

광대역 심벌 트랜스듀서 배열 설계

Design of a wideband cymbal transducer array

김동현,¹ 노용래[†]

(Donghyun Kim¹ and Yongrae Roh^{1†})

¹경북대학교 기계공학부

(Received March 17, 2020; accepted April 9, 2020)

초 록: 심벌 트랜스듀서는 높은 품질계수와 낮은 에너지 변환 효율성을 가지기 때문에 단일보다는 배열형으로 많이 사용된다. 단, 배열형으로 사용하면 구성 트랜스듀서들 간의 상호작용으로 인해 주파수 특성에 많은 변화가 나타난다. 본 연구에서는 이러한 성질을 이용하여 초광대역 특성을 가지는 배열형 심벌 트랜스듀서의 구조를 설계하였다. 먼저, 특정 중심 주파수를 가지는 심벌 트랜스듀서를 설계하였다. 그리고 설계된 심벌 트랜스듀서들로 2x2 평면 배열을 구성 하는데, 구성 트랜스듀서들이 모두 동일하거나 엇갈리는 분극 방향을 가지도록 하였다. 이 배열구조에 대해서 구성 트랜스듀서들 간의 중심 주파수 차이와 트랜스듀서들 중심과 중심 간의 간격이 전체 배열 구조의 음향특성에 미치는 영향을 분석하였다. 이 결과를 바탕으로 비대역폭이 최대가 되는 배열형 심벌 트랜스듀서의 구조를 도출하였다.

핵심용어: 배열형 심벌 트랜스듀서, 광대역, 비대역폭, 최적설계법

ABSTRACT: Cymbal transducers are often used as an array rather than single because they have a high quality factor and low energy conversion efficiency. When used as an array, there occurs a big change in the frequency characteristics of the array due to the interaction between constituent transducers. In this study, we designed the structure of a cymbal transducer array to have ultra-wideband characteristics using this property. First, cymbal transducers with specific center frequencies were designed. Then, a 2x2 planar array was constructed with the designed transducers, where the cymbal transducers were arranged to have same or opposite polarization directions. For this structure, we analyzed the effect of the difference in the center frequency of and the spacing between the constituent transducers on the acoustical characteristics of the array. Based on the analysis, we designed the structure of the cymbal transducer array to have the widest possible bandwidth.

Keywords: Cymbal transducer array, Broadband, Fractional bandwidth, Optimal design

PACS numbers: 43.30.Yj, 43.38.Fx

1. 서 론

최근 무선 센서 네트워크 기술을 이용한 다양한 응용 분야가 나타나게 되면서 수중에서도 다수의 센서 노드들을 활용한 수중 센서 네트워크(Under Water Sensor Networks, UWSN)에 대한 연구가 이뤄지고 있다. 이 기술의 대표적인 예로 수중으로 침투하는 적을 탐지하기 위한 Seaweb이 있는데, 이는 센서 노드

와 중계 노드, 게이트웨이 등으로 구성되며 센서 노드는 다시 고정형 노드와 이동형 노드로 이루어진다.^[1] 이 기술은 해양 오염 모니터링, 재해 예측, 무인 또는 자율 잠수정을 이용한 해저 자원 탐사와 과학적 데이터 수집 등 광범위한 응용 분야에 활용되고 있다.^[2] UWSN 체계에서 음향 트랜스듀서는 UWSN의 성능을 좌우하는 핵심요소인데, UWSN의 효과적인 작동을 위해서 고성능 음향 트랜스듀서는 필수적

[†]Corresponding author: Yongrae Roh (yryong@knu.ac.kr)

School of Mechanical Engineering, Kyungpook National University, 80 Daehakro, Bukgu, Daegu 41566, Republic of Korea
(Tel: 82-53-950-6828, Fax: 82-53-943-8716)

“이 논문은 2019년도 한국음향학회 추계학술대회에서 발표하였던 논문임.”



Copyright©2020 The Acoustical Society of Korea. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

이다. 특히, 고속 통신과 대용량의 정보 전송을 위해서는 광대역 주파수 특성을 가지는 음향 트랜스듀서가 요구된다.^[3]

본 연구에서는 위와 같은 조건을 만족하는 수중 음향 트랜스듀서로 심벌 트랜스듀서를 연구하였다. 심벌 트랜스듀서는 1990년대 초 Newnham *et al.*에 의해 개발되었으며 Class V flextensional 트랜스듀서의 소형화된 버전이다.^[4] 심벌 트랜스듀서는 두 개의 심벌 모양의 금속 캡 사이에 압전 세라믹 디스크가 끼워져 있는 단순한 구조를 가진다.^[5] 금속 캡은 기계적 변압기 역할을 하며 세라믹의 높은 음향 임피던스, 작은 인장 변형을 트랜스듀서 전체의 낮은 음향 임피던스, 큰 굽힘 변형으로 변환시키는 역할을 한다.^[6] 심벌 트랜스듀서는 구조가 간단하여 제조가 용이하고, 크기가 작고 가벼우며, 비교적 낮은 공진 주파수에서 고효율로 구동된다.^[7] 그리고 설계변수를 제어하여 특정 응용 분야에 맞게 공진 주파수를 조정하기가 쉬워서 설계 시 큰 유연성을 가질 수 있다.^[8] 또한, 제작 공정이 저렴하여 UWSN의 특징인 대규모 노드를 구성하기에 적합하다. 하지만 이 트랜스듀서는 크기가 작고, 높은 품질계수와 낮은 에너지 변환 효율을 가지기 때문에 원하는 소스 레벨과 지향성을 달성하기 위해서는 단일보다는 배열형으로 많이 사용한다. 하지만 이러한 심벌 트랜스듀서 여러 개를 배열한 형태로 사용하게 되면 소자들 간의 상호 간섭으로 인해 단일 트랜스듀서에 비해 주파수 특성에 많은 변화가 나타나게 되며, 이를 잘 활용하면 광대역 특성을 구현할 수 있다.^[9]

심벌 트랜스듀서의 배열 구조에 관해서는 많은 연구들이 수행된 바 있다. Tressler *et al.*^[10]은 배열형 심벌 트랜스듀서의 금속 캡 재료와 캡의 기하학적 구조에 따른 성능을 비교하였다. 그리고 Zhang *et al.*^[9]은 장착 방식에 따른 배열 구조의 성능 차이를 비교하고, 어레이 요소 간의 상호 작용을 분석하는 연구도 수행하였다. Newnham *et al.*^[11]은 2가지(3 × 3, 5 × 20)의 배열형 심벌 트랜스듀서들을 제작하여 Transmitting Voltage Response(TVR)을 비교하였다. 또한, Zhang *et al.*^[12]은 유한 요소 해석과 적분 방정식을 결합하여 3 × 3 심벌 어레이를 모델링하였다. 이 외에도, 수중 청음기용 배열형 심벌 트랜스듀서의 수신

전압 감도 및 지향성 특성 비교 평가,^[13] 6개의 심벌 모듈을 직렬, 병렬 또는 두 가지의 조합으로 배열한 프로젝터 설계^[14] 등과 같은 연구들이 이루어진 바 있다. 그러나 이들 연구의 대부분은 배열형 심벌 트랜스듀서의 성능 평가와 활용에 중점을 둔 것으로서, UWSN 체계에 필요한 트랜스듀서의 대역폭 개선과 직접적인 연관은 없다. 그리고 위 사례들에서의 배열형 트랜스듀서들은 동일한 심벌 트랜스듀서들로만 이루어져 있다.

따라서 본 연구에서는 UWSN에 적용할 수 있도록 광대역 주파수 특성을 가지는 배열형 심벌 트랜스듀서를 설계하였다. 이를 위해 먼저 특정 주파수에서 작동하는 개별 심벌 트랜스듀서를 설계한 다음, 이들을 배열함에 있어 구조변수들이 배열 트랜스듀서의 음향특성에 미치는 영향을 분석하였다. 분석 결과를 바탕으로 TVR 레벨에 대한 제한 조건을 만족시키면서 최대의 비대역폭을 갖는 배열형 심벌 트랜스듀서의 구조를 설계하였다. 설계된 구조의 타당성은 초기 모델과 TVR 스펙트럼을 비교함으로써 확인하였다.

II. 배열형 심벌 트랜스듀서 구성

본 연구에서는 상용 프로그램인 PZFlex[®]를 이용하여 심벌 트랜스듀서의 유한요소해석(Finite Element Analysis, FEA) 모델을 구축하고 음향특성을 분석하였다. 단일 심벌 트랜스듀서에 대해 구축된 2D 축대칭 모델과 해당 트랜스듀서의 구조를 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1에서 d_a 는 공동 위 직경, d_b 는 공동 아래 직경, d_c 는 압전 세라믹 직경, t_m 은 금속 캡 두께, t_c 는 압전 세라믹 두께, h_c 는 공동 높이를 말한다. 압전 세

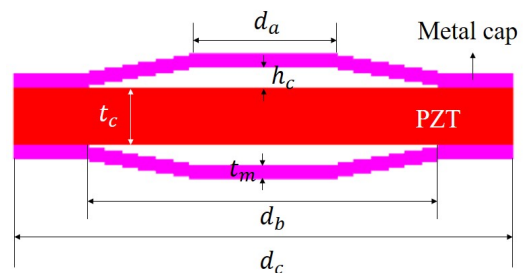
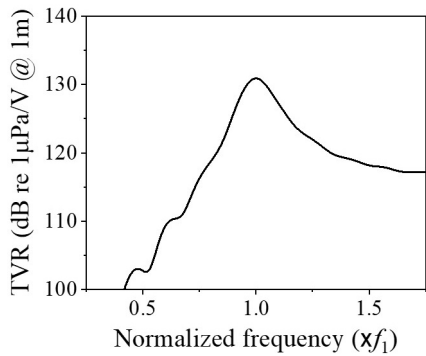


Fig. 1. (Color available online) Schematic structure of the individual cymbal transducer.

Table 1. Structural parameters and dimensions of the cymbal transducer Tx_1 .

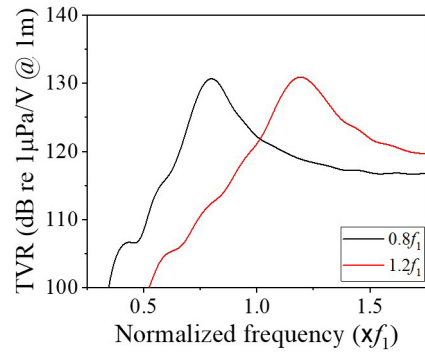
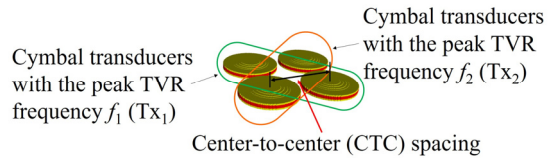
Structural Parameter	Symbol	Dimension (mm)
Diameter of the cavity apex	d_a	5.1
Diameter of the cavity base	d_b	14.5
Diameter of the piezoceramic	d_c	20.0
Thickness of the metal cap	t_m	0.5
Thickness of the piezoceramic	t_c	1.0
Height of the cavity	h_c	0.7

Fig. 2. Underwater TVR spectrum of the cymbal transducer Tx_1 .Table 2. Acoustic characteristics of the cymbal transducer Tx_1 .

Peak TVR frequency	f_1
Peak TVR (TVR_0)	130.9 dB
-3 dB Fractional bandwidth	15.9 %

라믹 디스크 상하면에 금속 캡이 접착된 구조를 가지는데, 압전 세라믹 디스크와 금속 캡 사이의 접착층은 너무 얇아서 해석 모델에서는 무시하였다. 압전 세라믹 재료는 PZT-5A이고, 금속 캡 재료는 황동이다. 각 재료의 물성은 Reference [15]의 값을 인용하였다.

우선 배열형 심벌 트랜스듀서를 구성하기 위한 특정 중심 주파수와 TVR 값을 가지는 단일 심벌 트랜스듀서를 설계하였다. 먼저, 중심 주파수가 f_1 인 심벌 트랜스듀서(Tx_1)의 구조를 설계하였다. 설계 방법 및 설계 결과는 선행 연구인 Reference [16]에서 도출된 결과를 사용하였으며, 그 값을 Table 1에 나타내었다. Fig. 2는 Tx_1 의 수중 TVR 스펙트럼이고, Tx_1 의 음향특성 값을 Table 2에 표시하였다. 여기서 f_1 은 16 kHz이며 모든 주파수 특성은 f_1 에 정규화되었다.

Fig. 3. (Color available online) Underwater TVR spectra of the two cymbal transducers Tx_2 having center frequencies $0.8f_1$ and $1.2f_1$, respectively.Fig. 4. (Color available online) 3D FEA model of the 2×2 cymbal transducer array.

다음으로, f_2 를 중심 주파수로 가지는 심벌 트랜스듀서(Tx_2)를 설계하였다. Tx_2 의 중심 주파수는 f_1 대비 20% 증감시킨 값들로 설정하였다. Tx_1 의 치수를 기준으로 Reference [16]에 사용된 설계변수를 사용하여 해당 변수의 치수 범위를 조정함으로써 Tx_2 를 설계하였고, 설계된 두 Tx_2 의 TVR 스펙트럼을 Fig. 3에 나타내었다. 중심 주파수 $0.8f_1$ 을 가지는 Tx_2 의 최대 TVR은 130.7 dB, -3 dB 비대역폭은 17.3%이며, 중심 주파수 $1.2f_1$ 을 가지는 Tx_2 의 최대 TVR은 130.9 dB, -3 dB 비대역폭은 16.0%이다. 그 후, 설계된 심벌 트랜스듀서 Tx_1 과 Tx_2 를 사용하여 Fig. 4와 같은 평면 배열 구조를 구성하였다. Fig. 4에서 대각선으로 마주보는 트랜스듀서 쌍이 각각 Tx_1 과 Tx_2 이다. 여기서, Tx_1 과 Tx_2 의 분극 방향은 서로 동일하거나 반대되는 방향을 가지도록 설정하였다. 이 연구의 목적은 배열 트랜스듀서의 구조변수가 트랜스듀서의 음향특성에 미치는 영향을 분석하여, 가능한 한 넓은 대역폭을 가지는 배열형 심벌 트랜스듀서를 설계하는 것이다. 이를 달성하기 위해서 배열형 심벌 트랜스듀서의 성능에 대한 구조변수의 영향을 FEA를 통해 분석하였다.

III. 배열형 심벌 트랜스듀서 성능에 미치는 구조변수 영향

광대역 배열형 심벌 트랜스듀서 설계를 위해서 우선 배열의 구조변수가 트랜스듀서에 미치는 영향을 분석하였다. 여기서 말한 구조변수는 Tx_1 과 Tx_2 의 분극 방향, Tx_2 의 중심 주파수와 Tx_1 과 Tx_2 의 중심간 (Center-To-Center, CTC) 간격 등이다. λ 는 f_1 주파수에서의 물속 음파의 파장이다. 구조변수에서 중심 주파수와 중심간 간격의 범위는 중심 주파수인 f_1 대비 비율, 파장 대비 비율로 설정하였다. 먼저, 분극 방향은 Tx_1 과 Tx_2 가 동일하거나 서로 반대되는 방향을 가지도록 설정하였다. 그리고 트랜스듀서 중심 주파수의 차이가 배열형 심벌 트랜스듀서의 음향특성에 미치는 영향을 분석하였는데, Tx_1 의 주파수는 기준 주파수인 f_1 로 고정시키고, Tx_2 의 주파수 f_2 만 $0.8f_1$, $1.0f_1$, $1.2f_1$ 로 변화시켰다. 동시에, 트랜스듀서들 중심간 간격이 배열형 심벌 트랜스듀서의 성능에 미치는 영향을 분석하였는데, 향후 시제품으로 제작되어 측정할 때 사용할 취구의 크기를 고려하여 중심간 간격을 0.3λ , 0.36λ , 0.42λ 로 설정하였다. TVR 스펙트럼에서 추출한 음향특성은 중심 주파수, 최대 TVR 값, 대역폭 등이고, -3 dB 대역폭을 중심 주파수로 나누어 비대역폭을 구하였다. Fig. 5는 Tx_1 과 Tx_2 의 분극 방향이 같을 때, 중심 주파수 차이와 중심간 간격의 변화에 따른 배열형 심벌 트랜스듀서의 TVR 스펙트럼 변화를 나타낸다. Fig. 5(a)와 (c)에서 TVR 스펙트럼의 통과대역에서 노치가 발생하는 이유는 Tx_1 과 Tx_2 의 공진 주파수 전후의 음향 임피던스가 서로 반대의 부호를 가지기 때문인 것을 판단된다.^[17] 전체적으로 중심간 간격이 좁아질수록 TVR이 낮아지고, 대역폭이 증가한다. Fig. 5(a)~(c)의 경우, 중심간 간격이 0.3λ 일 때 비대역폭이 각각 29.9%, 40.6%, 26.4%이다.

Fig. 6은 Tx_1 과 Tx_2 의 분극 방향이 다를 때, 중심 주파수 차이와 중심간 간격의 변화에 따른 배열형 심벌 트랜스듀서의 TVR 스펙트럼 변화를 나타낸다. Fig. 6에서는 Fig. 5와는 반대로 중심간 간격이 넓을수록 TVR이 낮아지고, 대역폭이 증가하는 것으로 나타났다. 구체적으로 Fig. 6(a)과 (c)의 경우, 중심간 간격이 0.42λ 일 때 비대역폭은 각각 33%와 25.6%이

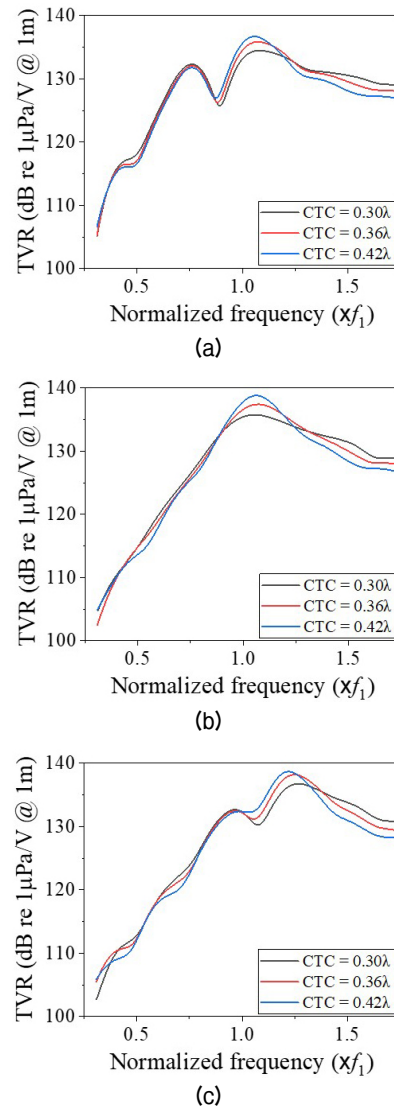


Fig. 5. (Color available online) Comparison of TVR spectra in relation to the center frequency difference and CTC spacing for the same polarity of Tx_1 and Tx_2 : (a) $f_2 = 0.8f_1$, (b) $f_2 = f_1$, (c) $f_2 = 1.2f_1$.

다. 단, Fig. 6(b)의 경우에는 Tx_1 과 Tx_2 의 중심 주파수가 같고 분극 방향이 반대이다 보니 두 트랜스듀서에서 발신되는 음파들의 위상이 정확히 반대가 되어 서로를 상쇄시키는 현상이 나타난다. 그러다 보니 Fig. 5 혹은 Fig. 6(a), (c)와 같은 경우들에 비해 최종 음압이 120 dB 이상 현저히 낮게 나와서 본래 용도인 수중 탐지용으로 사용하기에 부적합해졌기 때문에 더 이상 배역폭을 비교할 대상이 되지 않는다. 위의 결과를 바탕으로 배열형 심벌 트랜스듀서의 비대역폭은 구성 소자의 분극 방향, 소자들 간 중심 주파수

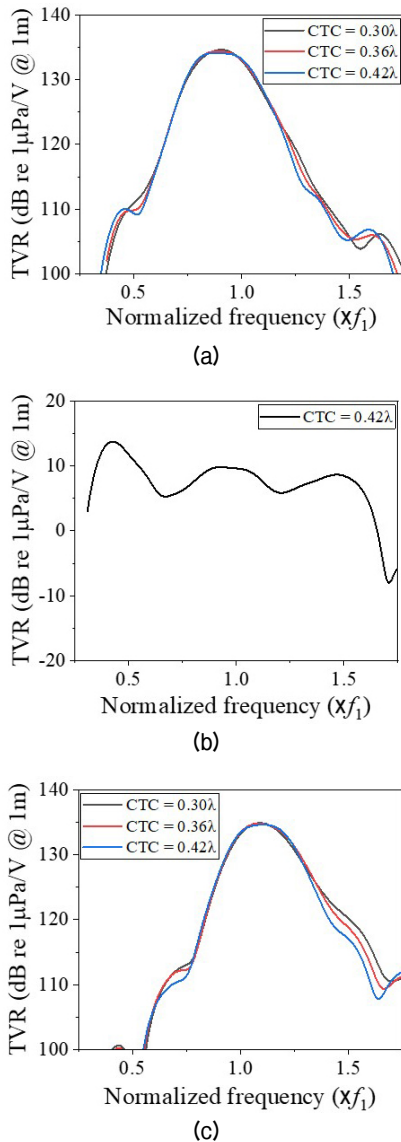


Fig. 6. (Color available online) Comparison of TVR spectra in relation to the center frequency difference and CTC spacing for the opposite polarity of Tx_1 and Tx_2 : (a) $f_2 = 0.8f_1$, (b) $f_2 = f_1$, (c) $f_2 = 1.2f_1$.

차이 그리고 중심간 간격을 제어함으로써 효과적으로 조절할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 5에서 노치가 발생하지 않은 경우인 Fig. 5(b)와 Fig. 6의 결과를 비교해보면, 소자들 분극 방향이 같을 때의 비대역폭이 서로 다를 때의 비대역폭보다 훨씬 크다. 따라서 이후의 광대역 배열형 심벌 트랜스듀서의 설계에서는 Tx_1 과 Tx_2 의 분극 방향을 서로 같게 해서 설계를 하였고, 설계변수에서 분극 방향을 제외하였다. 배열 구조 설계를 좀 더 정확하게 하

Table 3. Variation range of the structure variables.

f_2	CTC spacing
$0.8f_1$	0.3λ
$0.85f_1$	
$0.9f_1$	0.33λ
$0.95f_1$	
f_1	0.36λ

기 위해 같은 분극 방향일 때 Tx_2 의 중심 주파수와 중심간 간격을 좀 더 세분화하고, 사전 분석을 통해 대역폭 확장에 유리한 설계변수의 변화 구간을 설정하여 Table 3에 나타내었다. Table 3에 나타낸 구간에 대해 중심 주파수 차이와 중심간 간격 변화에 따른 배열형 심벌 트랜스듀서의 성능에 대해서 추가적으로 분석하여 Fig. 7에 나타내었다. 여기서 $0.85f_1$, $0.9f_1$, $0.95f_1$ 의 중심 주파수를 가지는 트랜스듀서들의 구조는 2장에서와 동일한 방법을 사용하여 도출하였다.

IV. 광대역 배열형 심벌 트랜스듀서 구조 설계

본 절에서는 비대역폭을 최대로 갖는 배열형 심벌 트랜스듀서의 구조를 설계하였다. 3장의 구조변수 변화에 따른 배열형 심벌 트랜스듀서의 음향특성 변화 분석 결과를 바탕으로 설계변수를 Tx_2 의 중심 주파수 f_2 와 중심간 간격으로 설정하였다. Tx_1 의 중심 주파수는 3장과 동일하게 f_1 로 고정하였다. 최적설계를 위한 설계변수 변화 범위는 경향성 분석에 사용하였던 것과 동일하게 Tx_2 의 주파수 범위는 $0.8f_1 \sim 1.0f_1$, CTC 간격의 범위는 $0.3\lambda \sim 0.36\lambda$ 로 설정하였다. 배열형 심벌 트랜스듀서의 구조 설계는 Fig. 8에 나타낸 것과 같은 순서로 진행하였다. 비대역폭 최대화를 목적 함수로 설정하였고, 이 때 제한 조건으로 배열 트랜스듀서의 최대 TVR은 기준 모델인 Tx_1 의 최대 TVR 이상이 되도록 하였으며, 이를 Eq. (1)에 나타내었다.

$$\begin{aligned} \text{Objective function : maximize the fractional bandwidth} \\ \text{Constraint : TVR} \geq 130.9 \text{ dB (TVR of } Tx_1). \end{aligned} \quad (1)$$

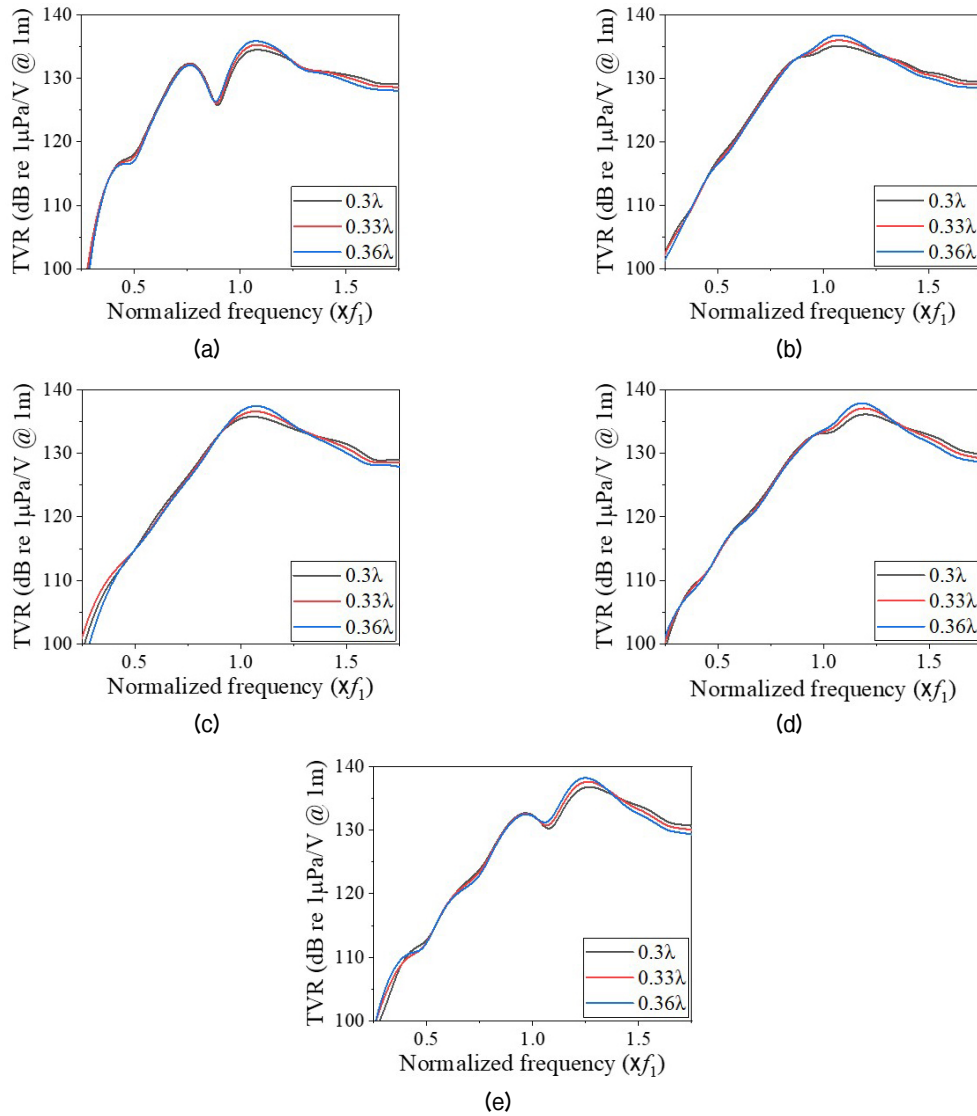


Fig. 7. (Color available online) Comparison of TVR spectra in relation to the center frequency difference and CTC spacing for the same polarity of Tx_1 and Tx_2 : (a) $f_2 = 0.8f_1$, (b) $f_2 = 0.85f_1$, (c) $f_2 = 0.9f_1$, (d) $f_2 = 0.95f_1$, (e) $f_2 = f_1$.

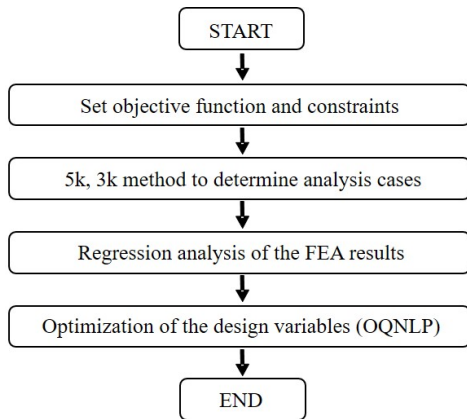
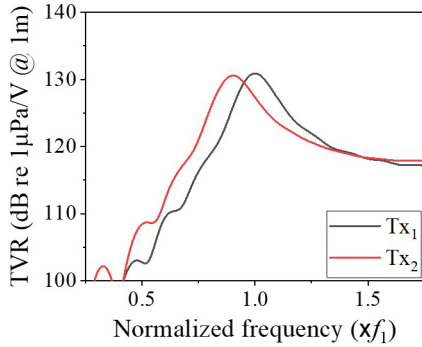


Fig. 8. Optimization flow chart.

최적설계를 위해 실험계획법 중 중심 주파수 차이는 5k 요인배치법, 중심간 간격은 3k 요인배치법을 이용하여 15개의 표본을 선정하고, 각 표본에 대해 설계변수들의 변화에 따른 중심 주파수와 최대 TVR 값, 대역폭, 비대역폭을 분석하였다.^[18,19] 그 후, 분석된 데이터에 대해 다중 회귀 분석을 수행하여 목적 함수와 제한 조건에 대한 회귀방정식을 도출하였다.^[20] 그리고, 도출된 회귀방정식에 대해 OptQuest Nonlinear Programs(OQNLP) 알고리즘을 적용하여 목적 함수와 제한 조건을 만족하는 배열형 심벌 트랜스듀서의 최적구조를 도출하였다.^[21] OQNLP 알고리

Table 4. Result of the optimal design.

	f_2	CTC spacing
Optimal structure	$0.92f_1$	0.3λ

Fig. 9. (Color available online) The TVR spectra of the two cymbal transducers Tx_1 and Tx_2 derived from the optimal design.

좁은 비선형적인 문제에서 최적점을 찾는 Multistart 휴리스틱 알고리즘이다.^[22] 해당 알고리즘을 사용한 이유는 하나의 시작점만 찾는 것이 아니라 많은 수의 시작점을 선정하여 많은 수의 최적점을 얻을 수 있고, 얻어진 최적점들을 비교하여 전역 최적점을 찾을 수 있기 때문이다.

초기 모델 Tx_1 과 Tx_2 로 구성되는 배열형 심벌 트랜스듀서의 중심 주파수는 $1.08f_1$, 최대 TVR 값은 137.4 dB, 대역폭은 $0.32f_1$, 비대역폭은 28.9%이다. 위에서 도출된 배열형 심벌 트랜스듀서의 최적구조는 Table 4에 나타내었다. 여기서 $0.92f_1$ 의 중심 주파수를 가지는 트랜스듀서의 구조는 2장의 방법과 동일한 방법을 사용하여 구하였다. 초기 배열 트랜스듀서 모델을 구성하는 Tx_1 과 Tx_2 소자 각각의 TVR 스펙트럼은 Fig. 9에 나타내었으며, 정량적인 음향특성 값을 Table 5에 나타내었다. 이후, Tx_1 과 Tx_2 를 Fig. 4와 같이 배열한 초기 배열 트랜스듀서의 TVR 스펙트럼을 Fig. 10에 보였다. 최적구조를 가지는 배열형 심벌 트랜스듀서의 중심 주파수는 $1.07f_1$, 최대 TVR 값은 135.0 dB, 대역폭은 $0.57f_1$, 비대역폭은 52%이다. 최적화된 배열형 심벌 트랜스듀서의 TVR 값은 135.0 dB로서 제한 조건을 만족하였으며, 비대역폭은 최적설계 전의 결과에 비해 1.8배 증가한 것으로 나타났다.

Fig. 10은 초기 배열 구조의 TVR 스펙트럼과 비교하여 최적화된 배열 구조의 TVR 스펙트럼을 나타낸

Table 5. Comparison of the acoustic characteristics of the initial and optimized cymbal transducer arrays.

Center frequency	f_1 (Tx_1)	$0.92f_1$ (Tx_2)
Maximum TVR (dB)	130.9	130.6
Bandwidth (kHz)	2.6	2.7
-3 dB Fractional bandwidth (%)	15.9	18.5

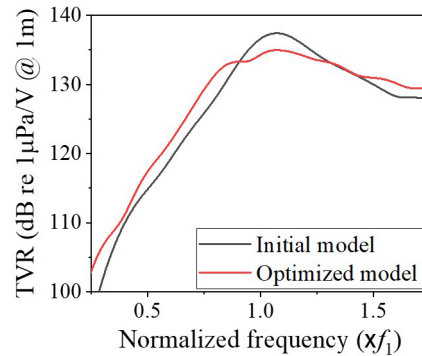


Fig. 10. (Color available online) Comparison of the TVR spectra of the initial and optimized cymbal transducer arrays.

Table 6. Comparison of the acoustic characteristics of the initial and optimized cymbal transducer arrays.

	Center frequency	Maximum TVR	Bandwidth	Fractional bandwidth
Initial model	$1.08f_1$	137.4 dB	5.0 kHz	28.9 %
Optimized model	$1.07f_1$	135.0 dB	9.2 kHz	52.0 %
Difference	$-0.01f_1$	-2.4 dB	+4.2 kHz	+23.1 %

것이며, 정량적인 음향특성 값들을 Table 6에 비교하였다. 동일한 트랜스듀서 개수를 사용했음에도 불구하고 Tx_2 의 주파수와 트랜스듀서 간격을 최적화함으로써 비대역폭을 획기적으로 증대시킬 수 있었다. 그러나 트랜스듀서들에 의해 공급되는 음향 파워는 일정한 상태에서 대역폭이 넓어지다 보니 최대 TVR이 불가피하게 낮아지는 것으로 나타났다. 그러나 설계된 최대 TVR인 135.0 dB는 Eq. (1)에서 인가한 제한조건 130.9 dB를 초과하므로, 설계결과는 이 조건을 만족시켰다. 결론적으로, 이상에서 설계된 광대역 심벌 트랜스듀서는 비록 TVR이 어느 정도 저하되기는 했지만 본 연구에서 의도했던 UWSN용 광대역 센서로서의 성능은 충분히 향상되었다고 할 수 있다.

V. 결 론

본 연구에서는 수중 센서 노드용 광대역 음향센서를 만들기 위해 FEM과 최적설계기법을 사용하여 심벌 트랜스듀서의 배열방법에 대한 연구를 수행하고, 광대역 배열 센서 구조를 설계하였다. 이를 달성하기 위해 구조변수가 배열형 심벌 트랜스듀서의 음향 특성(중심 주파수, 최대 TVR 값, 대역폭, 비대역폭)에 미치는 영향을 분석하였고, 분석된 결과를 바탕으로 배열형 심벌 트랜스듀서의 대역폭을 최대화시킬 수 있는 소자 간 중심 주파수 차이와 CTC 간격의 최적 값들을 도출하였다. 최적설계 결과로서, 최적 구조 배열센서의 비대역폭은 초기 모델에 비해 80% 증가하였다. 이 연구결과는 향후 UWSN에서 기존 수중 음향 트랜스듀서의 한계를 극복할 수 있는 초광대역 송신센서 개발에 활용될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었음(계약번호 UD170023DD).

References

1. J. Rice, "Seaweb acoustic communication and navigation networks," Proc. Int. Conf. Underwater Acoustic Measurements: Technologies & Results, **28**, 1-7 (2005).
2. I. F. Akyildiz, D. Pompili, and T. Melodia, "Underwater acoustic sensor networks: Research challenges," Ad Hoc Networks, **3**, 257-279 (2005).
3. J. H. Cui, J. Kong, M. Gerla, and S. Zhou, "The challenges of building scalable mobile underwater wireless sensor networks for aquatic applications," IEEE Netw., **20**, 12-18 (2006).
4. A. Feeney, F. Bejarano, and M. Lucas, "Dynamics characterisation of cymbal transducers for power ultrasonics applications," Phys. Procedia, **87**, 29-34 (2016).
5. A. Dogan, *Flexensional "Moonie and Cymbal" Actuators*, (Ph.D. thesis, University of Pennsylvania, 1994).
6. F. Bejarano, A. Feeney, and M. Lucas, "A cymbal transducer for power ultrasonics applications," Sens. Actuators, A: Phys., **210**, 182-189 (2014).
7. J. Zhang, W. J. Hughes, P. Bouchilloux, R. J. Meyer Jr., K. Uchino, and R. E. Newnham, "A class V flexensional transducer: The cymbal," Ultrasonics, **37**, 387-393 (1999).
8. R. E. Newnham, A. Dogan, D. C. Markley, J. F. Tressler, J. Zhang, E. Uzgur, R. J. Meyer Jr., A. C. Hladky-Hennion, and W. J. Hughes, "Size effects in capped ceramic underwater sound projectors," Ocean. Conf. Rec. **4**, 2315-2321 (2002).
9. J. Zhang, W. J. Hughes, R. J. Meyer Jr., K. Uchino, and R. E. Newnham, "Cymbal array: A broad band sound projector," Ultrasonics, **37**, 523-529 (2000).
10. J. F. Tressler, R. E. Newnham, and W. J. Hughes, "Capped ceramic underwater sound projector: The 'cymbal' transducer," J. Acoust. Soc. Am. **105**, 591-600 (1999).
11. R. E. Newnham, J. Zhang, and R. J. Meyer Jr., "Cymbal transducers: A review," IEEE Int. Symp. Appl. Ferroelectr. **1**, 29-32 (2000).
12. J. Zhang, A. C. Hladky-Hennion, W. J. Hughes, and R. E. Newnham, "Modeling and underwater characterization of cymbal transducers and arrays," IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. **48**, 560-568 (2001).
13. L. Denghua and Y. Xi, "Cymbal transducer array for hydrophone applications," Ferroelectrics, **263**, 131-136 (2001).
14. J. F. Tressler, T. R. Howarth, and W. L. Carney, "Thin, lightweight electroacoustic projector for low frequency underwater applications," J. Acoust. Soc. Am. **116**, 1536-1543 (2004).
15. J. L. Butler and C. H. Sherman, *Transducers and Arrays for Underwater Sound* (Springer, Switzerland, 2016), pp. 547, 552.
16. H. Shim and Y. Roh, "Design and fabrication of a wideband cymbal transducer for underwater sensor networks," Sensors, **19**, 4659 (2019).
17. O. B. Wilson, *Introduction to Theory and Design of Sonar Transducers* (Peninsula Publishing, Los Altos, CA, 1988), pp. 11-43.
18. H. W. Altland, "Regression analysis: Statistical modeling of a response variable," Technometrics, **41**, 367-368 (1999).
19. D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments* (John Wiley & Sons, New York, 2012), pp. 394-410.
20. H. Kim and Y. Roh, "Design and fabrication of a wideband Tonpitz transducer with a void head mass," Sens. Actuators, A: Phys., **239**, 137-143 (2016).
21. A. D. Belegudu and T. R. Chandrupatla, *Optimization Concepts and Applications in Engineering* (Cambridge University Press, New York, 2014), pp. 424-460.
22. Z. Ugray, L. Lasdon, J. Plummer, F. Glover, J. Kelly, and R. Marti, "Scatter search and local NLP solvers: A multistart framework for global optimization", INFORMS Journal on computing, **19**, 328-340 (2007).

저자 약력

▶ 김 동 현 (Donghyun Kim)



2012 3월 : 대구가톨릭대학교 의공학과
학사
2019 3월 ~ 현재 : 경북대학교 기계공학부
석사 과정

▶ 노 용 래 (Yongrae Roh)



1984년 2월 : 서울대학교 자원공학과(공
학사)
1986년 2월 : 서울대학교 자원공학과(공
학석사)
1990년 5월 : 미국 펜실베이니아주립대학교
(공학박사)
1990년 5월 ~ 1994년 2월 : 포항산업과학
연구원 선임연구원
1994년 3월 ~ 현재 : 경북대학교 기계공학
부 교수
<관심분야> 음향/초음파 트랜스듀서, 압
전 Device, 전자재료, 파동해석