

# 자외형 초음파 트랜스듀서용 도파봉의 설계 및 제작

## Design and Construction of the Acoustic Horn for Magnetostrictive Ultrasonic Transducer

강 국 진\*, 노 용 래\*\*  
(Kukjin Kang\*, Yongrae Roh\*\*)

\*경북대학교 센서공학과, \*\*경북대학교 기계공학부

(접수일자: 2001년 4월 19일; 수정일자: 2001년 6월 1일; 채택일자: 2001년 6월 8일)

본 연구에서는 자외형 초음파 트랜스듀서의 도파봉을 이론적으로 해석하고 그 타당성을 유한요소 해석법으로 검증하였으며 두 해석법의 결과는 서로 잘 일치하였다. 본 연구에서 유도한 이론적 해석법은 유한 요소 해석법에 비해서 빠른 시간내에 주어진 주파수를 만족시키는 도파봉 길이를 결정할 수 있는 반면, 차단 주파수 (cut-off frequency)를 넘어서는 범위에서만 해석이 가능하다는 단점을 가진다. 해석결과 현수선 도파봉 (catenoidal horn)이 지수함수 도파봉 (exponential horn)에 비해서 더 큰 변위 증폭을 가져왔고, 현수선 형상 길이가 짧을수록 더욱 큰 변위로 증폭시킬 수 있었다. 해석 결과를 바탕으로 공기중에서 공진 주파수 20.8 kHz를 가지는 자외형 초음파 트랜스듀서를 제작하여 성능을 측정하였다. 자외형 트랜스듀서는 수중에서 19.3 kHz의 공진 주파수와 199 dB의 최대 SPL (Sound Pressure Level)을 가지고 무지향성의 특성을 보였다.

**핵심용어:** 도파봉, 자외소자, 트랜스듀서, 현수선, 지수함수, 유한요소법

**투고분야:** 초음파 및 탄성과 분야 (4.2)

In this paper, we designed the acoustic horn for magnetostrictive ultrasonic transducers in a theoretical manner, and validity of the analysis was verified through comparison with the results of finite element analysis. Results of the two analysis methods showed good agreement with each other. The theoretical method can fairly quickly determine the horn length that satisfies given frequency specification, but also has the drawback that it is applicable only to the frequency range over the cut-off frequency. According to the results, the catenoidal horn can provide larger amplification than the exponential horn. It was also found that it is more desirable for the region having the catenoidal curvature to be as short as possible to achieve larger amplification of the transducer deformation. Based on the analysis results, a magnetostrictive transducer sample was fabricated and its performance was evaluated experimentally. The transducer has the resonance frequency of 19.3 kHz as well as the maximum SPL of 199 dB, and shows the omni-directional radiation pattern.

**Keywords:** Acoustic horn, Magnetostrictive, Transducer, Catenoidal, Exponential, FEM

**ASK subject classification:** Ultrasonic and elastic waves (4.2)

## I. 서 론

고출력 초음파 트랜스듀서는 전기 에너지를 기계적 변

책임저자: 강국진 (kkj@usound.knu.ac.kr)  
702-701 대구광역시 북구 산격동 1370  
경북대학교 대학원 센서공학과  
(전화: 053-943-8716; 팩스: 053-950-6827)

위로 변환시키는 초음파 진동자와 진동자에서 발생되어진 변위를 증폭시켜서 방사매질로 전달하는 도파봉 (acoustic horn)의 두 부분으로 이루어져 있다. 종래에 사용되던 압전형 초음파 트랜스듀서는 일반적인 랑쥬벵 형태에 도파봉을 붙인 형상을 취하고 있고, 1/2파장의 길이 진동모드를 이용한다[1,2]. 그러나 압전소자는 전

기-기계 에너지 변환특성의 선형성을 가질 수 있는 허용 입력전압이 제한되어 있어서 필요로 하는 만큼의 큰 출력을 내기가 어려우며, 에너지 변환 특성 또한 한계가 있어서 무리한 구동 시 급격한 수명 단축을 초래하며, 일정 온도 이하에서만 사용 가능하다는 등의 단점을 가지고 있다. 이러한 문제를 해결할 수 있는 재료로 최근 많이 사용되는 자왜 재료는 외부에서 자기장이 인가되면 그 자기장의 크기에 비선형적인 크기만큼의 기계적 변위를 발생시키는 재료로서 압전소자에 비해 작은 크기의 에너지로도 동등 이상의 고출력을 구현할 수 있고, 내구성이나 온도, 사용 환경 등에서 강유전체 세라믹보다 월등한 우수성을 제공한다. 자왜소자의 대표적인 재료로는 Nickel, Permalloy, Terfenol-D와 철이나 코발트로 이루어진 금속 합금 재료 등이 있다[3-6].

자왜형 초음파 트랜스듀서도 자왜소자부와 도파봉으로 구성되는데, 우수한 고출력 트랜스듀서를 구현하려면, 소자에서 발생되어진 변위를 증폭시켜서 방사매질로 전달하는 도파봉이 주어진 자왜소자의 특성에 맞도록 최적설계 되어야 한다. 도파봉은 단면적이 증가 또는 감소하는 비에 따라 현수선, 지수함수, conical, parabolic, hyperbolic, stepped 등으로 나눌 수 있다. Stepped 도파봉은 변위 증폭도는 우수하지만 지나친 응력 집중으로 인해서 고출력이 요구되는 곳에는 적용이 불가능하고, 현수선과 지수함수 도파봉은 변위 증폭도는 stepped 도파봉에 비해 떨어지나 안정성이 상대적으로 우수하여 고출력이 요구되는 곳에 많이 사용되고 있다[7]. 도파봉을 설계하는 방법으로는 도파봉의 평형 상태 파동 방정식을 이용하여 공진을 위한 도파봉의 길이를 수학적으로 결정하는 방법[8,9], 도파봉이 회로의 트랜스포머 역할과 유사하다는 것을 이용하여 간단한 등가회로법으로 설계하는 방법[10,11], 그리고 단면적 차이, 곡률 등으로 인한 오차를 줄이고 정확성을 높이기 위하여 유한 요소법을[7] 이용하는 세 가지 방법이 주종을 이루고 있다.

본 연구에서는 압전형 초음파 트랜스듀서보다 월등한 우수성을 제공할 수 있는 자왜형 초음파 트랜스듀서를 설계 및 제작하였다. 먼저 중심 주파수 20 kHz 이상을 가지는 Fe-Co-V 합금의 자왜소자를 제작하고, 자왜소자와 일치하는 공진 주파수를 가지는 현수선 및 지수함수 도파봉에 대해서 파동 방정식을 이용하여 이론적으로 해석하였다. 이와 더불어 유한요소 상용도구인 ANSYS를 이용하여 도파봉을 해석하고 이론적 해석의 타당성을 검증하였다. 나아가 해석되어진 결과를 바탕으로 자왜형 초음파 트랜스듀서를 제작하여 성능을 측정하였다.

## II. 자왜형 초음파 트랜스듀서 해석

본 연구에서 설계 및 해석하고자 하는 자왜형 초음파 트랜스듀서는 그림 1에서 보는 바와 같이 전기적 에너지를 기계적 변위로 변환하는 자왜소자와 자왜소자에서 발생되어진 기계적 변위를 증폭시켜서 방사매질로 전달하는 도파봉의 두 부분으로 이루어져 있다. 그리고 전체 초음파 트랜스듀서는 자왜소자와 도파봉 각각이 동일한 공진 주파수에서 1/2파장 길이 진동모드를 가지도록 설계하였다. 따라서 본 연구에서는 먼저 자왜소자를 제작하여 공진 특성을 분석하고, 다음으로 자왜소자의 공진 주파수와 일치하는 현수선 및 지수함수 도파봉을 해석하고자 한다.

### 2.1. 자왜소자 설계 및 해석

본 연구에 사용되는 자왜재료로는 박판 형태로 적층된 Fe-Co-V 금속 합금을 사용하였다. Fe-Co-V 금속 합금 자왜소자는 금속계 자왜소자 중에서 가장 높은 포화자왜값을 갖고, 가장 높은 큐리(curie)온도를 가지며 전기저항이 작아서 자기이력손실이 적다는 장점을 가지는 반면 소재가격이 비싸고 가공이 어렵다는 단점을 가진다. 본 연구에서는 선행 연구결과를[12,13] 바탕으로 공진 주파수 20 kHz 이상을 가지는 Fe-Co-V 금속 합금 자왜소자의 대략적인 치수를 결정하고 제작하였다. 제작되어진 자왜소자의 치수를 그림 2에 나타내었다. 제작된 자왜소자에 1.5 mm 두께를 가지는 동선 코일을 20회 감고, 6.0 A<sub>rms</sub> 전류를 인가하여 (입력 자장 세기는 약 1.41 kA/m), 가속도 센서, 오실로스코프, 주파수 계수기를 이용하여 공진 특성을 분석한 결과 자왜소자의 공진 주파수는 21.3 kHz이었다.

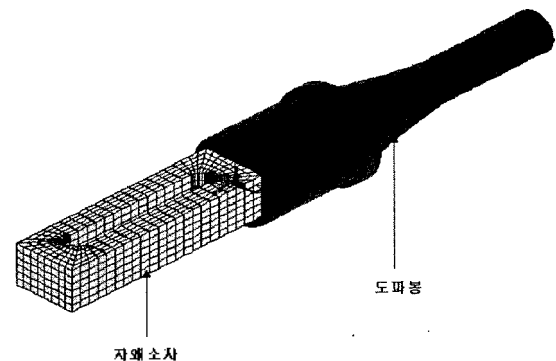


그림 1. 자왜소자를 이용한 초음파 트랜스듀서의 유한요소 모델  
Fig. 1. Finite element model of the ultrasonic transducer with the magnetostrictive material.

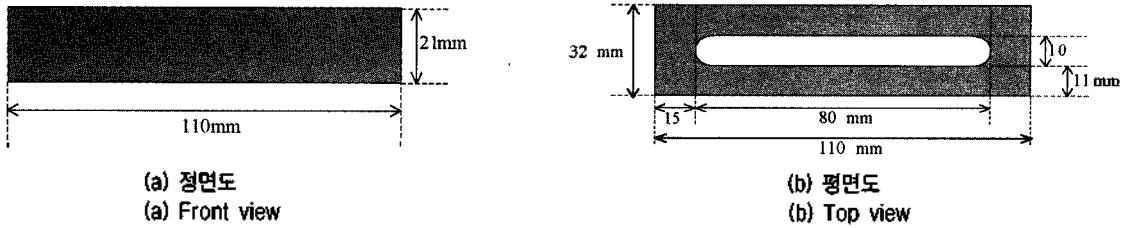


그림 2. 공진 주파수 21.3 kHz를 가지기 위한 자외소자의 치수  
 Fig. 2. Dimensions of the magnetostrictive material for 21.3 kHz resonance frequency.

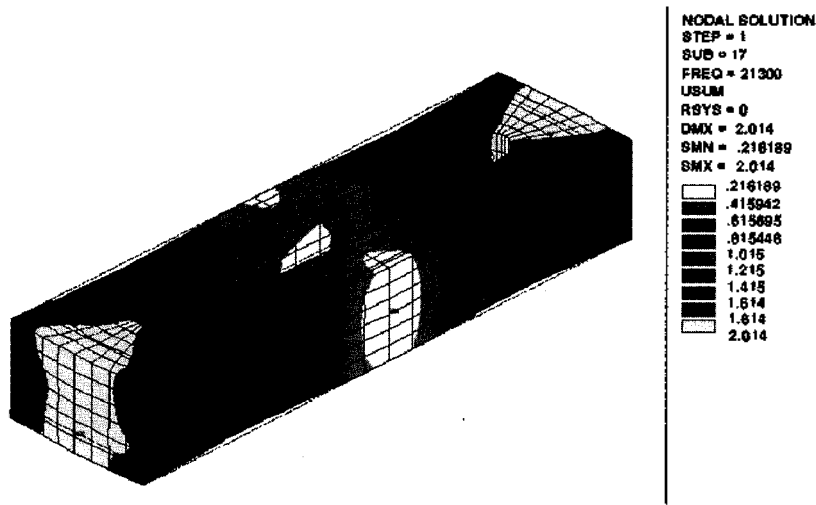


그림 3. 자외소자의 공진 주파수 및 진동형태  
 Fig. 3. Resonance frequency and mode shape of the magnetostrictive material.

다음으로 유한 요소 상용도구인 ANSYS를 이용하여 정해진 자외소자의 치수와 공진 주파수 21.3 kHz에 알맞은 Fe-Co-V 합금의 물성을 결정하였는데, 영률은 225 GPa, 밀도는 8418 kg/m<sup>3</sup>, 포아송비는 0.33이었다. 그림 3에 정해진 치수와 물성을 대입하여 유한요소 해석한 자외소자의 1/2파장 길이 진동모드와 공진 주파수를 나타내었다.

## 2.2. 도파봉 해석

도파봉은 자외소자에서 발생한 기계적 변위를 증폭시켜서 방사 매질로 전달하는 역할을 수행한다. 자외소자의 공진 주파수가 정해지면, 자외소자와 일치하는 공진 주파수를 가지도록 도파봉을 설계하여야 초음파 트랜스듀서가 최대 효율을 가진다[7]. 본 연구에서는 먼저 변위 증폭도가 우수하다고 알려진 현수선 및 지수함수 도파봉에 대해서 이론적으로 해석하였다. 다음으로 유한요소 상용도구인 ANSYS를 이용하여 도파봉을 해석하여 이론적 해석의 타당성을 검증하였다.

### 2.2.1 파동 방정식을 이용한 이론적 해석

도파봉의 구동 주파수는 도파봉 전체의 길이에 의해 결

정되며, 길이 결정의 이론적 해석은 양단이 서로 다른 단면적을 갖는 길이 1인 바 (bar)의 종진동 해석과 동일하게 이루어진다. 그림 4에 서로 다른 단면적을 갖는 간단한 형태의 도파봉을 나타내었다. 길이 방향 (x)으로 작용하는 힘  $F$ 는 Hooke의 법칙에 의해서 식 (1)로 표현된다[14].

$$F = ES(x) \frac{\partial u}{\partial x} \quad (1)$$

여기서,  $E$ 는 영률,  $S(x)$ 는 길이 방향 임의의 지점(x)에

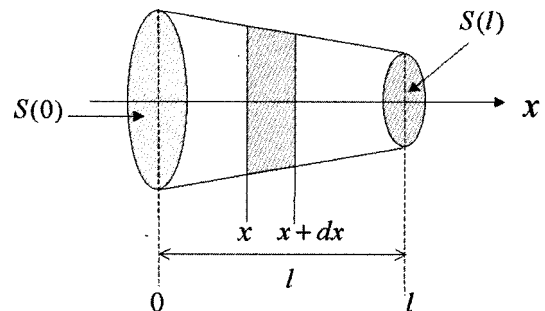


그림 4. 단면적이 서로 다른 도파봉  
 Fig. 4. Acoustic horn with different cross-sectional areas.

서의 도파봉 단면적,  $u$ 는 변위이다.

그림 4에서 미소요소  $dx$ 에 작용하는 힘의 평형 방정식은 식 (2)와 같다.

$$dF = \left( F + \frac{\partial F}{\partial x} dx \right) - F = \frac{\partial F}{\partial x} dx$$

$$= \rho S(x) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} dx \quad (2)$$

여기서,  $\rho$ 는 밀도이다.

식 (1)과 (2)로부터 길이 방향의 운동 방정식은 식 (3)과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( ES(x) \frac{\partial u}{\partial x} \right) = \rho S(x) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (3)$$

식 (3)을 정리하면 식 (4)와 같이 단면적의 함수를 포함하는 도파봉의 파동 방정식이 된다.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{1}{S(x)} \frac{\partial S(x)}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (4)$$

여기서,  $c$ 는 재료의 음속이고 식 (5)와 같다.

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (5)$$

선행 연구결과에 따르면 도파봉 단면적이 변하는 형태가 현수선일 경우 단면적  $S(x)$ 의 해는 식 (6)과 같고 지수함수일 경우는 식 (7)과 같다[10].

$$S_{cat}(x) = S(l) [\cosh a(x-l)]^2 \quad (6)$$

$$S_{exp}(x) = S(0) \text{Exp}[-2bx] \quad (7)$$

여기서,  $S(0)$ 는 도파봉 시작단의 단면적,  $S(l)$ 은 도파봉 끝단의 단면적,  $a$ ,  $b$ 는 flare 상수로서 도파봉 시작단과 끝단의 단면적 및 도파봉 길이  $l$ 로부터 계산할 수 있는 상수이다.

따라서 식 (6)과 (7)을 식 (4)에 대입하면 현수선 및 지수함수 도파봉의 변위 해는 각각 식 (8), (9)와 같다.

$$u_{cat}(x) = A \frac{\text{Exp}[a - \sqrt{a^2 - k^2}]x}{1 + \text{Exp}[2a(x-l)]}$$

$$+ B \frac{\text{Exp}[a + \sqrt{a^2 - k^2}]x}{2\sqrt{a^2 - k^2}(1 + \text{Exp}[2a(x-l)])} \quad (8)$$

$$u_{exp}(x) = \text{Exp}[bx] \{ C \text{Exp}[\sqrt{b^2 - k^2}x] + D \text{Exp}[-\sqrt{b^2 - k^2}x] \} \quad (9)$$

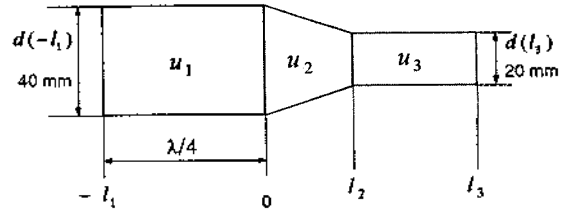


그림 5. 도파봉의 이론적 해석 모델  
Fig. 5. Theoretical analysis model of the acoustic horn.

여기서,  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ 는 경계조건에 의해서 구하여지는 상수이고  $k$ 는 파수이다. 따라서 식 (8)과 (9)에서 경계조건을 만족하는 해를 구하면 도파봉 길이에 대한 공진 주파수, 혹은 주어진 주파수를 만족하는 도파봉 길이  $l$ 을 쉽게 구할 수 있다.

본 연구에서 해석 및 설계하고자 하는 도파봉은 그림 5에서 보는 바와 같이 단면적이 일정한 bar 2개와 현수선 혹은 지수함수 형태로 단면적이 변하는 bar의 세 부분으로 이루어져있다. 그림 5에서  $d$ 는 직경,  $\lambda$ 는 파장이다. 본 연구에서는 현수선 형태에 대해서 이론적 해를 구하고 지수함수 형태에 대해서는 결론식을 제시하고자 한다.

식 (4)의 파동 방정식으로부터 그림 5와 같은 구조를 가지는 현수선 도파봉의 변위를 식 (10), (11), (12)과 같이 세 부분으로 가정하였다.

$$u_1(x) = A \cos kx + B \sin kx; -l_1 \leq x \leq 0 \quad (10)$$

$$u_2(x) = C \frac{\text{Exp}[a - ik_1]x}{1 + \text{Exp}[2a(x-l_2)]}$$

$$+ D \frac{\text{Exp}[a + ik_1]x}{2ik_1(1 + \text{Exp}[2a(x-l_2)])}$$

$$; 0 \leq x \leq l_2 \quad (11)$$

$$u_3(x) = E \cos kx + F \sin kx; l_2 \leq x \leq l_3 \quad (12)$$

여기서,  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ ,  $E$ ,  $F$ 는 경계조건에 의해 구해지는 상수이고,  $k_1 = \sqrt{k^2 - a^2}$ 이다. 경계조건으로도 파봉 양끝단이 자유상태이고, 세 개의 bar의 경계점에서는 변위와 응력이 연속이어야 한다는 조건을 적용하였다. 그리고 도파봉 끝단에서 변위가 최대이기 위해서 그림 5의 '0' 지점에 파절점 (nodal point)이 위치하여야 한다는 조건을 대입하였다[7]. 따라서 아래와 같이 6개의 경계조건

- (i)  $u_1(-l_1) = 0$
- (ii)  $u_1(0) = u_2(0) = 0$
- (iii)  $u_1'(0) = u_2'(0)$
- (iv)  $u_2(l_2) = u_3(l_2)$

$$(v) u_2'(l_2) = u_3'(l_2)$$

$$(vi) u_3'(l_3) = 0$$

들을 식 (10), (11), (12)의 도파봉 해에 적용하면,  $A=0$ ,  $l_1 = \lambda/4$ ,  $C = -\frac{k(1 + \text{Exp}[-2al_2])}{i2k_1} B$ ,  $D = -i2k_1 C$ ,  $u_1(x) = B \sin kx$  이고, 식 (13) ~ (15)와 같은  $B, E, F$ 에 관한 식이 유도된다.

$$\frac{kB}{2k_1} (1 + \text{Exp}[-2al_2]) \text{Exp}[al_2] \sin k_1 l_2 - E \cos kl_2 - F \sin kl_2 = 0 \tag{13}$$

$$\frac{B}{2} (1 + \text{Exp}[-2al_2]) \text{Exp}[al_2] \cos k_1 l_2 + E \sin kl_2 - F \cos kl_2 = 0 \tag{14}$$

$$-E \sin kl_3 + F \cos kl_3 = 0 \tag{15}$$

식 (13) ~ (15)를  $B, E, F$ 의 행렬로 표현하면 식 (16)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{2k_1} (1 + \text{Exp}[-2al_2]) \text{Exp}[al_2] \sin k_1 l_2 \\ \frac{1}{2} (1 + \text{Exp}[-2al_2]) \text{Exp}[al_2] \cos k_1 l_2 \\ 0 \\ -\cos kl_2 & -\sin kl_2 \\ \sin kl_2 & -\cos kl_2 \\ -\sin kl_3 & \cos kl_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B \\ E \\ F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{16}$$

식 (16)이 유일 해를 갖기 위한 조건은 계수행렬의 행렬식 (determinant)이 '0'이어야 하므로 이를 정리하면 식 (17)과 같이 파수  $k$ 와 도파봉 길이  $l_2, l_3$  대한 함수가 된다.

$$k_1 \cot k_1 l_2 - k \tan k(l_3 - l_2) = 0 \tag{17}$$

그러므로 도파봉의 재질, 단면적(또는 직경)비, 공진 주파수가 주어지면 식 (17)을 만족시키는  $l_2, l_3$ 의 조합을 구할 수 있고, 반대로  $l_2, l_3$ 가 주어지면 도파봉의 공진 주파수를 구할 수 있다.  $k_1 = \sqrt{k^2 - a^2} > 0$ 의 차단 주파수를 넘어서는  $l_2$  길이에 따른  $l_3 - l_2$  길이 결과를 그림 6에 나타내었다. 수치해석시 도파봉의 재질로는 영률 245 GPa, 밀도 8,120 kg/m<sup>3</sup>, 포아송비 0.3을 가지는 스테인리스 스틸을, 공진 주파수는 21.3 kHz, 직경비  $d(-l_1)/d(l_3) = 2$ 를 적용하였다.

다음으로 지수함수 도파봉의 해를 적용하고, 동일한 해석과정과 경계조건을 적용하여 지수함수 도파봉에 대

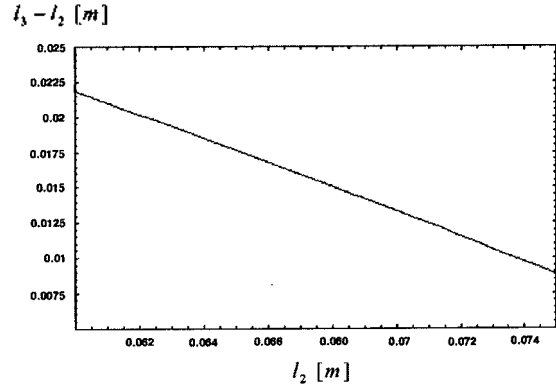


그림 6. 현수선 도파봉의  $l_2$  길이 변화에 따른  $l_3 - l_2$  길이 (Theoretical)

Fig. 6. Theoretical length of  $l_3 - l_2$  with varied length of  $l_2$  for the catenoidal acoustic horn.

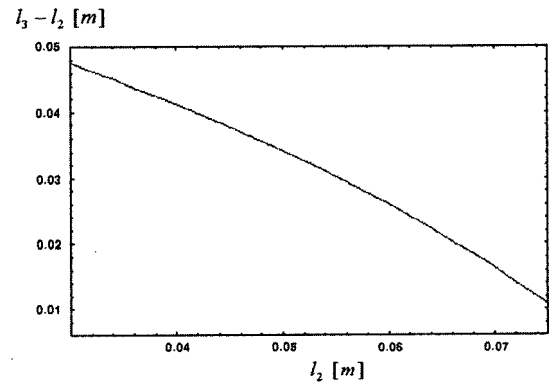


그림 7. 지수함수 도파봉의  $l_2$  길이 변화에 따른  $l_3 - l_2$  길이 (Theoretical)

Fig. 7. Theoretical length of  $l_3 - l_2$  with varied length of  $l_2$  for the exponential acoustic horn.

해서 계산한 해는 식 (18)과 같다.

$$k \tan k(l_3 - l_2) - b - k_1 \cot k_1 l_2 = 0 \tag{18}$$

여기서,  $k_1 = \sqrt{k^2 - b^2}$ 이고,  $b$ 는 지수함수 도파봉의 flare 상수이다.

그림 7에 차단 주파수를 넘어서는 지수함수 도파봉의  $l_2$  길이에 따른  $l_3 - l_2$  길이 결과를 나타내었다. 그림 6과 그림 7의 결과를 보면, 이론적 해는 차단 주파수를 넘어서는 범위에서 해석가능하고[15], 현수선 및 지수함수 도파봉의 경우 모두  $l_2$  길이가 길어짐에 따라 공진 주파수 21.3 kHz를 만족하기 위한  $l_3 - l_2$  길이는 짧아짐을 알 수 있다. 그리고 동일한  $l_2$  길이를 가지는 경우,  $l_3 - l_2$ 의 길이는 지수함수 도파봉이 현수선 도파봉보다 길어야 함을 알 수 있다.

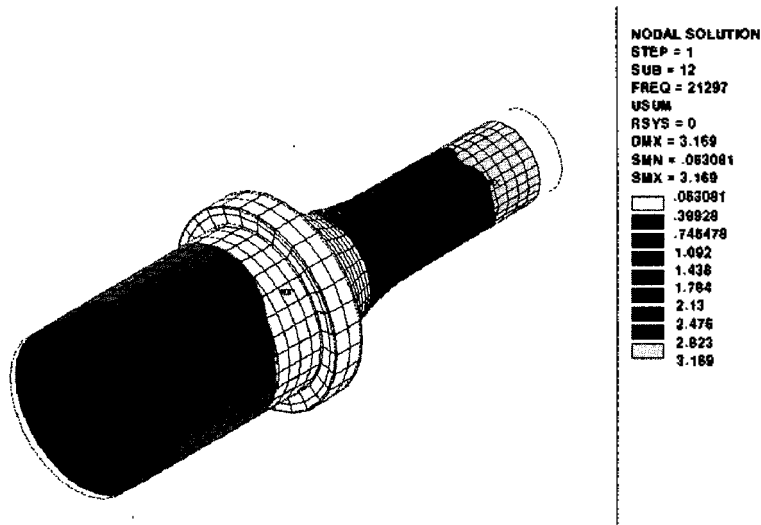


그림 8. 도파봉의 1/2파장 진동형태  
Fig. 8. Half wavelength mode shape of the acoustic horn.

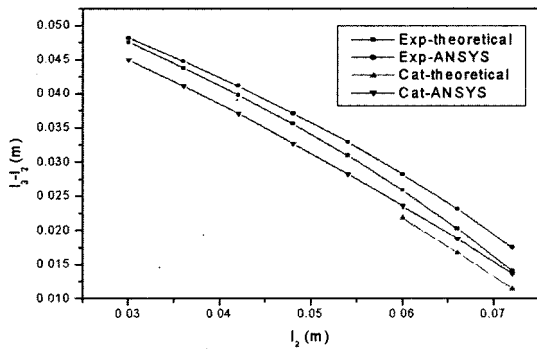


그림 9. 공진 주파수 21.3 kHz를 만족하는 도파봉  $l_2$  길이에 따른  $l_3-l_2$  길이(ANSYS and Theoretical)  
Fig. 9. Length of  $l_3-l_2$  with varied length of  $l_2$  for 21.3 kHz resonance frequency(ANSYS and Theoretical).

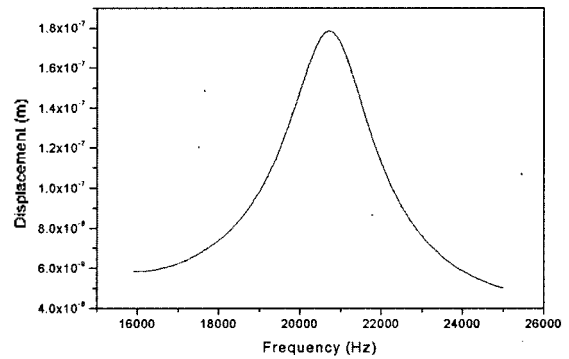


그림 10. 주파수에 따른 도파봉 끝단의 변위  
Fig. 10. End displacement of the acoustic horn with frequency.

2.2.2. ANSYS를 이용한 유한요소 해석

이론적 해석 결과를 검증하기 위해서 유한요소 상용도구인 ANSYS를 이용하여 도파봉을 해석하였다. 해석 모델은 실제 적용상황을 고려하여 이론식 모델보다 구체적으로 묘사하였고, 도파봉의 파절점 지점에 해당하는 부분은 실제 제작시 덮개를 씌워서 고정하는 부분으로서 이론모델에 비해 더 강화되었고, 그 규격의 길이는 8 mm, 직경은  $d(-l_1)$ 의 1.2배가 되도록 하였다. 나머지 규격은 이론 모델의 규격과 일치시켰다. 그리고 도파봉의 재료로는 이론적 해석에서 사용한 스테인리스 스틸을 사용하였다.

앞서 언급한 바와 같이 초음파 트랜스듀서가 고효율을 가질려면 자왜소자의 공진 주파수와 도파봉의 공진 주파수가 일치하여야 한다. 그리고 도파봉 역시 자왜소자와

마찬가지로 1/2파장 길이 진동모드를 이용한다. 중앙에 노드 (node)가 위치하고 양끝단이 줄어드는 변형을 일으키는 현수선 도파봉의 1/2파장 길이 진동모드를 그림 8에 나타내었다. 이때 도파봉의 치수는  $l_2$ 가 30 mm,  $l_3-l_2$ 가 45 mm이다.

자왜소자의 공진 주파수 21.3 kHz와 일치하는 도파봉의  $l_2$ 길이에 따른  $l_3-l_2$ 길이를 유한 요소 상용도구인 ANSYS를 이용하여 결정하였다. 길이 결정시  $l_1$ 길이는 이론식에서 구한 값을 대입하였고, 주어진 공진 주파수 21.3 kHz를 만족하는  $l_2$ 길이에 대한  $l_3-l_2$ 길이 변화를 그림 9에 나타내었다. 해석 결과를 보면, 현수선이나 지수함수 도파봉 모두 이론적인 결과와 거의 일치하는 경향성을 보임을 알 수 있고,  $l_2$ 길이가 길어짐에 따라 공진 주파수 21.3 kHz를 만족하기 위한  $l_3-l_2$ 길이는 짧아져

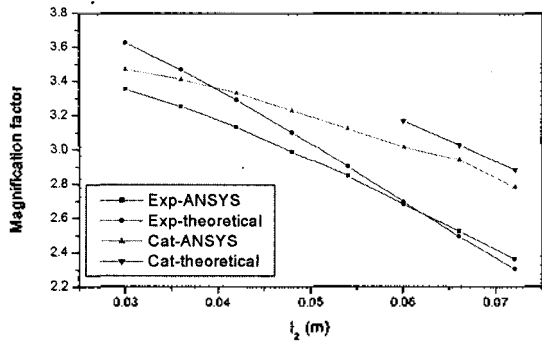


그림 11. 도파봉의 변위 증폭도  
Fig. 11. Magnification of displacement for an acoustic horn.

야 함을 알 수 있다. 그리고  $l_2$  길이가 동일한 경우 공진 주파수 21.3 kHz를 만족하는  $l_3 - l_2$  길이는 현수선 도파봉이 지수함수 도파봉보다 짧음을 알 수 있다. 그림 9에서 이론 계산결과와 유한 요소해석 결과의 차이는 파절점 지점의 직경이 이론 모델과 유한요소 모델에서 다르기 때문인 것으로 판단된다.

이상에서 구한 도파봉 규격의 타당성을 밝히기 위해 그림 8의 도파봉 규격과 그림 2의 자외소자 규격이 결합된 그림 1의 트랜스듀서에서 자외소자에 일정한 힘을 인가하여 주파수에 따른 도파봉 끝단에서 변위를 계산하였다. 그림 10의 결과를 보면 최대 변위가 나타나는 주파수는 자외소자와 도파봉 각각이 가지는 공진 주파수 21.3 kHz와 거의 일치하는 20.8 kHz이다.

이상의 결과로 볼 때 도파봉의 이론적 해석 결과와 ANSYS를 이용한 유한요소 해석 결과가 잘 일치함을 알 수 있고, 따라서 이론적 해석법의 타당성을 검증하였다. 이론적 해석법은 식 (17)과 (18)로부터 빠른 시간내에 주어진 주파수를 만족시키는 도파봉 길이를 결정할 수 있다는 장점을 가지는 반면, 차단 주파수를 넘어서는  $l_2$  길이에 대해서 해석 가능하고 차단 주파수 이하의  $l_2$  길이에 대해서는 해석 불가능하다는 단점을 가진다. 그러므로 차단 주파수 이하의  $l_2$  길이에 대해서는 유한요소 해석법으로 도파봉을 해석 및 설계하여야 한다.

다음으로 도파봉의 변위 증폭도를 해석하였다. 여기서 변위 증폭도는  $\left| \frac{u(l_2)}{u(-l_1)} \right|$ 로 정의하였다. 자외소자에 인가되는 힘이 일정한 상태이기 때문에 변위 증폭도가 큰 도파봉이 끝단에서 변위도 더 크고 이는 결국 고출력 특성을 가진다고 할 수 있다. 그림 11의 해석 결과를 보면 현수선 도파봉이 지수함수 도파봉에 비해 변위 증폭도가 매우 큰 것을 알 수 있고,  $l_2$  길이가 짧을수록 더 큰 변위

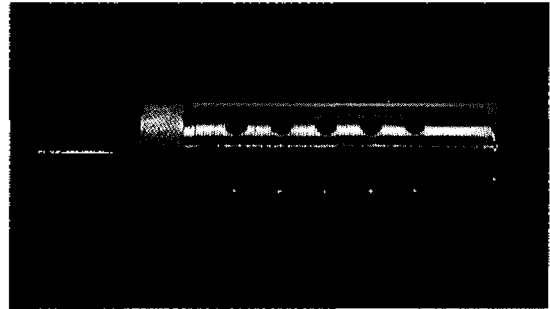


그림 12. 자외형 초음파 트랜스듀서의 사진  
Fig. 12. Photograph of the magnetostrictive ultrasonic transducer.

증폭도를 가진다. 그리고 차단 주파수에서 멀어질수록 이론적 해석 결과와 ANSYS에 의한 해석 결과가 더 잘 일치하였다.

### III. 자외형 초음파 트랜스듀서 제작 및 성능 측정

유한요소 해석 결과를 바탕으로 중심 주파수 20.8 kHz를 가지는 자외형 초음파 트랜스듀서를 제작하였다. 제작된 도파봉의 규격은 2장의 해석 결과를 바탕으로 현수선 형태로 제작하였고, 재질은 스테인리스 스틸을 사용하였다. 자외소자와 도파봉을 모두 결합한 자외형 초음파 트랜스듀서 사진을 그림 12에 나타내었다.

제작된 자외형 초음파 트랜스듀서의 주파수에 따른 음압 변화를 측정하였다. 측정시 오실로스코프 (LeCory,

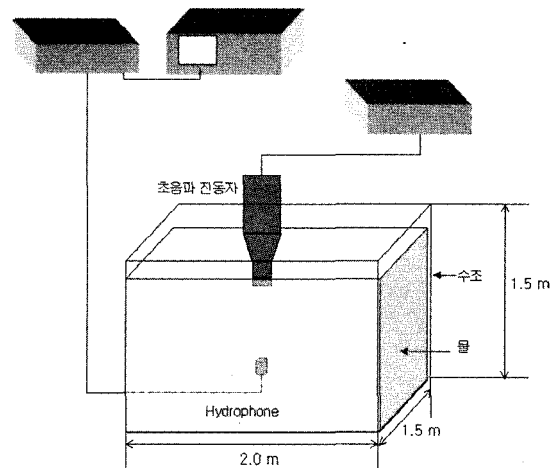


그림 13. 음압 및 beam pattern 측정 장치도  
Fig. 13. Schematic diagram of the measurement system of sound pressure and beam pattern.

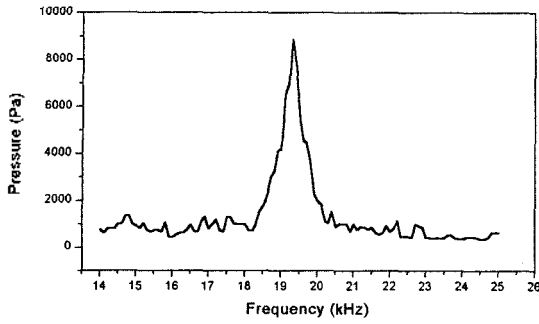


그림 14. 자왜형 초음파 트랜스듀서의 주파수에 따른 음압  
(입력 자장 세기=1.41 kA/m)  
Fig. 14. Sound pressure with frequency of the magneto-  
stictive ultrasonic transducer (Input magnetic field  
intensity=1.41 kA/m).

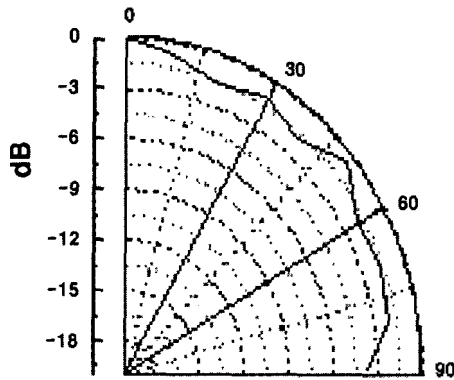


그림 15. 측정된 자왜형 초음파 트랜스듀서의 beam pattern  
Fig. 15. Measured beam pattern of the magnetostrictive  
ultrasonic transducer.

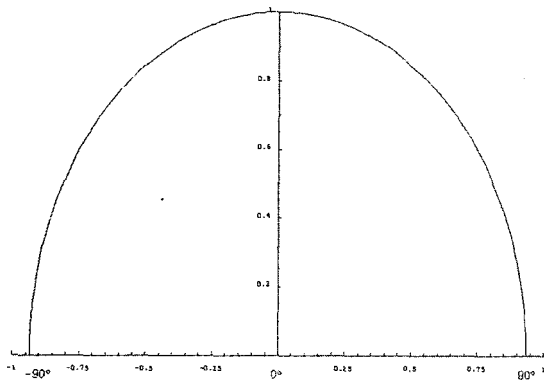


그림 16. 이론식에 의한 자왜형 초음파 트랜스듀서의 beam pattern  
Fig. 16. Theoretical beam pattern of the magnetostrictive  
ultrasonic transducer.

9310A), Hydrophone 10CT (G.R.A.S, Sound & Vibration), Charge Amplifier 12CB (G.R.A.S, Sound & Vibration), 전자 구동장치, 수조를 이용하였고, 측정 장치도를 그림 13에 나타내었다. 측정시 수조의 용량 제한으로 원거리 (far-field) 구간인 0.5 m 떨어진 지점에서 측정하였고,

원거리 구간에서의 음압은 거리에 반비례하므로 측정된 음압에 1/2을 곱하여 1 m 값으로 환산하였다. 그리고 반사파의 영향을 배제하기 위해서 오실로스코프에서 반사파가 도달하기 전의  $V_p - p$  값을 측정하였다. 그림 14에 주파수에 따른 1 m 떨어진 지점에서 자왜형 초음파 트랜스듀서의 음압 실효치를 나타내었다. 그림 14의 결과를 보면 자왜형 초음파 트랜스듀서의 공진 주파수는 19.3 kHz로서 ANSYS 해석 결과인 20.8 kHz와 약간 차이가 난다. 이는 ANSYS 해석에서는 물을 고려하지 않았고, 통상 트랜스듀서가 수중에서는 공기중에서 보다 공진 주파수가 약간 떨어지는 것에서 기인한다고 할 수 있다. 그리고 공진 주파수 19.3 kHz에서 최대 음압의 실효치는 약 8,860 Pa로서 199 dB (re 1  $\mu$  Pa at 1 m)의 SPL (Sound Pressure Level)을 가진다.

더불어서 자왜형 초음파 트랜스듀서의 끝단에서 하이드로폰까지 0.5 m 거리를 유지하고, 하이드로폰을 0°에서 90°까지 10°간격으로 모터로 이동시키면서 음압을 측정하여 구한 빔 패턴을 그림 15에 나타내었다. 측정 시 구동 주파수는 최대 음압을 나타내는 19.3 kHz이다. 측정 결과를 보면, 제작된 자왜형 초음파 트랜스듀서는 -3 dB 내에서 무지향성을 가짐을 알 수 있고, 이는 주어진 주파수와 반경  $a$ 는 10 mm를 아래의 식 (19)에 대입하여 구한 그림 16의 빔 패턴과 거의 일치하는 특성이다.

$$H(\theta) = \left[ \frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \right] \quad (19)$$

#### IV. 결론

본 연구에서는 자왜형 초음파 트랜스듀서의 도파봉을 이론적으로 해석하고 그 타당성을 유한요소 해석법으로 검증하였다. 이론적 해석법은 유한 요소 해석법에 비해서 빠른 시간내에 주어진 주파수를 만족시키는 도파봉 길이를 결정할 수 있다는 장점을 가지는 반면, 차단 주파수를 넘어서는 범위에서 해석 가능하고 차단 주파수 이하의 범위에서는 해석 불가능하다는 단점을 가진다. 그러므로 차단 주파수 이하의 범위에서는 유한 요소 해석법으로 도파봉을 설계 및 해석하는 것이 바람직하다. 그리고 현수선 도파봉이 지수함수 도파봉에 비해서 더 큰 변위 증폭을 가져왔고, 현수선 형상이 짧을수록 더욱 큰 변위를 증폭시킬 수 있었다. 따라서 현수선 형상이 짧은 도파봉을 적용하는 것이 고출력 초음파 트랜스듀서를 구현하



는데 훨씬 유리함을 알 수 있었다.

나아가 유한요소 해석법의 결과를 바탕으로 공기 중에서 공진 주파수 20.8 kHz를 가지는 자외형 초음파 트랜스듀서를 제작하여 성능을 측정하였다. 자외형 초음파 트랜스듀서는 수중에서 19.3 kHz의 공진 주파수와 199 dB의 최대 SPL을 가지고 무지향성의 특성을 보였다.

### 참고 문헌

1. Y. Watanabe and E. Mori, "A study on a new flexural-mode transducer-solid horn system and its application to ultrasonic plastics welding," *Ultrasonics*, **34**, pp. 235-238, 1996.
2. A. Lal and R. M. White, "Silicon microfabricated horns for high power ultrasonics," *Sensors and Actuator A*, **54**, pp. 542-546, 1996.
3. O. B. Wilson, *Introduction to Theory and Design of Sonar Transducers* (Peninsula, Los Altos, 1988), chap. 7, pp. 126-134.
4. M. B. Moffett, A. E. Clark, M. Wun-Fogle, J. Linberg, J. P. Teter, and E. A. McLaughlin, "Characterization of Terfenol-D for magnetostrictive transducers," *J. Acoust. Soc. Am.*, **89**(3), pp. 1448-1455, 1991.
5. F. Claeysen, N. Lhermet, and G. Grosso, "Giant magnetostrictive alloy actuators," *Proceedings of the first international meeting on magnetoelastic effects and applications*, Naples, Italy, 24-26 May, 1993.
6. L. Kvamsjo and G. Engdahl, "Differential incremental measurements of magnetoelastic parameters of highly magnetostrictive materials," *Proceedings of the first international meeting on magnetoelastic effects and applications*, Naples, Italy, 24-26 May, 1993.

7. S. G. Amin, M. H. M. Ahmed, and H. A. Youssef, "Computer-aided design of acoustic horns for ultrasonic machining using finite-element analysis," *Journal of Materials Processing Technology*, **55**, pp. 254-260, 1995.
8. E. Eisner, "Complete solution of the Webster horn equation," *J. Acoust. Soc. Am.*, **41**(4), pt. 2, pp. 1126-1138, 1967.
9. S. Lin, "Study on the longitudinal-torsional composite mode exponential ultrasonic horns," *Ultrasonics*, **34**, pp. 757-762, 1996.
10. W. P. Mason and R. F. Wick, "A barium titanate transducer capable of large motion at an ultrasonic frequency," *J. Acoust. Soc. Am.*, **23**(2), pp. 209-214, 1951.
11. P. Lesniewski, "Discrete component equivalent circuit for Webster's horns," *Applied Acoustics*, **44**, pp. 117-124, 1995.
12. V. F. Nozdreva, *Ultrasound in industrial processing and control*, Consultants Bureau, New York, 1964.
13. Z. Kaczkowski, "Piezomagnetic device," *Proceedings of the first international meeting on magnetoelastic effects and applications*, Naples, Italy, 24-26 May, pp. 177-183, 1993.
14. L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens, and J. V. Sanders, *Fundamentals of Acoustics*, John Wiley & Sons, Inc., New York, Chap. 3-5, pp. 58-121, 1982.
15. L. L. Beranek, *Acoustics*, American Institute of Physics, Inc., New York, Chap. 9, pp. 259-284, 1988.

---

### 저자 약력

---

- 강 국 진 (Kukjin Kang)  
한국음향학회지 제20권 제4호 참조
- 노 용 래 (Yongrae Roh)  
한국음향학회지 제20권 제4호 참조