

# 등가회로를 이용한 후면추 고정형 Tonpiliz 트랜스듀서의 공진 특성 해석

## Analysis of the Resonant Characteristics of a Tonpiliz Transducer with a Fixed Tail Mass by the Equivalent Circuit Approach

김진욱, 김원호\*, 조치영\*, 노용래  
(Jinwook Kim, Wonho Kim\*, Cheeyoung Joh\*, Yongrae Roh)

경북대학교 기계공학과, \*국방과학연구소  
(접수일자: 2011년 5월 20일; 수정일자: 2011년 7월 8일; 채택일자: 2011년 7월 26일)

본 논문에서는 후면추가 탄성체에 의해 고정된 Tonpiliz 트랜스듀서의 공진 특성을 등가회로를 이용하여 연구하였다. 후면추가 고정됨으로 인해 발생하는 추가적인 공진특성을 나타낼 수 있는 등가회로를 설계하였으며, 설계된 등가회로를 이용하여 얻은 송신음압감도 (TVR)를 유한요소해석을 통해 도출한 결과와 비교하여 그 타당성을 검증하였다. 등가회로를 이용하여 송신특성을 파악한 결과, 유한요소해석 결과와 일치하였으며, 후면추 고정재료의 강성과 후면추의 질량 변화에 따른 공진 주파수와 송신음압감도 변화를 명확히 파악할 수 있었다. 본 연구에서 도출한 등가회로를 이용하면 설계변수의 변화에 따라 모델을 변경해야하고 긴 계산시간이 요구되는 유한요소해석에 비해 효과적으로 트랜스듀서의 공진특성을 해석할 수 있다.

**핵심용어:** 등가회로, 트랜스듀서, Tonpiliz, 다중 모드 트랜스듀서

**투고분야:** 수중음향 분야 (5.6)

In this paper, the resonant characteristic of a Tonpiliz transducer with a fixed tail mass has been studied by means of an equivalent circuit approach. An equivalent circuit has been designed to describe the characteristic of a Tonpiliz transducer that has an additional resonance because of its fixed tail mass. The transmitting voltage response of the transducer calculated by the designed circuit has been compared with that by the FEA (finite element analysis) to confirm the validity of the circuit. This equivalent circuit approach produces identical results with the FEA, in which the variation of resonant frequencies and TVR has been clearly figured out in relation to the stiffness of the mounting fixture and the mass of the tail mass. The suggested equivalent circuit can be utilized to figure out the characteristics of the Tonpiliz transducer more efficiently than FEA that requires much calculation time and revision of the models in accordance with the variation of design variables.

**Keywords:** Equivalent circuit, Transducer, Tonpiliz, Multi-mode Transducer

**ASK subject classification:** Underwater Acoustics (5.6)

### I. 서론

수중 음향 트랜스듀서의 설계 시 다양한 해석기법을 이용하여 구동 특성을 분석하게 된다. 널리 사용되는 방법들로는 등가회로를 이용한 방법, 유한 요소 해석법

(FEM), 경계 요소 해석법 (BEM) 등이 있는데, 그 중에서 모델을 구성하는 요소의 크기만 적합하다면 높은 정확성을 보장받을 수 있는 유한 요소 해석법이 ANSYS, PZ-flex 등의 상용프로그램을 통해 많이 이용되고 있다. 하지만 유한 요소 해석법은 복잡한 형상의 트랜스듀서의 모델링과 해석 과정이 번거롭고, 계산시간이 오래 걸리는 단점이 있다. 최근에 제안된 기존의 종 방향 공진주파수보다 낮은 주파수에서 추가적인 공진모드를 발생시켜

장거리 탐지와 종 방향 공진주파수에서의 세부탐지가 가능하다는 장점이 있는 Tonpilz 트랜스듀서 역시 유한요소해석만을 통해 구동 특성과 구조 변수들이 미치는 영향 등이 분석되었다 [1]. 이 Tonpilz에 대한 연구에서는 후면추 (tail mass)를 탄성체로 고정 시킴으로써 발생하는 저주파수에서의 공진특성을 파악하고, 구조 변화에 따른 성능 변화 경향을 파악하기 위해 유한요소모델들을 반복적으로 모델링하여 계산되었다. 유한요소해석을 통해 후면추가 고정된 Tonpilz 트랜스듀서의 정확한 동적 거동을 파악하기 위해서는 설계 요소 변화에 따른 유한요소모델 수정과 계산에 많은 시간이 필요하며 성능 변화 경향을 파악하기 위한 반복적인 데이터 처리 및 정리 과정을 거쳐야 한다는 단점이 있다.

반면에 등가회로 해석법은 트랜스듀서의 형상이 복잡하여 구동에 영향을 미치는 유효 값을 도출하기 어렵거나 모드의 결합 (mode coupling)이 발생하여 일정 오차를 감수해야 하는 경우가 아니라면 비교적 간단한 계산을 통해 상당히 정확한 결과를 얻을 수 있다. 또한, 트랜스듀서의 성능 향상을 위한 전기적 정합회로 설계에도 유용하게 사용할 수 있는 장점이 있다. 이러한 장점으로 등가회로를 이용한 방법이 활발히 연구된 결과, 다양한 구조의 수중 음향 트랜스듀서의 등가회로 모델은 이미 완성되어 활용되고 있는 실정이며 [2-5], 최근에는 능동 소나 시스템에서 요구되는 고출력 및 광대역 특성을 가지는 다중모드 트랜스듀서의 설계를 위해 인접 모드의 간섭도 고려되어 트랜스듀서의 특성을 효과적으로 정확하게 파악할 수 있는 등가회로 설계 방법도 연구되었다 [6,7].

따라서 본 논문에서는 본 저자들이 선행 연구에서 유한요소 해석법으로 분석한 바 있는 후면추 고정형 Tonpilz 트랜스듀서의 공진 특성을 보다 간단하고 신속하게 파악하기 위해, 후면추가 고정된 Tonpilz 트랜스듀서에 적합한 등가회로를 도출하였다 [1]. 모델링된 등가회로를 이용하여 추가적인 공진 모드에 결정적인 영향을 미치는 구조변수의 변화에 따른 성능 변화 경향을 분석하였으며, 기존의 유한요소해석을 통하여 도출된 결과와 비교하여 그 정확성을 검증 하였다. 또한 저주파수에서 추가적으로 발생하는 공진에 의한 송신 음압을 최대 발생시키기 위해 구조변수들의 변화에 따른 최대 TVR (transmitting voltage response)값을 도출하는 방안을 제시하였다. 나아가 이상과 같이 두 작동 모드가 확연히 구분되는 Tonpilz 트랜스듀서에 대해 요구되는 성능을 만족시키기 위한 구조변수 설계 방향을 결정하는데 제안된 등가회로가 효과적으로 사용될 수 있음을 확인하였다.

## II. Tonpilz 트랜스듀서의 후면추 고정에 의한 공진 특성

탄성체를 이용하여 후면추를 고정시킨 Tonpilz 트랜스듀서의 구조는 그림 1과 같이 2차원 축대칭 유한요소 모델로 나타낼 수 있으며, 기존의 Tonpilz 트랜스듀서와 구분되는 특성을 파악하고 후면추를 고정하는 탄성체의 구조변화에 따른 특성을 파악하기 위해 유한요소해석을 수행하였다. 탄성체에 의해 후면추가 고정된 Tonpilz 트랜스듀서의 구동 특성에 결정적인 영향을 미치는 변수는 후면추의 질량과 탄성체의 강성 (stiffness)이라고 연구되었다 [1]. 그림 1의 네 가지 Tonpilz 유한요소모델에서 구동부는 정반대의 분극방향을 가지는 2개의 PZT 세라믹의 적층 구조로 이루어져 있으며, 후면추 지지 부를 제외한 모든 부분의 재료와 치수는 동일하며, 표 1에 나타내었다. 후면추에 부착된 탄성체는 각각 다른 지지구조를 가지고 있는데, 진동하는 트랜스듀서를 고정하여 진동에 영향을 주는 길이를 고려하여야 한다. 따라서 표 1에 표시한 바와 같이 영 계수 (Young's modulus)에 변화를 주어 탄성체의 강성 값을 조정함으로써 결과적으로는 동일한 등가 강성 (equivalent stiffness)값을 가지도록 이상적인 유한요소 모델을 설계하였다. 이와 같은 유한요소모델의 설정은, 진동체를 지지하는 구조의 유효 강성 값이 동일하다면 진동 주파수 특성에 큰 차이가 없을 것이라 가정을 검증하기 위함이다. 각 모델의 특성은 그림 2와 같이 매질인 물을 포함한 2차원 축대칭 유한요소 모델의 조화 해석을 통해 그림 3의 임피던스 스펙트럼, 그림 4의 TVR 스펙트럼, 그림 5의 각 공진주파수에서의 모드형상으로 나타내었는데, 그림 3과 그림 4의 주파수 축은 Tonpilz 트랜스듀서의 종 방향 공진주파수에 정규화 된 값으로 표현하였으며, 그림 5에서 점선은 변위가 없을 때의 Tonpilz 트랜스듀서의 형상을, 화살표는 전면추와 후면

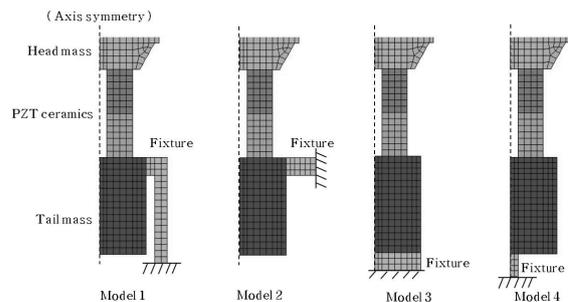


그림 1. 다양한 지지구조의 Tonpilz 트랜스듀서의 유한요소 모델  
Fig. 1. FEA models of Tonpilz transducers with different types of fixtures.

표 1. Tonpiliz 트랜스듀서의 물성 값  
Table 1. Material property of the Tonpiliz transducer.

Parts	Head mass	Drive section	Tail mass	Fixing structure
Material	Aluminum	PZT4	Steel	Modified plastic
Density [ kg/m <sup>3</sup> ]	2,700	7,500	7,700	1,180
Poisson ratio	0.33		0.28	0.4
Young's modulus (GPa)	69		195	( modified )
Thickness [ mm ]	7.5	20.0	22.0	
Inner radius [ mm ]		1.75		
Outer radius [ mm ]	14.0	7.75	11.0	

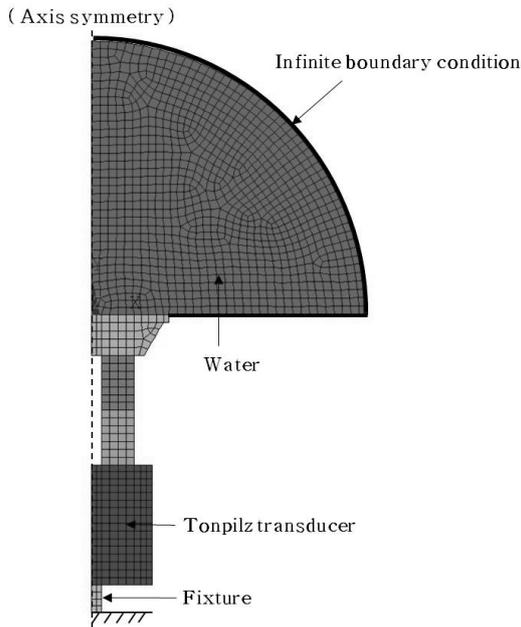


그림 2. 물에서의 후면추가 고정된 Tonpiliz 트랜스듀서 유한요소 모델  
Fig. 2. FEA model of Tonpiliz transducers with water & a fixed tail mass.

추의 변위 방향을 나타낸다. 결과들에서 확인 할 수 있듯이 탄성체를 이용하여 Tonpiliz 트랜스듀서 후면추를 고정함으로써 기존의 종방향 공진 주파수 보다 낮은 주파수 대역에서 공진이 발생하는데 이 공진모드에서 송신하는 음압은 기존의 종방향 공진 모드에서의 음압에 비해 낮게 나타나며 음압과 주파수는 앞서 밝힌 바와 같이 후면추의 질량과 치수, 고정 재료의 강성 값을 변경하여 조절할 수 있다. 또한, 이 결과들을 통해 후면추를 고정시키는 탄성체의 지지형태가 위의 4가지 모델들처럼 다양하게 변하더라도, 물성 값에 변화를 주어 등가강성 값을 동일하게 유지시킨다면 전체 Tonpiliz 트랜스듀서의 주파수 특성과 음압 송신 특성에 큰 영향을 주지 않으며, 동일한 성능을 나타낸다고 볼 수 있다. 예를 들어, Model 3과 같이 고정

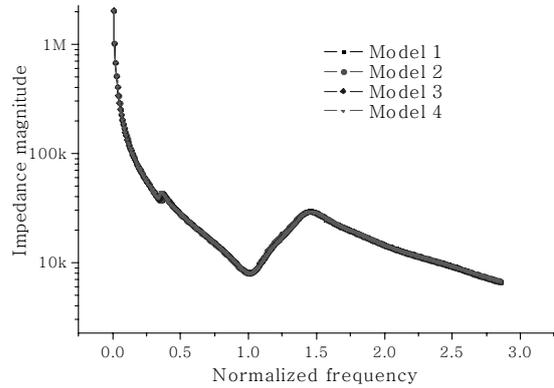


그림 3. Tonpiliz 트랜스듀서들의 임피던스 스펙트럼  
Fig. 3. Impedance magnitude spectra of Tonpiliz transducers.

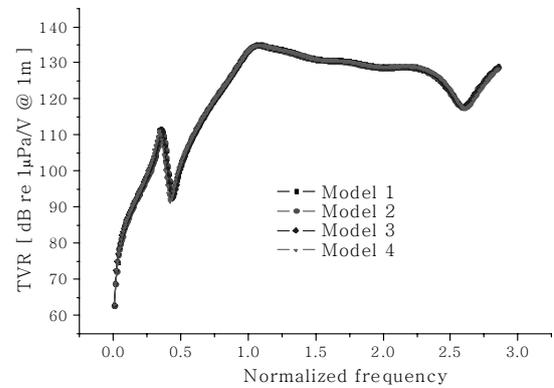


그림 4. Tonpiliz 트랜스듀서들의 TVR 스펙트럼  
Fig. 4. TVR spectra of Tonpiliz transducers.

부의 지지면적이 큰 형태에 비해 Model 4와 같이 좁은 단면적을 가질 때 영 계수가 더 큰 재료를 사용하여야 한다. 따라서 후면추 고정 재료의 치수와 물성이 정해진 경우 등가 강성 값을 가장 쉽게 구할 수 있는 Bar 형태로 후면추가 고정된 model 4를 등가회로 모델링에 적용하였는데, 이때 등가 강성은  $EA/L$ 로 나타낼 수 있으며, 여기서  $E$ 는 고정 재료의 영 계수,  $A$ 와  $L$ 은 각각 Bar의 단면적과 길이를 나타낸다.

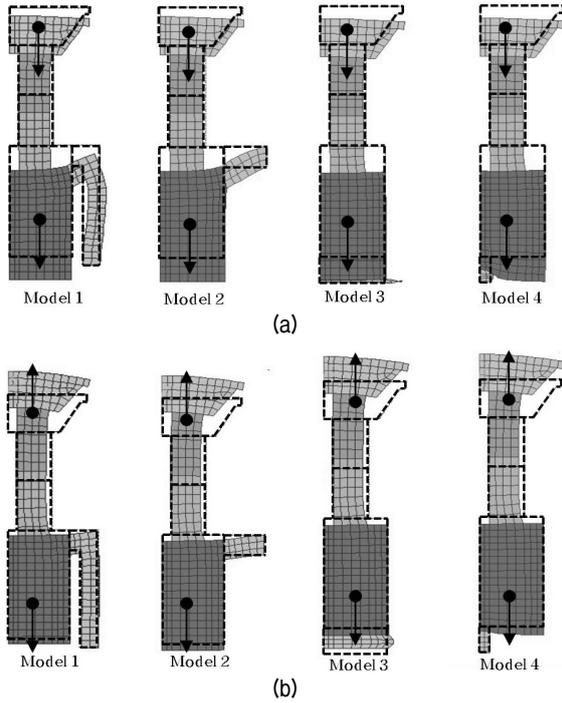


그림 5. 후면추 고정형 Tonpiliz 트랜스듀서들의 모드 형상 (mode shape)  
 (a) 정규화된 공진 주파수 0.35에서의 모드 형상, (b) 정규화된 공진 주파수 1.02에서의 모드 형상  
 Fig. 5. Mode shapes of the Tonpiliz transducers with the fixed tail mass.  
 (a) at normalized frequency 0.35 (b) at normalized frequency 1.02

### III. 후면추가 고정된 Tonpiliz 트랜스듀서의 등가회로

그림 1에 나타난 model 4의 등가회로를 설계하기 위해 기존의 Tonpiliz 트랜스듀서의 등가회로 모델을 참고하였다. 일반적인 단일 모드 Tonpiliz 트랜스듀서의 등가회로는 그림 6과 같이 T형 회로망으로 나타낼 수 있는데 여기서,  $Z_C$ ,  $Z_H$ ,  $Z_T$ 는 각각 구동부로 사용된 압전세라믹, 전면추, 후면추의 임피던스와 같고,  $Z_m$ 은 트랜스듀서의 고정에 의한 임피던스,  $Z_r$ 은 방사 임피던스를 나타낸다. 또한,  $Z_0$ 와  $N$ 은 각각 분류 임피던스 (shunt impedance), 변환기의 권선비를 나타내는데 이와 같은 소자들은, 식 (1)에서 식 (10)과 같은 관계로 나타낼 수 있다 [2-5,8-9].

$$Z_{C1} = j\rho_C c_C A_C \tan\left(\frac{k_C n t_C}{2}\right) \quad (1)$$

$$Z_{C2} = -j \frac{\rho_C c_C A_C}{\sin(k_C n t_C)} \quad (2)$$

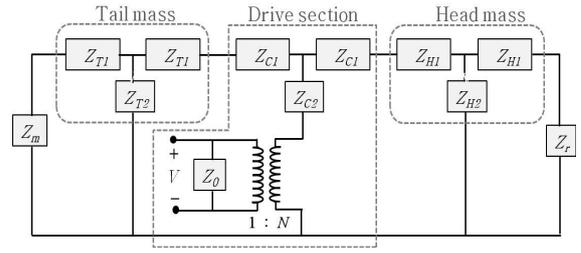


그림 6. 일반적인 단일모드 Tonpiliz 트랜스듀서의 등가회로  
 Fig. 6. The lumped equivalent circuit of a conventional single-mode Tonpiliz transducer.

$$Z_{H1} = j\rho_H c_H A_H \tan\left(\frac{k_H t_H}{2}\right) \quad (3)$$

$$Z_{H2} = -j \frac{\rho_H c_H A_H}{\sin(k_H t_H)} \quad (4)$$

$$Z_{T1} = j\rho_T c_T A_T \tan\left(\frac{k_T t_T}{2}\right) \quad (5)$$

$$Z_{T2} = -j \frac{\rho_T c_T A_T}{\sin(k_T t_T)} \quad (6)$$

$$Z_0 = 1/j\omega n C_0 \quad (7)$$

$$C_0 = \epsilon_{33}^S A_C / t_C \quad (8)$$

$$N = d_{33} A_C / t_C s_{33}^E \quad (9)$$

$$c_C = 1 / \sqrt{s_{33}^E \rho_C} \quad (10)$$

여기서,  $A$ ,  $\rho$ ,  $t$ ,  $k$ ,  $c$ 는 트랜스듀서의 각 부분의 단면적, 밀도, 두께, 파수, 음속을 나타내며, 아래 첨자  $C$ ,  $H$ ,  $T$ 는 각각 압전세라믹, 전면추, 후면추에 대한 변수임을 나타낸다. 또한  $n$ 은 구동부의 압전세라믹 층의 개수로써 2가되어, 정반대의 분극 방향을 가지는 2개의 PZT가 적층 구조의 전기적인 병렬연결 효과를 고려한 것이고,  $\epsilon_{33}^S$ 는 변형률이 일정할 때의 압전세라믹의 3방향 유전율,  $d_{33}$ 은 압전계수,  $s_{33}^E$ 는 전기장이 일정할 때의 탄성유연계수를 나타낸다. 표 1에 나타난 것과 같이 Tonpiliz 트랜스듀서를 구성하는 부품들의 치수와 물성을 정확히 알고 있으므로 위의 식을 이용해 등가회로를 구성하는 전기적인 수동소자의 값을 구할 수 있다.

기존의 단일모드 Tonpiliz 트랜스듀서의 등가회로에 탄성체를 이용하여 후면추를 고정시킨 조건을 적용하기 위

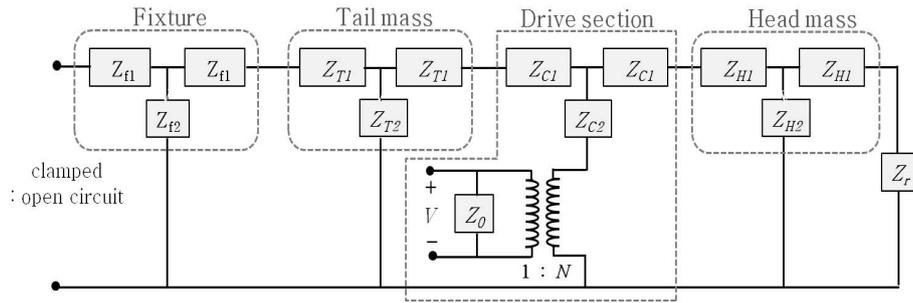


그림 7. T형 회로망을 이용하여 나타낸 후면추가 고정된 Tonpilz 트랜스듀서의 등가회로  
 Fig. 7. T network equivalent circuit of the Tonpilz transducer with a fixed tail mass.

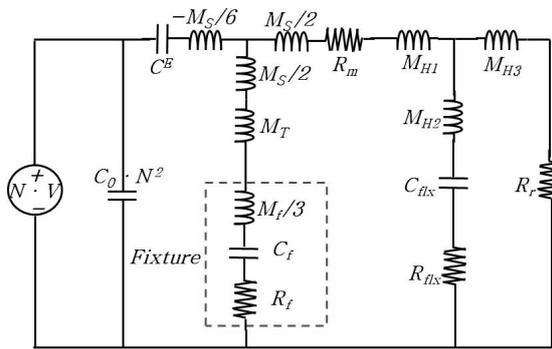


그림 8. 집중 소자로 나타낸 후면추가 고정된 Tonpilz 트랜스듀서의 등가회로  
 Fig. 8. The lumped element equivalent circuit of the Tonpilz transducer with a fixed tail mass.

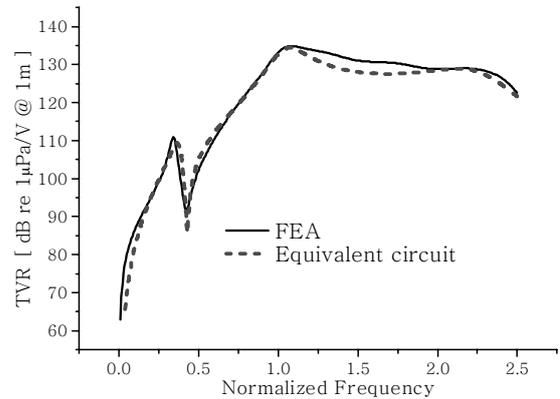


그림 9. 유한요소해석과 등가회로에 의한 TVR 스펙트럼 비교  
 Fig. 9. TVR spectra by means of FEA and equivalent circuit.

해서는 Tonpilz 트랜스듀서의 고정에 의한 임피던스  $Z_m$  을 정확히 설정하는 것이 중요하다. 후면추를 고정시키는 탄성체는 한쪽 끝이 후면추에 부착되어 있으므로 Tonpilz 트랜스듀서의 구동시 후면추와 동일한 변위와 속도를 가지게 되고, 다른 한쪽은 변위가 전혀 없는 완전히 고정된 경계조건을 가지게 되는데, 이를 그림 6의 회로에 추가적으로 적용시켜보면 그림 7과 같은 등가회로로 나타낼 수 있다. 그림 7의 회로에서  $Z_f$ 는 T형 회로망을 이용하여 나타낸 탄성체의 임피던스를 나타내며, 식 (1)과 (2)에 탄성체의 치수와 물성을 대입함으로써 구할 수 있다. 이와 같이 구성된 등가회로를 집중 소자 회로로 나타내보면 그림 8과 같이 나타낼 수 있는데, T형 회로망을 집중 소자들의 연결 구조로 근사하여 유도하는 과정은 참고자료 [3]에 자세히 유도되어 있다. 그림 8에서  $M_f$ ,  $C_f$ ,  $R_f$ 는 후면추를 고정한 탄성체의 질량, 탄성유연계수, 감쇠계수를 나타내며,  $C^E$ 는 적층된 구동 세라믹의 단락 회로 유연계수 (short circuit compliance)로써 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다 [3].

$$C^E = nts_{33}^E / A_C \quad (11)$$

앞서 설명한 바와 같이 후면추에 부착된 탄성체는 트랜스듀서의 구동시 후면추와 동일한 변위와 속도를 가지게 되므로, 임피던스 법 (impedance analogy)으로 등가화한 결과, 후면추에 대응되는 소자와 탄성체에 대응되는 소자들에, 속도에 대응되는 동일한 전류가 흘러야 하므로 탄성체를 등가화한 소자들을 후면추 소자에 종속접속으로 연결할 수 있다.

그림 1에서의 Tonpilz 트랜스듀서 모델들이 전면추의 flexural 공진 모드에서도 효과적으로 구동되어 높은 음압을 방사시키기 위해 테이퍼진 것처럼 종방향 공진모드와 정합된 flexural 공진모드에서의 특성도 등가회로 모델에 적용되어야 한다. 하지만 정합된 다중 모드간의 상호간섭이 고려된 등가회로 모델의 각 소자에 대응되는 미지 상수의 값을 찾기 위해선 적합도 함수를 구성하고 실험을 통해 측정된 값들을 이용하여 오차를 최소화 하는 최적화 과정 등이 필요하여 [6,7], 이러한 flexural 공진 모드에 대한 정확한 특성은 유한요소해석을 통해 파악하는 것이 더욱 효과적이라고 알려져 있다 [2,3]. 또한, 본 연구의 핵심은 탄성체를 이용한 후면추 고정에 의한 공진 특성을 등가회로를 이용하여 파악 하는 것이므로 flexural

공진 모드에 대한 회로 구성은 기존의 연구 결과를 참고 하였으며 [10,11], 회로를 구성하는 소자들의 실제 값은 유한요소해석을 통해 얻은 스펙트럼과 비교를 통해 시행 착오적으로 대입하여 적정 값을 도출하였다. 여기서  $C_{flr}$ ,  $R_{flr}$ 은 각각 전면추의 flexural 모드에 작용하는 기계적인 탄성 유연 계수와 감쇠 계수를 나타낸다. 따라서 최종적으로 후면추가 탄성체에 의해 고정된 Tonpiliz 트랜스듀서의 등가회로는 그림 8과 같이 나타 낼 수 있다.

이와 같이 구현된 Tonpiliz model 4의 등가회로를 이용하여 TVR 스펙트럼을 구하였으며, 그 결과를 그림 4의 유한요소해석 결과와 비교하여 그림 9에 나타내었다. 이와 같은 결과는 그림 8의 등가회로에서 전면추의 방사 속도에 해당하는 전류  $I_H$ 를 구하여 식 (12)에서 식 (15)를 이용하여 방사출력,  $W$ 와 최종적으로는 단위 전압 1V를 가할 때의 수중에서의 송신 전압 감도인 TVR을 구할 수 있다 [5,12].

$$W = \frac{1}{2} (I_H)^2 R_r \tag{12}$$

$$TVR = 10 \log W + DI + 171 \text{ [dB re } 1\mu\text{Pa/V @1m]} \tag{13}$$

$$DI = 10 \log D \tag{14}$$

$$D = \frac{(ka)^2}{1 - J_1(2ka)/ka} \tag{15}$$

여기서, 식 (12)의  $R_r$ 은 피스톤 형태인 음원의 방사저항을 의미하며 식 (15)의 분모 항으로 나타낼 수 있고,  $DI$ 는 트랜스듀서의 지향 지수로서 피스톤 형태의 음원인 경우 식 (14), (15)와 같이 나타낼 수 있으며,  $k$ 는 파수,  $a$ 는 방사면의 유효반경으로 Tonpiliz 트랜스듀서의 전면추의 반지름과 같고,  $J_1$ 은 제 1종 1차 Bessel 함수이다.

비교된 TVR 스펙트럼을 살펴보면, 후면추 고정에 의해 발생하는 첫 번째 공진모드와 종방향 공진모드에서의 주파수와 TVR 값이 잘 일치함을 확인 할 수 있다. 이러한 결과들에서 확인 할 수 있듯이 이와 같이 모델링된 등가회로가 첫 번째 공진 모드와 두 번째 종 방향 공진 모드까지는 후면추가 탄성체에 의해 고정된 Tonpiliz 트랜스듀서의 특성을 잘 나타낼 수 있는 타당한 모델이라 볼 수 있으며, 그 공진주파수에서의 송신 특성을 보다 신속하고 편리하게 파악하기 위해 본 등가회로 모델이 유한요소 해석을 이용한 세밀한 분석 이전에 전체적인 경향성 파악에 활용될 수 있는 것이다.

## IV. 등가회로를 이용한 트랜스듀서의 공진 특성 해석

앞 절에서 구현된 후면추가 고정된 Tonpiliz 트랜스듀서의 등가회로를 이용하여 트랜스듀서의 각 부분의 치수 변화나 물성 변화에 대한 음압 송신 성능의 변화를 유한요소해석을 통한 분석보다 효율적으로 파악 할 수 있게 된다. 등가회로를 이용한 TVR 계산은 Matlab을 이용하여 수행하였는데 유한요소해석에 비해 계산시간이 월등히 빨랐으며, 그 결과로 얻은 그림 10과 그림 11과 같은 3차원 그래프를 이용하면 후면추 고정에 의한 공진에 가장 큰 영향을 주는 변수들에 대한 전체적인 성능 변화 경향을 파악하는데 용이하였다. 등가회로로부터 도출된 식을 Matlab을 이용해 계산한 경우와 상용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 조화해석을 한 경우, Tonpiliz 트랜스듀서의 TVR 스펙트럼을 얻는데 소요되는 시간 비교 결과와 계산에 사용된 컴퓨터 및 프로그램의 사양은 표 2에 나타내었다.

위의 표 2에 나타낸 것처럼 유한요소해석 시간은 주어진 치수와 물성에 대한 한 번의 해석 시간이므로 그림 10, 그림 11과 같은 등가회로를 이용하여 2초 만에 계산한 결과를 얻기 위해선, 변수 변화 범위 내에서 300번 계산하여야 하므로 약 500시간이 소요된다. 그림 10은 Tonpiliz 후면추를 고정한 탄성체의 강성 변화 즉, II장에서 밝힌 바와 같이 고정용 탄성체의 형상과 치수는 Model 4의 경우로 유지하되, 물성 값 중 영계수를 조정하여 등가강성 변화에 따른 TVR과 주파수 변화를 나타낸 것이며, 그림 11은 후면추의 질량 변화에 따른 TVR과 주파수 변화를 나타낸 것이다. 탄성체의 강성과 후면추의 질량의 변화 범위는 TVR 스펙트럼에서 큰 변화를 관찰할 수 있는 범위로 설정하였다. 각 그림에서 변경하고자 하는 변수를 x축, 정규화된 주파수를 y축, TVR 값을 z축으로 설정하였다.

그림 10의 3차원 그래프를 회전시켜 x-y평면에서 살펴보면 탄성체의 강성 변화에 따른 두 공진 주파수의 변화와 peak TVR 값의 변화를 살펴 볼 수 있는데 이를 그림 12에 나타내었다. 그림 12의 (a)에 원으로 표시한 궤적은 첫 번째 공진주파수의 변화, 삼각형으로 표시한 궤적은 종방향 공진주파수의 변화를 나타낸 것이고, 1st peak는 후면추 고정에 의해 발생하는 공진주파수에서의 최대 음압값을 표시한 것이고 2nd peak는 기존의 종방향 공진주파수에서의 최대 음압값을 표시한 것이다. 탄성체의 강

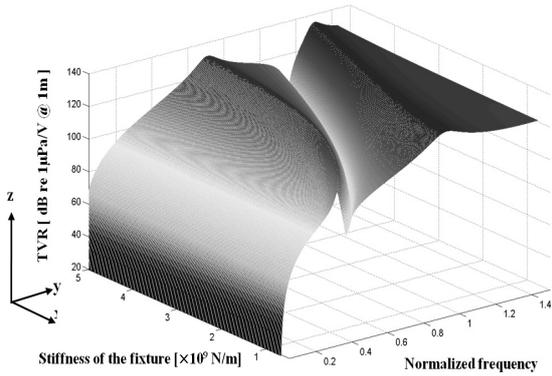


그림 10. 탄성체의 강성변화에 따른 TVR 스펙트럼의 변화  
 Fig. 10. Variation of the TVR spectrum in accordance with the stiffness of the tube.

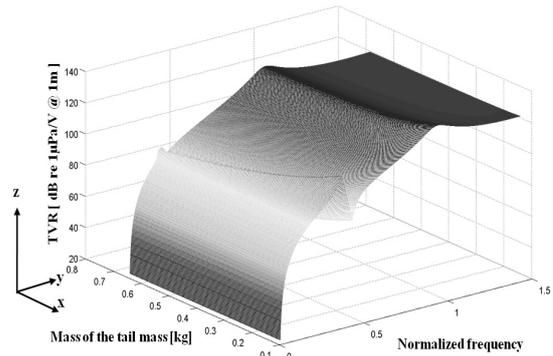


그림 11. 후면추의 질량 변화에 따른 TVR 스펙트럼의 변화  
 Fig. 11. Variation of the TVR spectrum in accordance with the mass of the tail mass.

표 2. 등가회로를 이용한 해석과 유한요소해석의 계산 시간 비교

Table 2. Calculation time comparison between analysis by equivalent circuit and FEA.

해석 방법	등가회로 설계	유한요소해석
프로그램	MATLAB R2008a	ANSYS ver.11.0
계산 내용	<ul style="list-style-type: none"> <li>회로상의 방사출력을 이용한 TVR 계산</li> <li>구조변수의 변화 범위 내에서의 성능 변화 경향을 1회 계산으로 파악할 수 있음</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>2D 축대칭 모델을 이용한 조화해석</li> <li>설정된 물성과 치수에 대한 TVR 스펙트럼</li> <li>물성과 치수의 변화에 따른 스펙트럼 변화 경향을 분석하기 위해선 변수 변경 후 동일한 해석을 반복해야함</li> </ul>
계산 시간	2초	10분/1회 해석

계산에 사용된 컴퓨터 사양

CPU: INTEL CPU 3.0 GHz, 램: DDR2, 2 GByte, 운영체제: Windows XP (32 bit)

성 값이 증가함에 따라 후면추 고정에 의한 공진주파수는 급격히 증가하다가 강성이 일정 값 이상이 되었을 때 그 변화 정도가 서서히 감소하게 되는데 반해, 종방향 공진 주파수는 그 변화 정도가 비교적 일정하며 첫 번째 공진 주파수 만큼 급격하게 변화하지 않는 것을 확인 할 수 있다. 그림 12의 (b)는 그림 10의 그래프를 z-x 평면에서 분석한 그림이다. 여기서 원으로 표시한 궤적은 첫 번째 공진주파수에서의 TVR 값의 변화를 나타낸 것이다. 첫 번째 공진 모드의 활용에 있어 가장 결정적인 조건이 기존의 종방향 공진에 의해서 발생하는 음압에 최대한 근접하게 저주파 공진 모드에서의 음압을 증가시키는 것이다. (b) 그래프에서 확인 할 수 있듯이 후면추 고정체의 강성을 높임으로써 첫 번째 공진 주파수에서 높은 음압을 발생시킬 수 있지만, (a) 그래프에서처럼 구동 주파수대의 증가를 감수해야만 하고 강성이 일정 값 이상 증가된 경우 강성증가로 인한 음압 증가효과를 기대할 수 없게 되며, 최대로 종방향 공진에서 발생한 음압과 근접한 음압을 발생시킬 수 있게 되는 것이다. 따라서 이러한 복잡한 성능 변화 경향을 이 두 그래프를 이용하여 파악하고 원하는 주파수대역과 송신 음압을 만족하는 후면추 고정

재료의 강성 값을 설정할 수 있는 것이다. 후면추가 고정된 Tonpilz 트랜스듀서의 성능변화에 영향을 미치는 또 다른 중요 변수인 후면추 질량 변화에 따른 결과를 파악하기 위해 그림 11의 3차원 스펙트럼을 회전시켜 x-y 평면을 그림 13의 (a)처럼 나타낼 수 있으며 표시된 궤적과 표시의 의미는 그림 12에서와 같다. 후면추의 질량 역시 일정 값 이상이 될 때 까지는 두 공진 주파수가 급격히 감소하다가 그 값 이상에서는 변화가 거의 나타나지 않는다. z-x 평면으로 나타낸 그림 13의 (b)에서 첫 번째 공진 주파수에서 음압은 후면추의 질량을 감소시킬수록 탄성체의 강성 변화에 따른 영향에 비해 비교적 선형적으로 증가하여 종방향 공진주파수에서의 음압에 가까운 높은 음압을 발생시킬 수 있지만 후면추 질량이 작은 범위에서는 그 변화에 따라 급격한 주파수 변화를 보이게 된다. 트랜스듀서의 성능에 후면추의 질량이 미치는 영향도 그림 13의 그래프들을 이용하여 파악할 수 있으며, 원하는 성능 즉, 구동 주파수와 그 공진 주파수에서의 발생음압이 설정된 경우 적절한 후면추의 질량을 설정 할 수 있게 된다.

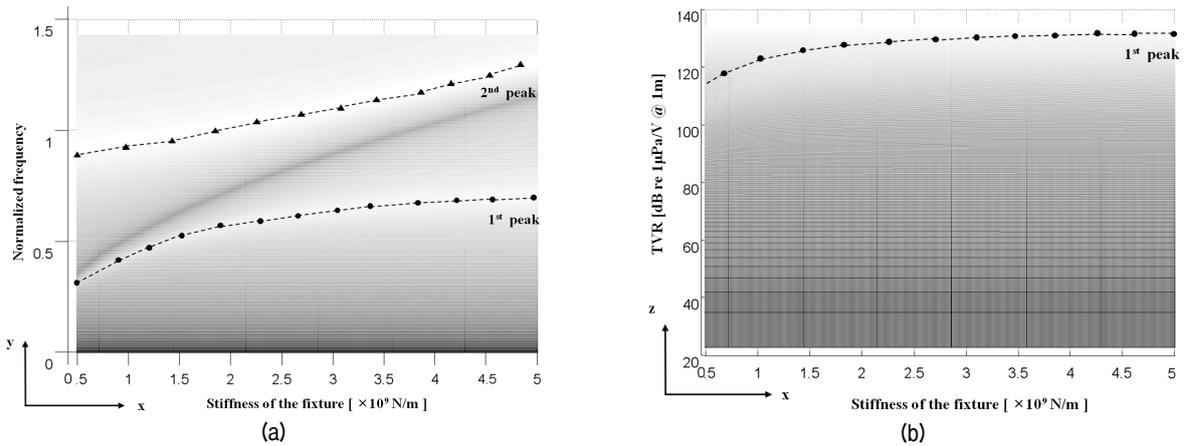


그림 12. 탄성체의 강성변화에 따른  
 (a) 각 공진 주파수의 변화, (b) 첫 번째 공진주파수에서의 TVR 값의 변화  
 Fig. 12. (a) Variation of the each resonant frequency,  
 (b) Variation of the first TVR peak in accordance with the stiffness of the fixture.

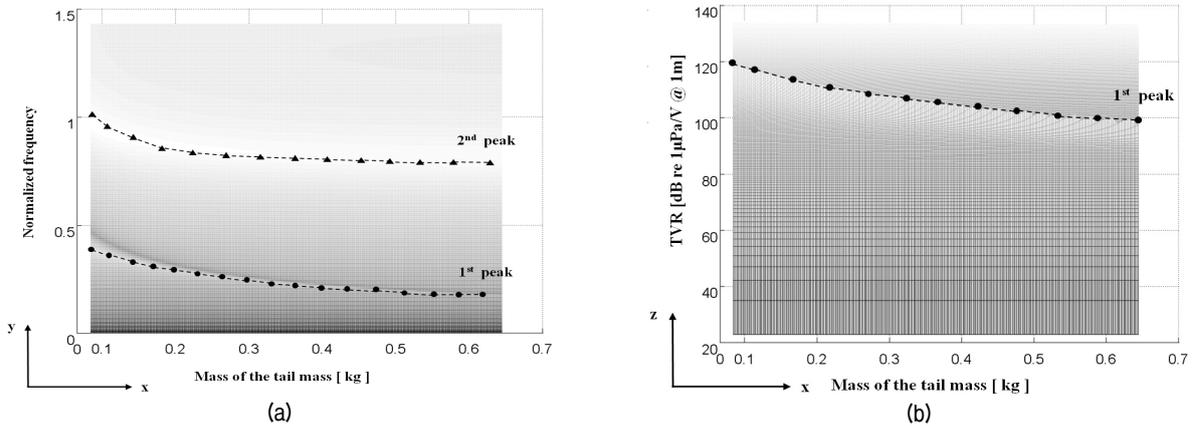


그림 13. 후면추의 질량 변화에 따른  
 (a) 각 공진 주파수의 변화, (b) 첫 번째 공진주파수에서의 TVR 값의 변화  
 Fig. 13. (a) Variation of the each resonant frequency,  
 (b) Variation of the first TVR peak in accordance with the mass of the tail mass.

## V. 결론

본 연구에서는 등가회로를 이용하여 Tonpiliz 트랜스듀서의 후면추를 탄성체를 이용하여 고정시킴으로써 발생하는 저주파 공진 특성을 파악하였다. 유한요소해석을 이용하여 분석된 기존의 연구를 참고하여 보다 효과적이고 신속하게 설계변수에 따른 성능 변화 경향성을 파악하기 위해 저주파수에서 추가적인 공진 특성을 가지는 Tonpiliz 트랜스듀서의 등가회로 모델을 구현하였다. 후면추를 고정시키는 방식의 차이는 그 탄성체의 등가 강성값이 일정하다면 Tonpiliz 트랜스듀서의 송신 특성에 영향을 미치지 않으므로 이론적인 값을 도출하기 쉬운 형태로 설정하였으며, 그 도출된 등가 강성값을 등가회로 모

델에 적용하였다. 유한요소해석 결과와의 비교를 통해 구현된 등가회로 모델의 타당성을 검증하였으며, 등가회로를 이용하여 트랜스듀서의 송신 성능에 가장 큰 영향을 미치는 변수인 후면추 고정재료의 강성과 후면추의 질량 변화에 따른 성능 변화를 보다 효과적인 방법으로 파악하였다. 유한요소해석에서는 관련변수 변화에 따른 유한요소모델의 변경이 복잡하고, 비교적 긴 계산시간을 거처 얻은 결과를 분석하고, 최종적으로 성능변화의 경향을 파악하기 위한 데이터 처리작업을 수행해야만 하는 것에 반해 본 연구에서 모델링한 등가회로를 이용하여 빠른 시간 안에 보다 효율적으로 판단 할 수 있었다. 또한 후면추를 고정시키는 탄성체의 강성 변화와 후면추의 질량 변화에 따른 TVR 스펙트럼의 변화를 주파수 대역별로 판

단할 수 있었다. 추가적인 공진모드의 결정적인 활용 조건이 종방향 공진주파수에서의 음압에 버금가는 음압을 발생시키는 것인데 이러한 조건을 파악할 수 있었지만 이 공진 모드에서의 높은 음압은 구동주파수의 급격한 증가를 감수할 수 밖에 없음을 확인하였다.

따라서 후면추가 탄성체에 의해 고정된 Tonpitz 트랜스듀서의 특성파악과 특정 구동 조건을 만족하는 설계를 하는데 있어서, 전면추의 flexural 공진모드까지 고려한 보다 정확한 분석은 유한요소해석을 수행하여야겠지만, 이에 앞서 본 연구에서 구현된 등가회로 모델이 트랜스듀서의 성능변화 경향을 예측하는데 효율적으로 사용될 수 있을 것이다.

### 감사의 글

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다 (계약번호 UDO90008DD).

### 참고 문헌

1. 김진욱, 김원호, 조치영, 노용래, "후면추 고정형 Tonpitz 트랜스듀서의 공진 특성 연구," *한국음향학회지*, 29권, 7호, 439-447 쪽, 2010.
2. O. B. Wilson, *Introduction to Theory and Design of Sonar Transducers*, Peninsulr Publishing, Los Altos, Chap. 2 and 6, 1988.
3. C. H. Sherman and J. L. Butler, *Transducers and Arrays for Underwater Sound*, Springer, New york, Chap. 3 and 7, 2007.
4. D. Church and D. Pincock, "Predicting the electrical equivalent of piezoceramic transducers for small acoustic transmitters," *IEEE Trans. Sonics Ultrason.*, vol. SU-32, no. 1, pp. 61-64, 1985.

5. 조치영, 서희선, 이정민, "수중 음향 압전 트랜스듀서의 등가회로 모델링," *한국음향학회지*, 15권, 4호, 77-82쪽, 1996.
6. R. Ramesh and D. D. Ebenezer, "Equivalent circuit for broadband underwater transducers," *IEEE Trans. U.F.F.C.*, vol. 55, no. 9, pp. 2079-2083, 2008.
7. 이정민, 이병화, 백광렬, "미립자 집단 최적화 알고리즘을 이용한 다중모드 수중 음향 압전 트랜스듀서의 등가회로 모델링," *한국음향학회지*, 28권, 4호, 363-369쪽, 2009.
8. M. V. Crombrugge and W. Thompson, Jr., "Optimization of the transmitting characteristics of a Tonpitz-type transducer by proper choice of impedance matching layers," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 77, no. 2, pp. 747-752, 1985.
9. H. A C Tilmans, "Equivalent circuit representation of electromechanical transducers: I. lumped-parameter systems," *J. Micromech. Microeng.*, vol. 6, pp. 157-176, 1996.
10. J. L. Butler, J. R. Cipolla and W. D. Brown, "Radiating head flexure and its effect on transducer performance," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 70, no. 2, pp. 500-503, 1981.
11. S. C. Butler, "Triply resonant broadband transducers," *Oceans '02 MTS/IEEE*, vol. 4, pp. 2334-2341, 2002.
12. L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens, and J. V. Sanders, *Fundamentals of Acoustics*, 4th ed., John Wiley and Sons, New york, 2000.

### 저자 약력

• **김진욱 (Jinwook Kim)**

한국음향학회지 제28권 제4호 참조  
 2010년: 경북대학교 기계공학부 학사 졸업  
 2010년 ~ 현재: 경북대학교 기계공학과 석사 과정  
 ※ 주관심 분야: 수중 음향, 초음파

• **김원호 (Wonho Kim)**

한국음향학회지 제24권 제3호 참조

• **조치영 (Cheeyoung Joh)**

한국음향학회지 제14권 제5호 참조

• **노용래 (Yongrae Roh)**

한국음향학회지 제26권 제2호 참조