

Tonpiliz 변환기의 최적설계

강국진*, 루샤오광**, 노용래***

*경북대학교 센서공학과

**경북대학교 기계공학과

***경북대학교 기계공학부

Optimal design of a tonpiliz transducer

Kookjin Kang*, Lu Xiaoguang**, and Yongrae Roh**

*Department of Sensor Engineering, Kyungpook National University

**Department of mechanical Engineering, Kyungpook National University

***School of mechanical Engineering, Kyungpook National University

*kookjinkang@yahoo.co.kr, **lxgchpb@hotmail.com, and **yryong@knu.ac.kr

요약

수중에서 사용되는 음향변환기의 성능은 사용환경 뿐만 아니라 많은 설계변수들의 조합에 의해 결정되며, 이들 설계변수들의 영향은 서로 선형 독립적이지 않은 경우가 대부분이다. 따라서 음향변환기의 최적성능을 구현하기 위해서는 각 설계변수들의 개별영향 뿐만 아니라 상호작용에 의한 영향을 동시에 고려하여야 한다. 본 연구에서는 tonpiliz 변환기에 대하여 유한 요소 해석을 통하여 설계변수들이 중심 주파수, 대역폭, 음압 및 충격력에 미치는 영향을 파악하였고, 그 결과들의 통계적 다중 회귀분석을 통하여 중심 주파수, 대역폭, 음압 및 충격력을 이들 설계변수들의 함수로 도출하였다. 나아가 제한 최적화 기법을 이용하여 주어진 사용 환경에서 동작하면서 최대 음압을 구현할 수 있는 변환기의 최적 구조를 자동으로 결정할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 본 연구에서 개발된 최적화 프로그램은 다중 설계변수들의 상호효과를 충분히 반영할 수 있으며, 유사한 기능의 여타 음향변환기 설계에 직접 응용이 가능할 것이다.

1. 서론

Tonpiliz 변환기는 수중에서 음파를 송, 수신하는 대표적인 변환기로서, 전면추, 압전 세라믹, 후면추를 볼트로 결합시킨 형태를 가진다. 두계모드 진동을 이용하는 전형적인 tonpiliz 변환기는 높은 정확성과 고 분해능으로 인해 수중 소나 시스템에 많이 사용되어져왔고, 형상은 거의 일반화 되어져있다.[1] 그간 주어진 공진 주파수에서 높은 음압을 발생시킬 수 있는 tonpiliz 변환기 개발에 대해 그동안 많은 연구가 진행되어 왔으나 [1-6] 대부분의 경우 구동자 재료를 바꿈으로써 높은 음압을 구현하고자 하였고, [4-6] 정해진 공진 주파수와 재료에 대해서 일정 대역폭을 만족시키면서 높은 음압을 발생시킬 수 있는 음향 변환기 구조 설계에 대한 연구는 미미한 실정이다. 또한, tonpiliz 변환기는 수중의 과도 충격 음압에 의해서 압전세라믹에서 파괴가 일어나고, 변환기는 동작을 하지 못한다. 수중 충격에 강인한 변환기의 개발이 결실한 실정이나 변환기의 설계 변수들이 과도 충격력에 미치는 영향을 체계적으로 분석한 자료는 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 변

환기의 주요 성능 변수로 공진 주파수, 음압, 대역폭 및 최대 충격 저항력을 설정하였고, 정해진 주파수와 재료에 대해서 일정 대역폭을 만족시키면서 높은 음압과 높은 충격 저항력을 가지는 변환기의 최적 구조를 자동으로 결정할 수 있는 프로그램을 개발하였다.

2. 변환기 모델링

본 연구의 대상인 tonpiliz 변환기는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 음향 방사체 역할을 하는 전면추, 압전 세라믹에서 발생한 변위를 반사시켜 전면추의 변위를 증폭시키는 후면추, 구동자 역할을 하는 압전 세라믹, 그리고 이들을 결합시키고 일정한 압력으로 조임으로써 압전 세라믹의 허용인가 전압을 증대시키는 역할을 하는 볼트로 구성되어있다.[7] 본 연구의 변환기 유한요소 모델은 상용도구인 ANSYS를 이용하여 Fig. 2에서 보는 바와 같이 축대칭 모델로 구현하였다. 원거리장 음압 계산을 할 수 있도록 물을 변환기 표면에서 100 mm까지 설치하였으며, 약 18,400개의 절점과 18,000개의 요소로 구성하였다. 경계 조건으로는 변환기의 모든 부분을 자유상태로 가정하였고, 물의 최 외곽층에는 무반사 경계조건을 적용하였다. 유한요소 해석모델의 타당성을 검증하기 위하여 변환기의 공진 및 반공진 특성을 임피던스 분석기(HP-4194A)로 측정하였고, 유한요소 모델 해석결과와의 비교를 위해서 측정치의 공진 주파수에 대해 정규화 하여 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다. 임피던스 분석기로 측정한 실험결과와 ANSYS를 이용한 유한요소 해석 결과가 잘 일치함을 알 수 있고, 따라서 2차원 축대칭 모델로 구성한 유한요소 해석모델은 충분한 타당성을 가진다. 다음으로 공진 주파수와 대역폭 및 음압에 많은 영향을 미칠 것으로 판단되는 4개의 설계변수를 설정하여 Table 1에 나타내었다.

Tonpiliz 변환기의 주요 성능변수로 최대음압, 대역폭, 공진 주파수 및 충격저항력을 설정하였으며, 압전 세라믹 단위 길이당 일정한 전압 (10 V/mm)의 사인파 (Sine wave)를 인가하고 과도(Transient) 해석을 행하여 공진 주파수, 대역폭 및 발생 음압을 계산하였다. 해석 시 발생 음압은 변환기 중심 표면으로부터 100 mm 떨어진 지점에서 음압의 최대진폭(peak to peak) 값으로 계산하였고, 대역폭 및 공진 주파수는 음압의 결과를 고속 푸리에 변환(FFT)하여 계산하였다. 또한

과도 충격력에 따른 충격저항력을 계산하기 위해서 구조체 각각의 항복응력값을 대입한 상태에서 Fig. 5에 보인바와 같이 변환기 진면에 100 kHz의 충격파를 인가하고 과도 해석을 행하여 변환기에서 처음으로 소성 변형이 일어나는 지점과 충격값을 계산하여 충격저항력으로 정의하였다. 이들 결과로부터 tonpilz 변환기의 최적 구조를 자동으로 결정 할 수 있는 프로그램의 흐름도를 Fig. 6에 나타내었다. 본 연구에서 개발한 프로그램은 설계변수들의 개별 영향 및 이들의 상호작용에 의한 영향까지도 반영할 수 있으며, 최적 구조 설계시 소요되는 계산시간을 단축할 수 있는 매우 유용한 프로그램이다.

Table 1. Design variables of a Tonpilz transducer

Design variables	Variation range
Thickness of the PZT-4(x_1)	8.0 ~ 24.0 mm
Thickness of the tail mass(x_2)	9.0 ~ 27.0 mm
Thickness of the head mass(x_3)	9.7 ~ 29.1 mm
Radius of the head mass(x_4)	9.0 ~ 19.4 mm

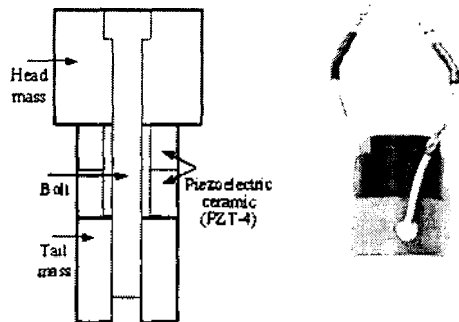


Fig. 1. Model of a Tonpilz transducer.

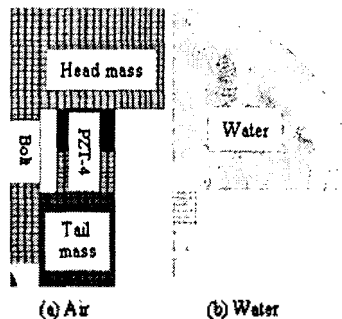


Fig. 2. Finite element model of a Tonpilz transducer.

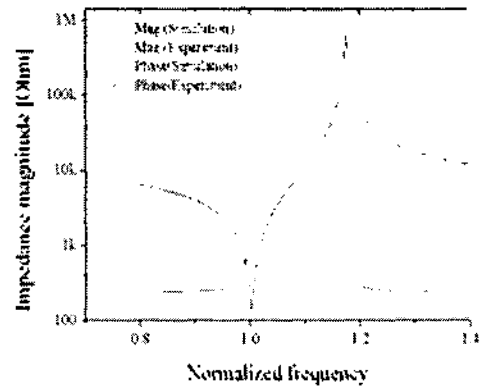


Fig. 3. Impedance spectrum of the Tonpilz transducer (in air).

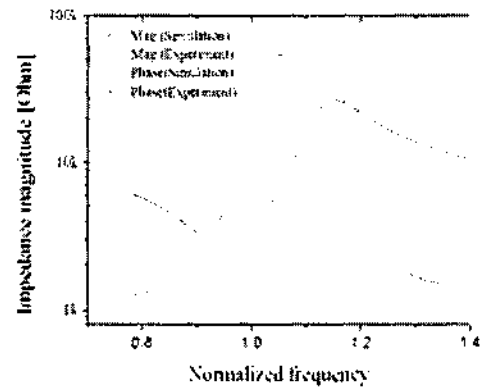


Fig. 4. Impedance spectrum of the Tonpilz transducer (in water).

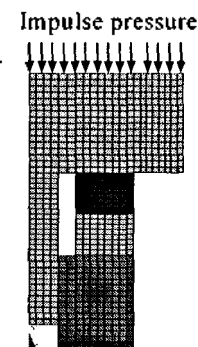


Fig. 5. Shock pressure resistance analysis model.

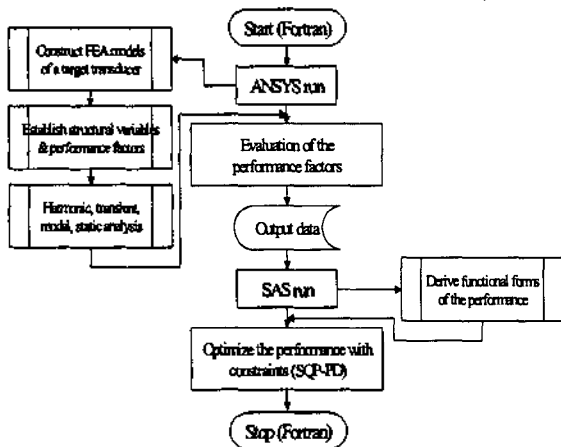


Fig. 6. Optimal design program for the transducer.

3. 성능 변화 해석

세가지 설계변수들의 값을 기본모델의 값으로 고정시키고, 한 변수만을 변화시키면서 변환기 성능 변화 경향성을 해석하였고, 그 결과를 종합하여 Table 2에 나타내었다. 그리고 대표적인 경우로 전면추 반경 변화에 따른 성능의 변화 경향성을 Fig. 7-9에 나타내었다. 다른 모든 변수들이 기본 모델의 값으로 고정된 상태에서 전면추 반경이 증가하면 변환기 전체 mass가 증가하게 되고, 이로 인하여 공진 주파수는 감소한 것으로 판단된다. 공진 주파수 감소로 인하여 파수는 감소하고, 반경이 더 큰 쪽으로 증가함에 따라 전체적으로 파수 반경은 증가한다. 지향성은 파수 반경에 비례하는데, [7] 지향성이 증대되면 변환기 표면으로부터 일정한 거리만큼 떨어진 지점에서(100 mm) 측정된 음압은 증가할 것이다. 또한 근거리 장파 원거리 장의 경계점은 반경이 증가함에 따라 변환기 표면으로부터 멀어지고, [8] 이로 인하여 음압의 증가를 가져올 것이다. 또한 주파수 계급에 비례하는 음압은 [9] 공진 주파수 감소로 인하여 감소하게 되고, 따라서 이들의 효과에 의해서 음압은 비선형적인 특성을 보이는 것으로 판단된다. 대역폭은 파수 반경의 증가에 의해서 증가하는 경향을 보이는 것으로 판단된다.

Table 2. Summary of performance results

	X_1	X_2	X_3	X_4
Increase of f_r	↓	↓	↓	↓
Increase of Δf	↓	↓	↓	↑
Increase of P_r	↑	↓	↓	↑
Increase of P_s	-	-	↑	↓

f_r : Resonance frequency.

Δf : 3dB bandwidth.

P_r : Maximum sound pressure.

P_s : Impulsive shock pressure.

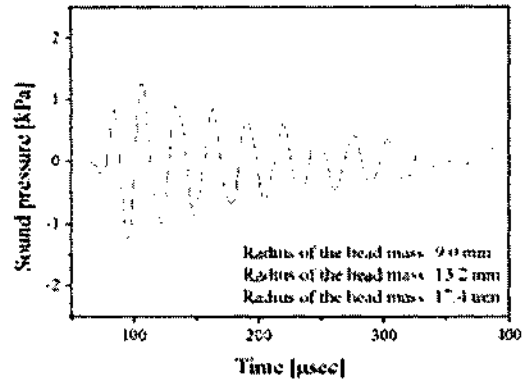


Fig. 7. Pressure vs. radius of the head mass.

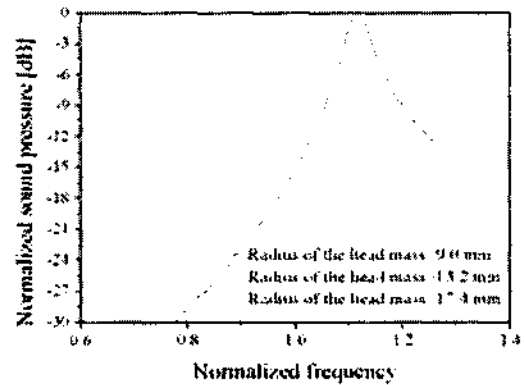


Fig. 8. Bandwidth & resonance frequency vs. radius of the head mass.

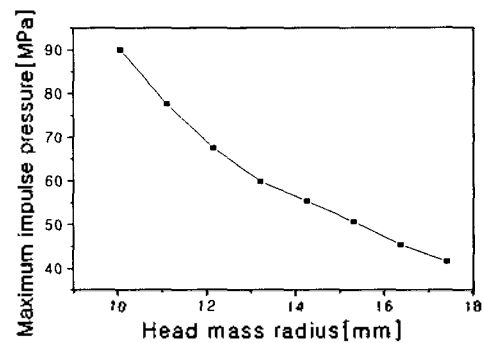


Fig. 9. Shock pressure vs. radius of the head mass.

4. 성능의 함수화 및 최적설계

본 연구에서는 최적화 계산 시간 단축을 위하여 변수들간의 함수관계를 찾을 수 있는 통계적기법인 다중 회귀분석을 수행하여 변환기 설계변수들의 상호효과까지 고려한 공진 주파수, 대역폭, 발생 음압 및 충격 저항력을 함수화 하였다. 회귀분석 시 설계변수들의 상대적

인 영향정도를 해석하기 위하여 각 설계변수들을 표준화하였고, 성능의 함수화를 이루기 위한 기초자료를 획득하기 위해서 실험 계획법에 의한 유한요소 해석을 행하였다. 실험 계획법에 의한 총 49경우의 해석 결과를 바탕으로 상용 프로그램인인 SAS를 이용하여 회귀분석을 하였으며, 공진 주파수(f_r)의 회귀식을 식 (1)에 나타내었다.

$$f_r = 1510.3x_1^2 + \dots - 7249.3x_1 + \dots + 31248.6 \quad (1)$$

음압(P_r)에 대한 회귀식은 식 (2)에 나타내었다.

$$P_r = -407.3x_1^2 + \dots + 82.0x_1 + \dots + 3461.6 \quad (2)$$

대역폭(Δf)에 대한 회귀식을 식 (3)에 나타내었다.

$$\Delta f = 425.2x_1^2 + \dots - 1238.9x_1 + \dots + 2400.6 \quad (3)$$

충격저항력(P_s)에 대한 회귀식을 식 (4)에 나타내었다.

$$P_s = 0.8x_1^2 + \dots - 0.4x_1 + \dots + 0.1 \quad (4)$$

본 연구의 목적은 주어진 사용환경에서 동작하면서 최대 음압을 구현할 수 있는 tonpilz 변환기 설계변수들을 최적화 하는 것이다. 따라서 본 연구의 목적함수는 음압을 최대화하는 것이므로 식 (5)와 같이 표현할 수 있고, 제한 조건은 실제 사용환경을 고려하여 식 (6)과 같이 설정하였다.

$$\text{Minimize } \left| \frac{1}{P_r} \right| \quad (5)$$

$$\text{Subject to } \begin{aligned} f_r &= 1 \\ \Delta f &\geq 2,400 \text{ Hz} \\ P_s &\geq 58 \text{ MPa} \end{aligned} \quad (6)$$

제한 조건을 수반하는 목적함수를 최적화 하기 위해서 본 연구에서는 여러 가지 제한 최적화방법 중에서 수렴속도가 가장 빠르다고 알려진 SQP-PD방법을 이용하여 tonpilz 변환기의 설계변수들을 최적화 하였으며 그 결과를 Table 3에 나타내었다. [10] Table 3의 결과를 보면 설계변수들이 제한 조건을 만족하면서 최대 음압을 가지기 위해서 최대값과 최저값 사이에 최적값이 존재하였고, 이는 설계변수들의 상호효과에 의하여 도출된 결과로 판단된다.

Table 3. Results of the optimization with the SQP-PD method

x_1 (mm)	x_2 (mm)	x_3 (mm)	x_4 (mm)	f_r	P_r (Pa)	Δf (Hz)	P_s (MPa)
22.96	9.36	15.52	13.20	1.0	1,809.0	2,448.3	58.1

5. 결론

본 연구에서는 음향 변환기의 최적 설계법을 제시하였다. 제시된 설계법은 변환기의 대표적 성능인 공진 주파수, 대역폭, 발생 음압 및 충격저항력에 미치는 설계변수들의 영향을 유한요소 해석을 통해 구한 다음, 통계적기법인 실험 계획법과 다중 회귀분석을 수행하여 변수들의 상호효과까지 고려한 공진 주파수, 대역폭 및 음압을 함수화 하였고, 제한 최적화방법인 SQP-PD법을 이용하여 주어진 환경에서 동작하면서 최대 음압을 구현하도록 하는 변환기의 설계변수들을 최적화 하였다. 본 연구에서 제시한 설계법은 다중 설계변수들의 상호효과를 충분히 반영할 수 있으며, 유사한 기능의 여타 음향 변환기 설계에 직접 응용이 가능할 것이다.

참고문헌

1. K. R. Dhilsha, "Performance of a low-frequency, multi-resonant broadband tonpilz transducer," J. Acoust. Soc. Am. 111(4), 1692-1694, 2002.
2. Q. Yao, and L. Bjørnø, "Broadband tonpilz underwater acoustic transducers based on multimode optimization," IEEE UFFC. 44(5), 1060-1066, 1996.
3. D. W. Hawkins, and P. T. Gough, "Multiresonance design of a Tonpilz transducer using the finite element method," IEEE UFFC. 43(5), 782-790, 1996.
4. S. Kaneko, and K. Ohya, "Load characteristics of a bolted Langevin torsional transducer," Ultrasonics, 34, 239-241, 1996.
5. K. R. Dhilsha, and K.V.S. Rama Rao, "Design and fabrication of a low frequency giant magnetostrictive transducer," Journal of Alloys and Compounds, 258, 53-55, 1997.
6. F. Claeysen, and P. Bouchilloux, "Actuators, transducers and motors based on giant magnetostrictive materials," Journal of Alloys and Compounds, 258, 61-73, 1997.
7. O. B. Wilson, *Introduction to theory and design of sonar transducers*, (Peninsulr publishing, Los Altos, 1988), Chap.6, pp.109-125.
8. L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens, and J. V. Sanders, *Fundamentals of acoustics*, (John Wiley & Sons, New York, 2000), Chap.7, pp.171-209.
9. J. R. Oswin, and J. Dunn, "Frequency, power and depth performance of Class IV flexensional transducers," in: B. Hamonic and J. N. Decarpigny (Eds.), *Power Sonics and Ultrasonic Transducers Design*, Springer-Verlag, Berlin, 1988.
10. A. D. Belegudu, and T. R. Chandrupatla, *Optimization concepts and applications in engineering*, (Prentice Hall, New Jersey, 1999), Chap.5, pp.141-221.