신부 혼 가이드 초음파 수신 신호를 Fig. 16에 나타내었다. 송신부 혼 가이드 치수에 따른 신호 크기를 Fig. 17에 나타내었다. 실험 결과 각도 20°이고 길이 50 mm인 혼 가이드가 송신 성능이 가장 좋은 것으로 파악되었다.

유한요소 해석과 실험결과를 비교하였다. 해석결과와 음압과 실험결과와의 센서출력을 각각 정규화하여 혼 가이드 길이에 따른 해석과 실험결과 비교 그래프와 혼 가이드 각도에 따른 해석과 실험결과 비교 그래프를 Fig. 18에 나타내었다. 비교결과 거리측정용 초음파 센서에 결합된 혼 가이드 치수에 따른 유한요소 해석과



Fig. 14 Horn guide specimens made by a 3D printer

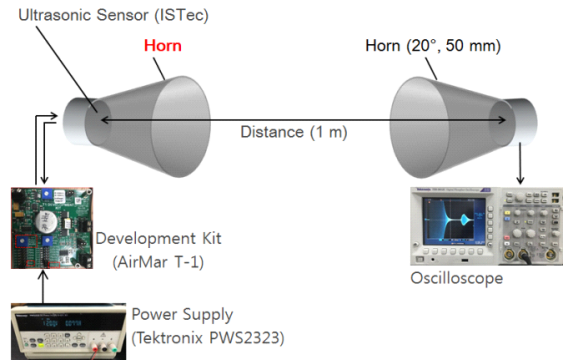
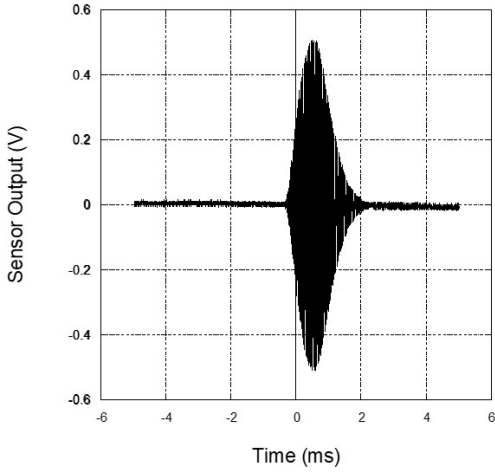


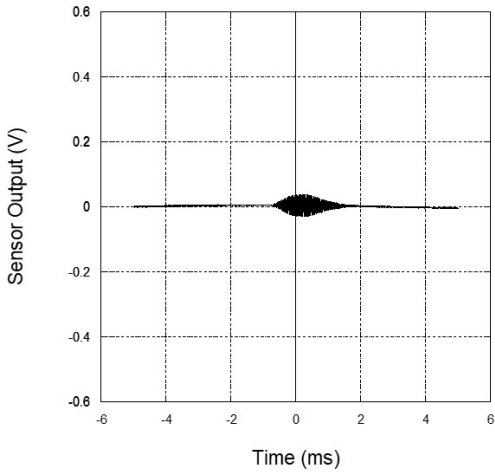
Fig. 15 Configuration diagram of transmission test instrument



실험결과 경향이 유사하다. 혼 가이드의 길이가 길수록 음향 지향성이 좋고, 혼 가이드 각도 20°에서 음향 지향성이 가장 좋다.



(a) Horn (length 50 mm, angle 20°)



(b) No horn

Fig. 16 Received signal of ultrasound at the transmission horn guide

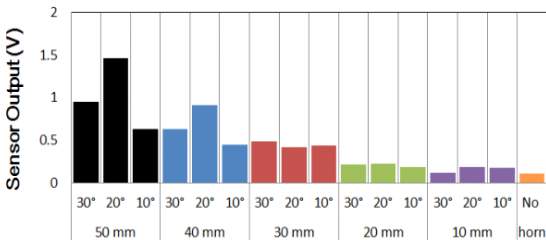
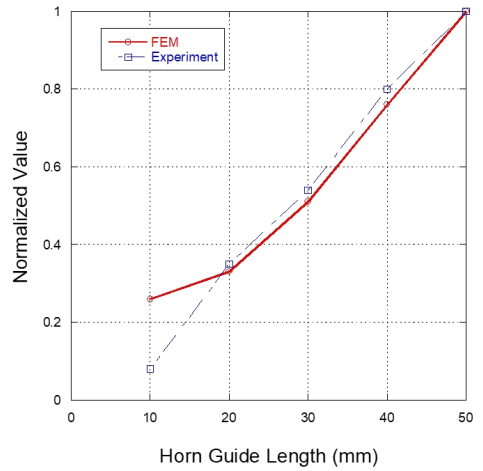


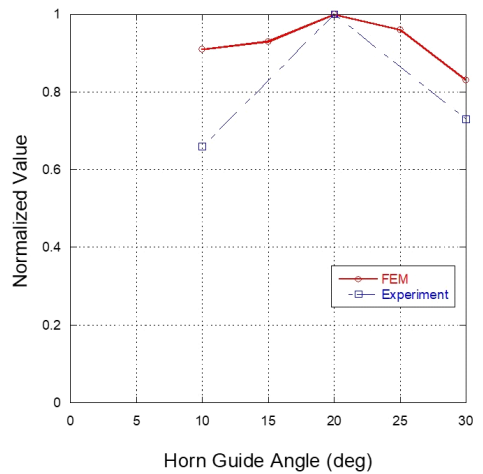
Fig. 17 Output voltage of ultrasonic sensor at the transmission test according to the horn guide dimensions

### 4.3 수신 실험

수신성능을 파악하기 위해 수신부 혼 가이드를 교체하며 수신신호 크기를 측정하였다. 초음파 센서를 사용하여 초음파를 송신하고 중심축 방향 1 m 위치에서 수신용 초음파 센서로 초음파의 음압을 측정하였다. 수신부 초음파 센서의 혼 가이드를 교체하며 실험하였다. 수신음압 관찰이 용이하도록 송신용 초음파 센서에 혼 가이드를 설치하였고, 계측기 구성도를 Fig. 19에 나타내었다. 혼 가이드 치수에 따른 수신 신호를 오실로스코프로 계측하였고, 수신부 혼 가이드의 초음파 수신 신호를 Fig. 20에 나타내었다. 수신부 혼 가이드 치수에 따른 신호크기를 Fig. 21에 나타내었다. 실험 결과 각



(a) According to horn guide length



(b) According to horn guide angle

Fig. 18 Comparison of finite element analysis and experiment depending on horn guide dimension

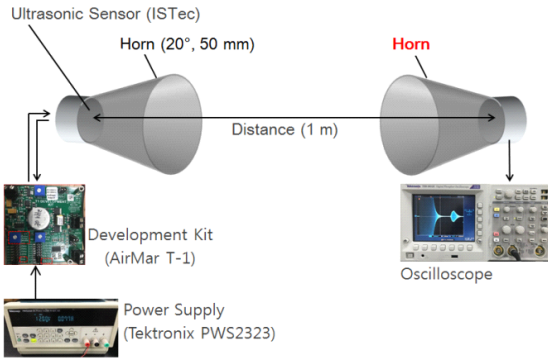
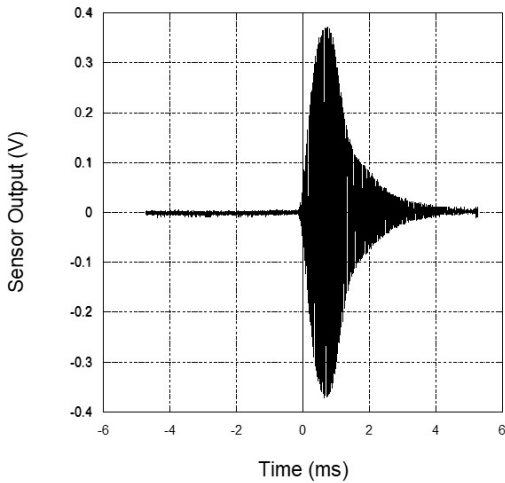
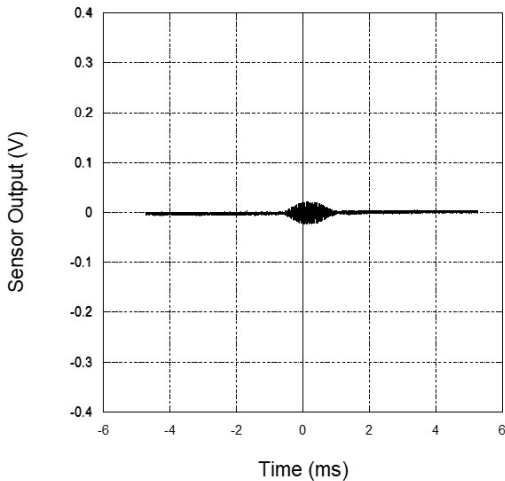


Fig. 19 Configuration diagram of reception test instrument



(a) Horn (length 50 mm, angle 20°)



(b) Horn (length 10 mm, angle 30°)

Fig. 20 Received signal of ultrasound at the reception test

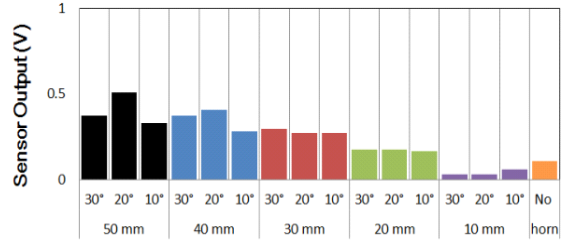


Fig. 21 Output voltage of ultrasonic sensor at the reception test according to the horn guide dimensions

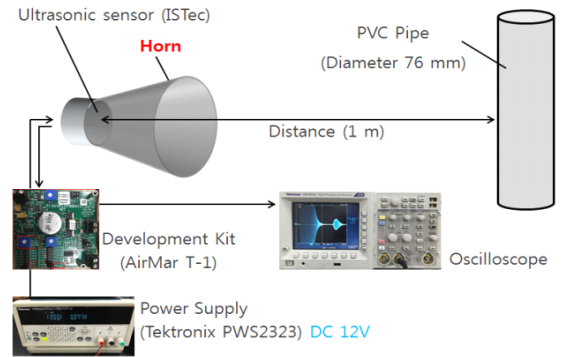


Fig. 22 Configuration diagram of transmission and reception test instrument

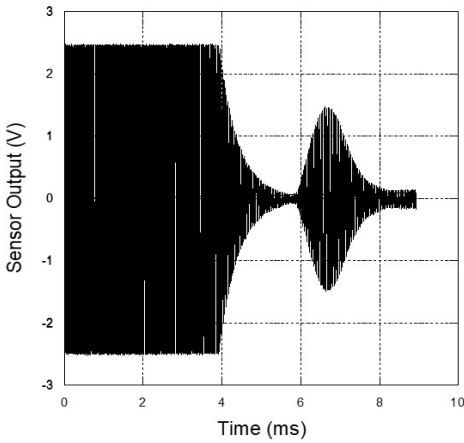
도 20°이고 길이 50 mm인 혼 가이드가 수신 성능이 가장 좋은 것으로 파악되었다.

#### 4.4 송·수신 실험

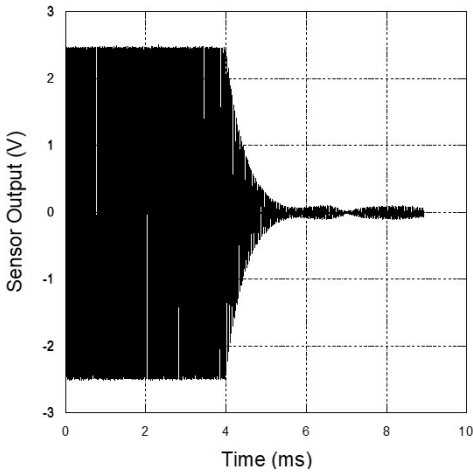
혼 가이드가 부착된 초음파 센서를 사용하여 초음파를 송신하고 원통벽에서 반사되어 수신되는 초음파의 음압을 측정하였다. Fig. 22에 계측기 구성도를 나타내었다. 초음파 반사용 원통벽은 지름 76 mm의 PVC 파이프이고, 초음파 센서와의 거리는 1 m이다. 이러한 구조는 현업에서 시험하는 방식에 따른 것이다. 각도와 치수가 다른 혼 가이드를 교체해 가며 실험하였다. 혼 가이드 유무에 따른 초음파 송·수신 신호를 Fig. 23에 나타내었고, 혼 가이드 치수에 따른 초음파 송·수신 신호 크기를 Fig. 24에 나타내었다. 실험 결과 각도 20°이고 길이 50 mm인 혼 가이드가 송·수신 성능이 가장 좋은 것으로 파악되었다.

각도 20°이고 길이 50 mm인 혼 가이드와 혼 없는 경우의 초음파 빔 패턴을 측정하였다. 계측기 구성도를 Fig. 25에 나타내었다. Fig. 26에 나타난 회전장치를 사용하여 초음파 센서를 회전하였고, 초음파 센서



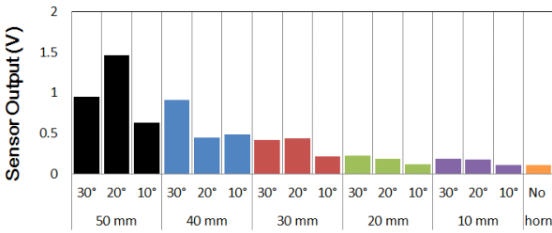


(a) Horn (length 50 mm, angle 20°)



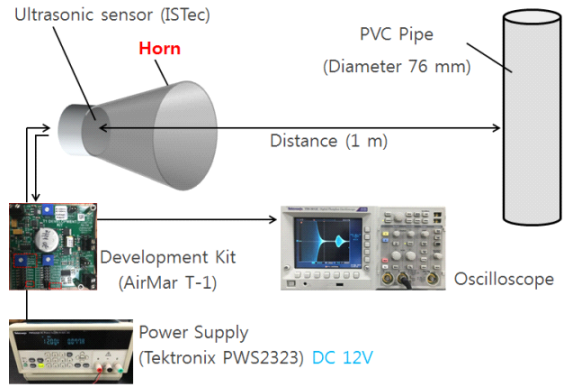
(b) No horn

**Fig. 23** Received signal of ultrasound at the transmission and reception test

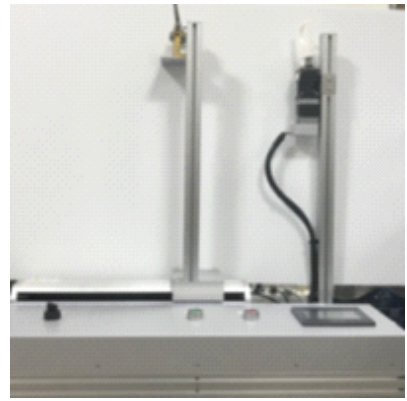


**Fig. 24** Output voltage of ultrasonic sensor at the transmission and reception test according to horn guide dimensions

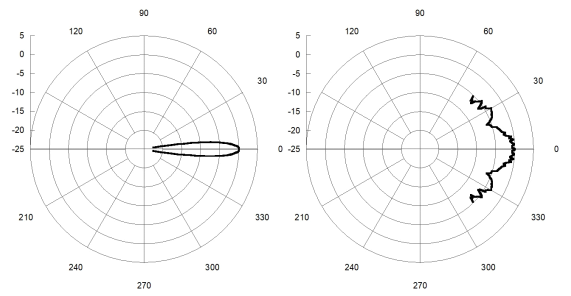
와 원통벽의 각도를 1°씩 변경하며 측정하였다. 혼 가이드 유무에 따른 빔 패턴을 Fig. 27에 나타내었다. 빔 폭이 각각 5.5°와 19°로 혼 가이드가 있는 경우의 빔 폭이 30% 줄어서 지향성이 좋음을 확인하였다.



**Fig. 25** Configuration diagram of beam pattern measurement instrument



**Fig. 26** Device for rotating ultrasonic sensors



(a) Horn (length 50 mm, angle 20°)

(b) No horn

**Fig. 27** Beam patterns according to the presence or absence of the horn guide

## 5. 결론

혼 가이드 치수에 따른 초음파 센서의 지향성을 다루었다. 혼 가이드의 길이와 각도에 따른 음향 특성을 파악하기 위하여 유효요소 해석과 실험을 하였다. 구

동주파수 30 kHz, 혼 가이드의 각도 10°, 20°, 30°와 길이 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm, 50 mm를 대상으로 하였다.

유한요소 해석을 통해 여러 유형의 혼 가이드에 의한 음압분포를 구하고, 이로부터 빔 패턴과 지향성을 산출하여 비교하였다. 해석결과를 검증하기 위해 3D 프린터로 혼 가이드 시제품을 제작하여 실험을 하였다. 혼이 부착된 초음파 센서를 사용하여 초음파를 송신하고 일정거리에서 수신된 초음파의 음압을 측정하였다. 해석결과와 음압과 실험결과와의 센서출력을 각각 정규화하여 비교한 결과 경향이 유사함을 보였다. 혼 가이드의 각도 20°에서 음향 지향성이 가장 좋으며, 동일한 혼 가이드 각도에서 혼 가이드가 길수록 음향 지향성이 좋은 것으로 파악되었다.

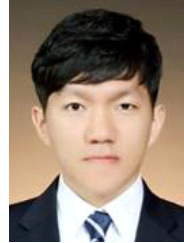
## References

- (1) Kim, J. O., 2000, Sensors and Actuators Using Ultrasound, Journal of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 10, No. 5, pp. 723~728.
- (2) Seon, S. O., Kim, J. O., Chae, M. K. and Yoo, G. S., 2018, Acoustic Characteristics Depending on the Vibration Distribution of Ultrasonic Sensors, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 28, No. 4, pp. 490~500.
- (3) Choi, Y. K., Choi, U. S. and Song, J. B., 2009, Obstacle Avoidance of a Mobile Robot Using Low-cost Ultrasonic Sensors with Wide Beam Angle, Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, Vol. 15, No. 11, pp. 1102~1107.
- (4) Lee, J. L., 1997, Ultrasonic Waves and Its Usage, Sehwa, Paju, p. 114.

(5) Ju, X., Gu, L. and Dong, X., 2014, Application and Research of Ultrasonic Horn in Ultrasonic Ranging System, Sensors & Transducers, Vol. 170, No. 5, pp. 60~66.

(6) 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.

(7) Kinsler, L. E., 1999, Fundamentals of Acoustics, 4th edition, Wiley, New York, pp. 171~193.



**Sung Gu Lim** received the B.S. degree in mechanical engineering from Soongsil University in 2014. Since 2017 as a graduate student at Soongsil, he has been working on ultrasonic sensors and wave 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 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.