

Effects of piezoelectric material on the performance of Tonpiliz transducer using finite element method

Jin-Won Seo, Kyoon Choi[†] and Ho-Yong Lee^{*}

Icheon Branch, Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology, Icheon 17303, Korea

^{*}R & D Center, Ceracom Co., Ltd., Cheonan 31094, Korea

(Received August 11, 2016)

(Revised August 17, 2016)

(Accepted August 19, 2016)

Abstract Effects of the shape and size of the piezoelectric materials on the performance of tonpiliz transducers were studied with a computer simulation using a finite element method (FEM). The diameter and height of the donut-shaped piezoelectric ceramics head mass were changed as variables. And the effect of the stack number was also investigated. Finally, if the piezoelectric ceramics were changed to a piezoelectric single crystal having high piezoelectric constants, how the performances especially, the output power and the TVR transmittance were affected was simulated by FEM. As a result, the output of transducer could be increased to 10 times of PZT-4 with replacement of relaxor single crystal of the same size.

Key words Tonpiliz, Piezoelectric transducer, Finite element method (FEM), Ultrasonic, Ceramic stack

Tonpiliz 트랜스듀서의 성능에 미치는 압전소재의 영향

서진원, 최균[†], 이호용^{*}

한국세라믹기술원 이천분원, 이천, 17303

^{*}세라콤, 천안, 31094

(2016년 8월 11일 접수)

(2016년 8월 17일 심사완료)

(2016년 8월 19일 게재확정)

요약 Tonpiliz 트랜스듀서의 거동에 미치는 압전 소재의 형상과 크기의 효과에 대하여 유한요소법을 통한 컴퓨터 모사를 통하여 연구하였다. 도넛 형태의 압전체의 직경과 높이 그리고 쌓아올린 stack의 수를 변수로 고려하였고 최종적으로 소재 자체를 특성이 뛰어난 단결정 소재로 변환하였을 때 그 특적인 출력과 TVR 대역폭이 어떻게 변하는지를 모사하였다. 그 결과, 리랙서 단결정을 활용함으로써 같은 구조에서 출력을 10배 정도 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

1. 서론

전기음향(electro-acoustic) 트랜스듀서는 전기적 신호를 음향파로 바꾸거나 음향파를 전기적 신호로 바꾸는 장치로서 많은 경우에는 동시에 이 두 가지를 수행한다. 가장 많이 활용되는 트랜스듀서로서 Tonpiliz 트랜스듀서는 큰 head mass와 이를 구동하는 작은 디스크 형의 압전체, 이를 고정시키는 tail mass와 볼트로 구성되며 저주파 고출력의 특징을 갖고 있다. 1958년 처음 발명된 이래 [1], 수중 초음파 발생기, 초음파 세척기, 초음파 웰더나

커터 등 여러 용도에 널리 활용되고 있으며 일방향 지향성을 갖고 있어서 2차원 정렬을 통하여 수중 SONAR 시스템에도 적용되고 있다[1-3]. 한편, 트랜스듀서의 음압을 이용하여 미세입자를 분리 혹은 응집하고자 하는 시도도 계속되고 있는데 이는 최근 문제로 대두되고 있는 황사나 미세먼진에 의한 대기오염과 연관되어 대기환경을 개선시키고자 하는 공학적인 한 가지 접근법으로 주목 받고 있다[4, 5].

Tonpiliz 트랜스듀서를 설계하기 위해서는 실험적인 방법이나 대수 계산을 통하여 기본적인 구조설계가 가능하지만 소재나 형상에 따른 구조의 최적화에는 도달할 수 없는 한계가 있다. 최근에는 FEM(finite element method, 유한요소법)에 기반한 상업적인 S/W를 활용함으로써 더

[†]Corresponding author
E-mail: knchoi@kicet.re.kr

손쉽게 그 초음파 특성을 예측할 수 있다. YaO 등[2]은 FEM을 통한 시뮬레이션을 통하여 이상적인 head mass의 직경을 예측하였고 flapping mode와 piston mode를 중첩(mode coupling)시킴으로써 TVR에서의 대역폭을 확대시킬 수 있다고 제안하였다. 최근까지 head mass의 구조와 크기를 최적화하기 위한 시도[6-8]들이 계속되었으나 각 요소들이 어떤 상관 관계를 갖고 있는가에 대한 구체적인 모델링이 제시되지 못하였다. 본 연구에서는 압전체 소재의 stack 수나 크기 및 형상이 트랜스듀서의 응답 특성인 출력과 대역폭에 미치는 영향을 살펴보았다. 또한, PZT-4와 비교하였을 때, 압전 소재의 측면에서 같은 전기장 하에서 변위가 크고 전기기계 결합계수가 0.9에 달하는 PMN-PT와 같은 리랙서 단결정을 트랜스듀서 소재로 적용하였을 때 어떤 특성이 예측되는지를 FEM software(S/W)를 활용하여 예측하여 보았다.

2. 계산 방법

시뮬레이션에 사용된 소재로는 head mass로는 알루미늄 소재를 tail mass와 고정 볼트는 강철 소재(steel)를 이용하였다. 이용된 소재의 물성치와 관련해서는 이전의 논문에서 인용된 값을 그대로 사용하였다[8]. 또한 시뮬레이션에 사용된 리랙서 단결정(CPSC-160-95)의 물성치는 (주)세라콤으로부터 제공되었으며 그 값을 Table 1에 나타내었다. 구조를 단순화하기 위하여 물과의 임피던스 매칭을 위한 층은 도입하지 않았고 전극의 두께도 고려하지 않았다. 시뮬레이션에 사용된 tonpiliz 트랜스듀서의 외형을 Fig. 1(a)에 나타내었다. 압전소재의 크기인 직경과 높이, stack 수를 변수로 하였고 소재로는 기존의 PZT-4 조성의 세라믹 소결체와 리랙서 단결정인 PMN-PZ-PT를 사용하였는데 이 단결정은 기존의 PMN-PT에 비하여 Curie 온도인 T_C 와 실사용 온도인 T_{RT} 가 높아서 [9] 공기 중에서 사용하였을 때 고출력을 장시간 동안 유지할 수 있는 장점이 있다. 또한 Table 1에서 확인할 수 있듯이 d_{33} 값이 커서 세라믹에 비해 높은 출력(변위) 값을 얻을 수 있다. 압전 진동체는 d_{33} 모드로 서로 반대 방향으로 폴링된 4개의 디스크로 구성되며 이때 압전체의 단위 두께당 인가되는 구동 전압은 1 V/mm로

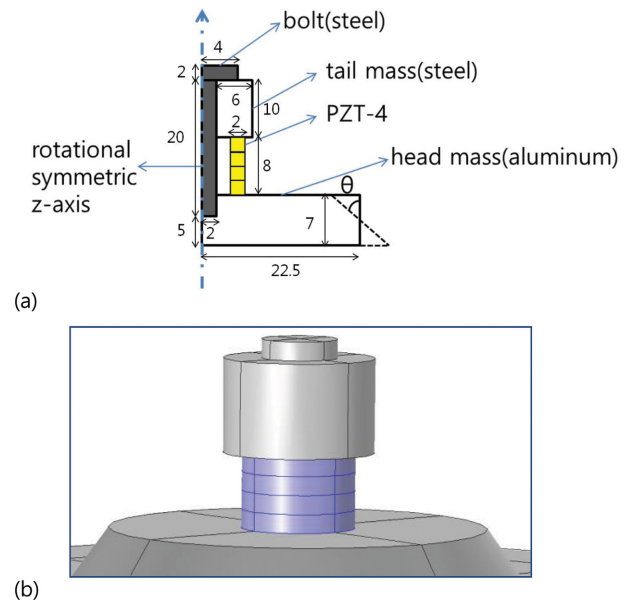


Fig. 1. (a) Geometrical dimensions and designations of components of tonpiliz transducer and (b) its 3-dimensional shape.

고정하였다. 이로부터 트랜스듀서의 초음파 응답특성을 상용 FEM S/W인 COMSOL을 이용하여 예측하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 압전체의 초기 압축응력(prestress)의 영향

가벼운 head mass를 더 무겁고 단단한 tail mass에 고정시키는 역할을 하는 볼트의 또 다른 역할은 디스크 형태의 세라믹 stack에 압축 응력이 걸리게 만듦으로써 기계적인 파괴가 일어나는 것을 막는 것이다. 이 때 인가되는 압축 응력의 크기는 용도와 구조에 따라 달라지게 되는데 인가되는 초기 압축 응력의 크기에 따라 나타나는 주파수에 대한 TVR 응답 특성을 Fig. 2에 나타내었다. 최대의 변위가 생성되는 공진주파수에서 세라믹스에 인장응력이 가해지지 않도록 인가하는 초기 압축응력의 크기는 일반적으로 PZT-4 소재가 견딜 수 있는 강도의 1/10에서 1/20 수준으로 본 연구에서는 1000 N과 2000 N의 경우에 나타나는 응력 분포와 그에 따른 TVR-주파

Table 1
Materials used and their physical constants for these simulations

Materials	Density (kg/m ³)	Relative permittivity { $\epsilon_{11}^T/\epsilon_0, \epsilon_{11}^T/\epsilon_0, \epsilon_{11}^S/\epsilon_0$ }	Coupling Factor [k_{33}]	d_{33} (pC/N)
PZT-4	7500	{762.5, 762.5, 663.2}	0.7	289
PMN-PZ-PT single crystal (CPSC160-95)	7900	{2960, 2960, 2568}	0.93	2000

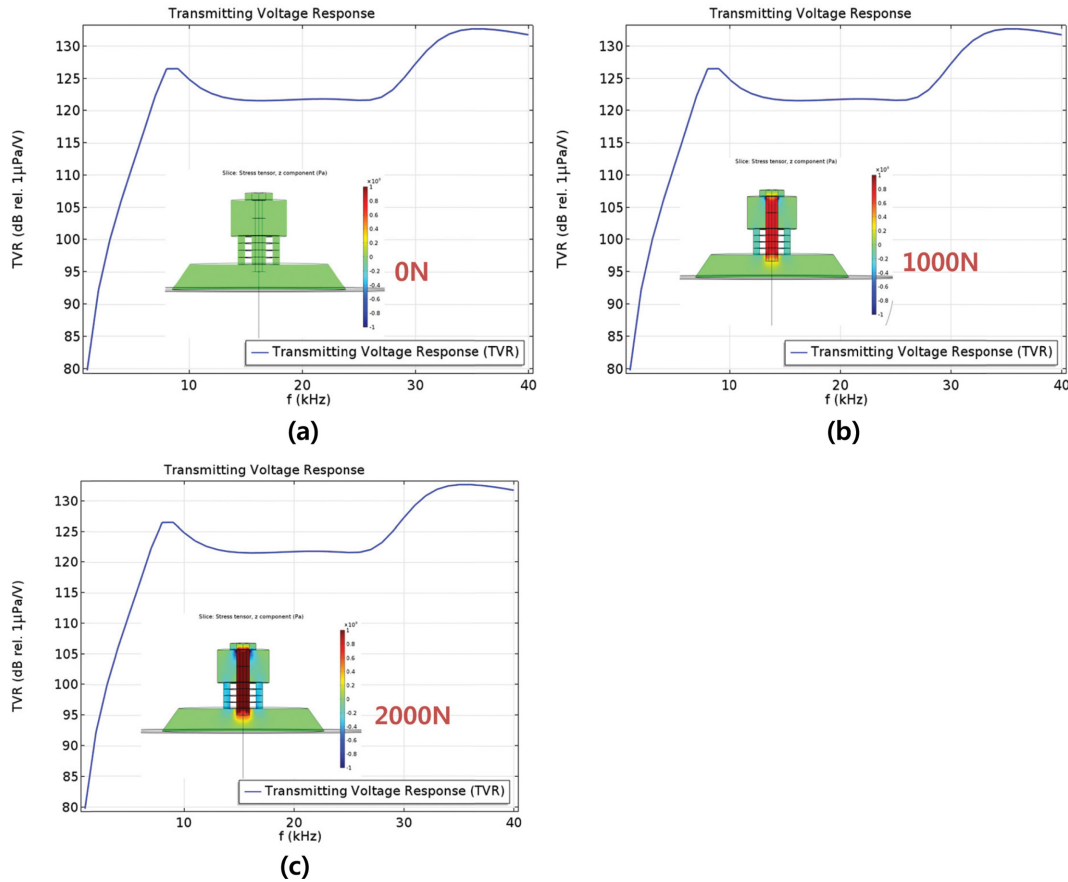


Fig. 2. Change of transmitting voltage response (TVR) of tonpizl transducers with various compressive pre-stress on the piezoelectric stacks by the bolt and the head mass shown in Fig. 1(a) as a function of frequency.

수 특성을 함께 도시하였다. 그 결과, 주파수 특성은 압축 응력에 무관하게 나타남을 확인할 수 있었고 출력 특성도 압축응력에 무관하게 일정하게 나타났다. 이는 압전체에 걸리는 압축응력이 트랜스듀서의 출력에 미치는 영향이 미미함을 보여주고 있다.

3.2. Stack 크기의 효과

TVR(transmitting voltage response)은 1 볼트의 교류 전압($1 V_{RMS}$)을 인가하였을 때 1미터 떨어진 곳에서의 음압 강도로 정의되며 다음과 같이 주파수의 함수로 표기된다.

$$TVR = 20 \log \frac{P_{RMS}/V_{RMS}}{1 \mu Pa V^{-1}} \quad (1)$$

여기서 P_{RMS} 는 head mass 앞 1 m 위치에서의 음압이다. TVR의 주파수 의존성은 특히 수중 초음파 발생기의 대역폭(band-width)를 결정하는 중요한 인자로서 음압 강도가 ± 3 dB 내의 폭 만큼 변화하는 주파수 대역을 보통 대역폭(bandwidth)으로 정의한다. PZT-4의 내부 직경(8 mm)을 그대로 유지한 채, 외경만을 12, 14, 16 mm

까지 확대하였을 때의 주파수에 따른 출력과 TVR 특성을 Fig. 3에 나타내었다.

Fig. 3(a), 3(c), 3(e)에서 볼 수 있듯이 PZT-4 압전체의 외경이 증가함에 따라 출력이 비례하여 증가하는 양상이 나타났으며 동시에 출력이 최대가 되는 주파수도 높은 쪽으로 이동하여 각각 36, 42, 47 kHz에서 각각 0.15, 0.32, 0.65 mW의 최대 출력값을 나타내고 있다. 한편, 대역폭(Δ)은 22 kHz에서 ± 3 dB가 되는 영역으로 외경의 증가와 함께 감소하였는데 Fig. 3(b), 3(d), 3(f)에서 관찰되는 바와 같이 각각 88.1, 84.5, 53.2 %로 감소하는 경향을 나타내었다. 반면에, stack의 높이를 조절하는 방법으로는 stack의 높이를 고정하고 그 수를 늘리는 방법과 stack의 수를 고정하고 높이를 변화시키는 방법이 있다. 이에 대한 검증을 위하여 stack의 수를 늘리는 모사실험 결과를 Fig. 4에 도시하였고 stack의 높이를 변화시키는 모사실험 결과를 Fig. 5에 각각 나타내었다.

Fig. 4와 Fig. 5의 모사결과를 비교해보면, stack의 수를 늘리는 방법과 stack의 수를 늘리는 방법이 거의 유사한 효과를 나타냄을 확인할 수 있다. 즉, stack의 수를 1.5배와 2배로 늘리면 Fig. 3(a)와 Fig. 4(a) 및 4(c)에서 확인할 수 있듯이 출력이 거의 1.5배와 2배로 증가하면

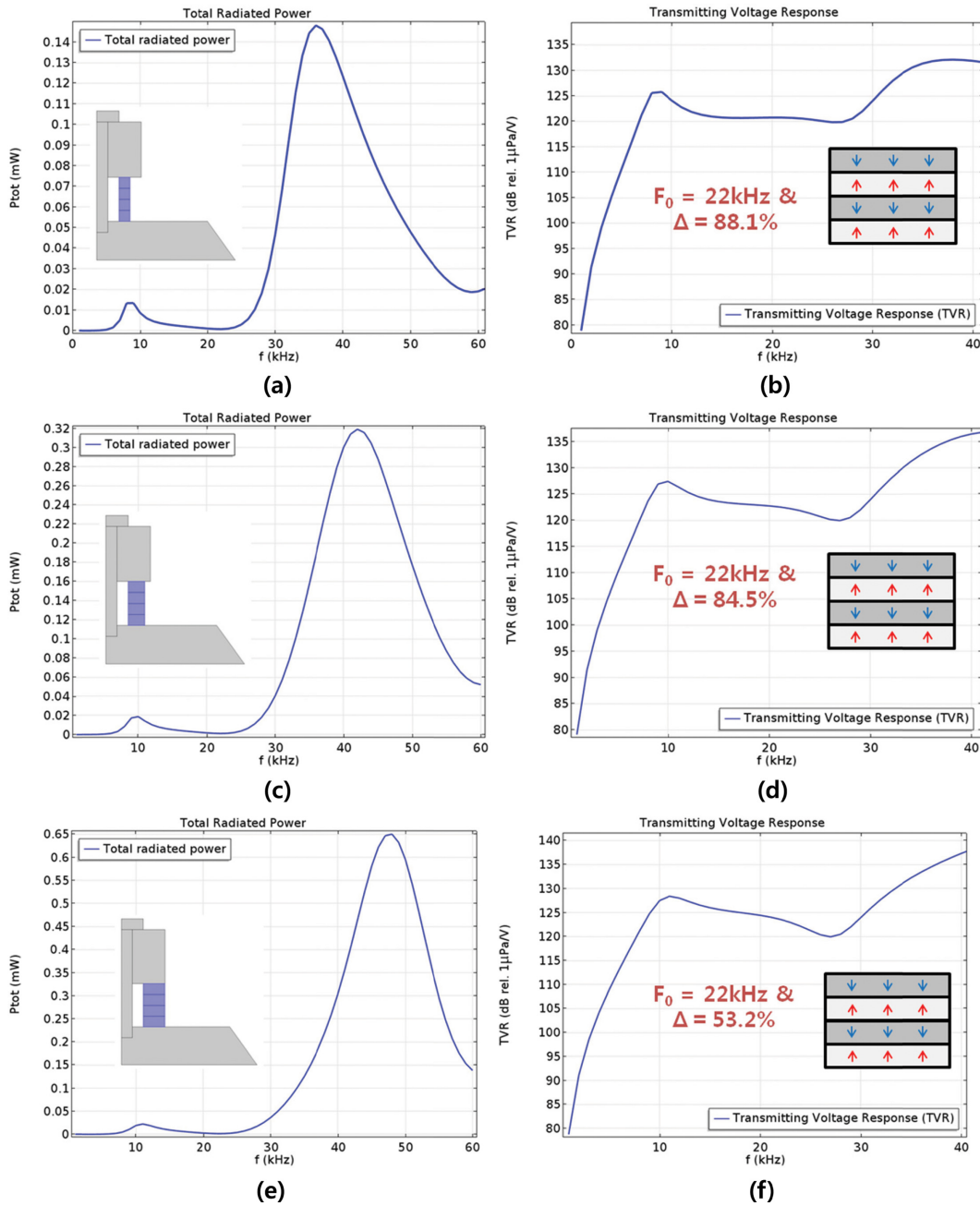


Fig. 3. Change of total radiated power (a, c, e) and transmitting voltage response (TVR) (b, d, f) of tonpilz transducers as a function of frequency with varying outer diameter from 12 mm (a, b), 14 mm (c, d) to 16 mm (e, f) of the piezoelectric stacks.

서 동시에 최대 출력이 나타나는 주파수가 저역대로 이동한다. 이러한 경향은 stack 수를 고정하고 그 높이를 1.5배, 2배로 늘려도 유사한 양상으로 나타나는데 이는 Fig. 3(a)와 Fig. 5(a) 및 5(c)를 비교함으로써 확인할 수 있다. 또한 최대 출력이 나타나는 주파수 대역이 좁아지면서 peak 폭이 줄어드는 양상을 확인할 수 있다. 한편, 대역폭의 경우에는 stack의 수를 증가시키거나 stack의 높이를 늘리는 경우에 각각 서서히 감소하는 양상을 나타내는데 이러한 경향 역시 두 경우 모두 유사한 양상을 나타내고 있음을 Fig. 4(b)와 Fig. 5(b) 및 Fig. 4(d)와

Fig. 5(d)를 비교함으로써 확인할 수 있다.

3.3. 리랙서 단결정의 적용

압전체 소재를 PZT-4에서 리랙서 단결정인 PMN-PZ-PT로 바꾸었을 때에는 그에 맞추어 head mass의 형상과 소재도 최적화하여야 한다[8]. 이를 위하여 기존의 head mass의 소재와 그 형상인자(θ)를 각각 Ti와 20° 로 하였을 때, 시뮬레이션 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 이 결과를 Fig. 3(a)와 3(b)와 비교해 보면 리랙서 단결정을 사

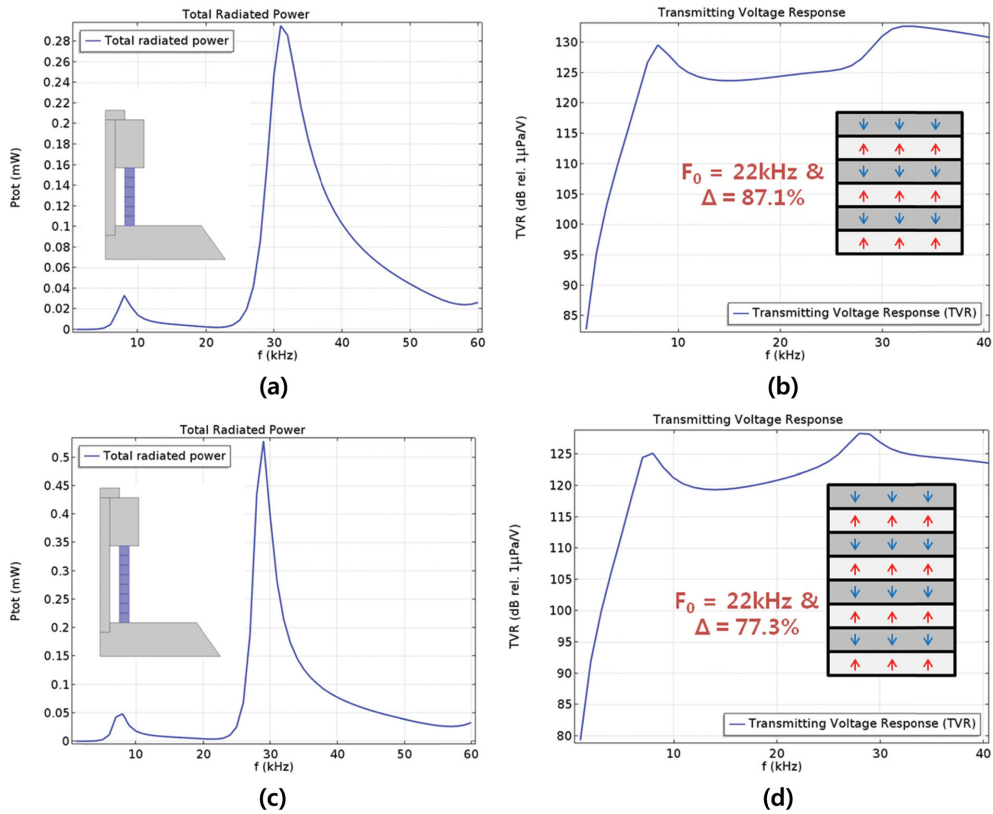


Fig. 4. Change of total radiated power (a, c) and transmitting voltage response (TVR) (b, d) of tonpilz transducers as a function of the piezoelectric stack number from 4 (Fig. 3(a), 3(b)), 6(a, b) to 8(c, d) of the same thickness.

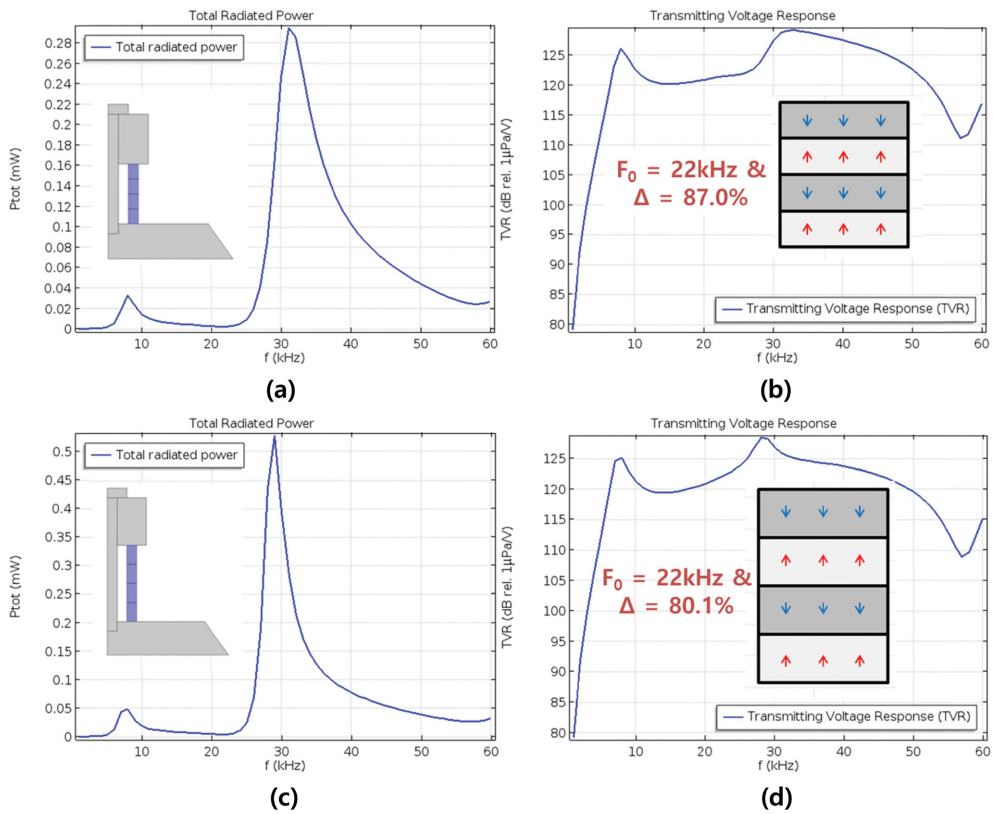


Fig. 5. Change of total radiated power (a, c) and transmitting voltage response (TVR) (b, d) of tonpilz transducers as a function of the piezoelectric stack height from the original (Fig 3(a), 3(b)), 1.5 times (a, b) to 2 times (c, d).

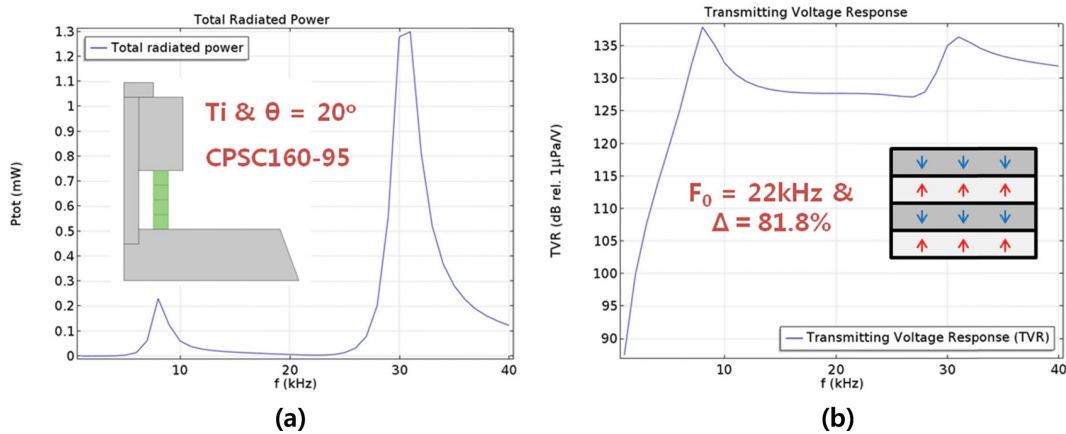


Fig. 6. Change of total radiated power (a) and transmitting voltage response (TVR) (b) of tonpilz transducers by the replacement of piezoelectric materials from PZT-4 (Fig 3(a), 3(b)) to PMN-PZ-PT single crystal (CPSC160-95) and the optimized head mass.

용함으로써 대역폭(Δ)를 80% 이상으로 유지한 상태에서 출력 값을 거의 10배 정도로 향상시킬 수 있음을 확인할 수 있다. 이는 단결정의 율동한 물성치(d_{33})에 근거한 것이며 이를 통하여 훨씬 낮은 구동력으로도 높은 출력 값을 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결 론

본 연구에서는 tonpilz 트랜스듀서의 소재와 크기 및 형상의 최적화를 통하여 그 출력과 대역폭(TVR)이 어떻게 영향을 받는지를 FEM 기반의 상용 소프트웨어를 사용하여 알아보았다. 그 결과, 도넛 형의 압전체의 외경이 증가할수록 그 출력은 증가하였으나 최대가 되는 진동수가 고주파수 대역으로 이동하였고 동시에 대역폭(TVR)이 감소함이 확인되었다. 또한 stack의 수가 증가하는 효과는 stack의 수를 일정하게 놓고 stack의 높이를 같은 높이로 증가시키는 것과 같은 양상을 나타내었으며 높이가 1.5배, 2배로 증가함에 따라 출력도 1.5배, 2배로 증가하였으나 주파수에 따른 출력의 변화는 더 급격한 양상을 나타내었다. 끝으로 압전소재를 PZT-4에서 PMN-PZ-PT 단결정으로 대체시키면 출력이 10배로 향상됨을 확인할 수 있었는데 이는 압전체의 율동한 물성치(d_{33})에 기인한 것으로 추정되었다.

감사의글

본 연구는 환경기술선도사업의 지원(Grant #: E315-

00012-0501)으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- [1] K. Cepni, "A methodology for designing tonpilz-type transducers", M. Sc. Thesis (Middle East Technical University, Turkey, 2011) p. 13.
- [2] Q. Yao and L. Bjorno, "Broadband tonpilz underwater acoustic transducers based on multimode optimization", IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Contr. 44 (1997) 1060.
- [3] S. Chhith and Y. Roh, "Wideband tonpilz transducer with a void head mass", Proc. Sym. Ultrason. Electro. 30 (2009) 361.
- [4] S.-H. Jeong, W.-S. Hong, S.-H. Shim, Y.-J. Kim and S.-B. Lee, "Application of ultrasonic for agglomeration of fine soot particles", J. Kor. Soc. Combust. 8 (2003) 41.
- [5] J.A.G. Juarez, G.R. Corral and L.G. Garreton, "An ultrasonic transducer for high power applications in gases", Ultrasonics 16 (1978) 267.
- [6] J.L. Butler, J.R. Cipolla and W.D. Brown, "Radiating head flexure and its effect on transducer performance", J. Acoust. Soc. Am. 70 (1981) 500.
- [7] J. Kim, I. Kim and Y. Roh, "Design and fabrication of multi-mode wideband tonpilz transducers", J. Acoust. Soc. Kor. 32 (2013) 191.
- [8] J.-W. Seo, K. Choi and H.-Y. Lee, "Optimization of head mass for tonpilz transducer using finite element method", J. Korean Cryst. Growth Cryst. Technol. 25 (2015) 140.
- [9] S. Zhang, F. Li, X. Jiang, J. Kim, J. Luo and X. Geng, "Advantages and challenges of relaxor-PT ferroelectric crystals for electroacoustic transducers - A review", Prog. Mater. Sci. 68 (2015) 1.