

볼트 체결형 란주반 초음파 트랜스듀서의 프렌지 포인트 최적화를 위한 실험적 방법 제안

Suggestion of an experimental method for optimization of flange point of a bolt-clamped Langevin-type ultrasonic transducer

김정순,¹ 김해운,² 김무준^{2†}

(Jungsoon Kim,¹ Haeun Kim,² and Moojoon Kim^{2†})

¹동명대학교 전기공학과, ²부경대학교 물리학과

(Received May 1, 2021; accepted June 8, 2021)

초 록: 강력초음파 분야에 있어서, 트랜스듀서의 고정을 위한 프렌지의 위치설정은 트랜스듀서의 변환효율에 큰 영향을 주는 중요한 요소이다. 본 연구에서는 볼트 체결형 란주반 초음파 트랜스듀서의 공진모드에 따른 프렌지의 설치 위치를 결정하기 위한 실험적 방법을 제안하였다. 제안된 방법에서는 반원형 썸기 형태의 지그를 제작하여 트랜스듀서의 측면을 따라 이동하며 지그에 일정한 압력을 가한 후 트랜스듀서의 진동특성을 분석하였다. 압력을 가하는 위치에 따른 트랜스듀서의 입력 어드미턴스의 변화를 분석하여 프렌지의 최적의 위치를 결정할 수 있었다. 이 위치들은 메이슨 등가회로를 적용하여 계산한 공진 주파수 및 전송선로 모델 해석으로부터 계산한 각 공진 모드에 대한 입자속도 분포로부터 예측한 진동 모드의 절의 위치와 좋은 대응을 보이고 있어 본 연구에서 제안된 방법의 유효성을 확인할 수 있었다.

핵심용어: 란주반 초음파트랜스듀서, 프렌지, 반원형 썸기 지그, 진동분포, 등가회로, 압전진동자

ABSTRACT: In the power ultrasound fields, the flange position for fixing the transducer is an important factor influencing on electro-mechanical efficiency of the transducer. We suggested a practical method that can determine the installation position of the flange for different resonance modes of the bolt-clamped type Langevin ultrasonic transducer. A semicircular wedge-shaped jig was manufactured and moved along the lateral surface of the transducer. The vibration characteristics were examined after a constant pressure was applied to the semicircular wedge-shaped jig. By observing the change of the input admittance of the transducer depending on the position of the pressure application, the optimum position for the flange installation could be determined. The resonant modes of the transducer were calculated by a Mason's equivalent circuit, and the particle velocity distribution for each resonance mode was calculated by a transmission line model. Since the optimum positions determined from an experimental result show a good correspondence with the node positions of the vibration modes calculated by the transmission line model, the validity of the suggested method was verified.

Keywords: Langevin-type ultrasonic transducer, Flange, Semicircular wedge-shaped jig, Vibration distribution, Equivalent circuit, Piezoelectric vibrator

PACS numbers: 43.38.Fx, 43.38.Ar

†Corresponding author: Moojoon Kim (kimmj@pknu.ac.kr)

Department of Physics, Pukyong National University, 45, Yongso-ro, Nam-Gu, Busan 48513, Republic of Korea

(Tel: 82-51-629-5572, Fax: 82-51-629-5549)

“이 논문은 2021년도 한국음향학회 춘계학술대회에서 발표하였던 논문임”



Copyright©2021 The Acoustical Society of Korea. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

볼트 체결형 란주반 초음파 트랜스듀서는 초음파 용접기 혹은 초음파 균질기 등과 같은 초음파의 동력적인 응용분야에서 매우 널리 사용되고 있다.^[1-3] 이러한 란주반형 초음파 트랜스듀서는 시스템에 고정해서 사용되는데 이때 트랜스듀서의 진동에 영향을 최소로 미치는 부분을 찾아 프렌지를 만들어 고정하는 것이 일반적이다.^[4-6] 따라서 프렌지의 설치 위치는 진동속도 혹은 진동 변위 분포에서 절(node)의 위치가 된다. 그러나 면내진동을 하는 란주반형 트랜스듀서의 금속블럭 표면에서 종진동의 절을 정확히 예측하는 것은 매우 어렵다.^[7-10] 왜냐하면 물성이 상이한 금속블럭, 금속볼트 및 압전 세라믹이 혼재되어 있으며 면적이 일정치 않은 구조로 체결되어 있어 등가회로 등을 사용한 이론적 해석으로는 진동 분포의 정확한 예측이 어렵기 때문이다. 또한 유한 요소 해석을 사용할 경우 구성 물질에 대한 정확한 물성치가 확보되어야만 한다는 제약이 있다.

이러한 문제들을 극복하기 위한 해결책 중의 하나로 본 연구에서는 볼트 체결형 란주반 초음파 트랜스듀서를 고정하기 위한 프렌지의 위치를 최적화하는 실험적 방법을 제안하였다. 본 연구에서는 반원형 뼈기 형태의 지그를 제작하여 란주반형 트랜스듀서의 금속블럭 측면에 부착하고 지그의 띠 형태의 좁은 면적에 일정한 압력을 가하여 프렌지와 유사한 효과를 구현하였다. 압력이 가해지는 위치를 변화시켜가며 트랜스듀서의 전기적 단자에서 측정된 입력 어드미턴스의 변화를 측정하여 분석함으로써 진동에 최소의 영향을 주는 프렌지의 위치를 찾을 수 있었다.

II. 볼트 체결형 란주반 초음파 트랜스듀서에 대한 등가회로 해석

2.1 공진특성 해석

Fig. 1에 나타난 것과 같은 볼트 체결형 란주반 초음파 트랜스듀서의 공진 특성을 해석하기 위하여 Fig. 2와 같은 Mason의 등가회로를 사용하였다.^[11] Fig. 1의 초음파 트랜스듀서의 구조는 두께가 약 5

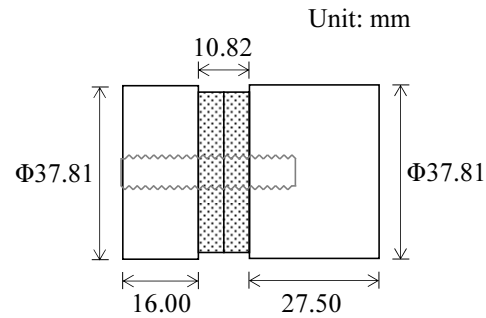


Fig. 1. Construction of the bolt-clamped Langevin-type ultrasonic transducer. Two disk-shaped piezoelectric ceramics with a thickness of 5 mm were layered that polarization directions faced each other. The layered piezoelectric vibrator is inserted between aluminum rods and it is clamped by a stainless steel bolt.

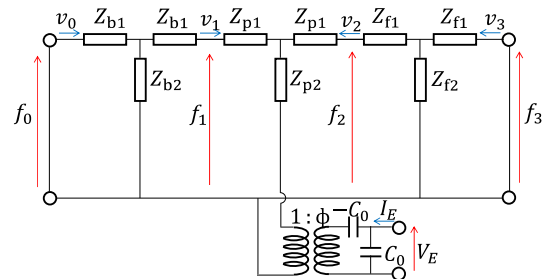


Fig. 2. (Color available online) Mason's equivalent circuit for the Langevin-type ultrasonic transducer. Z is the mechanical impedance of each elastic body, v is the particle velocity, and f is the force. V_E and I_E represent the voltage and the current at the electrical terminals, C_0 the clamped capacitance, ϕ the turn ratio of the transformer.

mm인 원판형의 압전 진동자 2 장을 분극방향이 서로 마주보도록 하여 두께가 각각 16.0 mm 및 27.5 mm 인 알루미늄 봉 사이에 삽입한 후 스테인리스 스틸 제 볼트로 고정되어있다. 등가회로 해석에 있어서, 분극방향을 서로 마주보게 한 고정된 2 장의 압전 진동자는 두께가 2배인 1 장의 압전 진동자와 거동이 일치하므로 제동용량이 2 배이고 두께가 2 배인 한 장의 압전 진동자로 등가 하여 해석할 수 있다. 여기서는 볼트 및 전극판의 영향은 무시하였는데 이는 정확한 공진 주파수의 파악이 목적이 아니라, 두께진동 공진 모드들의 주파수 영역을 파악하기 위한 해석이기 때문이다.

Fig. 2에 나타난 각 변수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Z_{b1} &= jZ_a \tan \frac{k_a l_b}{2}, \quad Z_{b2} = -jZ_a \operatorname{csc} k_a l_b, \\ Z_{f1} &= jZ_a \tan \frac{k_a l_f}{2}, \quad Z_{f2} = -jZ_a \operatorname{csc} k_a l_f, \\ Z_{p1} &= jZ_p \tan \frac{k_p l_p}{2}, \quad Z_{p2} = -jZ_p \operatorname{csc} k_p l_p, \end{aligned}$$

여기서 $Z_a = \rho_a c_a S$, $Z_p = \rho_p c_p S$, $k_a = \frac{2\pi f}{c_a}$, $k_p = \frac{2\pi f}{c_p}$ 이며, ρ_a 및 ρ_p 는 각각 알루미늄과 압전체의 밀도, c_a 및 c_p 는 각각 알루미늄과 압전체의 음속이다. S 는 단면적, l_b , l_f , 그리고 l_p 는 각각 뒷부분 알루미늄 봉의 길이, 앞부분 알루미늄 봉의 길이 및 압전진동자의 두께이다. k_a 및 k_p 는 각각 알루미늄과 압전체에서의 파수이다. 전기기계 변환 변압기의 권선비로 나타나는 ϕ 및 제동용량 C_0 는 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.^[11]

$$\phi = 4 \frac{e_{33} S}{l_p}, \quad (1)$$

$$C_0 = 4 \frac{\epsilon_{33}^S S}{l_p}, \quad (2)$$

여기서 e_{33} 및 ϵ_{33}^S 는 압전진동자의 압전 상수 및 유전율을 나타낸다. 또한 Fig. 2의 v_0 , v_1 , v_2 및 v_3 와 f_0 , f_1 , f_2 및 f_3 는 각 매질의 단면에서의 입자속도 및 힘을 나타내고 있다. 트랜스듀서의 양끝 단면에 음향매질이 없는 경우(자유단), f_0 및 f_3 는 모두 0이 된다. 등가 회로에서 전기단의 전류와 전압의 비 I_E/V_E 를 계산하여 입력어드미턴스를 구할 수 있다.

2.2 진동분포 해석

특정 공진 주파수에 대한 트랜스듀서의 진동속도 분포를 계산하기 위하여 다음과 같은 분포정수 행렬을 사용할 수 있다. 각 매질에서의 입자속도 및 힘의 관계는 다음과 같다.^[12]

$$\begin{bmatrix} f_x \\ v_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos k_a x & jZ_a \sin k_a x \\ j \frac{1}{Z_a \sin k_a x} & \cos k_a x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_0 = 0 \\ v_0 \end{bmatrix}, 0 \leq x < l_b$$

$$\begin{bmatrix} f_x \\ v_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos k_p x & jZ_p \sin k_p x \\ j \frac{1}{Z_p \sin k_p x} & \cos k_p x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ v_1 \end{bmatrix}, l_b \leq x < l_p$$

$$\begin{bmatrix} f_x \\ v_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos k_a x & jZ_a \sin k_a x \\ j \frac{1}{Z_a \sin k_a x} & \cos k_a x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_2 \\ v_2 \end{bmatrix}, l_p \leq x < l_f. \quad (3)$$

Eq. (3)에서 첫 번째 식은, 뒷부분의 알루미늄 봉에 대한 진동분포로, 트랜스듀서의 배면에 음향매질이 없다고 가정하므로 단면의 힘 f_0 는 0으로 두었다. 두 번째 식은 압전진동자에 대한 진동분포이며, 세 번째 식은 앞부분의 알루미늄 봉에 대한 진동분포를 계산하는 식이다. 여기서는 방사면의 입자속도로 규격화된 진동분포를 나타내기 위하여 $v_2 = 1$ 로 두고 계산하였다.

위의 세 식을 순차적으로 계산하여 각 탄성매질에서의 입자속도를 구하면 진동속도 분포를 구할 수 있다.

III. 실험방법

란주반 초음파 트랜스듀서를 고정하는 프레임의 효과를 구현하기 위하여 Fig. 3에 나타난 것과 같은 반원형 썩기 형태의 고정 지그를 제작하였다. Fig. 4(a)와 같이, 이러한 지그 1쌍을 바이스에 고정하여 트랜스듀서의 앞부분 알루미늄 봉의 측면에 압력을 가해 고정하도록 하였다. Fig. 4(b)와 같이, 압력을 가하는 부분(d)을 이동해 가며 트랜스듀서의 전기단자에서 입력어드미턴스를 측정하여 공진 특성의 변화를 관찰하였다. 이때 압력이 일정하게 인가되도록 바이스에 토크렌치를 사용하여 일정한 압력을 가하였다. 토크렌치에 의한 회전력과 이로 인해 바이스에 전달되는 축력, F , 사이에는 다음과 같은 관계가 있다.^[13]

$$T = k\phi F, \quad (4)$$

여기서 ϕ 는 볼트의 직경이고 k 는 토크계수로 0.15 ~ 0.2의 값을 가진다. 따라서 지그에 의해 트랜스듀서의 측면에 가해지는 압력 P 는 다음과 같이 주

어진다.

$$P = \frac{T}{k\phi A}, \tag{5}$$

여기서 A 는 트랜스듀서의 측면에 닿는 지그의 면적

이다. 본 연구에서는 토크를 $T = 7.3 \text{ Nm}$ 로 고정하였으며 바이스의 볼트직경은 $\phi = 12.6 \text{ mm}$, 지그와 닿는 면적은 $A = 38.63 \text{ mm}^2$, 마찰이 없는 경우로 간주하여 $k = 0.2$ 가 적용되었다. 따라서 트랜스듀서의 측면에 인가되는 압력은 약 $P = 75.0 \text{ MPa}$ 로 계산될 수 있다.

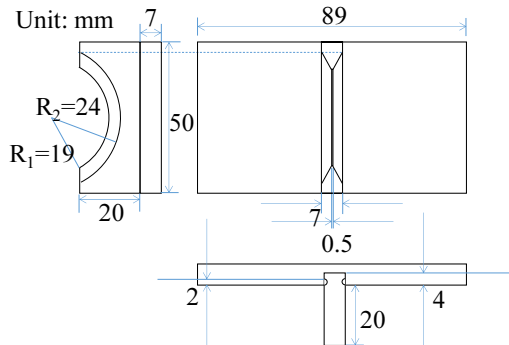


Fig. 3. (Color available online) Schematic of the semicircular wedge-shaped jig for fixing the bolt-clamped Langevin-type ultrasonic transducer.

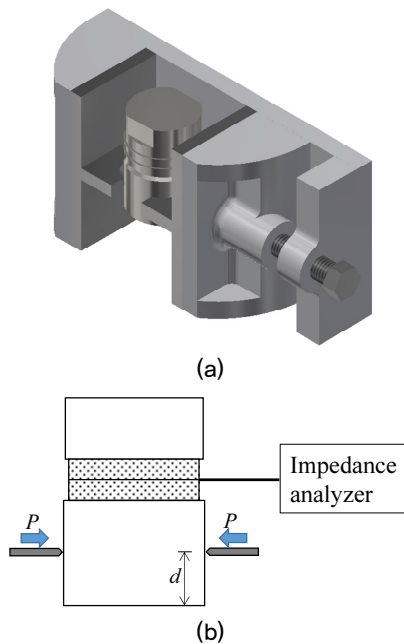


Fig. 4. (Color available online) Design and schematic of the experimental setup. (a) The head mass of the Langevin-type ultrasonic transducer is fixed with a semicircular wedge-shaped jig. The constant pressure is applied to the jig by rotating the bolt of the right side. (b) The input impedance of the Langevin-type ultrasonic transducer is measured for different position d using the impedance analyzer.

IV. 실험결과 및 분석

등가회로 계산에 사용할 압전체의 물질상수들을 구하기 위하여 란주반 트랜스듀서를 구성하고 있는 두께 5mm인 원판형 압전 진동자의 입력어드미턴스를 측정하였고 그 결과를 Fig. 5에 이론계산 결과와 함께 나타내었다. 그림에서 굵은 파선은 측정결과

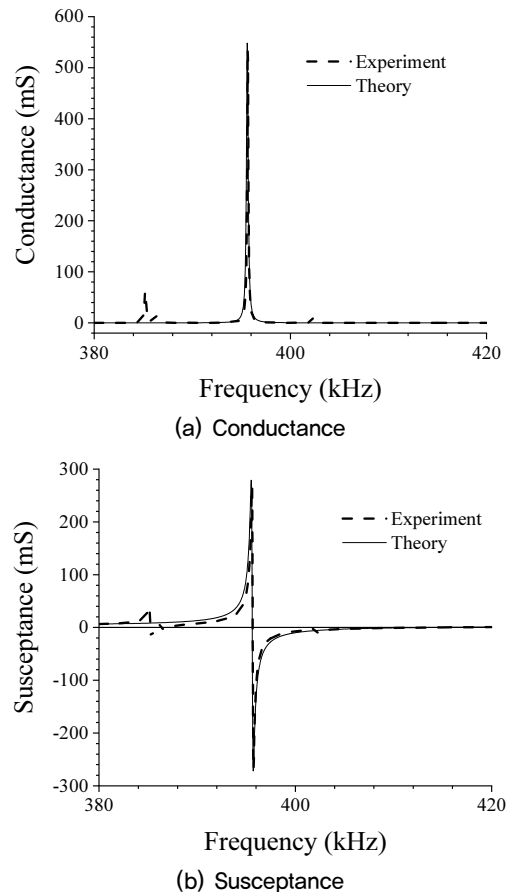


Fig. 5. Input admittance characteristics of piezoelectric vibrator of the bolt-clamped Langevin-type ultrasonic transducer. (a) Conductance that real part of the input admittance and (b) susceptance that imaginary part of the input admittance.

Table 1. Material constants used in the calculation.

	Piezoelectric vibrator	Aluminum
Density (kg/m ³)	7811.56	2740.9
Phase velocity (m/s)	4530.59-1.18 <i>i</i>	4146.2
Dielectric constant	922.76	-
Piezoelectric <i>e</i> constant (C/m ²)	11.71	-

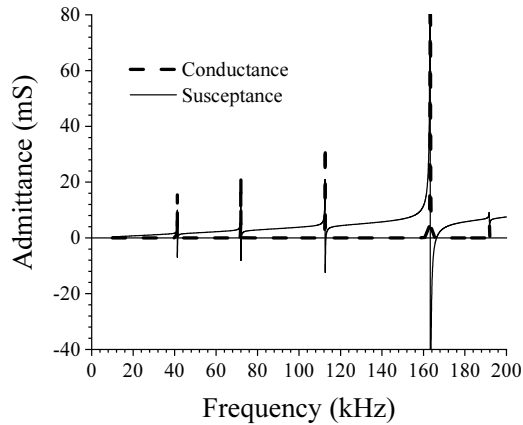


Fig. 6. Calculation result of the input admittance of the bolt-clamped Langevin-type ultrasonic transducer.

를, 가는 실선은 계산결과를 나타낸다. 이론계산 결과는 등가회로를 이용하여 계산한 것이며 압전 진동자의 감쇠를 결정하기 위하여 계산결과가 측정결과에 근접할 때까지 압전체의 감쇠계수를 변수로 하여 반복계산을 한 후 결정하였다. 또한 란주반 트랜스듀서를 구성하고 있는 알루미늄 봉의 음속 및 밀도를 측정하였다. Fig. 5로부터 도출된 압전진동자의 물질상수와 측정된 알루미늄 봉의 물질상수들을 Table 1에 나타내었다.

Table 1의 물질상수들을 Fig. 2에 나타낸 란주반 초음파 트랜스듀서의 등가회로의 각 요소에 적용하였다. 이 등가회로에서 란주반 초음파 트랜스듀서의 양 단면이 자유인 조건을 만족하도록 하여 전기단자의 입력어드미턴스를 계산하였고 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서 컨덕턴스를 굵은 파선으로, 서셉턴스를 가는 실선으로 나타내었다.

이 결과로부터 약 40 kHz부근의 기본 공진 모드와 75 kHz, 110 kHz부근 등 조화모드가 나타남을 알 수 있다. 한편 Fig. 1의 볼트 체결형 란주반 초음파 트랜스듀서의 양 단면이 자유인 조건을 갖도록 하여 임

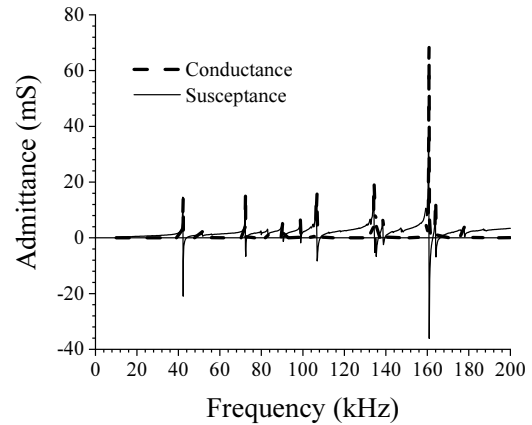


Fig. 7. Experimental result of the input admittance of the bolt-clamped Langevin-type ultrasonic transducer.

피턴스 아날라이저(Keysight, E4990A)를 이용하여 측정한 입력 어드미턴스의 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 이 결과를 보면 등가회로를 사용하여 계산한 결과인 Fig. 6의 결과와 유사하게 약 40 kHz부근에서 기본 공진 모드와 75 kHz, 110 kHz부근에서 조화모드가 나타남을 확인할 수 있다. 측정결과(Fig. 7)에서는 계산결과(Fig. 6)와는 달리 작은 스퓨리어스가 많이 나타나는데, 이들은 알루미늄과 압전 세라믹과의 접합면에서 발생하는 다중반사에 의한 것과 횡방향의 진동모드에 의한 것으로 생각된다. Figs. 6과 7을 비교해보면, 기본공진모드와 조화모드들의 주파수 영역이 유사함을 알 수 있으며, 두 결과 사이의 약간의 차이는, 상술한 바와 같이, 등가회로 해석 시 금속 볼트 및 전극의 영향을 무시한 것으로부터 기인된 것으로 생각된다. 그럼에도 불구하고 이론계산 결과로부터 길이방향의 유효한 모드는 충분히 확인할 수 있다.

란주반 초음파 트랜스듀서의 진동속도 분포를 해석하기 위하여 Eq. (3)을 사용하여 각 공진 모드에 대한 진동속도를 계산하였고 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 진동속도 값은 트랜스듀서의 후면에서의 진동속도로 규격화하여 나타낸 것이다. 결과를 보면 기본 공진(실선)인 41.34 kHz에 대해서는 진동의 절 부분이 트랜스듀서의 방사면으로부터 약 24 mm 떨어진 곳에 나타나며 제 2 조화파 모드(파선)에 대해서는 약 5 mm, 제 3 조화파 모드(점선)에 대해서는 약 8.0 mm인 지점에 각각 나타남을 알 수 있다.

다음으로 본 연구에서 제안한 방법인 Fig. 4에 나

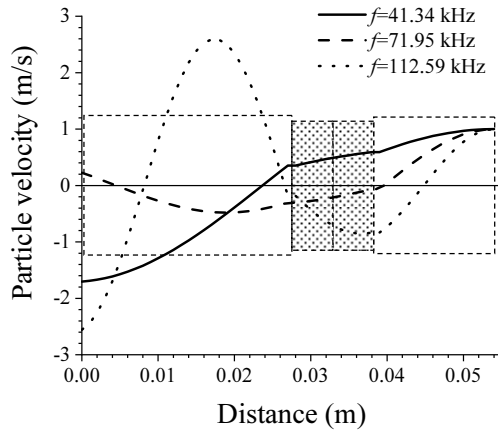
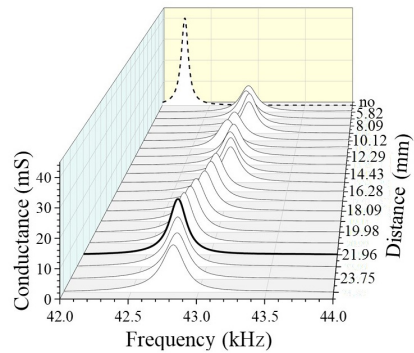
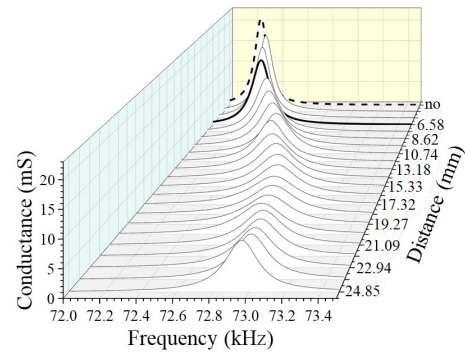


Fig. 8. Calculation result of the particle velocity distribution for the bolt-clamped Langevin-type ultrasonic transducer under free-ends condition. In the figure, the dotted rectangles refer to the parts of the transducer, the discontinuous distributions appear at the interfaces between the dot pattern part representing the piezoelectric ceramic and the void rectangles representing the aluminum rods.

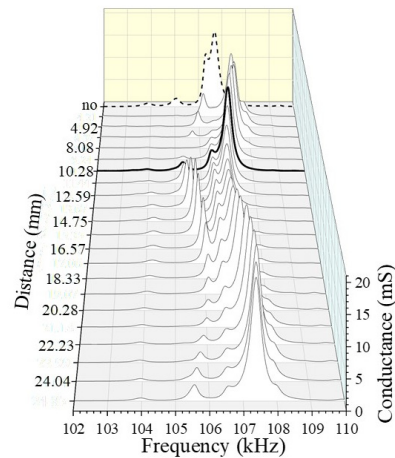
타낸 실험장치를 사용하여 란주반 초음파 트랜스듀서의 측면에 부착한 반원형 썸머 형태의 지그의 위치를 변화시켜 가며 트랜스듀서의 전기적인 특성 변화를 측정하였고 그 결과를 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9(a)는 기본 공진모드에 대한 입력컨덕턴스의 변화를 압력을 가하는 지점인 d 를 변화시켜 가며 측정한 결과이다. 컨덕턴스의 피크의 위치는 공진주파수를 나타내고 있으며 트랜스듀서에 아무런 압력을 가하지 않은 자유상태인 경우의 결과를 파선으로 나타내었다. 이 파선과 피크의 위치가 가장 가까운 경우에 대해 굵은 실선으로 나타내었으며 이 경우 압력을 가한 위치는 트랜스듀서의 방사면으로부터 $d = 21.96 \text{ mm}$ 떨어진 곳을 알 수 있다. 이 결과는 Fig. 8에 나타난 진동속도분포에서의 절의 위치와 매우 유사함을 알 수 있다. 같은 방법으로 제 2 조화파 모드에 대한 측정 결과를 Fig. 9(b)에 나타내었다. 파선의 최대값과 가장 가까운 피크를 나타내는 굵은 실선의 결과는 $d = 6.58 \text{ mm}$ 로 나타나 Fig. 7의 결과에서 나타난 5 mm의 절의 위치와 대략적으로 잘 대응됨을 알 수 있다. 제 3 조화파 모드에 대해서도 Fig. 9(c)에 나타낸 고정점의 위치는 Fig. 8의 진동속도분포의 절의 위치와도 잘 대응되고 있다.



(a) Fundamental mode



(b) Second harmonic mode



(c) Third harmonic mode

Fig. 9. (Color available online) Variation of the conductance depending on fixing point on the bolt-clamped Langevin-type ultrasonic transducer. In the figure, the dotted line refers to the conductance for each mode of the transducer without the jig, and the solid lines refer to the conductance when the jig is held at each position of d . (a) In the fundamental mode, the thick solid line shows the conductance when the position of the jig is $d = 21.96 \text{ mm}$, and it shows the closest resonant frequency to that of in the case of no jig. (b) In the 2nd harmonic mode, the closest resonant frequency appears when the position of jig is $d = 6.58 \text{ mm}$. (c) In the 3rd harmonic mode, the closest resonant frequency appears when the position of jig is $d = 10.28 \text{ mm}$.

V. 결 론

볼트 체결형 란주반 초음파 트랜스듀서를 고정하기 위한 프렌지의 위치를 최적화하기 위한 실험적 방법을 제안하였다. 반원형 썰기 형태의 지그를 사용하여 트랜스듀서의 고정점을 변화시켜가며 전기 단자에서 측정된 입력 어드미턴스의 특성 변화를 관찰하였다. 그 결과, 각 공진 모드에 대한 진동 속도분포의 절에 대응하는 위치를 각 모드에 대해 찾을 수 있었고, 이를 이용하여 트랜스듀서를 고정하기 위한 최적의 프렌지 설치위치를 결정할 수 있었다. 본 연구에서 사용한 란주반형 초음파 트랜스듀서의 경우, 기본모드, 제 2 조화파 모드 및 제 3 조화파 모드에 대해 프렌지의 설치 위치는 방사면으로부터 각각 21.96 mm, 6.58 mm, 및 10.28 mm 떨어진 지점으로 나타났다.

감사의 글

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2021년)에 의하여 연구되었음.

References

1. K. Adachi and M. Saito, "Construction of torsional-vibration systems with a hollow cylindrical bolt-clamped langevin-type transducer and their application to ultrasonic plastic welding," *Jpn. J. Appl. Phys.* **34**, 2735-2739 (1995).
2. C. Yun, T. Ishi, K. Nakamura, S. Ueha, and K. Akashi, "A high power ultrasonic linear motor using a longitudinal and bending hybrid bolt-clamped langevin type transducer," *Jpn. J. Appl. Phys.* **40**, 3773-3776 (2001).
3. J. Tsujino, T. Ueoka, K. Hasegawa, Y. Fujita, T. Shiraki, T. Okada, and T. Tamura, "New methods of ultrasonic welding of metal and plastic materials," *Ultrasonics*, **34**, 177-185 (1996).
4. D. Yamaguchi, T. Kanda, and K. Suzumori, "An ultrasonic motor for cryogenic temperature using bolt-clamped Langevin-type transducer," *Sens. Actuators A Phys.* **184**, 134-140 (2012).
5. S. Shi, W. Chen, and J. Liu, "A high speed ultrasonic linear motor using longitudinal and bending multimode

6. bolt-clamped langevin type transducer," *Proc. IEEE ICMA*. 25-28 (2006).
7. J. Kim and J. Lee, "Parametric study of bolt clamping effect on resonance characteristics of langevin transducers with lumped circuit models," *Sensors*. **20**, 1952 (2020).
8. H. Yamamori, T. Ito, K. Ohya, and H. Banno, "Characteristics of bolt-clamped langevin type ultrasonic transducer with square radiating surface," *Jpn. J. Appl. Phys.* **29**, 167-169 (1990).
9. K. Adachi, Y. Konno, and S. Masaki, "Development of bolt-clamped langevin-type transducer with high mechanical quality factor for excitation of large torsional vibration," *Jpn. J. Appl. Phys.* **33**, 1182-1188 (1994).
10. T. Takahashi and K. Adachi, "Experimental evaluation of the static strain on the clamping bolt in the structure of a bolt-clamped langevin-type transducer," *Jpn. J. Appl. Phys.* **47**, 4736-4741 (2008).
11. M. Kim, H. Kanai, and N. Chubachi, "Non-contact measurement of particle velocity distribution of ultrasonic waves along an elastic laser Doppler velocimetry," *J. Acoust. Soc. Jpn.* (E) **15**, 339-344 (1994).
12. V. M. Ristic, *Principles of Acoustic Devices* (John Wiley & Sons, Toronto, 1983), Chap. 5.
13. N. Chubachi and M. Kim, "Transmission line model equivalent circuit piezoelectric transducers including the effect of electrical terminal impedance," *Jpn. J. Appl. Phys.* **35**, 3231-3235 (1996).
14. T. Fukuoka, "Theory and practice of bolt tightening process," *JIME*. **46**, 119-125 (2011).

저자 약력

▶ 김 정 순 (Jungsoon Kim)



1996년 2월 : 부경대학교 물리학과 학사
1999년 2월 : 부경대학교 대학원 음향진동 공학과 석사
2002년 3월 : Tokyo University of Agriculture and Technology, Japan 공학박사
2006년 3월 ~ 현재 : 동명대학교 전기공학과 교수
<관심분야> 초음파 영상, 비선형음향, 초음파 분산, 의용 초음파

▶ 김 해 운 (Haeun Kim)



2001년 8월 : 목원대학교 응용화학공학과 학사
2009년 8월 : 고려대학교 화공생명공학과 석사
2020년 9월 ~ 현재 : 부경대학교 물리학과 박사과정
관심분야 : 초음파 분산, 초음파 유화, 초음파 변환기

▶ 김 무 준 (Moojoon Kim)



1985년 2월: 부경대학교 응용물리학과 학사

1990년 2월: 부경대학교 대학원 응용물리학과 석사

1994년 3월: Tohoku University, Japan 공학박사

1995년 3월 ~ 현재: 부경대학교 물리학과 교수

<관심분야> 초음파 트랜스듀서, 비선형 음향, 초음파 분산, 수중음향