

# 물체인식용 초음파센서 선형혼의 설계 및 제작

## Design and Fabrication of a Linear Horn in an Ultrasonic Sensor for Detecting an Obstacle

\*#박종규<sup>1</sup>, 제엽<sup>2</sup>, 이학수<sup>2</sup>, 문원규<sup>2</sup>

\*#JK Park(chong@changwon.ac.kr)<sup>1</sup>, Y. Je<sup>2</sup>, HS Lee<sup>2</sup>, WK Moon<sup>2</sup>

<sup>1</sup>창원대학교 기계공학과, <sup>2</sup>포스텍 기계공학과

Key words : Ultrasonic sensor, Linear horn, Continuum model

### 1. 서론

거리 측정용 초음파 센서는 다른 센서에 비해 저가이며 적용이 쉬워 모바일 로봇등의 자기 위치 측정 및 장애물 파악, 센서의 회전 스캔등을 이용한 2.5차원 공간 이미지 형성 등을 위해 많이 이용되고 있다. 1900년대 초부터 개발된 초음파 센서는 현재 상용화되어 많은 영역에서 응용되고 있다. 일반적으로 이러한 초음파 센서는 수십 kHz의 초음파 영역에서 이용되는데 이것은 음파보다 방향성(Directivity)이 좋기 때문이다. 피스톤음원에 대한 방향성을 결정짓는 HPBW(Half power beam width)는 아래와 같이 결정된다.

$$\theta = \text{Sin}^{-1}[1.22 \times c / (f \times D)] \quad (1)$$

지금까지 이용된 주요 초음파센서는 주로 원거리(far-field)에서 이용되고 있기 때문에 이 영역에서 초음파가 진행하면서 회절이 되어 지향각을 형성하게 된다. 지향각이 큰 센서는 원거리에서 공간 분해능이 떨어지게 된다. 즉 Polaroid사의 가장 작은 각을 가진 초음파 센서의 HPBW가 12도인 경우 센서 전방의 약 5m앞에서는 약 1m 정도의 빔폭이 형성되게 된다. 이러한 경우 벽이나 장애물등의 정확한 정보를 파악하기 어렵게 되고 스캔등을 통한 정확한 공간 구성이 어려워진다.

따라서 본연구에서는 5도 미만의 HPBW를 가진 고지향성 거리 센서를 개발하고자 하였다. 이러한 경우 같은 거리에서도 기존의 센서에 비해 더욱 좁아진 빔폭이 형성되게 된다.

본 연구에서는 방향성을 개선시키기 위해 두 개의 초음파원에서 발생하는 비선형 특성을 이용하고자 하였다[1,2]. 즉 충분히 큰 파장의 두개의 초음파를 발생시키면(1차음파) 두 초음파의 주파수에 대한 차음(2차음파)도 함께 발생하게 된다. 이와 같은 현상은 이를 파라메트릭 어레이(Parametric acoustic array)라 부르며 최초 Westervelt에 의해 발견되었고 지금까지 주로 수중음향에서 활용되어 왔다[5].

이러한 파라메트릭 어레이를 이용하기 위해서는 기본적으로 1차음을 충분히 크게 발생시킬수 있는 트랜스듀서를 설계하는 것이 관건이다. 왜냐하면 충분한 크기의 1차음이 보장되었을 때 2차음도 충분히 크게 발생하기 때문이다. 본연구에서는 1차음을 크게 발생시키고 낮은 제작 단가, 고해상도 초음파 발생을 위해 Gallego-juarez 연구 그룹의 stepped plate가 적합하다고 판단, 고해상도 거리센서로의 적용하였다[3]. 특히 본 논문에서는 음파를 증폭시키고 전체 음향발생기의 고유진동수에 직접적 연관관계를 지니는 트랜스듀서의 설계에 주안점을 두었다. 즉 두 개의 고유진동수를 이용하고 음파의 안정적 증폭을 위한 선형 혼을 수학적으로 모델하고 유한요소해석을 통해 설계하여 고음을 발생시키는 데 적합하고 고해상도를 지니는 초음파 센서를 설계하고 제작하였다.

### 2. 센서 설계

본 연구진은 낮은 제작 단가, 고해상도 고 음압의 초음파 발생에 Gallego-juarez 연구 그룹의 stepped plate가 적합하다고 판단, 고해상도 거리센서로의 적용을 연구하였다.

#### 2.1 Parametric array 디자인

차음주파수는 일반적으로 초음파 거리 센서에서 사용되는 40kHz로 결정하고 크기를 50mm x 50mm로 제한하여 1차 주파수를 결정하기 위한 시뮬레이션을 수행하였다.

Table 1 주파수에 따른 파장, 보상에 필요한 파장

frequency	wavelength	step height for compensation	selected step height
120kHz	$\lambda$	$\lambda/2, 3\lambda/2, 5\lambda/2 \dots$	$3\lambda/2$
80kHz	$3\lambda/2$	$3\lambda/4, 3\lambda/4 + \lambda, \dots$	$3\lambda/4$

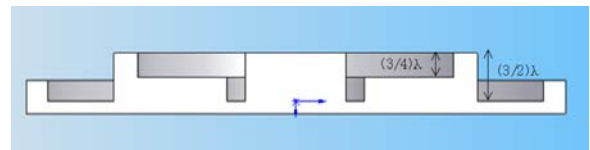


Fig. 1 The shape of proposed stepped plate

5m정도 떨어진 측정 거리에서 1차 주파수가 약 80kHz에서 차음의 음압이 최대가 되는 것을 확인하였다. 또한 HPBW(Half Power Beam Width)의 경우 약 120kHz에서 ± 1.5° 정도로 최적의 주파수가 나오는 것을 알 수 있다. 따라서 높은 음압의 2차 주파수를 얻기 위해 1차 주파수를 80kHz, 120kHz로 결정하였다.

#### 2.2 방사판 설계

본 연구진은 Stepped plate 트랜스듀서를 이용하여 고효율 고음압의 초음파를 발생시키는 연구를 진행하였다. 기존의 Gallego 연구진이 제안한 stepped plate 트랜스듀서는 한 가지 주파수에 대해서만 보상이 가능하기 때문에 이를 수정하여 두 가지 주파수에 대한 보상이 가능하도록 설계하였다(Fig.1).

#### 2.3 기계적 증폭부 설계

혼의 형태에는 stepped, exponential, fourier, linear등의 다양한 종류가 있으며, 혼의 형태를 선택하는 기준으로 기계적 증폭비와 가공의 용이성, 형상의 안정성, Eisner and Seager(1965)가 제시한 성능 지수를 들 수 있다.

기계적 증폭부에서 선형 혼의 경우는 변위의 안정적 증폭을 위해 가장 일반적으로 사용되는 혼이다. 혼의 증폭비는 선형혼의 기술기에 의해 확정된다. 더불어 선형혼의 장점은 안정적 증폭부를 가지고 있기 때문에 고주파수에서 스트레스의 집중을 최소화한다.

본 증폭부 설계의 최종 목표는 충분한 크기의 진동을 형성하는 것이 되겠고 이를 이루기 위한 핵심 설계 변수는 결국 공진주파수를 정확히 맞추는 부분과 원하는 위치에 노드(Node) 점을 형성시키는 것 등이 있다. 본 연구에서는 연속체 모델 (Continuum model)과 함께 압전 구동기와 증폭부 간의 연속 조건 (Compatibility condition)을 적용한 새로운 형태의 모델링 방법을 이용하였다. 이러한 모델 방법을 통해 수학적 모델을 만들고 이의 해를 구하기 위해 수학 계산 소프트웨어인 매스매티카(Mathematica)를 이용하여 해를 구해서 1차 개략적 모델을 생성시키게 된다. 이를 바탕으로 유한 요소(FEM) 소프트웨어인 코스모스웍스(Cosmosworks)를 이용하여 각 변수 컨트롤을 통해 최종적인 모델을 완성하게 된다.

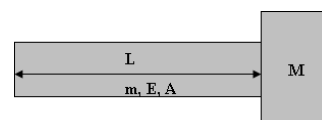


Fig. 2 Schematic diagram of the sensor

2.3.1 혼의 설계 방법

선형바(Uniform Bar)의 길이방향모드 해를 이용하여 Fig. 2와 같이 끝에 질량이 붙었을 때 경계조건을 이용하여 원하는 공진주파수에 대한 길이를 결정할 수 있다.

$$\frac{\partial u}{\partial x}(0,t) = 0 \tag{2}$$

$$AE \frac{\partial u}{\partial x}(l,t) = -M \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}(l,t) \tag{3}$$

$$\tan \frac{\omega l}{c} = -\frac{AE}{M\omega c} \tag{4}$$

이렇게 구해진 몸체의 길이를 이용하여 압전과 알루미늄 길이의 연속 조건을 이용하여 앞뒤 알루미늄의 길이를 결정할 수 있다.

즉 길이방향 변위를  $u$ 라 하고 길이방향의 힘을  $F$ 라하면 각각 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$u = A \sin(k_1 x) \tag{5}$$

$$F = ASE k_1 \cos(k_1 x) \tag{6}$$

여기서  $A$ 는 경계조건에 의해 결정되는 상수이고  $k$ 는 길이방향 wave number 이다. 먼저 앞서 구해진 압전소자의 길이를  $L_0$ 라 하면 압전소자의 변위와 힘은 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$u_0 = A_0 \sin(k_{10} L_0) \tag{7}$$

$$F_0 = A_0 S_0 E_0 k_{10} \cos(k_{10} L_0) \tag{8}$$

위식에서 압전소자의 길이와 동등한 알루미늄바의 변위와 힘은 다음과 같다.

$$u_1 = A_1 \sin(k_{11} L_1) \tag{9}$$

$$F_1 = A_1 S_1 E_1 k_{11} \cos(k_{11} L_1) \tag{10}$$

위 두식은 연속 조건에 의해 다음식이 각각 만족되어야 한다.

$$u_0 = u_1 \tag{11}$$

$$F_0 = F_1 \tag{12}$$

위 두식을 조합하면 다음 식을 유도할 수 있다.

$$\tan(k_{10} L_0) / \rho_0 c_{10} S_0 = \tan(k_{11} L_1) / \rho_1 c_{11} S_1 \tag{13}$$

where  $k_{10} = \omega_1 / c_{10}$ ,  $k_{11} = \omega_1 / c_{11}$

이를 통해 구해진 수정된 길이  $L_1$ 을 통해 알루미늄 부분의 길이를 유도할 수 있다.

$$l = \frac{1}{2}(L - 2L_1) \tag{14}$$

이러한 모델링 방법에 의해 구해진 최종 공진주파수 결과는 Fig. 3이고 Fig. 4는 유한해석 요소결과를 보여준다. 여기서 알 수 있듯이 자유단의 고유모드가 매우 다양하게 존재하며 이 중에서 81 kHz 와 125kHz 를 이용할 수 있다. 특히 이론과 시뮬레이션, 그리고 실험결과가 매우 유사하게 나옴을 확인할 수 있다.

3. 실험 및 결과

제작된 센서를 이용하여 두개의 초음파 신호를 발생시켜 초지향성의 2차 초음파가 발생되는지의 여부를 확인하기 위하여 Fig.5와 같은 초음파 발생 실험 세팅을 하였다.

중심축에 따른 차음 발생특성의 측정은 초음파 발생기의 중심축에서 15cm부터 1.6m 까지 선형 레일에 마이크로폰을 부착하여 이동시켜 가면서 측정을 해보았다. 초음파발생기에는 각각의 주파수에 50Vpk의 신호를 인가하였다. Fig. 6는 1차음파의 주파수와 차음주파수의 중심축에서 음압을 측정한 그래프이다. 실험 결과 1차 주파수의 최대 음압은 125 dB를 얻을 수 있었고, 2차주파수의 최대 음압은 90 dB를 얻을 수 있었다. 이러한 결과는 충분히 큰 2차음압을 통해 고지향성 물체 인식센서로서 응용이 가능하다는 것을 의미한다.

4. 결론

본 연구에서는 고지향성 센서의 전반적인 설계방법을 소개하였으며 특히 압전구동기를 포함한 선형혼의 새로운 모델링 방법을 통해 이론, 시뮬레이션, 그리고 실험결과가 유사하게 나옴을 확인하였다. 이러한 모델 방법에 의해 90dB 이상의 음압을 가진 고지향성 센서를 제작할 수 있었다.

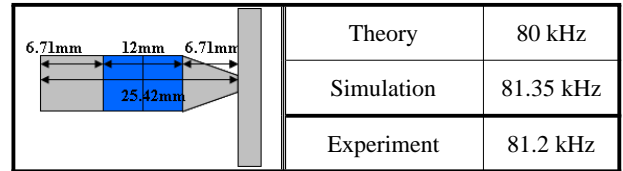


Fig. 3 Comparison between FEM and theory result of the sensor

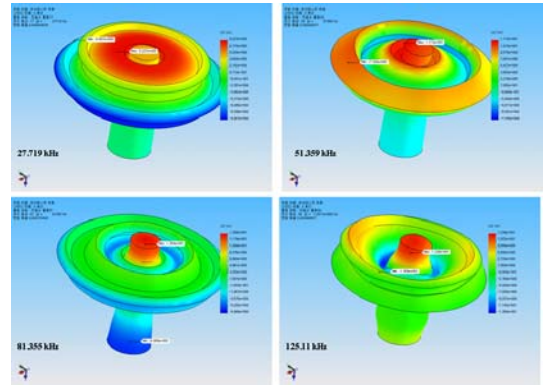


Fig. 4 FEM result of the sensor

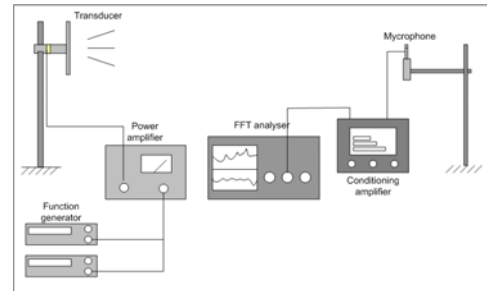


Fig.5 Experimental setup

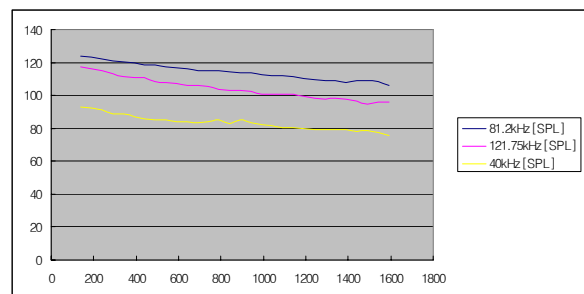


Fig.6 Propagation curves

후기

본 연구는 정보통신부 정보통신연구개발사업의 지능로봇센서 사업(2005-S-111-02)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. B. K. Novikov, O. V. Rudenko, and V. I. Timoshenko, Nonlinear Underwater Acoustics, (The American Institute of Physics, New York, 1987)
2. Mary Beth Bennett and David T. Blackstock, "Parametric array in air," J. Acoust. Soc. Am. vol. 57(3), pp. 562-568 (1975 Mar)
3. A.Barone and J.A.Gallego-juarez, Flexural vibrating free-edge plates with stepped thicknesses for generating high directional ultrasonic radiation, Journal of Acoustical Society of America, 51 (3), 953-959, 1972