

Barrel Stave Flextensional 트랜스듀서의 최적설계

Optimal Design of a Barrel Stave Flextensional Transducer

김 회 용* · 김 원 호** · 조 치 영** · 노 용 래†

Hoeyong Kim, Wonho Kim, Cheeyoung Joh and Yongrae Roh

(2008년 3월 14일 접수 ; 2008년 4월 24일 심사완료)

Key Words : Flextensional Transducer(Flextensional 변환기), Optimal Design(최적설계), FEA(유한요소해석)

ABSTRACT

The performance of a barrel stave flextensional transducer is determined by the properties of its constituent materials and the effects of many structural parameters. In this study, with the finite element method, the structure of a barrel stave flextensional transducer was optimized to achieve the widest bandwidth while satisfying the requirements on pressure and center frequency. The optimization was carried out with the SQP-PD method for multi-variable minimization. The optimized barrel stave flextensional transducer satisfied all the required specifications.

1. 서 론

수중 음향 트랜스듀서가 저주파 대역에서 고출력을 가지기 위해서는 큰 변위 진폭을 가져야 한다^(1~5). 수중 음향 트랜스듀서를 대표하는 것으로 tonpizl 트랜스듀서와 flextensional 트랜스듀서가 있는데, tonpizl 트랜스듀서는 고품질 플랫폼에 부착이 된 상태로 사용이 가능하며, 저주파 대역으로 갈수록 부피가 커진다. 또한 큰 부피 변위 진폭을 얻는데도 어려움이 있다^(6,7). 반면에 flextensional 트랜스듀서는 독자적인 작동이 가능하며, 저주파 대역에서 세라믹과 shell의 지레효과에 의하여 부피와 무게는 크게 줄이면서 큰 부피 변화 진폭을 얻을 수 있기 때문에 많은 각광을 받고 있다^(8~13). Barrel stave flextensional 트랜스듀서는 외부 stave의 모양에 따라 3종류로 분류되며⁽¹⁴⁾, 그 구조 설계에 관해 이미 많은 연구가 이루어 졌다. 하지만 여러 설

계변수들 중 특정 변수만의 영향에 대한 연구 보고는 있으나 모든 설계변수가 성능에 미치는 영향을 체계적으로 분석한 자료는 미미하다⁽¹⁵⁾. 따라서 이 논문에서는 barrel stave flextensional 트랜스듀서의 구조를 설정하고, 여러 설계 변수들이 성능에 미치는 영향을 체계적으로 분석하여 최적구조를 결정하고자 하였다. 구체적인 연구 목표는 중심주파수(f_c)의 범위가 $(f_c-100)\text{Hz} \sim (f_c+100)\text{Hz}$ 를 만족하고, TVR_{peak} 가 T_0 dB 이상의 값을 가지며, -6 dB 지점의 대역폭이 최대가 되는 barrel stave flextensional 트랜스듀서의 설계 변수들을 최적화하는 것이다.

트랜스듀서의 설계 변수들을 최적화하기 위해 설계변수들이 성능에 미치는 영향을 파악한 후 반응표면 계획법에 따른 유한요소해석을 수행하고, 이 결과를 토대로 다중 회귀분석을 시행하여 설계 변수들에 따른 성능의 함수화를 이루었다. 도출된 함수들을 이용하여 주어진 중심주파수와 음압의 범위 조건을 만족하면서 최대 대역폭을 가지는 barrel stave flextensional 트랜스듀서의 구조의 최적값을 도출하였다.

이 논문의 2장에서는 유한요소 모델링에 대해 설명을 하고, 3장에서는 성능 변화 경향성 분석 자료

† 교신저자 : 정희원, 경북대학교 기계공학과
E-mail : yryong@knu.ac.kr
Tel : (053)943-8716, Fax : (053)943-8716

* 경북대학교 기계공학과

** 국방과학연구소

를 제시한다. 이어서 4장에서는 각 성능의 함수화를 시행하였으며, 5장에서는 최적화를 수행하였다.

2. 유한요소 모델링

이 연구에서는 barrel stave flextensional 트랜스듀서 중 class I concave형을 선택하였으며, 상용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS®를 이용하여 해석하였다. 트랜스듀서는 각각의 세라믹 조각을 병렬로 묶어서 적층한 진동자, 음향 방사체 역할을 하는 shell, 중심점을 잡아주고 물의 침입을 막아주며 세라믹 적층과 shell을 연결하는 역할을 하는 flange, 세라믹 적층과 flange를 전기적으로 분리하는 절연체(insulator), 세라믹 적층과 flange의 중간에서 전달자 역할을 하는 insert, 그리고 flange사이의 누수와 부식을 방지하기 위한 rubber층 등으로 구성된다. Fig. 1은 이러한 구조를 가지도록 제작된 유한요소 모델을 보이고 있다. Fig. 1의 모델은 다시 방사매질인 물속에 잠긴 채로 해석이 되었으며, 물속에서 원거리 음장을 나타낼 수 있도록 물의 영역을 충분히 넓게 잡았다. 물의 최외곽 층에는 무반사 경계조건을 적용하여 한정된 모델의 크기에 의한 경계

면에서의 음향 반사 현상이 없도록 하였다. 또한, 대칭성을 고려하여 전체 트랜스듀서의 1/2에 해당하는 모델을 만들어 x축을 중심으로 축 대칭처리 하였으며, 전체 모델은 약 20100개의 절점과 20000개의 요소로 구성하였다. 해석 시 사용한 모델의 물성은 Table 1에 나타내었다.

Fig. 1에 보인 트랜스듀서의 중요 성능지수로는 응용 분야 및 선행 연구 결과들을 바탕으로 TVR (transmitting voltage response), 중심주파수 및 대역폭을 선정하였다⁽¹¹⁾. 그리고 트랜스듀서의 성능에 영향을 미치는 설계변수들을 파악하고 설계변수들의 범위를 설정하기 위하여 각 설계변수들에 대해 임의의 범위를 설정하여 유한요소해석을 행하였다. 이 해석 결과를 토대로 트랜스듀서의 성능에 미미한 영향을 미친 PZT의 내경은 5 mm로, rubber의 두께는 2 mm 고정하였으며, 많은 영향을 미치는 shell 두께, flange 두께, flange 길이, PZT 길이 및 shell의 곡률 반경인 ROC (radius of curvature) 등을 주요 설계변수로 설정하였다. 뿐만 아니라 해석결과를 토대로 다섯 개의 개별 설계 변수들의 특성이 가장 잘 나타나는 범위를 정하여 Table 2에 나타내었으며, 설계 범위 중 가운데에 해당하는 값을 기본

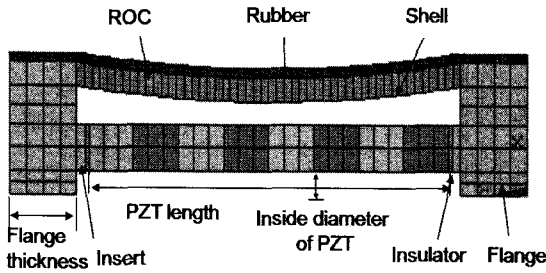


Fig. 1 Finite element model of the transducer

Table 1 Material properties of each part of the transducer

	Density (kg/m ³)	Young's modulus (Pa)	Poisson's ratio
Insert, Flange	2710	68.9E9	0.30
Insulator	2900	80.0E9	0.25
Shell	1900	27.4E9	0.25
Rubber	1100	3.0E7	0.49
Ceramic stack	PZT-4		

Table 2 Variation range of the structural variables of the transducer

Structural variables	Variation range(mm)
Shell thickness	5 ~ 9
Flange thickness	18 ~ 30
Flange length	31 ~ 43
PZT length	118 ~ 160
ROC(radius of curvature)	320 ~ 500

Table 3 Basic geometry of the barrel stave flextensional transducer

Shell thickness (x ₁)	7 mm
Flange thickness (x ₂)	24 mm
Flange length (x ₃)	37 mm
PZT length (x ₄)	139 mm
ROC(radius of curvature) (x ₅)	410 mm
Rubber thickness	2 mm
PZT thickness	10 mm
Inside diameter of PZT	5 mm

값으로 설정하여 기본 모델의 치수로 정하였다. 기본 치수의 값은 Table 3에 나타내었다.

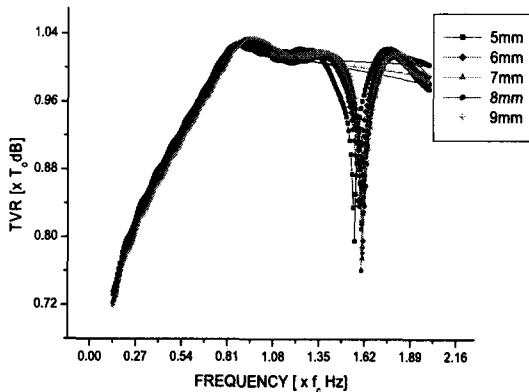
3. 구조변수에 따른 트랜스듀서 성능 변화의 경향성 분석

개별 설계변수가 성능에 미치는 경향을 해석하기 위해 다섯 개의 설계변수 중 네 가지 설계변수의 값은 기본 모델의 값으로 고정을 시키고, 한 변수만을 변화시키면서 트랜스듀서의 성능 변화 경향성을 분석하였다.

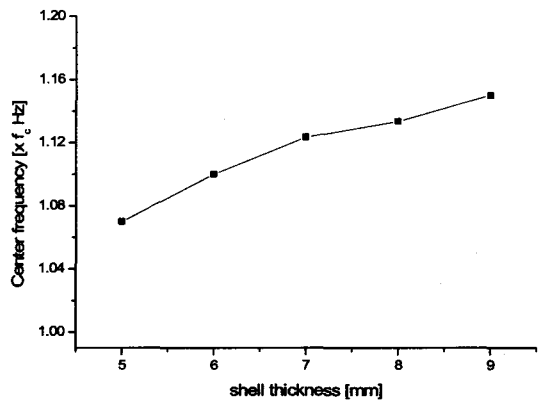
3.1 Shell 두께 변화에 따른 성능 변화

Table 2에 나타난 것과 같이 트랜스듀서의 shell 두께를 5mm에서 9mm까지 변화시킨 경우에 대하여 TVR_{peak}, 중심주파수 및 대역폭의 변화를 해석하였다. Fig. 2는 해석 결과를 나타내주는 것으로

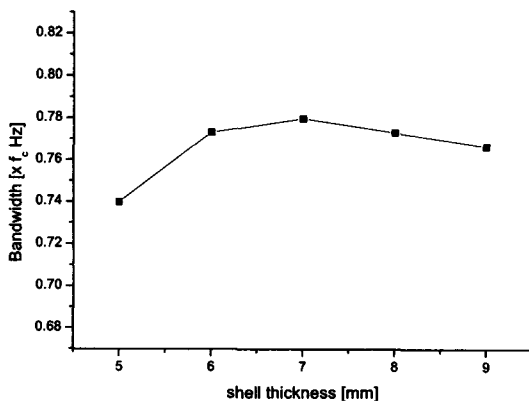
shell 두께가 커짐에 따라 중심주파수와 TVR_{peak}은 증가하는 경향을 보였고, 대역폭은 증가하다가 7mm부터는 감소하는 경향을 보였다. 먼저 트랜스듀서의 중심주파수의 변화는 shell 공진주파수와 다른 구조 변수들의 상관관계를 나타내는 식 (1)에 잘 나타내었다⁽²⁾. 일반적으로 flexensional 트랜스듀서의 공진주파수는 shell의 공진주파수 변화에 많은 영향을 받는데, 식 (1)에서 나타내는 것처럼 shell 두께가 증가하면 shell의 공진주파수가 증가하게 되어 트랜스듀서의 중심주파수가 증가하는 경향을 보였다. 또한, TVR_{peak}의 크기에 미치는 영향은 공진주파수의 영향이 부피 변위 진폭의 영향보다 월등히 크기 때문에 shell 두께가 증가하면 공진주파수가 증가하게 되어 발생 TVR_{peak}의 크기는 증가하게 된다. 대역폭의 경우, shell의 두께가 5mm에서 7mm까지 증가함에 따라 shell을 이루는 재료의 감쇠도 영향이 증가되어 대역폭이 증가하였으나, 7mm에서



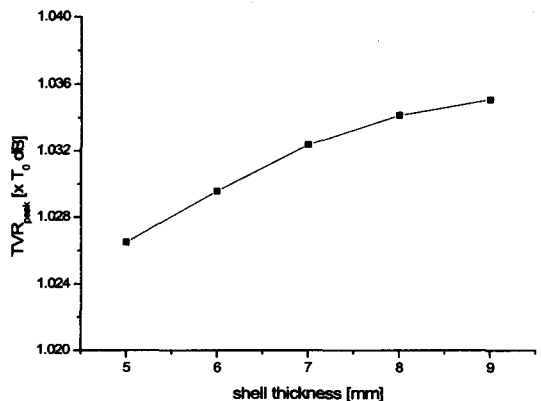
(a) Shell thickness vs. TVR spectrum



(c) Shell thickness vs. center frequency



(b) Shell thickness vs. bandwidth



(d) Shell thickness vs. TVR_{peak}

Fig. 2 Variation of performance in relation to shell thickness

9 mm로 두께가 증가하면 감쇠의 증가보다 shell의 구속력이 증가하여 대역폭이 감소하는 경향을 나타내었다.

$$f_{shell} = \frac{\pi t S^2}{8 \sqrt{12} l^2} \sqrt{\frac{Y_{shell}}{\rho_{shell}}} \quad (1)$$

t : Shell thickness Y_{shell} : Young's modulus

S : Number in series 3, 5, 7,...

ρ_{shell} : density

$$l : \pi \sqrt{0.5(a^2 + b^2)} :$$

a : Ceramic에서 shell까지의 단축길이

b : Ceramic에서 shell까지의 장축길이

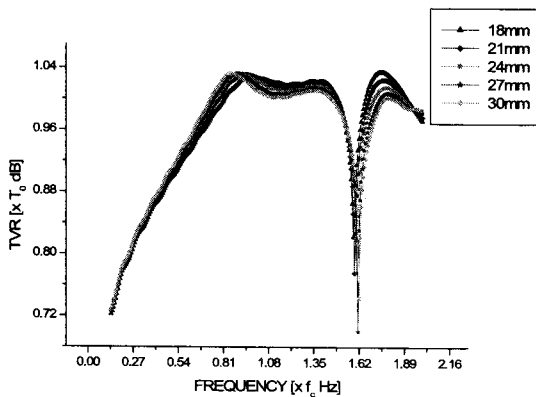
3.2 Flange 두께 변화에 따른 성능 변화

Flange 두께를 Table 2에서와 같이 18 mm에서

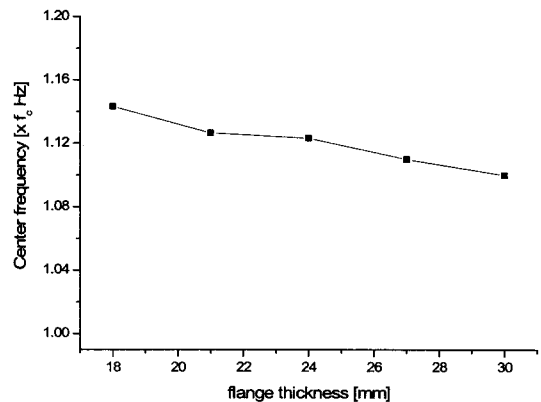
30 mm로 변화시키면서 트랜스듀서의 성능 변화를 해석하였으며, 결과를 Fig. 3에 나타내었다. Flange 두께가 증가함에 따라 TVR_{peak} 와 대역폭은 커졌으나, 중심주파수는 감소하였다. Flange 두께가 증가하면서 전체적인 길이가 증가하여 트랜스듀서의 중심 주파수가 감소하였으며, 대역폭은 flange 두께를 증가시키면 모델 전체의 감쇠도가 증가하게 되어 Q factor가 감소하게 되어 대역폭이 증가하는 경향을 보인 것으로 판단된다. 또한, flange의 두께가 두꺼워질수록 flange에서 shell로의 전달력이 증가하기 때문에 트랜스듀서의 TVR_{peak} 이 증가하는 것으로 판단되어진다.

3.3 Flange 길이 변화에 따른 성능 변화

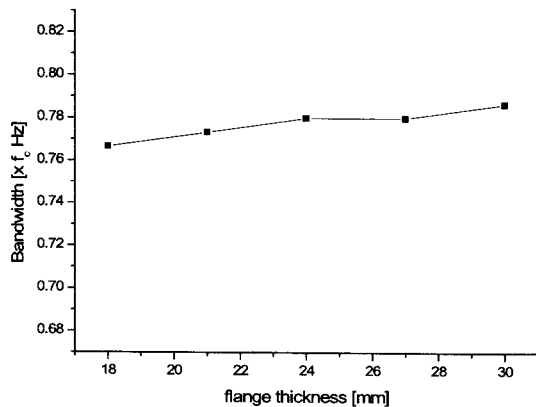
Table 2에 나타난 것처럼 flange 길이를 31 mm에서 43 mm로 변화 시키면서 트랜스듀서의 성능 변화를 해석하였다. 그 결과 길이가 길어질수록 대역폭



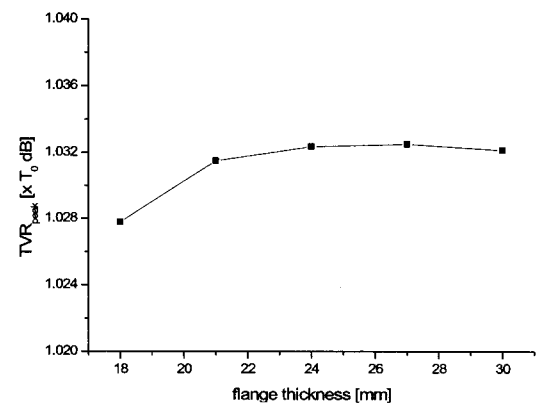
(a) Flange thickness vs. TVR spectrum



(c) Flange thickness vs. center frequency

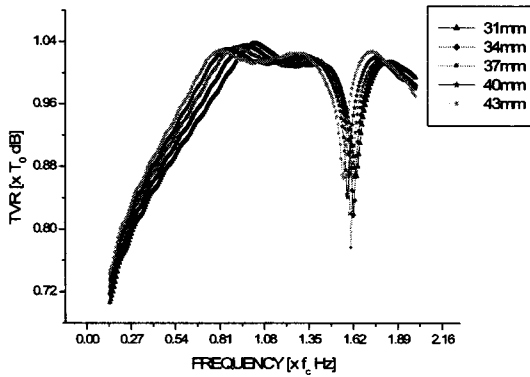


(b) Flange thickness vs. bandwidth

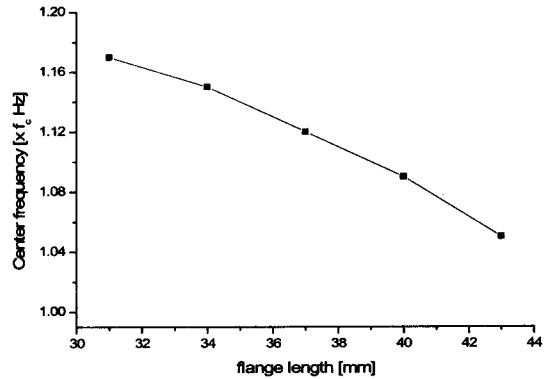


(d) Flange thickness vs. TVR_{peak}

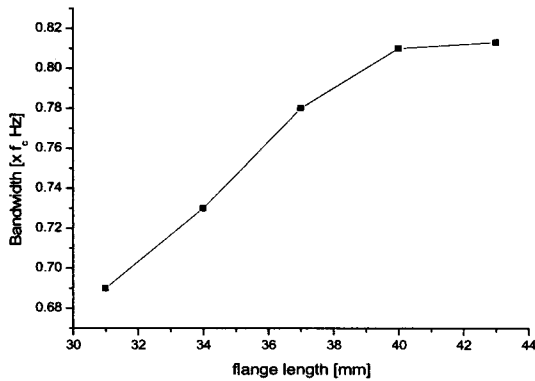
Fig. 3 Variation of performance in relation to flange thickness



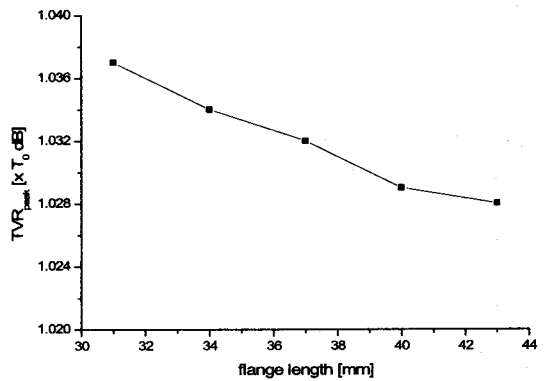
(a) Flange length vs. TVR spectrum



(c) Flange length vs. center frequency



(b) Flange length vs. bandwidth



(d) Flange length vs. TVR_{peak}

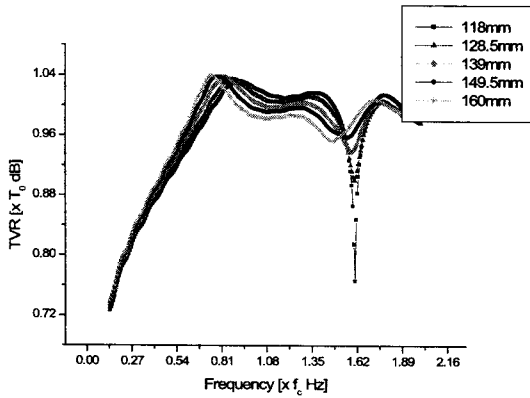
Fig. 4 Variation of performance in relation to flange length

은 증가하였으나, 중심주파수와 TVR_{peak}은 감소하는 경향을 보였다. 결과는 Fig. 4에 나타내었다. Flange 길이가 증가함에 따라 shell 높이가 같이 증가하게 되어 트랜스듀서의 공간이 증가하였다. 따라서 트랜스듀서의 전체적인 체적이 증가하게 되어 트랜스듀서의 중심주파수가 감소하는 경향을 보였다. 또한, flange 길이가 증가하여 flange 자체의 에너지 소모가 증가하게 되고, shell로의 에너지 전달이 줄어들게 되어 부피 변화 진폭을 감소시키므로 트랜스듀서의 TVR_{peak}이 감소하는 것으로 판단된다. 대역폭은 flange 길이를 증가시키면 감쇠가 증가하게 되므로 Q factor의 값이 감소하게 된다. 따라서 길이가 늘어날수록 트랜스듀서의 대역폭은 증가하는 것으로 판단된다.

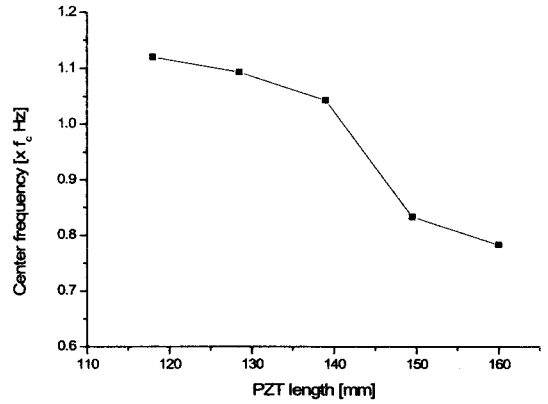
3.4 PZT 길이에 따른 성능 변화

PZT 길이를 118 mm에서 160 mm로 변화 시키면

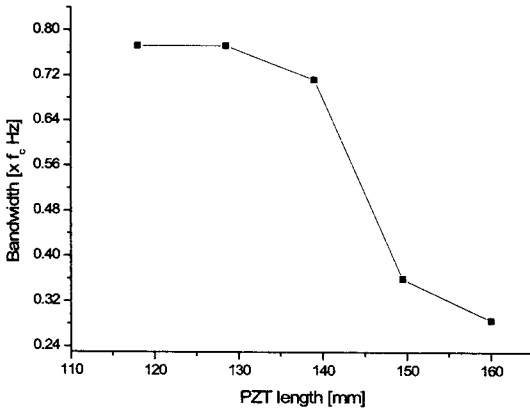
서 트랜스듀서의 성능변화를 해석하였다. 해석 시 PZT 단위 길이당 일정한 전압을 인가하여 트랜스듀서의 성능 변화를 해석하였으며, 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 그 결과 PZT 길이가 증가함에 따라서 트랜스듀서의 TVR_{peak}는 증가하는 반면, 대역폭과 중심주파수는 감소하는 경향을 보였다. 이는 세라믹 적층 두께와 공진주파수의 관계를 나타내는 수식 (2)에서 나타나듯이 세라믹 두께 d 가 증가했기 때문에 트랜스듀서의 전체적인 길이가 증가되어 트랜스듀서의 중심 주파수가 감소했으며, 음압의 경우는 세라믹의 단위 길이당 같은 전압을 인가했기 때문에 세라믹의 적층 길이가 증가함에 따라 적층 부피의 증가로 입력원이 증가하게 되어 트랜스듀서의 TVR_{peak}이 증가한 것으로 판단된다⁽³⁾. 또한, PZT의 길이가 증가하게 되면 트랜스듀서의 전체적인 stiffness가 증가하게 되어 Q factor 값은 높아지게 된다. 따라서 대역폭의 값이 감소한 것으로 판단된다.



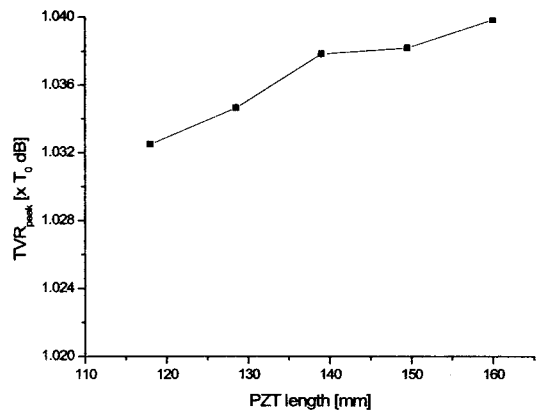
(a) PZT length vs. TVR spectrum



(c) PZT length vs. center frequency



(b) PZT length vs. bandwidth



(d) PZT length vs. TVR_{peak}

Fig. 5 Variation of performance in relation to PZT length

$$f_{ceramic} = \frac{1}{2d} \sqrt{\frac{Y_{ceramic}}{\rho_{ceramic}}} \quad (2)$$

d : 세라믹 두께

$Y_{ceramic}$: Young's modulus

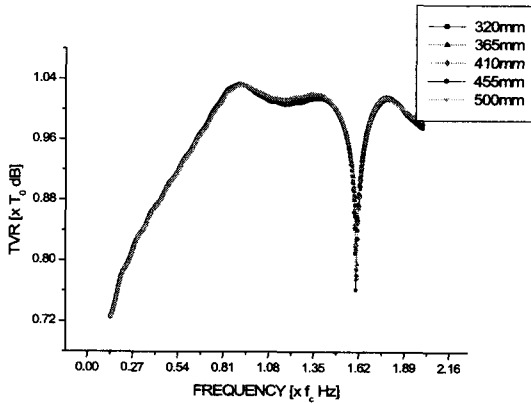
$\rho_{ceramic}$: Density

3.5 ROC의 크기에 따른 성능변화

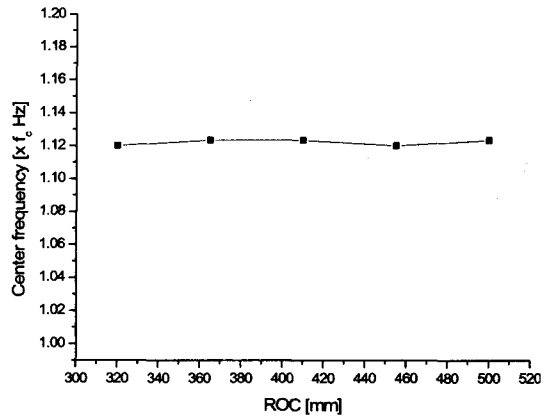
ROC의 크기를 320 mm에서 500 mm로 변화시키면서 트랜스듀서 성능의 변화를 해석하였다. 그 결과 ROC값이 증가함에 따라 약간의 성능 변화가 있었지만 대부분의 값이 오차 범위에 들기 때문에 큰 차이가 없었다. 이는 ROC의 값을 변화시키더라도 실제 모델에서 치수의 변화가 매우 작게 발생했기 때문에 성능에 미미한 영향을 미치는 것으로 판단된다. 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

3.6 경향성 분석 결과 종합

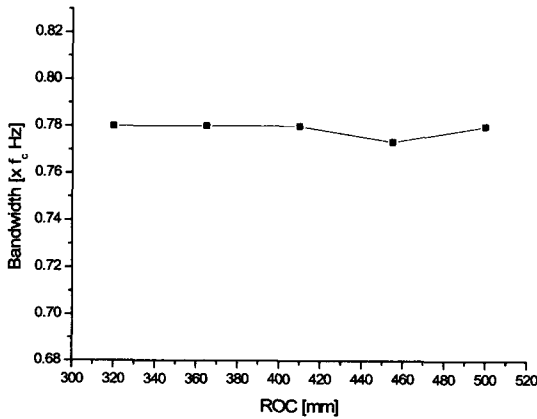
앞에서 행한 개별 설계변수들이 성능에 미치는 영향을 종합하여 Table 4에 나타내었다. ROC는 성능에 큰 변화를 주지 않는 것으로 나타났으며, shell 두께, flange 두께 및 PZT 길이가 증가하고 flange 길이가 감소할 때 TVR_{peak} 값이 증가하는 경향을 보였다. 중심 주파수는 shell 두께가 증가하고 flange 두께, flange 길이, PZT 길이가 감소할 때 증가하는 경향을 나타내었다. 마지막으로 대역폭의 경우 flange 두께와 flange 길이가 커지고 PZT 길이가 작아질 때 증가하는 경향을 보였으며, shell 두께는 감쇠와 구속 조건의 복합작용으로 5~7 mm까지는 증가하다가 7~9 mm까지는 감소하는 경향을 나타내었다. 하지만 Table 4에 나타난 결과는 개별 설계변수들 경향성을 나타낸 것으로 설계변수들의 상호효과를 고려하지 못하기 때문에 최적 구조를 설계하는 데는 한계가 따른다. 따라서 이 연구에서는 설계



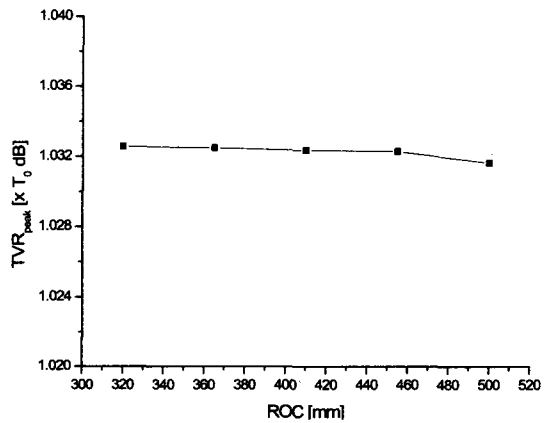
(a) ROC vs. TVR spectrum



(c) ROC vs. center frequency



(b) ROC vs. bandwidth



(d) ROC vs. TVR_{peak}

Fig. 6 Variation of performance in relation to ROC

Table 4 Result of the trend analysis

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
TVR _{peak}	↑	↑	↓	↑	-
Center frequency	↑	↓	↓	↓	-
Bandwidth	-	↑	↑	↓	-

x_1 = Shell thickness x_2 = Flange thickness
 x_3 = Flange length x_4 = PZT length
 x_5 = ROC(radius of curvature)

변수들의 개별 영향 및 상호효과를 고려할 수 있는 통계적 기법인 반응 표면 계획법에 따른 회귀분석을 수행하였다.

4. 회귀분석에 의한 성능의 함수화

이 연구에서는 최적화를 하기 위해 변수들간의 함

수관계를 다중 회귀분석법을 이용하여 TVR_{peak}, 중심 주파수 및 대역폭을 함수화하였다⁽¹⁶⁾. 상용 프로그램 SAS 9.1[®]을 사용하였으며, 회귀분석 시 설계 변수들의 상대적인 영향 정도를 고려하기 위하여 각각의 설계변수들을 표준화하였고, 그 값을 Table 5에 나타내었다. 또한 성능의 함수화를 위해 기초 자료를 확보하고자 실험계획법에 의한 유한요소해석을 하였다^(1,3,17). 설계변수들의 상호효과를 고려하기 위하여 설계변수들의 값이 각각 ±0.5와 ±1로 구성되는 2×2ⁿ요인(n =설계변수 개수) 실험계획법에 의한 해석을 하였으며, 3절에서 행한 개별 설계변수들의 영향을 해석한 21개의 결과를 이용하였다. 따라서 총 85개(2×2⁵+21)의 경우를 해석하여 회귀분석에 사용될 기초 자료를 확보하였다. 해석 결과를 바탕으로 다중 회귀분석을 수행하여 성능에 대한 함수화를 수행하였으며, 트랜스듀서의 TVR_{peak} 회귀식을

Table 5 Normalization factor of the structural variables (mm)

	Shell thickness	Flange thickness	Flange length	PZT length	ROC
-1	5	18	31	118	320
-0.5	6	21	34	128	365
0	7	24	37	139	410
0.5	8	27	40	150	455
1	9	30	43	160	500

식 (3)에 나타내었다.

$$\begin{aligned}
 TVR_{peak} = & -0.1x_1^2 - 0.25x_2^2 - 0.25x_3^2 + 0.003x_4^2 \\
 & - 0.2x_5^2 + 0.4x_1 - 0.2x_2 + 0.3x_3 + 0.2x_4 \\
 & - 0.1x_5 - 0.002x_1x_2 - 0.1x_1x_3 + 0.1x_1x_4 \\
 & + 0.1x_1x_5 - 0.1x_2x_3 - 0.0003x_2x_4 \\
 & + 0.2x_2x_5 - 0.2x_3x_4 + 0.2x_3x_5 - 0.01x_4x_5 \\
 & + 0.01x_1x_2x_3 + 0.05x_1x_2x_4 - 0.02x_1x_2x_5 \\
 & - 0.01x_1x_3x_4 + 0.3x_1x_3x_5 + 0.1x_1x_4x_5 \\
 & + 0.02x_2x_3x_4 - 0.4x_2x_3x_5 + 0.003x_2x_4x_5 \\
 & - 0.01x_3x_4x_5 + 0.002x_1x_2x_3x_4 - 0.04x_1x_2x_3x_5 \\
 & + 0.1x_1x_3x_4x_5 + 0.4x_2x_3x_4x_5 \\
 & - 0.03x_1x_2x_3x_4x_5 + 145.5
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

식 (3)은 총 36개의 회귀계수로 이루어진 회귀식을 나타내었으며, 결정계수는 0.9576으로서 이 식이 트랜스듀서의 TVR_{peak} 를 잘 표현하고 있음을 알 수 있다. 트랜스듀서의 중심주파수에 대한 회귀식은 식 (4)에 나타내었다.

$$\begin{aligned}
 \text{Center frequency} = & -47.7x_1^2 + 105.3x_2^2 - 0.6x_3^2 \\
 & - 62.6x_4^2 - 0.6x_5^2 + 235.3x_1 - 356.5x_2 \\
 & - 605.9x_3 - 596.6x_4 + 84.7 - 8.8x_1x_2 \\
 & + 24.3x_1x_3 - 53.7x_1x_4 + 25x_1x_5 \\
 & + 33.8x_2x_3 + 44.1x_2x_4 - 12.5x_2x_5 \\
 & + 144.8x_3x_4 - 25x_3x_5 + 35.3x_4x_5 - 0.4x_1x_2x_3 \\
 & + 1.5x_1x_2x_4 + 2.3x_1x_2x_5 + 9.6x_1x_3x_4 + 30.4x_1x_3x_5 \\
 & + 10x_1x_4x_5 - 1.5x_2x_3x_4 + 12.7x_2x_3x_5 \\
 & - 7.2x_2x_4x_5 - 14.6x_3x_4x_5 - 10.9x_1x_2x_3x_4 \\
 & - 16.9x_1x_2x_3x_5 + 14.0x_1x_3x_4x_5 \\
 & + 203.1x_2x_3x_4x_5 - 105.2x_1x_2x_3x_4x_5 + 6352.7
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

중심주파수에 대한 결정계수는 0.9736이었다. 트랜스듀서의 대역폭에 대한 회귀식은 식 (5)에 나타내었으며, 결정계수는 0.9657이었다.

$$\begin{aligned}
 \text{Bandwidth} = & -302.9x_1^2 + 1167.6x_2^2 - 1544.2x_3^2 \\
 & - 163.9x_4^2 - 238.3x_5^2 + 153.5x_1 \\
 & - 345.9x_2 + 341.2x_3 - 1650.4x_4 + 187.1x_5 \\
 & - 11.4x_1x_2 + 134.19x_1x_3 + 148.16x_1x_4 \\
 & - 17.3x_1x_5 - 256.2x_2x_3 - 399.6x_2x_4 \\
 & - 163.1x_2x_5 - 9.9x_3x_4 + 154.0x_3x_5 \\
 & + 200.4x_4x_5 - 34.0x_1x_2x_3 - 7.5x_1x_2x_4 \\
 & - 42.5x_1x_2x_5 + 13.3x_1x_3x_4 + 5.2x_1x_3x_5 \\
 & - 108.6x_1x_4x_5 - 119.0x_2x_3x_4 - 10.8x_2x_3x_5 \\
 & - 8.3x_2x_4x_5 + 14.7x_3x_4x_5 - 99.5x_1x_2x_3x_4 \\
 & - 16.2x_1x_2x_3x_5 + 103.5x_1x_3x_4x_5 \\
 & - 11.6x_2x_3x_4x_5 - 135.2x_1x_2x_3x_4x_5 + 5068.5
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

5. 최적화

이 연구의 목적은 중심주파수 f_c Hz 부근에서 TVR_{peak} 가 T_0 dB 이상의 값을 가지고, TVR_{peak} 로부터 -6 dB 지점의 낮은 주파수(f_1)가 $f_c - 2500$ Hz 보다 작고 높은 주파수(f_2)가 $f_c + 2500$ Hz 보다 큰 범위를 만족하면서 최대 대역폭을 가지는 barrel stave flextensional 트랜스듀서의 설계 변수들을 최적화하는 것이다. 따라서 이 연구에서의 목적함수는 대역폭을 최대화하는 것으로 설정하였고, 제한 조건은 중심 주파수, TVR_{peak} 및 대역폭으로 설정하였다. 각각을 식 (6)과 (7)에 나타내었다.

목적 함수

$$\text{Minimize } \frac{1}{\text{대역폭(Bandwidth)}}
 \tag{6}$$

제한 조건

$$f_c - 100 \text{ Hz} \leq f_c \leq f_c + 100 \text{ Hz}$$

$$\text{Bandwidth: } f_1 \leq f_c - 2500 \text{ Hz, } f_2 \geq f_c + 2500 \text{ Hz}
 \tag{7}$$

$$TVR_{peak} \geq T_0 \text{ dB}$$

최적화 방법으로는 SQP-PD(sequential quadratic programming method of Phenichny and Danilin)법을 이용하였다⁽¹⁸⁻²⁰⁾. SQP-PD법은 다중 변수 함수일 때 계산의 수렴속도가 가장 빠르다는 장점이 있으나, 시작점에 따라 최적값이 변하는 단점도 가지고 있기 때문에 여러 번의 최적화를 수행하여 결과를 비교 할 필요가 있다. 이 연구에서는 이 방법을 이용하여 모든 제한 조건을 만족하면서 최대 대역폭을 가지는 barrel stave flextensional

트랜스듀서의 설계 변수들의 최적 조합을 도출하였으며, 그 결과를 Table 6에 나타내었다. 이는 개별 설계변수들의 영향뿐만 아니라 상호효과까지 고려한 결과이다.

최적화 결과를 검증하기 위하여 Table 6의 최적값으로 트랜스듀서를 모델링하여 유한요소해석을 하였고, SQP-PD법에 의한 결과와 유한요소해석에 의한 결과를 비교해 보면 오차율이 3% 이하로 서로 잘 일치하는 것을 알 수 있다. Fig. 7과 Table 7은 각각 기본 모델과 최적화된 모델의 성능을 비교한 해석 결과와 스펙트럼을 나타내었다. 기본 모델의 성능

중 TVR_{peak} 는 $T_0+4.53$ dB로 제한 조건을 만족하였으나, 중심주파수는 f_c+900 Hz로 목표사양을 만족하지 못하였고, 대역폭 또한 f_1 은 (f_c-2000) Hz, f_2 는 (f_c+3800) Hz로 목표 사양을 벗어났다. 반면, 최적화된 모델의 중심주파수와 TVR_{peak} 의 값은 각각 f_c+25 Hz, $T_0+4.13$ dB로 제한 조건을 모두 만족하였으며, 대역폭도 f_1 은 (f_c-2900) Hz, f_2 는 (f_c+2950) Hz로 제한 조건을 만족하였다. 따라서 이 연구에서는 주어진 조건을 모두 만족하면서 최대 대역폭을 가지는 barrel stave flextensional 트랜스듀서를 최적설계 하였다.

Table 6 Result of the optimization with the SQP-PD method

	Optimized value	Normalization factor
x_1 (mm)	6	-0.5
x_2 (mm)	29.94	0.98
x_3 (mm)	43	0.99
x_4 (mm)	118	-1
x_5 (mm)	320	-0.98

6. 결론

이 연구에서는 barrel stave flextensional 트랜스듀서를 설계하는데 있어서 각 설계변수들의 개별 영향 및 상호작용에 의한 영향이 트랜스듀서의 성능에 미치는 영향을 분석하고, 나아가 이들을 barrel stave flextensional 트랜스듀서 설계에 적용하여 주어진 조건에서 최대성능을 발휘 할 수 있는 트랜스듀서의 구조를 최적 설계하고자 하였다.

Table 7 Analysis result of the basic and optimized models

	TVR_{peak} (dB)	Center freq.(Hz)	Bandwidth (Hz)
Basic model	$T_0+4.53$	f_c+900	$f_1=f_c-2000$ Hz $f_2=f_c+3800$ Hz
Optimized model	$T_0+4.13$	f_c+25	$f_1=f_c-2900$ Hz $f_2=f_c+2950$ Hz

먼저 트랜스듀서 모델을 구성하였으며, 성능에 영향을 많이 미치는 shell 두께, flange 두께, flange 길이, PZT 길이 및 ROC의 5가지 설계변수들을 선정하여 개별 설계변수와 설계변수의 상호작용이 성능에 미치는 영향을 체계적으로 분석하였다. 통계기법인 반응표면 계획법에 의해 다중 회귀분석을 수행하여 트랜스듀서의 성능을 설계변수들의 함수로 도출하였고, 제한 최적화 방법 중 SQP-PD법을 이용하여 최대 대역폭을 가지며, 목표 사양으로 주어진 중심주파수, TVR_{peak} 및 대역폭의 범위를 모두 만족하는 barrel stave flextensional 트랜스듀서의 설계 변수들의 최적값을 구하였다.

SQP-PD법으로 구한 설계변수들의 최적값으로 트랜스듀서의 성능을 확인한 결과 중심주파수 f_c+25 Hz, TVR_{peak} $T_0+4.13$ dB를 가지며 $(f_c-2500-400)$ Hz ~ $(f_c+2500+450)$ Hz 범위의 대역폭을 가지는 barrel stave flextensional 트랜스듀서의 최적 구조를 설계하였다. 최적화된 모델과 basic 모델의 결과를 비교한 결과, TVR_{peak} 는 최적화된 모델이 basic 모델 보다 조금 낮았지만, 목적함수로 설정한 대역폭의 경우 최적화된 모델이 basic 모델보다 더

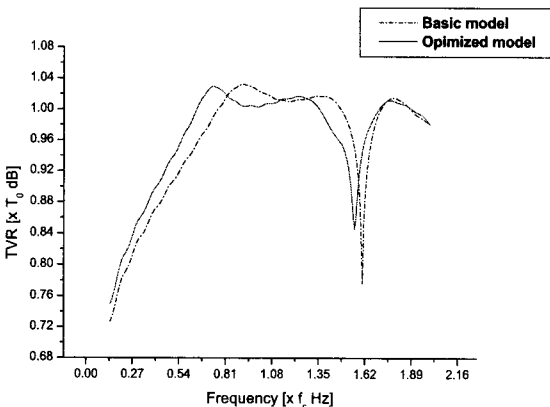


Fig. 7 TVR spectrum of the basic and optimized models

넓어졌으며, basic 모델이 만족 하지 못했던 제한 조건을 모두 만족하였다. 따라서 이 제한 최적화 방법은 향후 class I을 비롯한 다른 트랜스듀서의 최적 설계에 적용이 가능 할 것이다.

참 고 문 헌

- (1) Kang, K. J. and Roh, Y. R., 2003, "Optimization of Structural Variables of a Flextensional Transducer by the Statistical Multiple Regression Analysis Method", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 114, No. 33, pp. 1454~1461.
- (2) Kang, K. J. and Roh, Y. R., 2003, "Optimal Design of a Flextensional Transducer Considering All the Cross-coupled Effects of the Design Variables", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 13, No. 5, pp. 364~374.
- (3) Kang, K. J. and Roh, Y. R., 2000, "Optimal Design and Characteristic Analysis of a Class IV Flextensional Transducer", J. Acoust. Soc. Korea, Vol. 19, No. 4, pp. 69~76.
- (4) McKeighen, R. E., 1996, "Optimization of Broadband Transducer Designs by Use of Statistical Design of Experiments", IEEE UFFC, Vol. 43, No. 1, pp. 63~70.
- (5) Oswin, J. and Dunn, J., 1987, "Frequency, Power and Depth Performance of Class IV Flextensional Transducers", Proc. of the International Work-shop, pp. 121~133, Lille, France.
- (6) Wilson, O. B., 1988, "Introduction to Theory and Design of Sonar Transducers", Peninsul Publishing, Los Altos, Chap. 6.
- (7) Dhillsha, K. R., 2002, "Performance of a Low-frequency, Multi-resonant Broadband Tonpizl Transducer", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 111, No. 4, pp. 1692~1694.
- (8) Ahmad, J., Francis, D. T. I. and Coates, R. F. W., 1995, "Low Frequency Flextensional Transducer Designs for Ocean Acoustic Tomography", Proc. Inst. Acoust., Vol. 17, No. 3, pp. 200~209.
- (9) Francis, D. T. I., Bayliss, C. J. and Coates, R. F. W., 1994, "The Development of a Low Frequency Barrel-stave Transducer for Tomography Applications Using Finite Element and Boundary Element Modeling", IEEE Proc. Oceans Vol. 94, No. 1, pp. 371~376.
- (10) Jarng, S. S. D., Francis, T. I. J., Dunn, R. and Smith, B. V., 1990, "Optimization of Sonar Transducer Using a Coupled FE-BE Method", Proc. Inst. Acoust., Vol. 12, No. 4, pp. 76~84.
- (11) Jarng, S. S., 2003, "Comparison of Barrel-stave Sonar Transducer Simulations Between a Coupled FE-BEM and ATILA", IEEE Sensor Journal, Vol. 3, No. 4, pp. 439~446.
- (12) Jones, D. F. and Christopher, D. A., 1999, "A Broadband Omnidirectional Barrel-stave Flextensional Transducer", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 106, No. 2, pp. 13~17.
- (13) Sherman, C. H. and Butler, J. L., 2007, "Transducers and Arrays for Underwater Sound", Springer, New York, pp. 126~136.
- (14) Royster, L. H., 1970, "The Flextensional Concept: A New Approach to the Design of Underwater Acoustic Transducers", Appl. Acoust. 3, pp. 117~125.
- (15) Hanel, R., Mues, A. and Sobotta, R., 1996, "Description of Ultrasound Transducers Through Wave Parameters", Ultrasonics, 34, pp. 159~162.
- (16) SAS Institute Inc., Strategic Application Software, Ver.9.1, Cary, North Carolina, 2000.
- (17) Kuehl, R. O., 2000, "Design of Experiments: Statistical Principles of Research Design and Analysis", Duxbury Press, Pacific Grove.
- (18) Belegudu, A. D. and Chandrupatla, T. R., 1999, "Optimization Concepts and Applications in Engineering", Prentice Hall, New Jersey, Chap.5.
- (19) Pierre, D. A., 1986, "Optimization Theory with Applications", Dover Publications, New York.
- (20) Miller, R. E., 2000, "Optimization: Foundations and Applications", John Wiley & Sons, New York.