

충격 특성을 고려한 Tonpilz 변환기의 최적구조 설계

Optimal Structural Design of a Tonpilz Transducer Considering the Characteristic of the Impulsive Shock Pressure

강국진¹, 노용래^{2,a}
(Kookjin Kang¹ and Yongrae Roh^{2,a})

Abstract

The optimal structure of the Tonpilz transducer was designed. First, the FE model of the transducer was constructed, that included all the details of the transducer which used practical environment. The validity of the FE model was verified through the impedance analysis of the transducer. Second, the resonance frequency, the sound pressure, the bandwidth, and the impulsive shock pressure of the transducer in relation to its structural variables were analyzed. Third, the design method of 2ⁿ experiments was employed to reduce the number of analysis cases, and through statistical multiple regression analysis of the results, the functional forms of the transducer performances that could consider the cross-coupled effects of the structural variables were derived. Based on the all results, the optimal geometry of the Tonpilz transducer that had the highest sound pressure level at the desired working environment was determined through the optimization with the SQP-PD method of a target function composed of the transducer performance. Furthermore, for the convenience of a user, the automatic process program making the optimal structure of the acoustic transducer automatically at a given target and a desired working environment was made. The developed method can reflect all the cross-coupled effects of multiple structural variables, and can be extended to the design of general acoustic transducers.

Key Words : Tonpilz transducer, Optimal design, FEA, Constrained optimization, Impulsive shock pressure

1. 서론

Tonpilz 변환기는 반력을 받쳐주는 플랫폼의 표면에 설치되어 주로 수중 음파의 송수신기로 작동하는 대표적인 변환기로서 그림 1에서 보는 바와 같이 전면추, 압전 세라믹, 후면추를 볼트로 결합시킨 형태를 가진다. 두께모드 진동을 이용하는 진형적인 Tonpilz 변환기는 높은 정확성과 고 분해능으로 인해 수중 소나 시스템에 많이 사용되어져 왔고, 형상은 거의 일반화 되어져있다[1].

오늘날 Tonpilz 변환기는 예전에 비해 훨씬 높은 사용상의 성능과 엄격한 내환경성을 요구받고 있고, 높은 음압을 발생시키기 위하여 기존의 압전 세라믹 대신 Terfenol-D 자왜재료를 적용하였고 [2-4], 다중 공진 주파수와 넓은 대역폭을 구현하기 위하여 전면추 앞에 고분자 재료를 사용하기도 하였다[5,6]. 외부 환경에 둔감한 변환기 개발을 위하여 심해에서 주로 사용되는 압전 Tonpilz 변환기의 심해 수압에 대한 문제를 언급하고 이를 해결하기 위해 그림 2와 같이 내부 공기압을 사용하는 방법과 composite filter를 사용하는 방안을 제시하였다[7]. 내부 공기압을 이용하는 방법이란 Tonpilz 변환기와 외장이 이루는 공간에 심해 수압에 의해 발생하는 외압과 동일한 고압의 공기를 주입하여 외부 정수압의 영향을 상쇄시키는 방법

1. 한국섬유기계연구원 연구기획실
(경북 경산시 삼풍동 300)

2. 경북대학교 기계공학부

a. Corresponding Author : yryong@knu.ac.kr

접수일자 : 2008. 9. 5

심사완료 : 2008. 10. 24

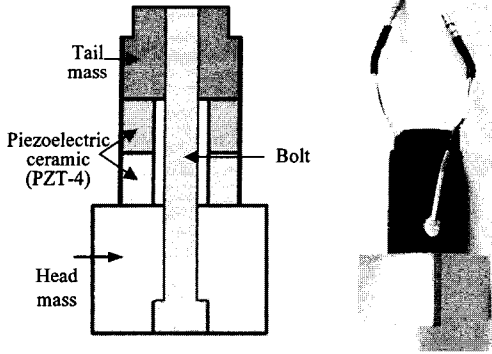


그림 1. Tonpiliz 변환기 모델.
Fig. 1. Model of the Tonpiliz transducer.

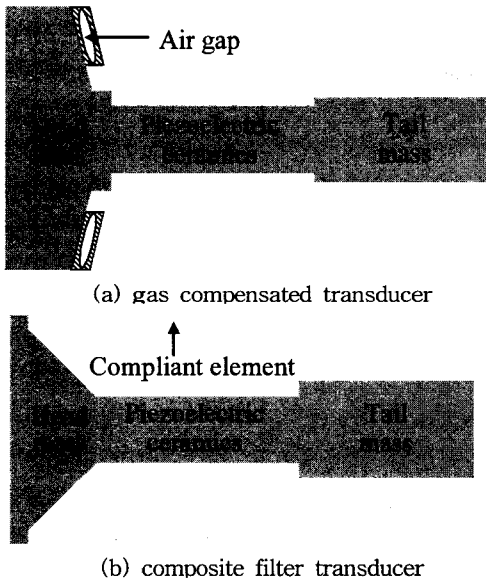


그림 2. 수압 특성이 우수한 압전 Tonpiliz 변환기.
Fig. 2. Piezoelectric Tonpiliz transducer good for hydrostatic pressure.

으로서 전체 공간에 고압가스를 주입하는 방법, Tonpiliz 변환기와 외장 사이에 빈공간을 별도로 만들어 이곳에 주입하는 방법, 그리고 Tonpiliz 변환기의 전면추 후단에 별도의 조그마한 공간을 만들어 주입하는 방법 등을 언급하였다. 그러나 이 방법은 간단한 해결책은 될 수 있으나 변환기 제조 시 세심한 주의를 요하며, 제작 공정이 복잡하

다는 단점이 있다. 그리고 변환기가 항상 심해에만 있을 수는 없으므로, 천해나 공기 중에 있는 경우에는 변환기내의 유연한 부분에 오히려 악영향을 미쳐 전체적으로 변환기의 성능을 저하시키는 문제점을 가지고 있다. 이를 좀 더 개선한 방법이 composite filter를 사용하는 방법이다. Tonpiliz 변환기의 전면추 후면과 외장 지지부 사이에 유연한 요소를 도입하여 심해 정수압이 가해질 경우 이 compliant wall에 변형이 일어나도록 하여 외부 압력을 제거하는 방식이다. 이 경우 유연한 요소의 재질이 아주 중요하며, 이 방안의 장점은 심해 수압의 영향을 제거함과 동시에 변환기 지지부와 전면추를 동적으로 격리시킬 수 있다는데 있다.

지금까지 연구사례들은 변환기의 많은 설계 변수들 중에서 구동자 재료, 전면추 반경 등의 대표적인 몇 가지만이 변환기의 성능에 미치는 영향을 보고한 사례에 불과하고 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 압전 세라믹에서 파괴가 일어나고[8,9], 변환기는 제대로 동작을 하지 못하게 된다. 수중 충격에 강인한 변환기의 개발이 절실한 실정이나 변환기의 설계변수들이 과도 충격력에 미치는 영향을 체계적으로 분석한 자료는 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 변환기의 주요 성능 변수로 공진 주파수, 음압, 대역폭 및 최대 충격저항력을 설정하였고, 정해진 주파수와 재료에 대해서 일정 대역폭을 만족시키면서 높은 음압과 높은 충격 저항력을 가지는 변환기의 최적 구조를 자동으로 결정할 수 있는 프로그램 개발하였다.

2. Tonpiliz 변환기 모델링

본 연구의 대상인 Tonpiliz 변환기는 그림 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 [10]. 그림 1의 실제모델에서 전면추는 정사각형의 형상으로 이루어져있고, 나머지는 원통으로 이루어져 있는데, 본 연구에서는 해석에 소요되는 시간을 최소화하기 위해서 전면추를 원통형으로 가정하여

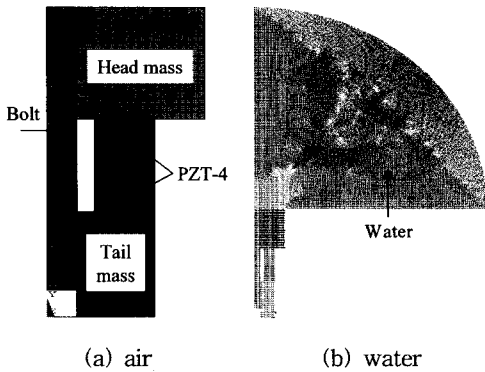


그림 3. Tonpiliz 변환기 유한요소 모델.
Fig. 3. Finite element model of the Tonpiliz transducer.

정사각형의 면적과 동일한 면적을 가지는 반경을 계산하여 상용도구인 ANSYS를 이용하여 그림 3에서 보는 바와 같이 2차원 축대칭 모델로 구성하였다. 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(Agilent 4294A)로 측정하였고, 유한요소 모델 해석결과와의 비교를 위해서 측정치의 공진 주파수에 대해 정규화 하여 그림 4와 5에 나타내었다. 임피던스 분석기로 측정된 실험결과와 ANSYS를 이용한 유한요소 해석 결과가 잘 일치함을 알 수 있고, 따라서 2차원 축대칭 모델로 구성된 유한요소 해석모델은 충분한 타당성을 가진다. 다음으로 공진 주파수, 대역폭, 발생 음압 및 충격 저항력에 많은 영향을 미칠 것으로 판단되는 4개의 설계변수를 설정하여 표 1에 나타내었다. 변수 설정 시 실제 모델에서 $\pm 50\%$ 를 변화 시켰으며, 전면추 최소반경은 압전 세라믹의 반경과 동일하다고 가정하였다. 또한 변환기 물성은 표 2의 값으로 고정시켰다. 그리고 전체 전면추 중에서 볼트 머리 부분 두께가 차지하는 비율은 25%, 후면추 중에서 볼트가 차지하는 두께는 75%로 고정시켰다. Tonpiliz 변환기의 주요 성능변수로 최대음압, 대역폭, 공진 주파수 및 충격저항력을 설정하였으며,

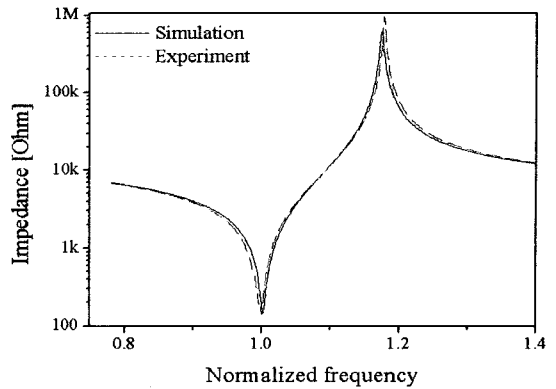


그림 4. Tonpiliz 변환기의 임피던스 곡선(공기중).
Fig. 4. Impedance spectrum of the Tonpiliz transducer(in air).

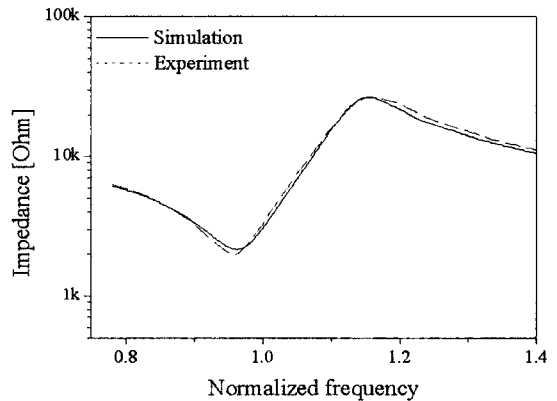


그림 5. Tonpiliz 변환기의 임피던스 곡선(수중).
Fig. 5. Impedance spectrum of the Tonpiliz transducer(in water).

표 1. Tonpiliz 변환기의 설계변수들.

Table 1. Design variables for the Tonpiliz 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

표 2. 고정된 Tonpiliz 변환기 각 부품들의 물성들.

Table 2. Fixed material properties of the parts in the Tonpiliz transducer.

	Young's modulus (GPa)	Density (kg/m ³)	Poisson's ratio
Head mass	70.3	2,770	0.33
Tail mass	206.0	7,955	0.30
Bolt	185.0	7,920	0.30
Piezoelectric ceramic	PZT-4		

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 그림 6에 보인바와 같이 변환기 전면에 100 kHz의 충격파를 인가하고 과도 해석을 행하여 변환기에서 처음으로 소성변형이 일어나는 지점과 충격값을 계산하여 충격저항력으로 정의하였다. 그림 7에 변환기에서 처음으로 소성변형이 일어나는 지점을 나타내었고, 이는 문헌에서 제시하는 과도 충격력에 의해 압전 세라믹에서 파괴가 일어나는 결과와 잘 일치하므로 본 연구의 수중 충격력 해석은 그 타당성을 충분히 가진다[8,9].

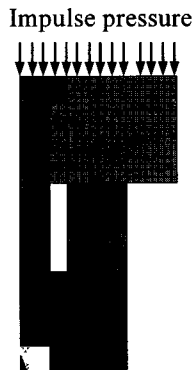


그림 6. 충격저항력 해석 모델.
Fig. 6. Analysis model of impulsive shock pressure.

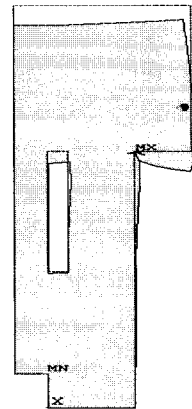


그림 7. Tonpiliz 변환기의 소성변형 발생 지점.
Fig. 7. Plastic strain occurrence point of the Tonpiliz transducer.

이상의 결과로부터 Tonpiliz 변환기의 최적 구조를 자동으로 결정할 수 있는 프로그램의 흐름도를 그림 8에 나타내었다. 본 연구에서 개발한 프로그램은 설계변수들의 개별 영향 및 이들의 상호작용에 의한 영향까지도 반영할 수 있으며, 최적구조 설계 시 소요되는 계산시간을 단축할 수 있는 매우 유용한 프로그램이다.

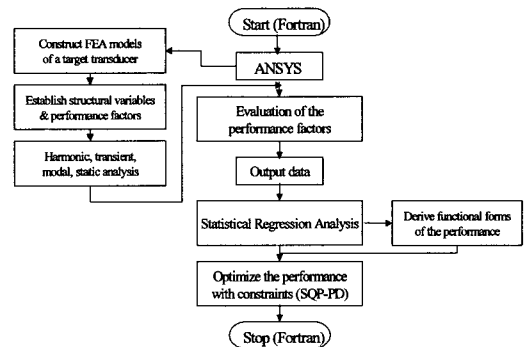


그림 8. 음향 변환기 최적설계 통합 프로그램.
Fig. 8. Optimal design program for the acoustic transducer.

3. 성능 변화 해석

세가지 설계변수들의 값을 기본모델의 값으로 고정시키고, 한 변수만을 변화시키면서 변환기 성능 변화 경향성을 해석하였고, 대표적인 경우로 전

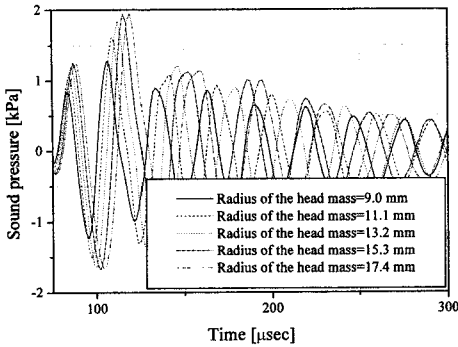


그림 9. 전면추 반경에 따른 음압 변화.
 Fig. 9. Variation of sound pressure in relation to radius of the head mass.

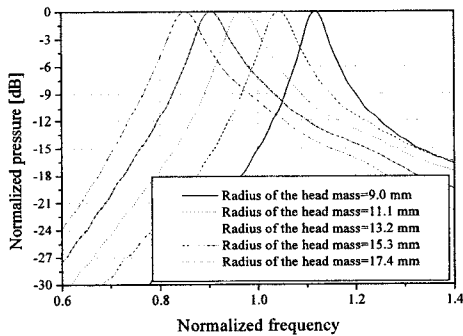


그림 10. 전면추 반경에 따른 공진 주파수 및 대역폭 변화.
 Fig. 10. Variation of resonance frequency and bandwidth in relation to radius of the head mass.

면추 반경 변화에 따른 성능의 변화 경향성을 그림 9-11에 나타내었다. 다른 모든 변수들이 기본 모델의 값으로 고정된 상태에서 전면추 반경이 증가하면 변환기 전체 무게가 증가하게 되고, 이로 인하여 공진 주파수는 감소한 것으로 판단된다. 공진 주파수 감소로 인하여 파수는 감소하고, 반경이 더 큰 폭으로 증가함에 따라 전체적으로 파수×반경은 증가한다. 지향성은 파수×반경에 비례하는데 [10], 지향성이 증대되면 변환기 표면으로부터 일정한 거리만큼 떨어진 지점에서(100 mm) 측정할

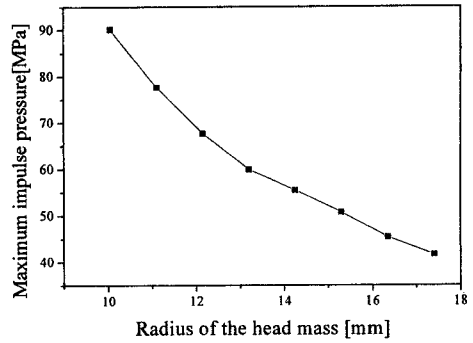


그림 11. 전면추 반경에 따른 충격저항력 변화.
 Fig. 11. Variation of impulsive shock pressure in relation to radius of the head mass.

음압은 증가할 것이다. 또한 근거리 장과 원거리 장의 경계점은 반경이 증가함에 따라 변환기 표면으로부터 멀어지고[11], 이로 인하여 음압의 증가를 가져올 것이다. 또한, 주파수 제공에 비례하는 음압은 공진 주파수 감소로 인하여 감소하게 되고 [12], 따라서 이들의 효과에 의해서 음압은 비선형적인 특성을 보이는 것으로 판단된다. 대역폭은 파수×반경의 증가에 의해서 증가하는 경향을 보이는 것으로 판단된다. 이상의 4가지 개별 설계변수들이 변환기 성능에 미치는 영향을 종합하여 표 3에 나타내었다. 그러나 표 3의 결과만을 이용하여 정해진 주파수와 재료에 대해서 일정 대역폭을 만족시키면서 높은 음압과 높은 충격 저항력을 가지는 변환기의 최적구조를 결정하기는 매우 어렵다. 따라서 본 연구에서는 설계변수들의 개별 영향 및 상호효과를 고려할 수 있는 통계적 기법인 반응 표면 계획법에 따른 다중 회귀분석을 수행하였다.

표 3. 설계변수들에 따른 변환기 성능의 변화.
 Table 3. Variation of the transducer performance in relation to design variables.

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

f_r =Resonance frequency, BW =-3dB bandwidth, P_r =Maximum sound pressure, P_s =Impulsive shock pressure.

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 충격저항력을 함수화 하였다. 회귀분석 시 설계변수들의 상대적인 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.

$$\begin{aligned}
 f_r = & 1465.3x_1^2 + 999.2x_2^2 + 1114.1x_3^2 - 7250.1x_1 - 4354.1x_2 \\
 & - 5094.4x_3 - 4908.9x_4 + 1152.6x_1x_2 + 1945.2x_1x_3 \\
 & + 1597.6x_1x_4 + 572.1x_2x_3 + 448.4x_2x_4 + 2435.8x_3x_4 \\
 & - 267.2x_1x_2x_4 - 1790.3x_1x_3x_4 - 903.2x_2x_3x_4 \\
 & + 672.0x_1x_2x_3x_4 + 31245.4
 \end{aligned} \quad (1)$$

총 변동 중에서 회귀선에 의하여 설명되는 변동이 기여하는 비율인 결정계수는 회귀선과 실제 결과가 어느 정도 일치하는지를 나타내는 계수인데, 본 연구의 결정계수는 0.9966이므로 트랜스듀서의 공진 주파수를 잘 표현하고 있음을 알 수 있다. 음압(P_r)에 대한 회귀식은 식 (2)에 나타내었다.

$$\begin{aligned}
 P_r = & -407.3x_1^2 + 83.7x_2^2 + 380.7x_3^2 - 473.4x_4^2 + 82.0x_1 \\
 & - 776.2x_2 - 1139.4x_3 + 588.0x_4 + 200.6x_1x_2 + 186.6x_1x_3 \\
 & + 248.7x_1x_4 + 374.5x_2x_3 - 96.0x_2x_4 - 171.0x_3x_4 \\
 & - 241.7x_1x_2x_3 + 101.5x_1x_2x_4 - 248.0x_1x_3x_4 \\
 & + 70.6x_2x_3x_4 - 62.3x_1x_2x_3x_4 + 3461.6
 \end{aligned} \quad (2)$$

음압에 대한 회귀식 식 (2)의 결정계수는 0.9823이었다. 대역폭(BW)에 대한 회귀식을 식 (3)에 나타내었다.

$$\begin{aligned}
 BW = & 499.0x_1^2 + 613.8x_2^2 - 511.5x_3^2 - 1238.6x_1 - 458.5x_2 \\
 & - 1181.9x_3 + 484.8x_4 + 177.3x_1x_2 + 481.3x_1x_3 + 147.0x_1x_4 \\
 & + 135.8x_2x_3 - 63.2x_2x_4 - 451.0x_3x_4 - 69.3x_1x_2x_3 \\
 & - 104.4x_1x_3x_4 + 56.4x_2x_3x_4 - 51.7x_1x_2x_3x_4 + 2394.6
 \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)의 회귀식 결정계수는 0.9802였다. 충격저

항력(P_s)에 대한 회귀식을 식 (4)에 나타내었다.

$$P_s = 13.85x_1^2 + 6.13x_3 - 29.78x_4 + 60.21 \quad (4)$$

이상의 회귀분석 결과로 볼 때, 실험 계획법에 의한 총 49경우로 해석한 Tonpitz 트랜스듀서의 공진 주파수, 발생 음압, 대역폭 및 충격저항력은 식 (1)~(4)의 회귀식으로 99 % 이상 설명됨을 알 수 있고, 최적구조 설계 시 소요되는 시간을 획기적으로 단축할 수 있게 되었다.

본 연구의 목적은 사용환경을 고려한 Tonpitz 변환기의 최적값을 결정하는 것이다. 즉, 정규화된 공진 주파수 1을 가지고 일정 대역폭과 일정 충격저항력을 만족하면서 최대음압을 가지는 변환기 설계변수들의 최적값을 찾는 것이다. 따라서 목적함수는 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

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

본 연구의 변환기는 배열형에 사용되는 것이기 때문에 배열형에 사용하기 위한 변환기 직경은 파장/2보다 작아야 한다. 또한, 본 연구의 변환기는 두께방향 진동을 이용하는 것으로서 휨 진동모드(Flexural mode)가 사용하고자 하는 주파수의 2배 이내에서 발생되지 않아야 한다. Tonpitz 변환기의 휨 진동모드 공진 주파수(f_{fm})는 전면추의 반경, 물성 및 두께에 의해서 결정되고 식 (6)과 같이 표현된다[1].

$$f_{fm} = \frac{14.1}{2\pi a^2} \sqrt{\frac{Yx_3^2}{12\rho(1-\nu^2)}} \quad (6)$$

여기서,

$x_3 =$ Thickness of the head mass ,

$a =$ Diameter of the head mass ,

$Y =$ Young's modulus of the head mass , 이다.

$\rho =$ Density of the head mass ,

$\nu =$ Poisson's ratio of the head mass .

따라서 이들의 조건에 의해서 전면추 두께와 반경은 제한되게 되고, 또한 일정 대역폭과 일정 충격저항력을 만족시켜야 하기 때문에 본 연구의 제한 조건은 식 (7)과 같이 표현된다.

Subject to $f_r = 1$

$$BW \geq 2,400 \text{ Hz}$$

$$P_s \geq 58 \text{ MPa} \quad (7)$$

$$-1.0 \leq x_3 \leq 0.0$$

$$-0.4 \leq x_4 \leq 1.0$$

제한 최적화 기법인 SQP-PD법에 의한 최적화를 하였으며, 그 결과를 표 4에 나타내었다[13]. 표 4의 결과를 보면 설계변수들이 제한 조건을 만족하면서 최대 음압을 가지기 위해서 최대값과 최저값 사이에 최적값이 존재하였고, 이는 설계변수들의 상호효과에 의하여 도출된 결과로 판단된다. 나아가 최적화 결과를 검증하기 위하여 표 4의 최적값을 가지는 변환기를 모델링 하여 성능들을 유한요소 해석하였는데, 공진 주파수는 1.003, 최대 음압은 4,552.8 Pa, 대역폭은 2,517.7 Hz, 충격 저항력은 57.7 MPa로써 각각 0.3 %, 2.8 %, 2.8 %, 1.2 %의 오차를 가지면서 일치하는 것을 확인하였다. 이상의 결과에 의해 본 연구에서 제시한 다중회귀분석과 최적화 기법을 이용한 Tonpilz 변환기 최적설계법의 타당성이 입증되었다고 할 수 있다. 또한 본 연구에서 제시한 최적설계법은 순수히 유한요소 해석법에만 의존하는 기존 설계법에 비해 계산시간의 단축과 높은 정확성을 가지는 매우 효율적인 설계법임을 알 수 있었다.

표 4. SQP-PD법에 의한 Tonpilz 변환기 최적화 결과.

Table 4. Results of the optimization for the Tonpilz transducer with the SQP-PD method.

x_1 (mm)	x_2 (mm)	x_3 (mm)	x_4 (mm)	f_r	P_r (Pa)	BW (Hz)	P_s (MPa)
22.96	9.36	15.52	13.20	1.0	4,427.5	2,448.3	58.4

5. 결론

본 연구에서는 음향 변환기의 최적 설계법을 제시하였다. 제시된 설계법은 Tonpilz 변환기의 대표적 성능인 공진 주파수, 대역폭, 발생 음압 및 충격저항력에 미치는 설계변수들의 영향을 유한요소 해석을 통해 구한 다음, 통계적기법인 실험 계획법

과 다중 회귀분석을 수행하여 변수들의 상호효과까지 고려한 공진 주파수, 대역폭 및 음압을 함수화 하였고, 제한 최적화방법을 이용하여 주어진 환경에서 동작하고, 충격력에 강인한 구조를 가지면서 최대 음압을 구현하도록 하는 Tonpilz 변환기의 설계변수들을 최적화 하였다. 향후 본 연구에서 최적설계한 변환기의 제작 및 성능실험에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다. 또한 본 연구에서 제시한 설계법은 다중 설계변수들의 상호효과를 충분히 반영할 수 있으며, 유사한 기능의 여타 음향 변환기 설계에 직접 응용이 가능할 것이다.

감사의 글

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었으며, 이에 대해 깊이 감사를 드립니다(계약번호UD070054AD).

참고 문헌

- [1] K. R. Dhillsha, "Performance of a low-frequency, multi-resonant broadband tonpilz transducer", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 111, No. 4, p. 1692, 2002.
- [2] K. R. Dhillsha and K. V. S. Rama Rao, "Design and fabrication of a low frequency giant magnetostrictive transducer", J. of Alloys and Compounds, Vol. 258, p. 53, 1997.
- [3] F. Claeysen and P. Bouchilloux, "Actuators, transducers and motors based on giant magnetostrictive materials", J. of Alloys and Compounds, Vol. 258, p. 61, 1997.
- [4] M. B. Moffett, A. E. Clark, M. Wun-Fogle, J. Linberg, J. P. Teter, and E. A. McLaughlin, "Characterization of Terfenol-D for magnetostrictive transducers", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 89, No. 3, p. 1448, 1991.
- [5] Q. Yao and L. Bjørnø, "Broadband Tonpilz underwater acoustic transducers based on multimode optimization", IEEE UFFC, Vol. 44, No. 5, p. 1060, 1996.
- [6] D. W. Hawkins and P. T. Gough, "Multiresonance design of a Tonpilz transducer using the finite element method", IEEE UFFC, Vol. 43, No. 5, p. 782, 1996.

- [7] P. Dufourcq, J. Adda, M. Letiche, and E. Sernit, "Transducers for great depths", in: B. Hamonic, O. B. Wilson, and J. N. Decarpigny (Eds.), *Power Transducers for Sonics and Ultrasonics*, Springer-Verlag, Berlin, 1991.
- [8] F. Massa, "Electroacoustic transducer with improved shock resistance", US Patent, No. 3,474,403, 1969.
- [9] G. R. Slebzak, "Transducer assembly with explosive shock protection", US Patent, No. 4,704,709, 1987.
- [10] O. B. Wilson, "Introduction to Theory and Design of Sonar Transducers", Peninsula publishing, Los Altos, p. 109, 1988.
- [11] L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens, and J. V. Sanders, "Fundamentals of Acoustics", John Wiley & Sons, New York, p. 171, 2000.
- [12] 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.
- [13] A. D. Belegudu and T. R. Chandrupatla, "Optimization Concepts and Applications in Engineering", Prentice Hall, New Jersey, p. 141, 1999.