

다중모드 광대역 Tonpiliz 트랜스듀서의 설계 및 제작

Design and Fabrication of Multi-mode Wideband Tonpiliz Transducers

김진욱, 김희용*, 노용래†

(Jinwook Kim, Hoeyong Kim, and Yongrae Roh[†])

경북대학교 기계공학부

(접수일자: 2013년 1월 11일; 채택일자: 2013년 2월 18일)

초 록: 본 논문에서는 광대역 Tonpiliz 트랜스듀서를 설계하고, 설계 결과의 타당성을 실험적으로 검증하였다. 광대역 주파수 특성을 이루기 위해서 전면추의 flapping 모드를 트랜스듀서의 종방향 공진 모드와 결합시켰으며, 유한요소 해석과 유전자 알고리즘을 이용하여 주어진 설계조건, 구동조건 하에서 가장 넓은 송신 비대역폭(fractional bandwidth)을 확보할 수 있는 트랜스듀서의 최적 구조를 설정하였다. 최적화된 구조는 단일모드 트랜스듀서에 비해 월등히 넓은 -6 dB 송신 비대역폭을 나타내었다. 설계 결과의 타당성을 검증하기 위하여 도출된 최적 구조대로 트랜스듀서 시험편을 제작하여 주파수 특성을 측정하였으며, 측정결과는 설계 결과와 잘 일치하였다.

핵심용어: Tonpiliz 트랜스듀서, Flapping 모드, 다중 모드, 광대역, 송신음압감도(TVR)

ABSTRACT: In this paper, we designed a wideband Tonpiliz transducer, and verified the validity of the design through experiments. The wide frequency bandwidth was achieved by coupling the fundamental longitudinal mode of the transducer with a flapping mode of the head mass. Structure of the Tonpiliz transducer was optimized by means of the finite element method and genetic algorithm to achieve the widest fractional bandwidth under design constraints. The optimized structure showed a far wider -6 dB fractional bandwidth of transmitting responses than that of single mode transducers. For verification of the design result, we manufactured a transducer prototype of the designed structure and characterized its performance, which showed good agreement with the design results.

Keywords: Tonpiliz transducer, Flapping mode, Multi-mode, Wideband, Transmitting voltage response (TVR)

PACS numbers: 43.30. Yj

1. 서 론

Tonpiliz 트랜스듀서는 수중 탐지 및 통신용으로 사용되는 대표적인 피스톤형 트랜스듀서로서 비교적 단순한 구조로 고출력의 송신 특성을 가진다는 장점이 있다. 이로 인해 Tonpiliz 트랜스듀서는 다양한 구조의 배열형 송신자를 구성하는 소자로 사용되고 있다.^[1,2] 배열형 수중 트랜스듀서의 송신 성능은 배열 형태에도 영향을 받지만, 기본적으로 단일 트랜스듀

서의 송신 성능에 의해 큰 영향을 받는다. 수중 배열형 트랜스듀서들은 다양한 빔 패턴과 높은 출력뿐만 아니라 다양한 구동 주파수와 높은 분해능의 확보를 위해 넓은 대역폭을 가져야 한다.^[1-3] 따라서, 이를 구성하는 Tonpiliz 트랜스듀서는 고출력 특성뿐만 아니라 광대역 특성 역시 필요하여, 현재까지 Tonpiliz 트랜스듀서의 광대역화를 구현하기 위해 많은 연구들이 진행되었다.

Tonpiliz 트랜스듀서는 기본적으로 종방향 공진 모드(longitudinal resonant mode)로 구동하는 트랜스듀서이므로 이 공진모드에서는 대역폭이 좁다.^[4] 이 한계를 극복하여 광대역 특성을 구현하기 위한 여러 가지 방법들이 제안되었다. 트랜스듀서 앞에 정합층

†Corresponding author: Yongrae Roh (yryong@knu.ac.kr)
School of Mechanical Engineering, Kyungpook National University,
1370 Sankyukdong, Bukgu, Daegu 702-701, Republic Of Korea.
(Tel: 82-53-950-6828, Fax: 82-53-943-8716)

*Current address: Development Team 3, Hanwha Corporation Gumi
Plant, 264-36 SANHO-DAERO GUMI, KYUNGBUK, 730-904,
Republic Of Korea.

이나 정합판을 부착하여 대역폭을 넓히는 방안^[5,6] 외에 Tonpilz 구조를 변경한 방법으로, Butler는 Rodrigo가 2개의 전면추(head mass 혹은 front mass)를 부착하여 부가적인 공진모드를 만들어낸 것^[7]에 착안하여 3개의 전면추를 가지는 구조로 대역폭을 증가시켰으며,^[8] Roh와 Pei는 구동소자를 압전세라믹에서 2-2형, 1-3형 압전복합체로 대체함으로써 넓은 대역폭을 확보하는 방안을 제시하였다.^[9,10] 그 외에도, Yamamoto와 Saijyou 등은 전면추 앞에 부착된 판(bending disk)의 진동모드가 나타나는 주파수를 구동 대역폭에 포함시켰으며,^[11,12] Chhith는 전면추에 빈공간을 두고 질량을 낮추어 Tonpilz의 품질계수(quality factor)를 감소시켜 대역폭을 증가시키는 방법을 제안하였다.^[13]

하지만, 가장 간단하고 효율적인 방법으로 사용할 수 있는 것은 Tonpilz의 전면추의 외곽쪽을 점점 얇아지게 만들어 전면추가 종방향 진동에 의해 휘는 모드(flapping mode)를 이용하는 것이다. 이는 구동 대역폭을 기본 종방향 공진주파수에서 전면추가 휘는 공진주파수까지 확보하는 것이며, 앞서 밝힌 기존의 연구 결과에서도 이러한 특성을 이용하고 있다. Yao는 전면추가 휘는 flapping 모드에 대해 주파수 대역에 따라 모드형상을 유한요소 해석(finite element analysis, FEA)을 이용해 분석하였으며, 실제 이 모드를 활용하는 Tonpilz를 제작하여 계산결과와 측정 결과를 비교하였지만,^[4] 측정환경과 Tonpilz의 부착방식에 대한 자세한 언급은 생략되어 있다. Hawkins 역시 flapping 모드를 유한요소 해석을 이용하여 분석하였지만, 실제 제작에선 이 모드를 사용하기 위해 lip-mounting이라는 다소 복잡한 구조의 부착 방식을 사용하였다.^[14] 또한 앞서 언급한 기존의 연구결과들 중에는 실제 측정결과 없이 유한요소 해석 결과만으로 성능을 평가한 연구 결과들도 있다.^[9,10,13]

따라서, 본 연구에서는 flapping 모드를 이용한 광대역 Tonpilz 트랜스듀서를 설계하고, 설계한 치수대로 시험편을 제작한 후 복잡한 부착방식 없이 송신 성능을 측정하여, 다중모드 광대역 Tonpilz의 구현 가능성을 검증하였다. 설계과정에서 상용 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 설계변수의 영

향을 분석하고 Tonpilz의 송신 성능을 파악하였으며, 유전자 알고리즘을 활용하여 주어진 설계조건과 구동조건에서 최대 주파수 비대역폭(fractional bandwidth)을 구현하기 위한 트랜스듀서 구조의 최적화를 수행하였다. 최적설계 결과를 따라 제작된 광대역 Tonpilz 트랜스듀서 시험편의 특성으로는 송신음압 감도(transmitting voltage response, TVR)를 평가하였다.

II. 다중모드 Tonpilz 트랜스듀서

Tonpilz 트랜스듀서는 기본적으로 종방향 진동 모드를 가지지만, 전면추의 넓은 방사면적과 형상으로 인해 전면추가 휘는 flapping 모드를 동시에 가질 수 있다.^[3] Tonpilz 트랜스듀서의 종방향 모드와 전면추가 휘는 flapping 모드의 형상은 Fig. 1에 나타내었으며, 점선으로 나타낸 부분이 Tonpilz가 진동을 하지

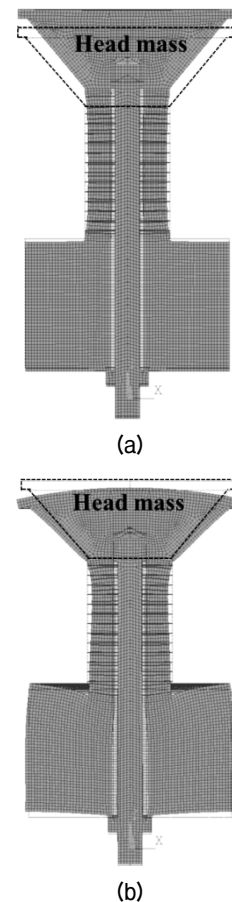


Fig. 1. Vibration modes of Tonpilz transducers: (a) longitudinal mode, (b) flapping mode.

않을 때의 상태이다. 처음 Tonpiliz가 설계되고 사용될 당시에는 flapping 모드가 트랜스듀서의 송신 특성에 악영향을 미친다고 판단되었다.^[15-18] 그래서 종방향 송신 음압과 주파수 대역폭에 악영향을 주지 않기 위해, flapping 모드의 공진 주파수가 구동대역폭보다 월등히 위에 있도록 설계하였다.^[3,15-18] flapping 모드의 근사적인 공진 주파수는 식(1)을 이용하여 도출할 수 있지만,^[3,15] 이 모드는 전면추의 형상과 종방향 공진 주파수의 영향을 크게 받으므로 실제 Tonpiliz의 전면추 형상을 고려한 정확한 공진주파수를 도출하기 위해서는 유한요소 해석을 이용해야 한다.^[15] 식(1)은 전면추의 단면이 원형이고 직경이 D , 두께가 t , 음속이 c , 포아송비가 ν 인 경우의 flapping 모드 공진 주파수 f_f 를 구하는 식이다.

$$f_f = 1.65ct/D^2(1-\nu^2)^{1/2} \quad (1)$$

하지만, Butler 등이 flapping 모드의 활용 방안에 대해 제안하였다.^[19] Tonpiliz 트랜스듀서의 기본적인 종방향 공진 주파수와 함께 flapping 모드 공진 주파수도 송신 주파수 대역에 포함시켜 활용할 수 있음을 밝혔다. 실제로 두 공진 주파수 사이에서는 송신 음압값이 급격한 변화를 보이는 구간 없이 평탄하게 이어지는 것을 확인 할 수 있다.

III. Tonpiliz 트랜스듀서의 특성분석 및 구조 최적화

3.1 Tonpiliz 트랜스듀서의 유한요소 모델

다중모드 Tonpiliz 트랜스듀서의 특성을 유한요소 해석을 통해 분석하였다. ANSYS를 이용한 Tonpiliz 트랜스듀서의 2차원 축대칭 유한요소 모델은 Fig. 2와 같다. 트랜스듀서의 구동소자에 전극을 인가하고, 이로 인해 전면추와 음향창(acoustic window)을 거쳐 방사된 음압을 물의 특정 절점에서 해석할 수 있도록 유한요소모델을 만들었다. 물 매질의 최외곽에서는 반사가 일어나지 않도록 경계조건을 설정하고, 수신 절점에서 해석된 음압을 송신거리 1m에 대해 환산하여 TVR을 계산하였다. Tonpiliz 트랜스듀서 시험편을 제작하고 TVR 측정실험을 할 것을 대비하

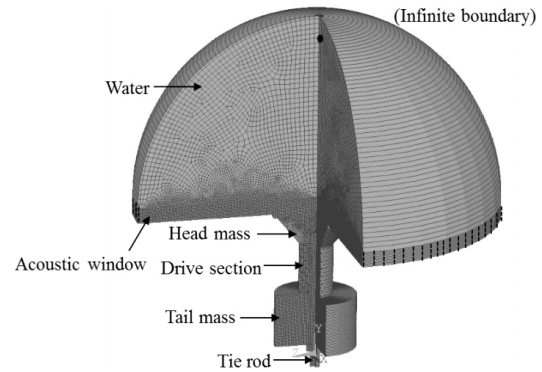


Fig. 2. Finite element model of a Tonpiliz transducer to analyze characteristics.

Table 1. Material properties of the Tonpiliz transducer's components.

Transducer component	Material	Density (kg/m ³)	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio
Head mass	Aluminum	2700	68.9	0.33
Tail mass	Brass	8800	104	0.33
Acoustic window	Polyurethane	1065	0.2	0.48
Drive section	PZT5A	7750	.	.
Tie rod	Copper	8250	128	0.3

여 실제 실험에 쓰이는 재료와 형태가 고려된 유한요소 해석을 수행하였으며, Tonpiliz 트랜스듀서의 부착형태, 음향창의 재료와 고정방식 역시 실제 실험 환경과 동일하게 설정하였다. Tonpiliz를 구성하는 전면추, 후면추, 절연층, 음향창, 구동소자, 접합볼트의 재료와 물성은 Table 1에 나타내었다.

3.2 설계변수에 따른 TVR 변화경향 분석

Tonpiliz 트랜스듀서의 구동 대역폭을 결정하는 중요한 요소로는 구동소자의 종류와 전면추, 후면추의 물성 및 구조 등이 있다. 하지만, 이미 많은 연구를 통해, 구동소자로 쓰이기에 적절한 압전세라믹의 종류와 전면추와 후면추에 효과적으로 쓰이는 재료가 보고되었다.^[2,14] 본 연구에서는 구동소자로 쓰이는 압전세라믹의 종류와 전면추, 후면추의 재료 그리고 구동 주파수와 방사면적이 정해진 경우, 전면추와 후면추의 구조가 Tonpiliz 트랜스듀서의 구동 대역폭에 어떤 영향을 미치는지 분석하였다. 방사면적이

정해진 상태에서 Tonpilz 트랜스듀서의 대역폭에 영향을 미치는 설계변수로는 전면추의 두께, 후면추의 두께, 후면추의 반경이 있다. 따라서, 3개의 설계변수가 트랜스듀서의 TVR에 미치는 영향을 유한요소 해석을 통해 분석하였다. 유한요소 해석을 통해 도출된 TVR 스펙트럼들은 중심주파수 값에 대해 정규화된 값을 가로축으로 하여 나타내었다.

먼저, 전면추의 두께를 9mm에서 18mm까지 2.25mm 간격으로 변화시켜가며 트랜스듀서의 TVR 변화 경향을 파악하였다. 전면추 두께변화에 따른 TVR 스펙트럼의 변화는 Fig. 3에 나타내었다. 전면추의 반경이 일정하게 유지된 조건에서, 두께가 증가할수록 첫 번째 종방향 공진주파수의 값은 낮아진다. 이는 전면추의 두께 증가량만큼 Tonpilz 트랜스듀서 전체의 길이가 증가하였기 때문이다. 또한, 전면추의 두께가 증가할수록 대역폭 확보에 중요한 역할을 하는 flapping 모드로 인한 송신 음압의 크기가 작아짐을

확인 할 수 있다. 음향장에 전면추가 부착되어 있기 때문에, flapping 모드의 공진 특성을 식(1)을 통해 정확하게 파악할 수는 없지만, 이 식에서 알 수 있듯이 전면추의 두께가 증가함에 따라 flapping 공진 주파수가 구동 대역폭 이후로 크게 증가하여 현재 성능을 평가하고자 하는 대역폭 내에서는 큰 영향을 미치는 않는 것으로 볼 수 있다. 전면추의 두께변화에 따른 Tonpilz 트랜스듀서의 -6 dB 비대역폭의 변화경향은 Fig. 4와 같이 나타난다.

두 번째 설계변수인 후면추의 두께 변화에 따른 TVR 변화도 파악하였다. 후면추의 두께를 10mm에서 25mm까지 3.75mm 간격으로 증가시켰을 때 TVR 스펙트럼의 변화결과는 Fig. 5와 같다. 후면추의 두께가 증가할수록 트랜스듀서 전체의 길이가 증가하므로, 종방향 공진 주파수가 크게 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 후면추의 두께변화에 따른 -6 dB 비대

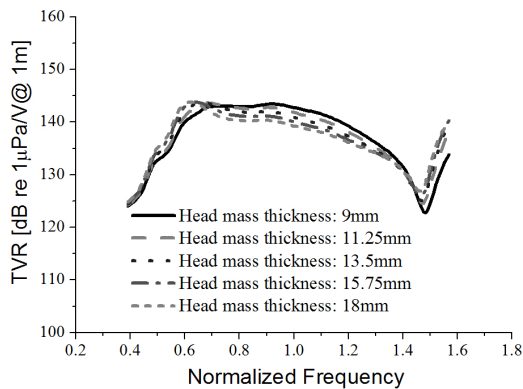


Fig. 3. TVR spectra in accordance with the variation of the head mass thickness.

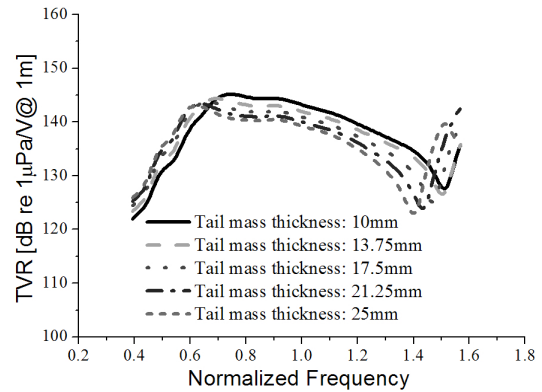


Fig. 5. TVR spectra in accordance with the variation of the tail mass thickness.

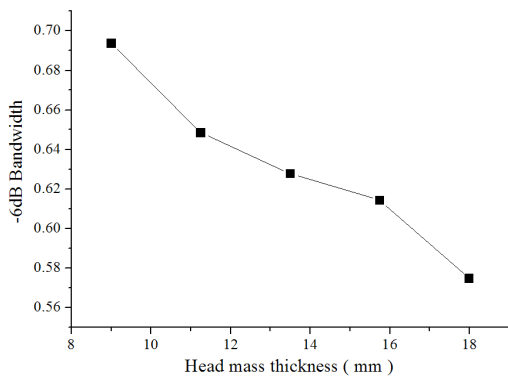


Fig. 4. Variation of -6 dB fractional bandwidth in accordance with the head mass thickness.

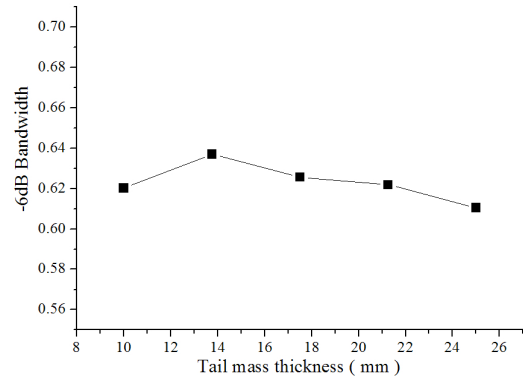


Fig. 6. Variation of -6 dB fractional bandwidth in accordance with the tail mass thickness.

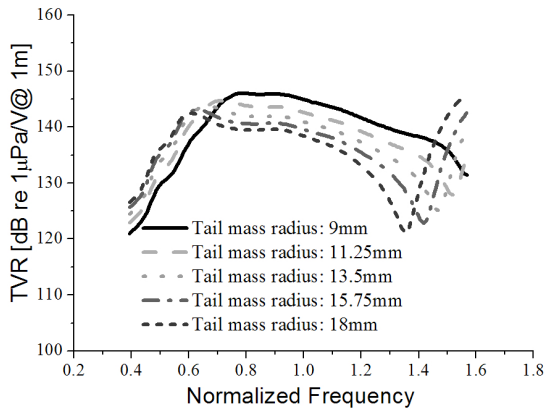


Fig. 7. TVR spectra in accordance with the variation of the tail mass radius.

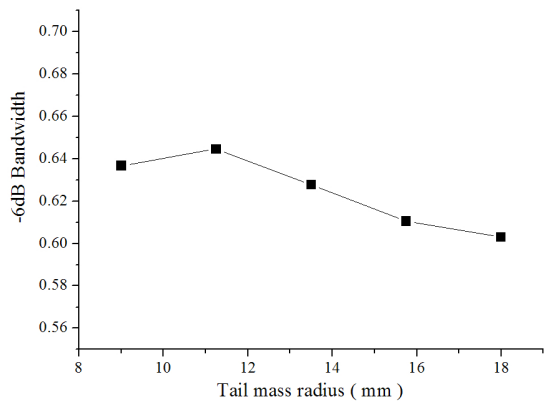


Fig. 8. Variation of -6 dB fractional bandwidth in accordance with the tail mass radius.

역폭의 변화는 Fig. 6에 나타내었다.

후면추의 반경변화에 따른 TVR 스펙트럼변화는 Fig. 7과 같다. 후면추의 반경을 9mm에서 18mm까지 2.25 mm씩 증가시킨 결과, 그 변화 경향이 후면추의 두께 변화 경향과 유사하다. 후면추의 반경이 증가하면서, 후면추의 질량 증가가 트랜스듀서의 총 질량을 증가시켜 전체적인 주파수 대역을 낮추게 된다. Fig. 8에 나타낸 -6 dB 비대역폭의 변화 경향 역시 후면추의 두께 변화와 유사함을 확인 할 수 있다.

3.3 광대역 구현을 위한 트랜스듀서 구조 최적화

앞 절에서 각 설계변수가 Tonpiliz 트랜스듀서의 TVR 스펙트럼에 미치는 영향을 분석하였으며, 각 설계변수에 의한 -6 dB 비대역폭의 변화 경향을 파악하였다. 본 연구의 목적은 주어진 제한조건 내에서

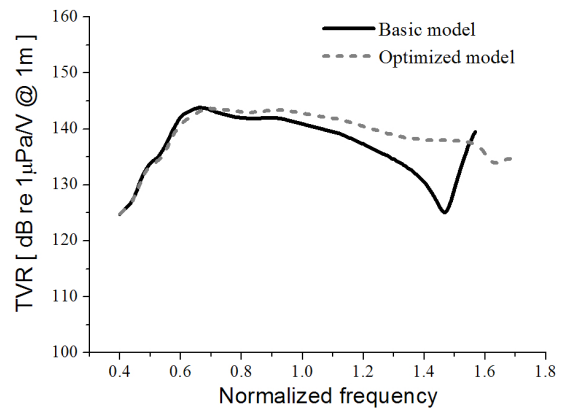


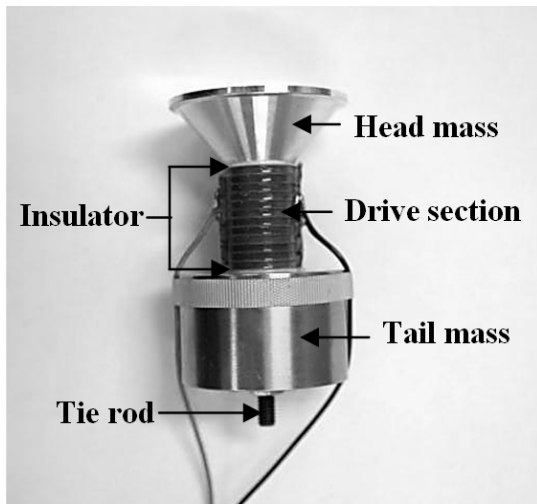
Fig. 9. Comparison of TVR spectra of the basic and optimized models.

-6 dB 비대역폭을 최대로 가지는 트랜스듀서를 설계하는 것이므로, 이러한 분석 결과들을 바탕으로 최적화 과정을 거쳐 최종 Tonpiliz 트랜스듀서 구조를 결정하여야 한다. 따라서, 설계변수를 전면추의 두께, 후면추의 두께, 후면추의 반경으로 설정하고, 이 3개의 설계변수들로 최적화를 수행하였다. 최적화의 제한 조건은 주어진 특정주파수에 대해 정규화된 중심주파수가 1.0이상 1.08이하인 범위 내에 위치하는 것이다. 이와 같은 제한조건 아래에서 유전자 알고리즘을 이용하여 설계변수들의 최적화를 수행하였다. 설계변수가 3개인 경우에 유전자 알고리즘을 이용하여 제한조건을 만족시키며 최적화를 수행하는 과정은 참고문헌 [9], [10], [13]에 상세히 기술되어 있다. 이와 같은 과정으로 최적화를 수행한 결과, 전면추의 두께는 11.2 mm, 후면추의 두께는 21.3 mm, 후면추의 반경은 16.8 mm인 경우에 제한조건을 만족함과 동시에 가장 넓은 -6 dB 비대역폭을 가지는 것으로 나타났다. 최적화를 수행하기 전의 기본 모델과 최적화를 통해 설계된 모델의 TVR 스펙트럼은 Fig. 9에 비교하였다. 그림에서 확인 할 수 있듯이, flapping 모드의 영향으로 기본 모델에 비해 최적 설계된 구조의 주파수 대역폭이 월등히 크게 증가하였다.

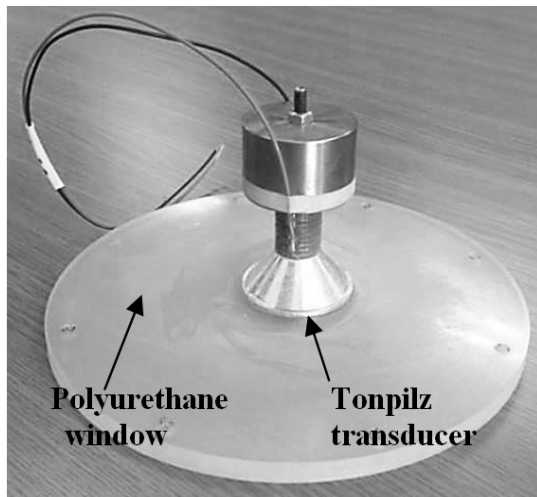
IV. 다중모드 Tonpiliz 트랜스듀서 시험편 제작 및 측정

III절에서 설계된 광대역 주파수 폭을 가지는

Tonpiliz 트랜스듀서의 실험적 시험편을 제작하였다. 유한요소 해석을 통해 Tonpiliz 트랜스듀서의 성능을 파악할 때부터 이미 실제 시험편 제작을 고려하였으므로, 해석에 사용되었던 것과 동일한 물성을 가지는 재료로 전면추와 후면추 등을 제작하였다. 구동소자도 해석에 쓰인 PZT-5A를 사용하여 12층의 다층구조로 제작하였다. 제작된 Tonpiliz 트랜스듀서는 폴리우레탄 음향창에 전면추의 방사면을 견고히 부착시켜 고정시켰다. Tonpiliz 트랜스듀서의 시험편과 시험편이 음향창에 부착된 형상은 Fig. 10과 같다.



(a)



(b)

Fig. 10. Prototype of the Tonpiliz transducer: (a) Tonpiliz transducer, (b) the transducer attached to the polyurethane window.

Fig. 10과 같은 상태에서 임피던스 분석기(Agilent 4294A)를 사용해 측정된 공기 중 임피던스와 유한요소 해석을 통해 계산한 공기 중 임피던스 스펙트럼을 비교한 결과는 Fig. 11에 나타내었다. 공기 중 임피던스의 측정결과와 해석 결과가 반공진 주파수에서 어느 정도 차이를 보이는 것은, 제작과정에서 발생한 치수 오차와 볼트 조임에 의한 초기 응력상태의 불일치 때문으로 판단된다.

제작된 Tonpiliz 시험편이 설계한 Tonpiliz의 유한요소 해석 결과와 일치하는 송신성능을 가지는지를 파악하기 위해, 제작한 Tonpiliz 시험편의 수중 임피던스와 TVR을 측정하였다. 트랜스듀서의 수중 특성 측정 개략도는 Fig. 12와 같고, Tonpiliz 트랜스듀서가 수조 안에 있을 때의 임피던스와 TVR 스펙트럼을 정규화된 주파수 0.4에서 2.0까지 0.02 간격으로 측정하였다. 측정된 임피던스, TVR 스펙트럼과 설계과정에서 유한요소 해석을 이용하여 구한 임피던스,

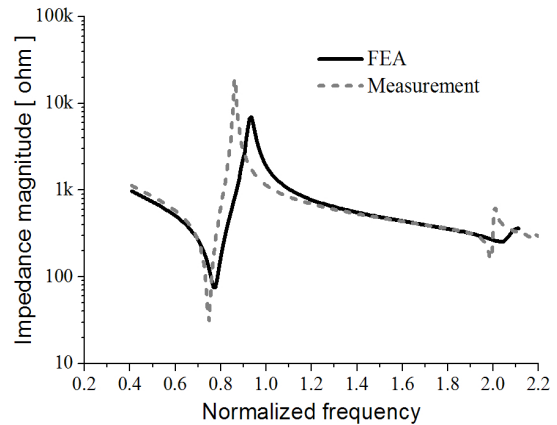


Fig. 11. Comparison of the measured and calculated in-air impedance spectra.

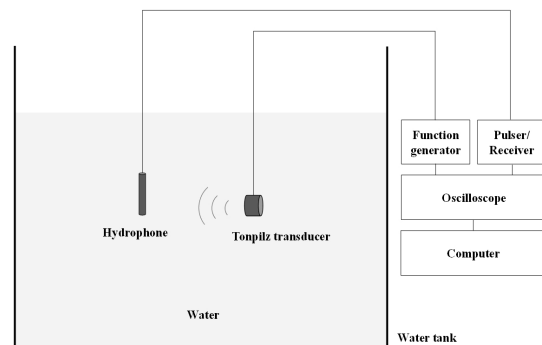


Fig. 12. Schematic diagram for TVR measurement.

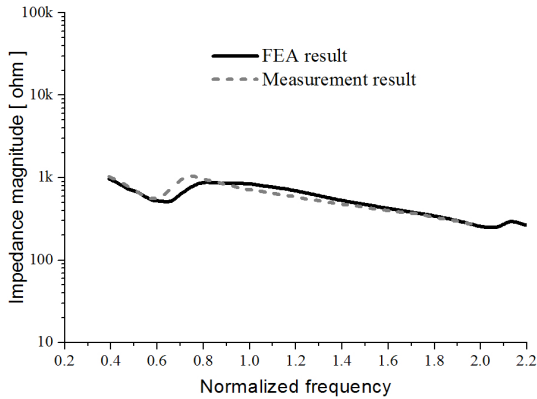


Fig. 13. Comparison of measured and calculated impedance spectra in water.

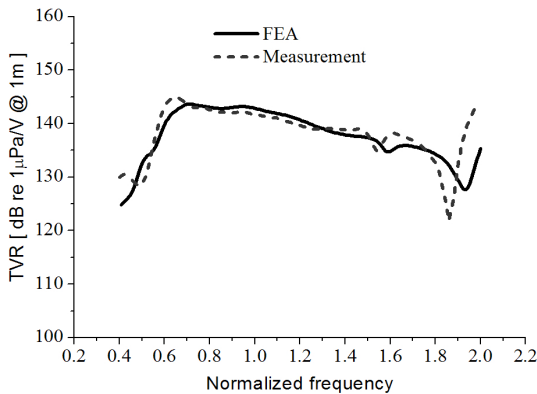


Fig. 14. Comparison of measured and calculated TVR spectra in water.

TVR 스펙트럼을 서로 비교한 결과는 각각 Fig. 13과 Fig. 14와 같다.

두 스펙트럼에서 전체적인 임피던스의 값은 잘 일치하지만, 앞서 공기중 임피던스를 측정하여 비교했던 결과와 유사하게 반공진 주파수에서 어느 정도 오차를 보이는 것을 확인할 수 있다. 반공진 주파수에 차이가 있는 것은 앞서 설명했던 것과 동일한 원인에 의한 것으로 판단된다. 측정한 TVR 스펙트럼과 유한요소 해석을 통하여 구한 TVR 스펙트럼을 비교해보면, 정규화된 주파수 대역 0.5에서부터 1.7까지 TVR 값과 주파수 변화에 따른 스펙트럼의 형상이 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 설계과정에서 의도했던 전면추의 flapping 모드로 인한 대역폭 증가 효과 역시 제작결과에서 잘 나타났다. 설계단계에서 계산했던 최적모델의 최대 TVR 값이 143.9 dB, -6 dB 비대역폭은 86.3%였으며, 실제 제작한 시험편

의 최대 TVR 값은 144.7 dB, 비대역폭은 89.0%로 측정되어, 기대했던 광대역 송신 성능을 구현할 수 있었다. 통상의 단일모드형 Tonpilz 트랜스듀서의 비대역폭이 10% 내외라는 점과 비교하면 본 연구에서 구현한 대역폭은 매우 넓은 값이다. 이러한 결과는 본 연구에서 목표로 했던 flapping 모드를 이용한 광대역 트랜스듀서가 구현되었음을 확인해주는 것이다.

V. 결 론

본 논문에서는 트랜스듀서의 종방향 공진 모드와 전면추의 flapping 모드를 결합함으로써 광대역 주파수 폭을 가지는 Tonpilz 트랜스듀서를 설계하고, 설계 결과의 타당성을 실험적으로 검증하였다. 광대역 주파수 특성을 이루기 위해서 유한요소 해석과 유전자 알고리즘을 이용하여 주어진 설계조건, 구동조건 하에서 가장 넓은 송신 대역폭을 확보할 수 있는 트랜스듀서의 최적 구조를 설정하였고, 최적화된 구조는 단일모드 트랜스듀서에 비해 월등히 넓은 송신 비대역폭을 나타내었다. 설계 결과의 타당성을 검증하기 위하여 도출된 최적 구조대로 트랜스듀서 시험편을 제작하여 주파수 특성을 측정하였으며, 측정결과는 설계 결과와 잘 일치하였다. 따라서 본 연구에서 목표로 했던 flapping 모드를 이용한 광대역 트랜스듀서가 구현되었음을 확인할 수 있었다. 이상과 같은 광대역 트랜스듀서는 각종 수중 통신 및 탐지 장치에서 기존 제품보다 더 고감도와 고정밀도를 가지는 송/수신 소자로 직접 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다(계약번호 UD100002KD).

참 고 문 헌

1. J. Kim, W. Kim, C. Joh, and Y. Roh, "Analysis of the resonant characteristics of a tonpilz transducer with a fixed tail mass by the equivalent circuit approach" (in Korean), J.

- Acoust. Soc. Kr. **30**, 344-352 (2011).
2. R. F. W. Coates, "The design of transducers and arrays for underwater data transmission," IEEE J. Oceanic Eng. **16**, 123-135 (1991).
 3. C. H. Sherman and J. L. Butler, *Transducers and Arrays for Underwater Sound* (Springer, New York, 2007).
 4. Q. Yao and L. Bjørnø, "Broadband tonpiliz underwater acoustic transducers based on multimode optimization," IEEE Trans., Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr. **44**, 1060-1066 (1997).
 5. G. Kossoff, "The effects of backing and matching on the performance of piezoelectric ceramic transducers," IEEE Trans. Sonics Ultrason. **SU-13**, 20-30 (1966).
 6. T. Inoue, T. Nada, T. Tsuchiya, T. Nakanishi, T. Miyama, S. Takahashi, and M. Konno, "Tonpiliz piezoelectric transducers with acoustic matching plates for underwater color image transmission," IEEE Trans., Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr. **40**, 121-130 (1993).
 7. G. C. Rodrigo, "Analysis and design of piezoelectric sonar transducers," Ph. D. Thesis, London, (1970).
 8. S. C. Butler, "Triply resonant broadband transducers," Oceans '02 MTS/IEEE **4**, 2334-2341 (2002).
 9. Y. R. Roh and X. Lu, "Design of an underwater Tonpiliz transducer with 2-2 mode piezocomposite materials," J. Acoust. Soc. Am. **119**, 3734-3740 (2006).
 10. D. L. Pei and Y. R. Roh, "Design of an underwater Tonpiliz transducer with 1-3 piezocomposite materials," Jpn. J. Appl. Phys. **47**, 4003-4006 (2008).
 11. M. Yamamoto, H. Shiba, T. Fujii, Y. Hama, T. Hoshino, and T. Inoue, "Tonpiliz piezoelectric transducer with a bending piezoelectric disk on the radiation surface," Jpn. J. Appl. Phys. **42**, 3221-3224 (2003).
 12. K. Saijyou and T. Okuyama, "Design optimization of wide-band Tonpiliz piezoelectric transducer with a bending piezoelectric disk on the radiation surface," J. Acoust. Soc. Am. **127**, 2836-2846 (2010).
 13. S. Chhith and Y. Roh, "Wideband tonpiliz transducer with a cavity inside a head mass," Jpn. J. Appl. Phys. **49**, 07HG08-1-07HG08-5 (2003).
 14. D. W. Hawkins and P. T. Gough, "Multiresonance design of a Tonpiliz transducer using the finite element method," IEEE Trans., Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr. **43**, 782-790 (1996).
 15. O. B. Wilson, *Introduction to Theory and Design of Sonar Transducers* (Peninsula Publishing, Los Altos, 1988).
 16. J. N. Decarpigny, J. C. Debus, B. Tocquet, and D. Boucher, "In-air analysis of piezoelectric Tonpiliz transducers in a wide frequency band using a mixed finite element-plane wave method," J. Acoust. Soc. Amer. **78**, 1499-1507 (1985).
 17. H. Allik, K. M. Webman, and J. T. Hunt, "Vibrational response of sonar transducers using piezoelectric finite elements," J. Acoust. Soc. Amer. **56**, 1782-1791 (1974).
 18. S. C. Thompson, M. P. Johnson, E. A. McLaughlin, and J. F. Lindberg, "Performance and recent developments with doubly resonant wide band transducers," Proc. 3rd Int. Workshop Transducers Sonics Ultrason. 239-249 (1992).
 19. J. L. Butler, J. R. Cipolla, and W. D. Brown, "Radiating head flexure and its effect on transducer performance," J. Acoust. Soc. Am. **70**, 500-503 (1981).

저자 약력

▶ 김진욱 (Jinwook Kim)



2010년 2월: 경북대학교 기계공학부 (공학사)
 2012년 2월: 경북대학교 기계공학과 (공학석사)
 2012년 3월~현재: 경북대학교 기계공학과 박사과정
 <관심분야> 음향/초음파 트랜스듀서, 탄성파

▶ 김회용 (Hoeyong Kim)

2005년 2월: 영남대학교 기계공학부 (공학사)
 2007년 2월: 경북대학교 기계공학과 (공학석사)
 2012년 8월: 경북대학교 기계공학과 (공학박사)
 2013년 1월~현재: (주)한화 선임연구원
 <관심분야> 음향/초음파 트랜스듀서, 수중음향

▶ 노용래 (Yongrae Roh)

1984년 2월: 서울대학교 자원공학과 (공학사)
 1986년 2월: 서울대학교 자원공학과 (공학석사)
 1990년 5월: 미국 펜실베이니아주립대학교 (공학박사)
 1990년 5월~1994년 2월: 포항산업과학연구원 선임연구원
 1994년 3월~현재: 경북대학교 기계공학부 교수
 <관심분야> 음향/초음파 트랜스듀서, 압전 Device, 전자재료, 파동해석