

후면추 고정형 Tonpiliz 트랜스듀서의 공진 특성 연구

A Study on the Resonant Characteristics of a Tonpiliz Transducer with a Fixed Tail Mass

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

*경북대학교 기계공학과, **국방과학연구소
(접수일자: 2010년 8월 9일; 채택일자: 2010년 9월 12일)

본 논문에서는 Tonpiliz 트랜스듀서의 후면추를 고정시킴으로써 발생하는 저주파 공진 특성을 연구하여 Tonpiliz 트랜스듀서의 다양한 공진모드에서의 이용 가능성을 분석하였다. 기존의 Tonpiliz 트랜스듀서의 후면추에 탄성 튜브를 연결한 후 한쪽 끝을 고정 시킴으로써, 기존의 종 방향 공진 주파수 이하에서 추가적인 공진이 발생하도록 하였다. 이 저주파 공진모드는 후면추에 부착된 탄성체의 강성, Tonpiliz 트랜스듀서의 전면추, 후면추의 질량 변화에 따라 그 특성이 변하게 된다. 이러한 추가적인 저주파 공진특성을 유한요소해석을 통해 분석하였으며, 그 결과를 바탕으로 특정 성능조건에 부합하는 Tonpiliz 트랜스듀서의 설계가능성을 확인하였다.

핵심용어: 트랜스듀서, Tonpiliz, 다중 모드 트랜스듀서, FEA

투고분야: 수중음향 분야 (5.6)

In this paper, the resonant characteristic of a Tonpiliz transducer with a fixed tail mass has been researched and the feasibility to utilize the transducer in that resonant frequency has been analyzed. The additional resonance is occurred by adhering an elastic tube to the tail mass of a conventional Tonpiliz transducer and fixing the other end of the tube. The characteristic of this low resonant mode is analyzed by means of the finite element method, then it is shown that this mode is affected by the variation of the stiffness of the tube as well as the mass of the head mass and tail mass. Based on the analysis results, the Tonpiliz transducer is designed to meet specific performance conditions.

Keywords: Transducer, Tonpiliz, Multi-mode Transducer, FEA

ASK subject classification: Underwater Acoustics (5.6)

I. 서론

수중에서 음파를 송, 수신하는 대표적인 음향 트랜스듀서인 Tonpiliz 트랜스듀서는 각종 배열형 트랜스듀서를 구성하는 단일 소자로 사용되며, 음향 방사체 역할을 하는 전면추, 구동자 역할을 하는 압전 세라믹, 구동자에서 발생한 변위를 반사시켜 전면추의 변위를 증폭시키는 후면추, 그리고 이들을 일정한 압력으로 조임으로써 압전 세라믹의 허용인가 전압을 증대시키는 역할을 하는 볼트가 결합된 형태를 가진다. 일반적인 Tonpiliz 타입의 트랜스

듀서는 1 kHz ~ 50 kHz의 주파수범위에서 구동되며, 통상 종방향 단일모드를 이용하여 좁은 대역에 걸쳐 고출력의 음향파를 송, 수신하는 기능을 수행한다 [1, 2]. 수중의 표적을 탐지, 추적하는 소나 시스템에 사용되는 트랜스듀서는 고출력 특성 뿐 아니라, 구동 주파수의 확장과 높은 분해능 확보를 위해 광대역 특성 또한 요구된다 [3, 4]. 광대역 특성을 가지는 다중 모드 Tonpiliz 트랜스듀서의 구조에 대한 연구는 활발히 이루어져 왔으며, 대표적으로 Rodrigo의 Rodrigo broadband design [5], Hawkins 등의 Multi resonance design [6-9], Butler의 Triple resonant design [5, 10] 등이 있으며, 최근에는 Saijyou 등에 의해 bending disk를 이용한 광대역 Tonpiliz 트랜스듀서도 연구되었다 [11]. 하지만, 이러한 다중 모드 Tonpiliz 트랜스

듀서에 대한 선행 연구들은 광대역 특성 구현을 위해 단일모드인 종방향 공진주파수 보다 더 높은 주파수에서 추가적인 공진 모드가 발생하는 방식이었다. 통상 Tonpilz 트랜스듀서를 장거리 탐지에 사용하기 위해서는 감쇠가 적은 저주파 공진 특성이 요구되므로 [12], 첫 번째 공진 모드인 종방향 공진 주파수를 낮추기 위해서 압전층을 두껍게 하거나 전면추와 후면추의 질량을 키워야 하는데, 결과적으로는 Tonpilz 트랜스듀서가 커지거나 무거워지게 된다. 하지만 Tonpilz 트랜스듀서는 배열형 트랜스듀서를 구성하는 대표적인 단일소자이므로 배열형 소자로 사용 시 그 규격에 제한이 있을 수밖에 없다. 따라서 제한된 규격 내에서 통상의 종방향 공진모드 보다 더 낮은 주파수에서의 공진에 의해 높은 음압을 발생시킬 수 있는 Tonpilz 트랜스듀서가 있다면 기존의 종방향 공진 모드 구동과 동시에 낮은 주파수에서의 장거리 탐지용 구동 또한 가능해지므로, 단일 Tonpilz 트랜스듀서로 두 가지 공진모드를 이용해 광범위한 장거리 탐지와 세부탐지가 동시에 가능해질 것이다.

따라서 본 연구에서는 Tonpilz 트랜스듀서에 추가적인 저주파 공진모드를 발생시키기 위한 방안으로서 후면추를 튜브를 이용하여 고정시킴으로써 저주파 공진 특성을 구현하는 방안을 제안하고, 그 이용 가능성을 분석하였다. 즉, 기존의 종방향 공진모드를 가지는 Tonpilz 트랜스듀서의 후면추에 탄성 튜브를 연결한 후 튜브의 한쪽 끝을 고정시킴으로써 본래의 종방향 공진 주파수 이하에서 추가적인 공진이 발생하도록 하였다. 이 저주파 공진모드는 후면추에 부착된 탄성체의 강성과 Tonpilz 트랜스듀서의 전면추, 후면추의 질량 변화에 따라 그 특성이 변하게 된다. 이러한 추가적인 저주파 공진특성을 유한요소 해석을 통해 분석하였으며, 특정 성능조건에 부합하는 Tonpilz 트랜스듀서의 설계가능성을 확인하였다. 이로써 본 연구를 통해 기존의 다중모드로 활용되었던 flexural 모드 등과 같은 고주파 공진 모드 외에 후면추 고정으로 인한 저주파 공진 모드의 이용 가능성을 확인하였다.

II. 후면추 고정형 Tonpilz 트랜스듀서의 모델링

후면추에 튜브가 부착되어 고정된 Tonpilz 트랜스듀서의 특성을 분석하기 위해 상용 유한요소 해석 (FEA) 프로그램인 ANSYS를 이용하여 분석하였다. 기존의 Tonpilz 트랜스듀서와 방사 매질인 물의 2차원 축대칭 모델과 Tonpilz 트랜스듀서의 후면추에 튜브를 부착시켜 고정시킨 모델을 그림 1에 나타내었다. 그림 1에서와 같이 후면추에 튜브가 부착되는 위치에 변화를 주었는데 이는 튜브의 부착위치에 따라 탄성체로 작용하는 튜브의 거동이 달라지고, 그에 따라 트랜스듀서 전체의 공진 특성 변화가 있을 것이라 예상했기 때문이다. 모델링된 Tonpilz 트랜스듀서의 각 부분의 물성 값은 표 1과 같으며, 튜브의 형태는 그림 2에 나타내었다. 그림 2의 트랜스듀서의

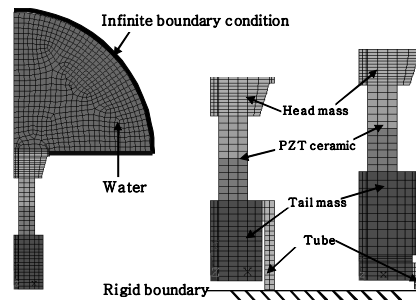


그림 1. 물에서의 Tonpilz 트랜스듀서와 튜브가 부착된 트랜스듀서의 유한요소 모델

Fig. 1. FEA model of Tonpilz transducers with water & a fixed tail mass.

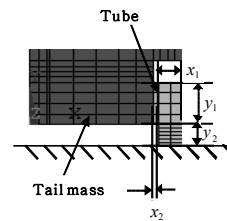


그림 2. 튜브의 형태

Fig. 2. Geometry of the tube.

표 1. Tonpilz 트랜스듀서의 부품별 주요 물성 값
Table 1. Material property of the Tonpilz transducer.

Parts	Material	density (kg/m3)	Poisson ratio	Young's modulus (GPa)
Head mass	Aluminum	2,700	0.33	69
	Steel	7,700	0.28	195
	Beryllium Copper	8,250	0.3	128
Tail mass	Steel	7,700	0.28	195
Tube	Modified plastic	1,180	0.4	75
Piezoelectric ceramic	PZT-4			

전면추 재질은 알루미늄이다. 그림 2에서 튜브의 외형 변수들은 그림에서 표시한 것과 같은 기호들로 나타내었는데, 이들 중 후면추에 튜브를 고정시키기 위한 반지름방향으로의 이격거리 x_2 와 튜브의 부착 길이 y_1 는 각각 0.5 mm, 4.0 mm로 유지하고, 튜브의 두께와 위치를 각각 나타내는 x_1 과 y_2 를 튜브 형상의 설계 변수로 설정하였다.

III. 후면추 고정형 Tonpiliz 트랜스듀서의 특성

앞서 모델링한 기존의 Tonpiliz 트랜스듀서와 후면추에 튜브가 부착되어 고정된 트랜스듀서, 두 모델의 진동 모드와 공진 주파수를 찾기 위해 harmonic 해석을 하였으며, 후면추의 튜브 부착 여부에 따른 임피던스, Transmitting Voltage Response (TVR), Receiving Voltage Sensitivity

(RVS) 스펙트럼 비교결과는 각각 그림 3-5에 나타내었다. 그림들에서 수평축은 튜브가 부착되지 않은 경우의 종방향 반공진주파수에 정규화된 값을 보인다. 그림 3의 결과에서 후면추에 튜브가 부착되어 고정됨으로 인해 기존 자유 상태의 종방향 공진 모드 보다 더 낮은 주파수에서 첫 번째 공진모드가 나타나게 되고, 종방향 공진 주파수가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그림 4의 TVR 스펙트럼을 보면 튜브에 의한 공진모드에서 발생하는 음압은 종방향 진동모드에 의한 음압 보다 상당히 낮게 나타나는데, 튜브에 의한 이 음압과 공진 주파수는 튜브의 두께, 부착위치, 그리고 전면추와 후면추의 두께 등에 따라 변하게 된다. 그림 5의 RVS 스펙트럼에서도 튜브에 의한 진동 모드로 인해 기존의 종방향 모드보다 아래에서 peak 값이 나타나는 것을 확인할 수 있다.

위에서 확인한 두 공진 모드 형상 (mode shape)은 그림 6에 나타내었으며, (a)는 그림 3-5에 나타난 저주파 공진

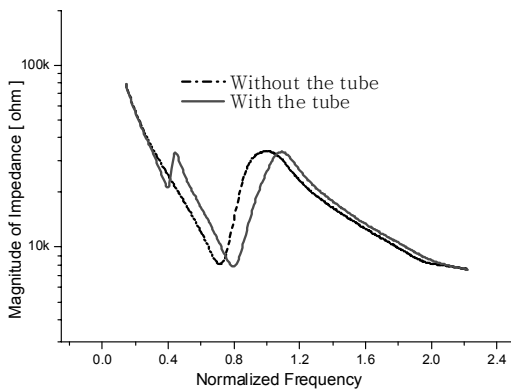


그림 3. 기존의 Tonpiliz 트랜스듀서와 후면추가 부착된 Tonpiliz 트랜스듀서의 임피던스 스펙트럼
Fig. 3. Impedance magnitude spectra of Tonpiliz transducers without a tube and with the tube.

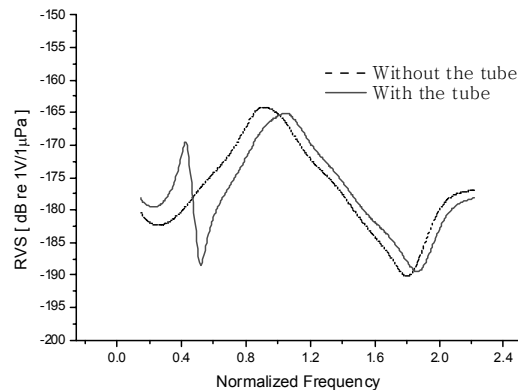


그림 5. 기존의 Tonpiliz 트랜스듀서와 후면추가 고정된 Tonpiliz 트랜스듀서의 RVS 스펙트럼
Fig. 5. RVS spectra of Tonpiliz transducers without a tube and with the tube.

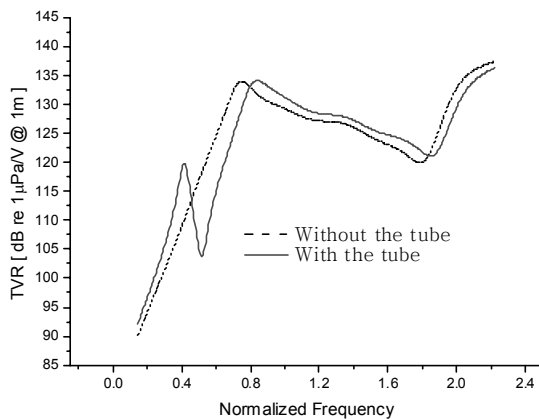


그림 4. 기존의 Tonpiliz 트랜스듀서와 후면추가 고정된 Tonpiliz 트랜스듀서의 TVR 스펙트럼
Fig. 4. TVR spectra of Tonpiliz transducers without a tube and with the tube.

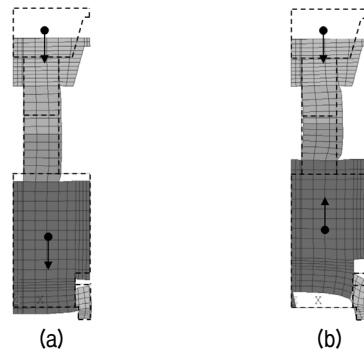


그림 6. 후면추 고정형 Tonpiliz 트랜스듀서의 모드 형상 (mode shape) (a) 정규화된 공진 주파수 0.4에서의 모드 형상, (b) 정규화된 공진 주파수 0.8에서의 모드 형상
Fig. 6. Mode shapes of the Tonpiliz transducer with the tube (a) at normalized frequency 0.4, (b) at normalized frequency 0.8.

모드에서, (b)는 종방향 공진 모드에서의 모드 형상이고 점선은 변위가 없을 때의 형상을, 화살표는 전면추와 후면추 변위의 방향을 나타낸 것이다. 이는 두 스프링에 의해 직렬로 연결된 두 질량으로 구성되는 간단한 2자유도 시스템에서 나타나는 모드 형상과 동일한 형태이다. 그림 6의 (a)에서 튜브가 부착됨에 의해 발생하는 저주파 공진 모드에서는 전면추와 후면추가 같은 방향으로 변위가 발생하게 되는데, 이것은 후면추에 연결된 튜브가 완전히 고정됨으로 인해 기존의 Tonpilz 트랜스듀서의 진동 형태에서는 볼 수 없었던 모드형상이다. 기존의 종방향 공진 모드에서의 모드 형상은 전면추와 후면추 변위의 방향이 서로 반대가 되는 진동 형태를 보이게 되며, 변위의 크기가 첫 번째 모드에 비해 더 크게 나타나는 것을 확인 할 수 있다.

IV. Tonpilz 트랜스듀서의 특성에 미치는 구조 변수의 영향 해석

트랜스듀서의 세부 구조 설계변수들의 영향을 유한요소해석을 통해 파악하기 위해 설계변수의 변화 범위를 표 2와 같이 설정하였다. 이 범위들은 그림 6의 트랜스듀서에 대해 목표로 하는 종방향 공진 주파수를 구현하기에 허용 가능한 각 변수들의 가변 범위를 사전 계산을 통해

표 2. Tonpilz 트랜스듀서의 설계변수 변화 범위
Table 2. The variation range of structural variables.

Structural variable	Variation range (mm)
Position of the tube	Top ~ Bottom (of the tail mass)
Thickness of the tube (x_1)	0.8 ~ 2.0
Thickness of the head mass	9.5 ~ 15.5
Thickness of the tail mass	19.5 ~ 25.5

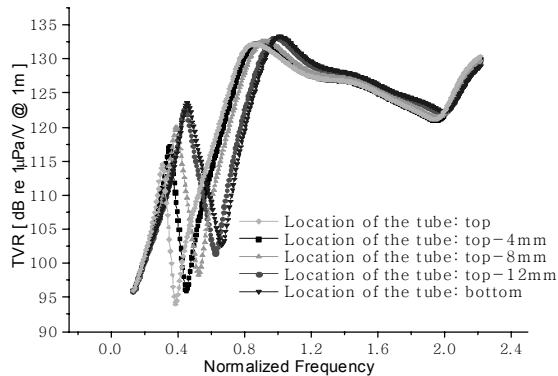


그림 7. 튜브의 부착 위치에 따른 TVR 스펙트럼
Fig. 7. TVR spectra in accordance with the tube attachment position.

설정된 값들이다. FEA를 통해 후면추에 부착된 튜브의 위치변화에 따른 TVR 스펙트럼을 분석한 결과를 그림 7에서 나타내었다. 후면추에 대한 튜브의 부착 위치는 TVR 스펙트럼에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 그 변화 경향은 그림 8과 그림 9에서 확인할 수 있다. 그림 8은 튜브로 인한 저주파 공진 모드에서 TVR 값과 주파수 변화를 나타낸 것인데, 튜브의 부착위치를 후면추의 아래쪽으로 내릴수록 TVR 값과 주파수가 증가하는 경향을 보인다. 튜브의 부착으로 발생하는 추가적인 공진주파수에서의 구동 특성 외에 본래의 종방향 진동 모드에서의 구동에 있어서도 넓은 범위의 대역폭을 확보하는 것이 중요하다. 본래의 종방향 진동 모드에서의 -3dB 대역폭과 주파수 변화는 그림 9에서 나타내었는데, 튜브가 후면추의 아래쪽에 부착될수록 대역폭은 좁아지고, 중심주파수는 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 그림 1에 보인 바와 같이 튜브의 위치 변화는 부착지점의 변화와 함께 튜

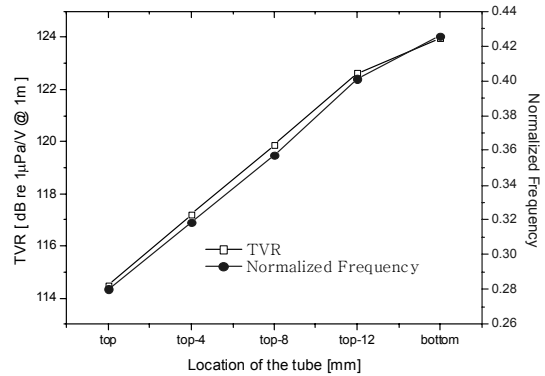


그림 8. 튜브의 위치변화에 따른 저주파 공진모드에서 TVR과 주파수 변화
Fig. 8. Variation of the TVR and frequency of the low frequency resonant mode in accordance with the tube attachment position.

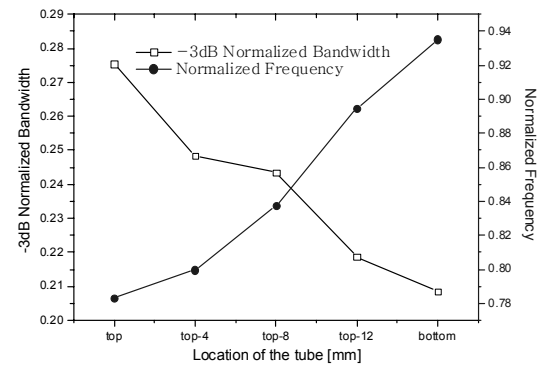


그림 9. 튜브의 위치변화에 따른 종진동 공진모드의 대역폭과 주파수 변화
Fig. 9. Variation of the bandwidth and frequency of the longitudinal mode in accordance with the tube attachment position.

브의 길이 변화로도 볼 수 있으므로, 튜브의 길이 변화에 따른 강성의 변화가 TVR 스펙트럼에 큰 영향을 미친다고 볼 수 있다. 즉, 튜브의 길이가 짧아짐에 따라서 튜브의 등가 강성 값이 증가하게 되고, 튜브의 등가 강성 값이 증가 할수록 튜브로 인한 저주파 공진모드의 TVR 값은 증가하고, 종진동 공진 주파수 역시 증가하는 것을 확인할 수 있다.

튜브의 또 다른 형상 변수는 두께 (x_1)이다. 그림 10은 튜브의 두께변화에 따른 TVR 스펙트럼의 변화를 나타낸 것이고, 그림 11과 12는 이러한 변화의 경향성을 나타낸 것이다. 튜브의 두께를 증가시키기에 따른 TVR의 변화는 위에서 설명한 튜브의 위치를 아래쪽으로 내릴 때의 경향과 유사하게 나타나는데, 이는 튜브의 위치변화에 따른 길이 변화의 영향과 같이 튜브의 두께가 증가하면서 튜브의 등가 강성이 증가하기 때문이고, 이로 인해 튜브에 의한 공진모드에서의 TVR 값은 증가하고, 종방향 공진 주파수 역시 증가하는 것으로 나타났다. 하지만, 그림 11과 12에서 볼 수 있듯이, 튜브의 위치변화로 인한 영향에 비해 그 변화 폭은 크지 않음을 확인할 수 있다. 이러한

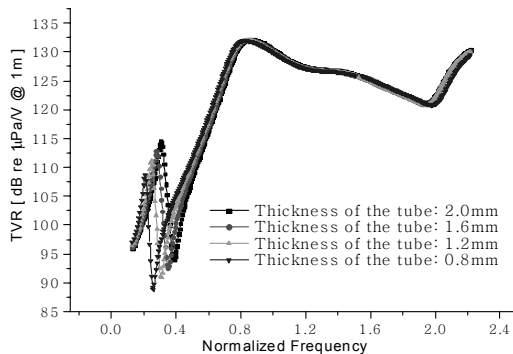


그림 10. 튜브의 두께에 따른 TVR 스펙트럼
Fig. 10. TVR spectra in accordance with the tube thickness.

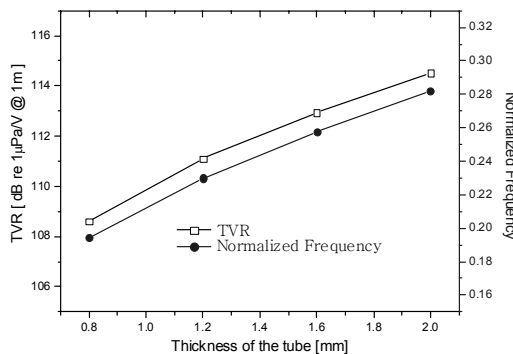


그림 11. 튜브의 두께에 따른 저주파 공진모드에서의 TVR과 주파수 변화
Fig. 11. Variation of TVR and frequency of the low frequency resonant mode in accordance with the tube thickness.

결과에 따르면, 튜브의 위치를 아래쪽으로 그리고 튜브의 두께를 두껍게 할수록 튜브에 의한 저주파 공진모드에서 음압을 크게 발생시킬 수 있게 된다. 하지만 튜브에 의한 저주파 공진 모드에서의 고출력을 얻고자 한다면 원치 않는 종진동 모드 주파수의 증가가 동시에 발생하므로, 이러한 주파수 증가 현상을 피할 수 있는 설계상의 조정이 필요하게 된다.

기존의 단일 모드 및 다중모드 Tonpiliz 트랜스듀서에 대한 해석에서 이미 알 수 있듯이, 전면추와 후면추의 두께 증가는 각각의 질량을 증가시키게 되므로 전체 Tonpiliz 트랜스듀서의 중심주파수를 감소시키게 된다. 이는 그림 13에서 18의 결과에서처럼 튜브가 후면추에 부착되어 고정된 Tonpiliz 모델에 대해서도 동일한 경향이 나타나게 된다. 그림 13은 전면추의 두께 증가에 따른 TVR 스펙트럼 변화를 나타낸 것이고, 그림 14와 15는 저주파 공진 모드의 특성 변화 경향을 나타낸 것이다. 그림 14를 살펴보면 전면추 두께의 증가는 저주파 공진 모드의 주파수를 감소시키면서, 그 주파수에서 방사되는 음압은

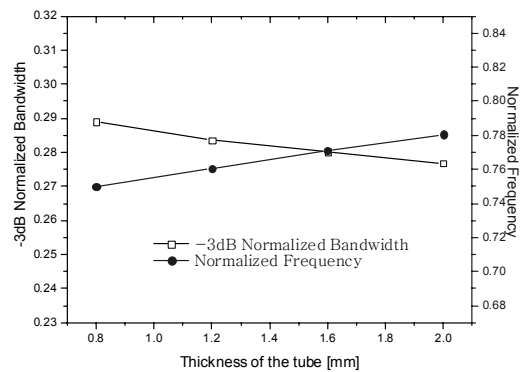


그림 12. 튜브의 두께에 따른 대역폭과 주파수 변화
Fig. 12. Variation of the bandwidth and frequency of the longitudinal mode in accordance with the tube thickness.

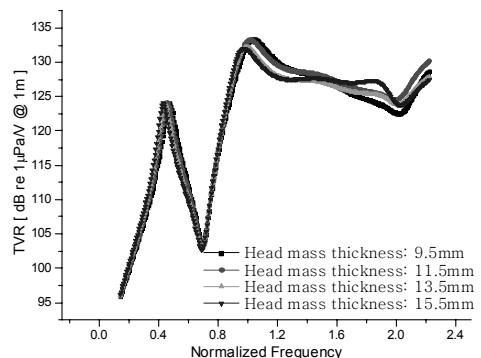


그림 13. 전면추의 두께에 따른 TVR 스펙트럼
Fig. 13. TVR spectra in accordance with the head mass thickness.

감소되는 경향 없이 일정한 값을 유지하게 된다. 이는 저주파 공진 모드는 전면추의 질량 변화에 대해 크게 영향을 받지 않고, Tonpilz 트랜스듀서 전체의 질량이 증가함에 따라 주파수만 감소하게 된다고 볼 수 있다. 따라서 저주파 공진 모드에서의 음압의 감소 없이 주파수를 조정할 수 있는 수단으로 전면추의 두께 변화가 이용될 수 있는 것이다. 하지만 그림 13에서 확인 할 수 있듯이 전면추의 두께가 증가할수록 종방향 공진모드에서의 출력은 감소하게 되고, 그림 15에서와 같이 -3dB 대역폭 역시 감소하게 된다.

후면추 두께의 변화에 대한 해석 결과는 그림 16에서 18에 나타내었는데, 튜브에 의한 저주파 공진모드의 크기와 종방향 공진모드의 대역폭은 전면추의 두께 증가에 의한 영향과는 반대되는 경향을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 즉 튜브가 직접 부착된 후면추의 두께 증가는 튜브로 인한 공진에서의 출력을 약화시키지만, 종방향

공진모드에서의 대역폭 확보에는 유용한 영향을 주게 되는 것이다. 따라서 튜브에 의한 공진 모드에서의 고출력 성능을 원한다면 두께 감소를 통한 후면추 질량 감소를 고려해 볼 수 있지만, 종방향 공진모드에서의 대역폭 확보에 대한 대안이 마련되어야 한다.

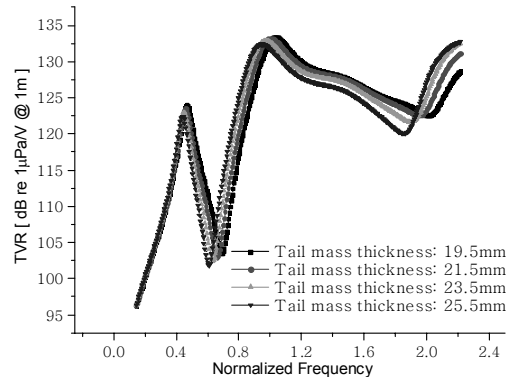


그림 16. 후면추의 두께에 따른 TVR 스펙트럼
Fig. 16. TVR spectra in accordance with the tail mass thickness.

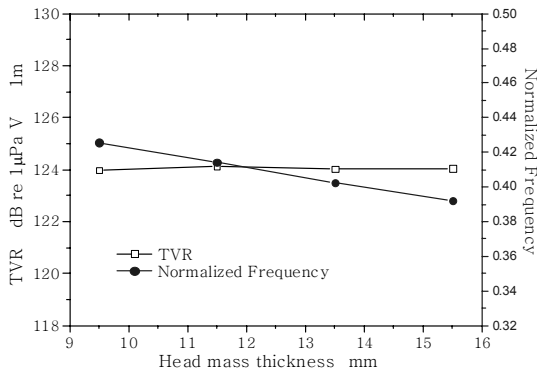


그림 14. 전면추의 두께에 따른 저주파 공진모드에서의 TVR과 주파수 변화
Fig. 14. Variation of TVR and frequency of the low frequency resonant mode in accordance with the head mass thickness.

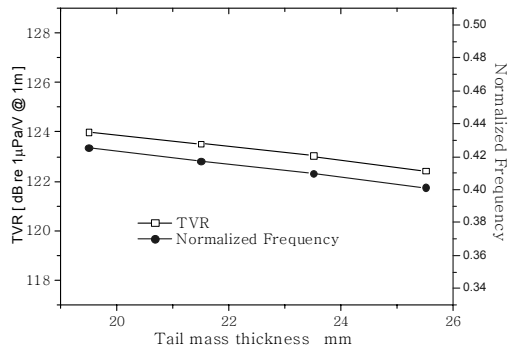


그림 17. 후면추의 두께에 따른 튜브에 의한 공진모드에서의 TVR값과 주파수 변화
Fig. 17. Variation of TVR and frequency of the low frequency resonant mode in accordance with the tail mass thickness.

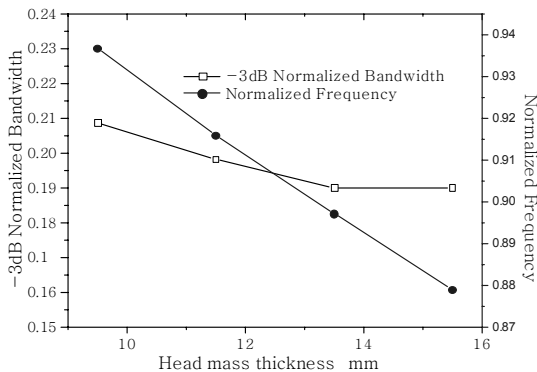


그림 15. 전면추의 두께에 따른 대역폭과 주파수 변화
Fig. 15. Variation of the bandwidth and frequency of the longitudinal mode in accordance with the head mass thickness.

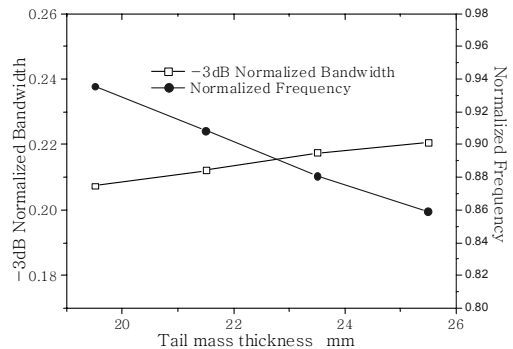


그림 18. 후면추의 두께에 따른 대역폭과 주파수 변화
Fig. 18. Variation of the bandwidth and frequency of the longitudinal mode in accordance with the tail mass thickness.

V. 주어진 성능 조건을 만족 시키는 Tonpiz 트랜스듀서의 설계

앞서 설명한 바와 같이 튜브의 부착으로 발생하는 저주파 공진 특성을 활용하기 위해 설계 시 특정한 성능 조건이 주어질 수 있는데, 지금까지 밝힌 해석결과와 경향성 분석 결과를 바탕으로 특정 성능 조건에 부합되는 Tonpiz 트랜스듀서의 설계가능성을 확인해볼 수 있다. 주어진 성능 조건은 다음과 같다.

- (가) Normalized frequency 0.31 와 0.42사이에서 저주파 공진 모드로 인해 가능한 한 최대의 음압 발생
- (나) 종방향 공진 모드에서의 -3dB 대역폭은 Normalized frequency 0.78에서 1.0까지를 만족하여 Normalized bandwidth 0.22 이상
- (다) Tonpiz 트랜스듀서의 PZT, 전면추, 후면추의 반경과 전체 길이는 각각 일정한 값 (반경 13.2 mm, 길이 60 mm) 이내로 제한

앞 절에서 확인한 각 변수에 따른 트랜스듀서 성능 변화 분석 결과를 이용하여 위의 성능조건에 만족하는 Tonpiz 트랜스듀서 모델 3개를 제안할 수 있는데, 각각

표 3. Model 1의 설계 치수
Table 3. Design dimensions of Model 1.

Location of the tube	bottom
Radius of head mass	13.2 mm
Radius of tail mass	13.2 mm
Thickness of the tube (x_1)	2.0 mm
Inner Radius of the PZT	1.75 mm
Outer Radius of the PZT	7.75 mm
Thickness of the head mass	8.5 mm
Thickness of the tail mass	25.5 mm
Total length	54.4 mm

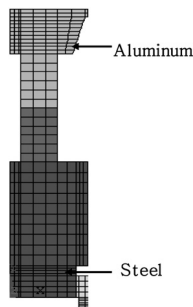


그림 19. Model 1
Fig. 19. Model 1.

Model 1, Model 2, Model 3로 명하였으며, 설계변수의 치수를 첨부하고, TVR 스펙트럼을 나타내었다. 먼저 Model 1에 대한 형상과 치수는 그림 19와 표 3에서 나타내었다. Model 1의 각 파트 물성은 표 3과 같고, 전면추의 재질은 알루미늄이다. 튜브를 후면추의 가장 밑 부분에 부착시킴으로써 저주파 공진 모드에서의 음압을 높일 수 있었는데, 그에 따른 부득이한 종진동 주파수 증가 문제를 보완하기 위해 후면추의 반경을 제한조건 내에서 최대한 증가시켜 중심주파수와 대역폭을 성능조건에 부합되도록 설계하였다. 그림 20의 TVR 스펙트럼에서 확인할 수 있듯이 Normalized frequency 0.41에서 119.9 dB의 TVR 값을 가지고, 0.77에서 1.0까지 -3dB 대역폭을 형성하므로 앞서 밝힌 성능 조건을 만족하지만, 두 공진 모드의 peak 값에 약 14.5dB 차이가 나게 된다.

성능 조건을 만족하면서, 두 공진 모드의 TVR 값의 차이를 더 줄일 수 있는 대안으로 Model 2와 Model 3을 제안할 수 있다. 앞 절의 경향성 분석에서 살펴보았듯이 후면추 최하단에 부착된 튜브에 의한 저주파 공진모드에서의 음압을 높이기 위해선 후면추의 질량을 감소시켜야 하되, 그로 인한 종진동 공진주파수의 증가를 보완하기 위해 전면추의 질량을 증가시켜 전체의 질량을 유지하여야 한다. 하지만 전면추의 질량 증가를 위해 두께를 증가시킬 경우 종진동 모드의 대역폭이 점점 좁아지는 문제가 발생하므로, 이를 해결하기 위해 전면추의 두께를 감소시켜 종진동 모드와 flapping 모드의 정합을 통해 대역폭을 확보하고, 전면추의 재료를 밀도와 질량이 높은 재료로 변경하여 전체 질량을 유지하도록 하였다. Model 2의 전면추는 Model 1에서의 재료인 알루미늄 보다 무거운 철(steel)을 사용하였고, Model 3에서는 보다 무거운 베릴륨동(BeCu)을 사용하였으며, Model 2와 Model 3의 유

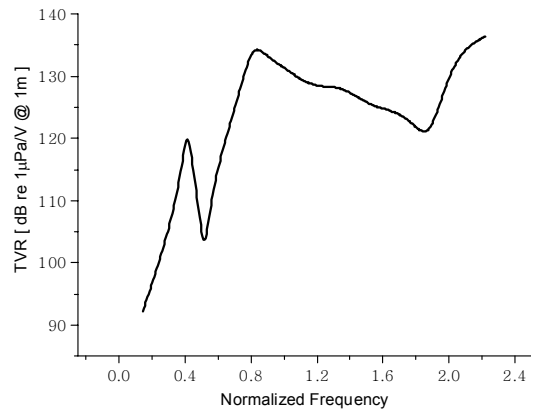


그림 20. Model 1의 TVR 스펙트럼
Fig. 20. TVR spectrum of Model 1.

한요소해석 모델은 각각 그림 21, 그림 23과 같다. 그림 22에서 확인할 수 있듯이 Model 2의 TVR 스펙트럼에서는 Normalized frequency 0.42에서 120.7 dB의 TVR을 나타내며, 0.78와 1.01사이에서 -3 dB 대역폭을 형성하게 되어 Model 1보다 성능조건에 더 부합한다고 볼 수 있다. 그림 24의 Model 2와 Model 3의 비교결과를 살펴보면, Model 3은 Normalized frequency 0.42에서 121.4 dB 값을 나타내며, 0.77에서 1.01까지 -3dB 대역폭을 형성하는 것을 확인할 수 있다. Model 2와 Model 3은 성능 조건을 만족하면서 튜브에 의한 공진 모드에서의 음압을

Model 1에 비해 더 높게 발생하게 된다. 따라서 후면추의 길이를 줄임으로써 튜브에 의한 공진모드에서의 음압을 증가시키고, 전면추의 두께를 줄이고, 질량을 높임으로써 대역폭을 확보하면서 중심주파수를 특정조건에 맞게 유지할 수 있는 것이다.

각 결과에서 볼 수 있듯이 전면추의 질량은 증가하고, 후면추의 질량은 감소함으로써 종방향 공진 모드의 최대 음압이 감소하는 경향을 보이지만, 제안된 3개의 Tonpilz 모델 중에서 성능 조건에 가장 잘 부합하는 모델은 Model 3이라 할 수 있다.

표 4. Model 2의 설계 치수
Table 4. Design dimensions of Model 2.

Location of the tube	bottom
Radius of head mass	13.2 mm
Radius of tail mass	13.2 mm
Thickness of the tube (x_1)	2.0 mm
Inner Radius of the PZT	1.75 mm
Outer Radius of the PZT	7.75 mm
Thickness of the head mass	3.2 mm
Thickness of the tail mass	23.4 mm
Total length	47.0 mm

표 5. Model 3의 설계 치수
Table 5. Design dimensions of Model 3.

Location of the tube	bottom
Radius of head mass	13.2 mm
Radius of tail mass	13.2 mm
Thickness of the tube (x_1)	2.0 mm
Inner Radius of the PZT	1.75 mm
Outer Radius of the PZT	7.75 mm
Thickness of the head mass	3.5 mm
Thickness of the tail mass	22.0 mm
Total length	45.9 mm

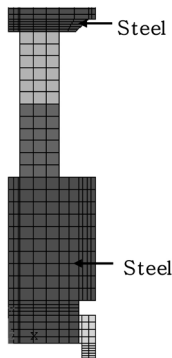


그림 21. Model 2
Fig. 21. Model 2.

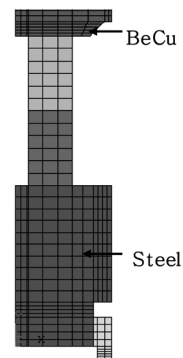


그림 23. Model 3
Fig. 23. Model 3.

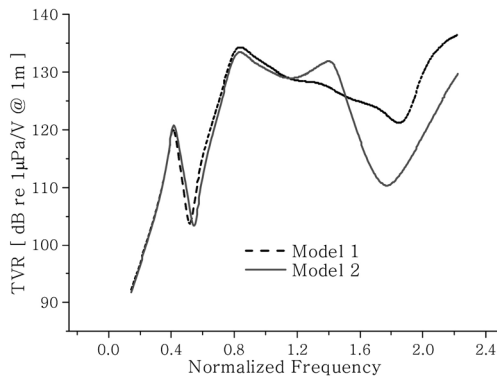


그림 22. Model 1과 Model 2의 TVR 스펙트럼
Fig. 22. TVR spectra of Model 2 and Model 3.

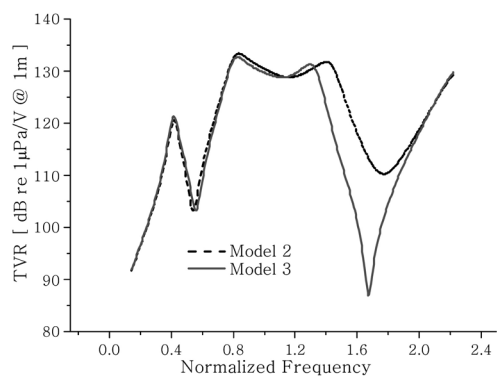


그림 24. Model 2와 Model 3의 TVR 스펙트럼
Fig. 24. TVR spectra of Model 2 and Model 3.

VI. 결론

본 연구에서는 Tonpilz 트랜스듀서의 후면추를 튜브를 이용하여 고정시킴으로써 발생하는 저주파 공진 특성을 파악하여 Tonpilz 트랜스듀서의 추가적인 저주파 공진 모드에서의 이용 가능성을 분석하였다. Tonpilz 트랜스듀서의 설계에 중요한 영향을 미치는 구조변수들을 설정하여 그 변화에 따른 특성을 유한요소법을 이용하여 분석하였다. 탄성을 가지는 튜브를 이용하여 후면추를 고정시킨다면, 그 고정방식이나 튜브의 형태에 따른 Tonpilz 트랜스듀서의 특성변화는 결과적으로 후면추에 부착되는 튜브의 강성값의 크기에 의한 영향으로 볼 수 있으며, 추가적인 공진 특성에 큰 영향을 미치는 것은 이러한 튜브의 강성값과 튜브가 직접적으로 부착되는 후면추의 질량임을 확인 할 수 있었다. 따라서 이 두 가지 변수가 Tonpilz 트랜스듀서의 공진 특성에 미치는 영향을 분석하여, 후면추 고정에 의해 발생하는 공진모드를 적절히 활용하는 방안을 모색할 수 있었다. 뿐만 아니라, 튜브에 의한 저주파 공진특성의 활용 조건을 포함한 임의의 성능 조건이 주어진 경우, 그 성능을 만족시키기 위한 Tonpilz 트랜스듀서의 설계방안 또한 도출해 낼 수 있었다.

따라서 본 연구를 통해 제한된 Tonpilz 트랜스듀서의 규격 내에서 광범위한 장거리 탐지를 위해 요구되는 저주파 공진특성을 가지는 Tonpilz 트랜스듀서의 설계방안을 제안하였으며, 후면추를 튜브를 이용해 고정시키는 비교적 간단한 방법을 통해 추가적인 저주파 공진모드의 활용 가능성을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다 (계약번호 UD090008DD).

참고 문헌

1. O. B. Wilson, *Introduction to Theory and Design of Sonar Transducers*, Peninsul Publishing, Los Altos, Chap. 2 and 6, 1988.

2. M. V. Crombrugge and W. Thompson, Jr., "Optimization of the transmitting characteristics of a Tonpilz-type transducer by proper choice of impedance matching layers," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 77, no. 2, pp. 747-752, 1985.
3. Y. R. Roh and X. Lu, "Design of an underwater Tonpilz transducer with 2-2 mode piezocomposite materials," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 119, no. 6, pp. 3734-3740, 2006.
4. D. L. Pei and Y. R. Roh, "Design of an underwater Tonpilz transducer with 1-3 piezocomposite materials," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 47, no. 5, pp. 4003-4006, 2008.
5. C. H. Sherman and J. L. Butler, *Transducers and Arrays for Underwater Sound*, Springer, New York, Chap. 3 and 7, 2007.
6. K. R. Dhilsha, G. Markandeyulu, B. V. P. Subrahmanyeswara Rao, and K. V. S. Rama Rao, "Design and fabrication of a low frequency giant magnetostrictive transducer," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 258, issues 1-2, pp. 53-55, 1997.
7. Q. Yao, and L. Bjorno, "Broadband Tonpilz underwater acoustic transducers based on multimode optimization," *IEEE Trans. U.F.F.C.*, vol. 44, no. 5, pp. 1060-1066, 1997.
8. D. W. Hawkins and P. T. Gough, "Multiresonance design of a Tonpilz transducer using the finite element method," *IEEE Trans. U.F.F.C.*, vol. 43, no. 5, pp. 782-790, 1996.
9. D. Rajapan, "Performance of a low-frequency, multiresonant broadband Tonpilz transducer," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 111, no. 4, pp. 1692-1694, 2002.
10. S. C. Butler, "Triply resonant broadband transducers," *Oceans '02 MTS/IEEE*, vol. 4, pp. 2334-2341, 2002.
11. K. Saijyou and T. Okuyama, "Design optimization of wide-band Tonpilz piezoelectric transducer with a bending piezoelectric disk on the radiation surface," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 127, no. 5, pp. 2836-2846, 2010.
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

•김 진 욱 (Jinwook Kim)

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

•김 원 호 (Wonho Kim)

한국음향학회지 제24권 제3호 참조

•조 치 영 (Cheeyoung Joh)

한국음향학회지 제14권 제5호 참조

•노 용 래 (Yongrae Roh)

한국음향학회지 제26권 제2호 참조