

# 음원의 방향 추정을 위한 수중 음향 Tonpiliz 벡터 센서의 제작 및 특성 평가

## Fabrication and Characterization of an Underwater Acoustic Tonpiliz Vector Sensor for the Estimation of Sound Source Direction

임영섭, 노용래\*<sup>†</sup>

(Youngsub Lim and Yongrae Roh\*<sup>†</sup>)

경북대학교 센서 및 디스플레이공학과, \*경북대학교 기계공학과

(Received June 5, 2015; accepted August 21, 2015)

**초 록:** 통상의 수중 음향 트랜스듀서는 음압의 크기만 측정할 뿐, 외부에서 들어오는 음향 신호의 방향은 파악할 수 없는 한계가 있다. 이에 본 논문의 저자들은 Tonpiliz 트랜스듀서를 바탕으로 단일체로서 음압의 크기와 방향을 동시에 탐지해 낼 수 있는 새로운 벡터 센서구조를 제안하였다. 제안된 구조에는 압전세라믹 링이 4등분되어 있으며, 외부 음압에 대한 각 세라믹 조각의 출력전압을 적절히 조합하면 음원의 방향을 파악할 수 있는 특징을 가진다. 본 논문에서는 이러한 구조를 가지는 Tonpiliz 벡터센서를 제작하고 그 특성을 실험적으로 측정하여, 제안된 구조의 타당성을 확인하였다.

**핵심용어:** Tonpiliz, 벡터 센서, 수중음향, 트랜스듀서, 압전세라믹, 방위각

**ABSTRACT:** Typical underwater acoustic transducers detect only the magnitude of an acoustic pressure and they have the limitation of not being able to recognize the direction of the sound signal. Hence, the authors of this paper proposed a new vector sensor structure based on Tonpiliz transducers that could detect both the magnitude and the direction of a sound pressure. In the proposed structure, the piezoceramic ring was divided into four segments, and proper combination of the output voltages of the segments in response to the external sound pressure could provide the information on the orientation of the sound source. In this paper, a Tonpiliz transducer has been fabricated to have the proposed structure and its characteristics has been measured to confirm the validity of the proposed structure.

**Keywords:** Tonpiliz, Vector sensor, Underwater, Transducer, Piezoceramic, Azimuthal angle

**PACS numbers:** 43.30.Yj, 43.38.Fx

### 1. 서 론

널리 사용되는 수중 음향 트랜스듀서에는 구형, 링형, Flextensional, 그리고 Tonpiliz 트랜스듀서 등이 있다.<sup>[1]</sup> 이러한 통상의 수중 음향 트랜스듀서들은 단일 센서로 사용 시 스칼라 센서로서 외부에서 들어오는 음압의 크기만 측정할 뿐 음원의 방향은 파악

할 수 없는 한계가 있다. 음원의 방향을 탐지하기 위해서는 이러한 센서를 여러 개 배열해야만 하는데, 배열센서의 각 소자에 도달하는 음향 신호의 시간차를 이용하여 음원의 방향을 추정하거나<sup>[2]</sup> 또는 음향 신호의 입사각을 추정하는 빔 형성기법 등이 이용된다.<sup>[3]</sup> 하지만 이들 방법은 많은 수의 소자를 필요로 하므로 전체 센서 구조가 복잡하게 되고, 그에 따른 부피 및 중량이 증가되기 때문에 이를 운용하는데 무리가 따른다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 최근

<sup>†</sup>Corresponding author: Yongrae Roh (yryong@knu.ac.kr)  
School of Mechanical Engineering, Kyungpook National University,  
1370 Sankyuk-dong, Buk-gu, Daegu 41566, Republic of Korea  
(Tel: 82-53-950-6828, Fax: 82-53-943-8716)

에는 단일 센서를 이용하여 음원의 방향을 탐지할 수 있는 벡터 센서에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다. 이것은 하나의 패키지로 구성된 단일구조의 센서로 음압의 크기뿐만 아니라 음원의 방향도 동시에 측정할 수 있는 센서이다.<sup>[4]</sup> 음압의 크기만 측정하는 스킨센서에 비해서 음원의 방향도 동시에 분석할 수 있고, 기존의 배열센서에 비해서 구조가 간단하고 크기가 작다는 등의 많은 장점을 제공할 수 있다.<sup>[5,6]</sup>

단일 소자를 이용하여 벡터 센서로 응용한 연구로는 Gordon *et al.*<sup>[7]</sup>이 2조각 낸 링 센서를 이용하여 쌍극자 모드를 구현하는 방법을 연구한 이후, Butler *et al.*<sup>[8,9]</sup>이 링 세라믹을 8조각 낸 다음 이들을 적절히 조합하여 다중 모드를 구현하는 방법을 제안하고 이것을 이용하여 외부 음원의 방향을 찾는 연구를 수행한 바 있다. 유사한 원리에 의해 구형 벡터 센서를 구현하는 연구로는 Ehrlich,<sup>[10]</sup> Ko *et al.*,<sup>[11]</sup> Ko와 Pond,<sup>[12]</sup> Butler와 Ehrlich<sup>[13]</sup> 등의 연구 사례가 있다. Flexensional 음향 트랜스듀서를 이용하여 음원의 방향을 찾는 연구로는 Zhang *et al.*,<sup>[14]</sup> Newnham *et al.*<sup>[15]</sup> 등이 원반 형태의 압전 소자 두 개를 조합한 다음, 두 개의 압전 소자에 동위상의 전압을 인가하여 무지향 모드를 만들고, 역 위상의 전압을 인가하여 쌍극자 모드를 구현한 바 있다.

그러나 Tonpizl 트랜스듀서를 이용해 벡터 센서로 구현한 연구 사례는 본 저자의 경우밖에 없는 상태이다.<sup>[16]</sup> Tonpizl 트랜스듀서는 가장 널리 사용되는 수중 음향 트랜스듀서 종류이므로, 이를 이용하여 벡터 센서로 구현할 수 있다면 기존의 Tonpizl 트랜스듀서 재료 및 제작 기법을 그대로 이용할 수 있기 때문에 높은 활용도를 가질 수 있을 것이다. 기 발표된 본 저자들의 연구 결과에서는 새로운 Tonpizl 벡터 센서의 개념을 제시하고, 센서의 특성을 수치해석을 통해 분석하였다. 본 연구에서는 이렇게 제안된 구조를 가지는 Tonpizl 벡터 센서의 시편을 제작하고 그 특성을 측정하여, 제안된 구조의 타당성을 실험적으로 검증하였다.

## II. Tonpizl 벡터 센서의 구조 및 제작

Tonpizl 트랜스듀서는 수중에서 가장 널리 사용되

는 음향 트랜스듀서이다. 일반적인 Tonpizl 트랜스듀서 내부에 장착된 압전세라믹은 단면상의 분극방향이 일정한 링 형태를 가진다. 따라서 단일 센서로 사용될 때 외부에서 들어오는 음압의 크기만 측정할 뿐 음원의 방향은 파악할 수 없는 한계가 있다. 하지만 본 연구에서 제안한 Tonpizl 벡터 센서는 Reference [16]에서 설명한 것처럼 외부에서 들어오는 음압의 크기 뿐 아니라 음원의 방향을 추정하기 위해 압전세라믹 링이 *a, b, c, d*의 4등분으로 나누어져 있다. Fig. 1은 Tonpizl 벡터 센서의 압전세라믹 링 구조도이다. 제안된 구조에서 모든 세라믹 조각들의 출력 전압을 합하면 통상의 Tonpizl 트랜스듀서처럼 음압의 크기를 측정할 수 있고, 임의의 방향에서 음압이 인가되었을 때 4등분 된 세라믹 조각들 출력 전압의 첫 번째 피크의 부호와 정규화된 크기 그리고 세라믹 조각들 출력 전압의 적절한 조합으로 음원의 방향을 찾을 수 있음을 선행 연구를 통해 확인하였다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 Tonpizl 벡터 센서의 음원의 방향 추정 성능을 검증하기 위하여 시제품을 제작하였다. 제작과정은 먼저 Tonpizl 벡터 센서 내부에 장착될 압전세라믹 링의 전극 부분만 dicing하여 링 세라믹이 4등분된 구조와 같은 형태를 가지도록 하였다. 그리고 dicing된 링 세라믹 6개를 분극 방향이 동일하게 쌓은 다음 전면추와 후면추 사이에 삽입하여 볼트로 체결하였다. 외부 신호에 대한 출력 전압을 얻기 위하여 4 조각낸 압전세라믹에 4쌍의 전선을 연결하였다. 제작에 사용된 물성은 Table 1과 같다. Fig. 2는 시제작된 Tonpizl 벡터 센서의 사진이고, 이것의 공기 중 임피던스 스펙트럼 측정 결과

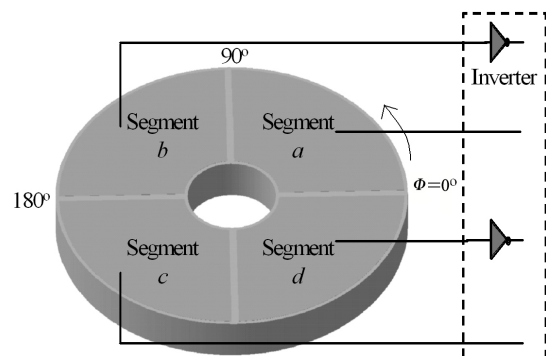


Fig. 1. Structure of the piezoceramic ring in the Tonpizl vector sensor.

Table 1. Properties of the materials composing the Tonpiliz vector sensor.

	Young's modulus [GPa]	Poisson's ratio	Density [kg/m <sup>3</sup> ]
Head mass	68.9	0.33	2,700
Tail mass	104.0	0.28	8,800
Piezoceramic	PZT-5H		

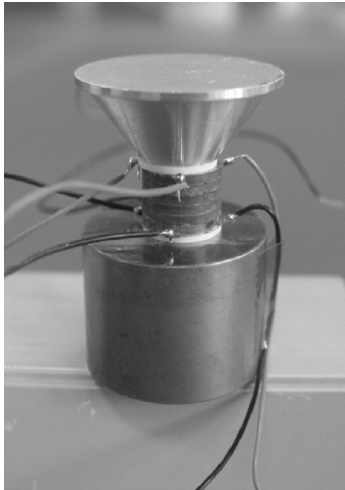


Fig. 2. Prototype of the Tonpiliz vector sensor.

를 Fig. 3에 나타냈다. 4개의 세라믹 조각들의 임피던스 스펙트럼이 서로 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 이것으로 링 압전세라믹이 4 부분으로 균일하게 나누어진 것을 확인할 수 있다.

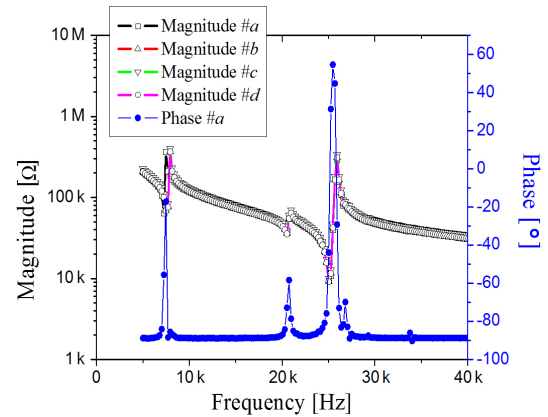


Fig. 3. Impedance spectrum of the Tonpiliz vector sensor prototype (in air).

### III. Tonpiliz 벡터 센서의 측정 및 성능 검증

#### 3.1 음원의 방위각 측정

Fig. 4는 시제작된 Tonpiliz 벡터 센서를 이용하여 음원의 방위각(azimuthal angle)을 추정하기 위한 실험 개략도이다. 외부에서 들어오는 음원의 방향에 따른 세라믹의 출력 전압을 얻기 위하여 대형 수조에 구형 프로젝터와 Tonpiliz 벡터 센서를 그림과 같이 설치했다. 고각(altitudinal angle)이 40°일 때의 방위각을 찾기 위하여, 구형 프로젝터와 센서간의 거리를 0.77 m, 높이 차가 0.65 m가 되도록 설치하였다. 그리고 Tonpiliz 벡터 센서의 전면추를 아래로 향하게

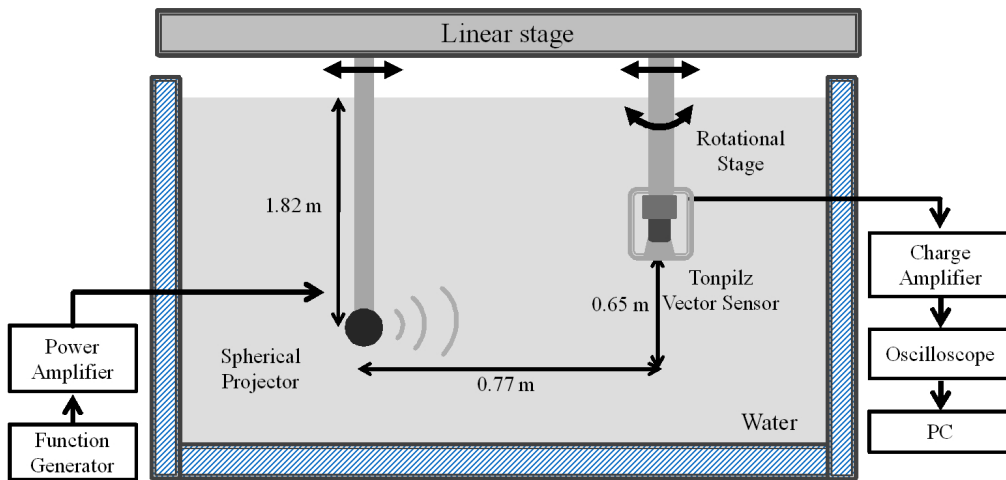


Fig. 4. Schematic diagram to measure the azimuthal angle of the incident wave with the Tonpiliz vector sensor prototype.

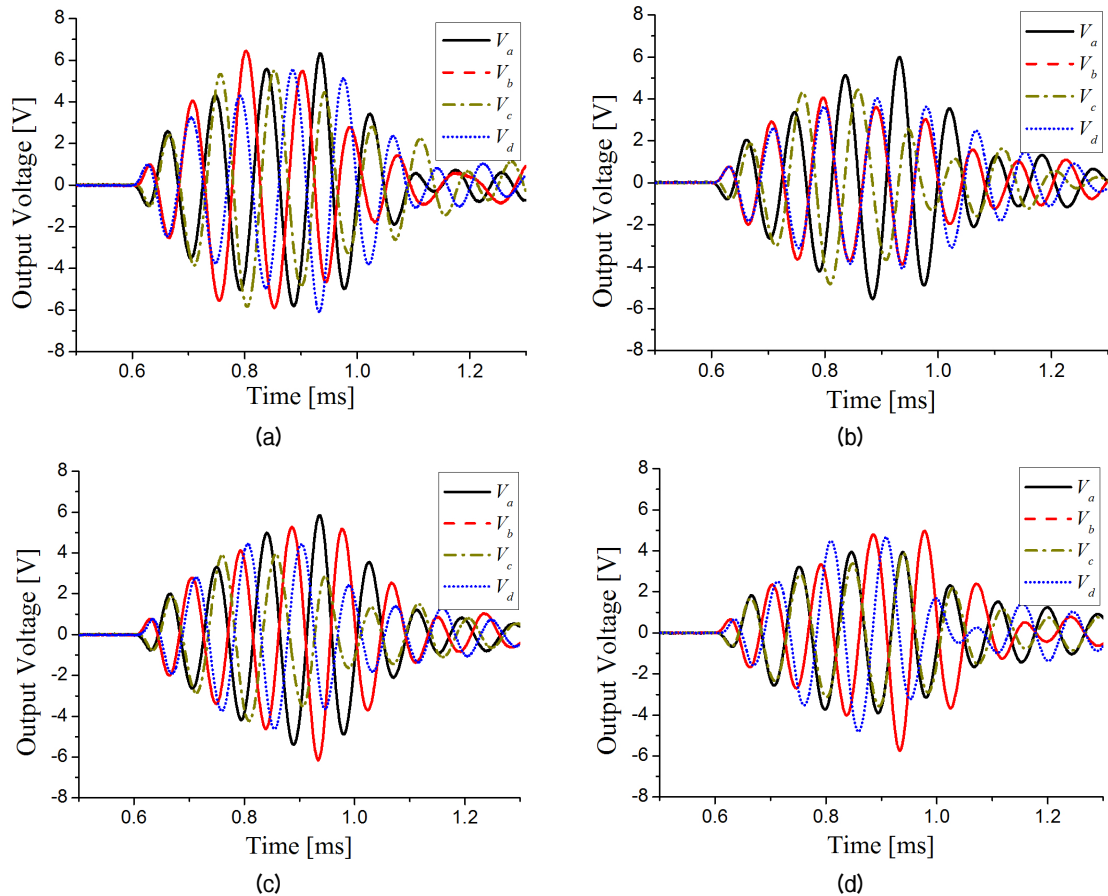


Fig. 5. Measured output voltages of the ceramic pieces  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  according to the incident azimuthal angle of the sound wave: (a)  $0^\circ$ , (b)  $45^\circ$ , (c)  $90^\circ$ , (d)  $135^\circ$ .

한 다음, 센서가 제자리에서 회전하도록 하였다. 외부 음원은 신호 발생기에서 발생한 신호를 파워 앰프를 사용해 증폭시켜 구형 프로젝터에 인가하여 발생시켰다. 발생한 음향 신호는 맞은편 Tonpilz 벡터 센서에 도달하고, 이 때 센서에 발생된 출력전압은 전하 증폭기와 오실로스코프를 거친 후 PC에 저장 되도록 하였다.

측정된 방위각에 따른 출력전압은 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5(a)는 음원의 입사 방위각이  $0^\circ$ 인 경우의 출력전압이다. 이 경우 세라믹 조각  $a$ 와  $d$ 의 출력전압인  $V_a$ 와  $V_d$ 의 첫 번째 피크 값이 크기는 같은데 부호가 서로 반대인 전압 값을 보이고, 세라믹 조각  $b$ 와  $c$ 의 출력전압인  $V_b$ 와  $V_c$ 의 첫 번째 피크 값 또한 같은 크기이며 서로 반대 부호를 가진 값을 보인다. Fig. 5(b)는 음원의 입사 방위각이  $45^\circ$ 인 경우 출력전압이다.  $V_a$ 의 첫 번째 피크 값이 (-)부호로 먼저 나타나고

그 뒤를  $V_b$ 와  $V_d$ 의 첫 번째 피크 값이 같은 시간에 같은 크기의 (+)부호로 나타났다. 그리고  $V_c$ 의 첫 번째 피크 값이 (-)부호로 그 다음 나타났다. Fig. 5(c)는 음원의 입사 방위각이  $90^\circ$ 인 경우이다.  $V_a$ 와  $V_b$ 의 첫 번째 피크 값이 같은 크기이며 부호가 서로 반대인 전압 값을 보이고,  $V_c$ 와  $V_d$ 의 첫 번째 피크 값이 같은 크기이며 서로 반대 부호를 가진 값을 보인다. Fig. 5(d)는 음원의 입사 방위각이  $135^\circ$ 인 경우이다.  $V_b$ 의 첫 번째 피크 값이 (+)부호로 먼저 나타나고 그 뒤를  $V_a$ 와  $V_c$ 의 첫 번째 피크 값이 같은 시간에 같은 크기의 (-)부호로 나타났다. 그리고  $V_d$ 의 첫 번째 피크 값이 (+)부호로 그 다음 나타났다. 이 같은 방법으로 음원의 입사 방위각에 따른 각 세라믹 조각 출력 전압들의 첫 번째 피크 값을 통해 나머지 방위각 구분도 가능하다.

Fig. 6은 음원의 방위각을 좀 더 쉽게 추정하기 위

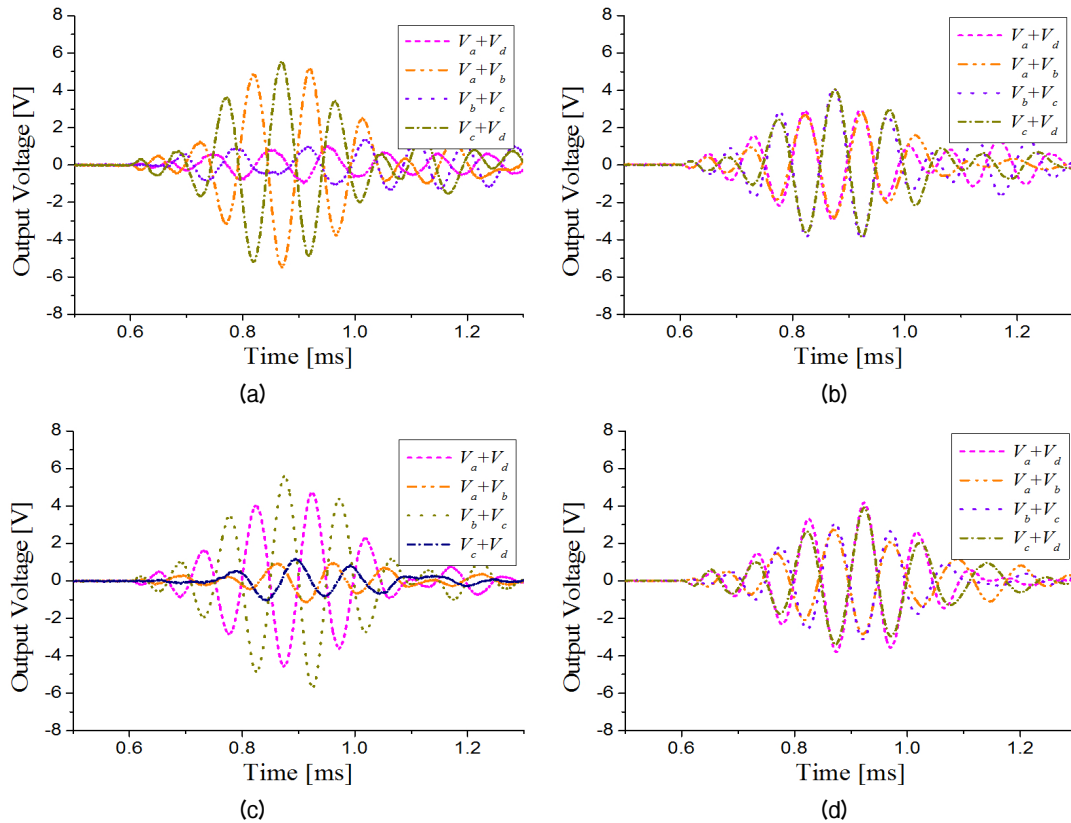


Fig. 6. Measured output voltages of the ceramic pieces  $a+d$ ,  $a+b$ ,  $b+c$ ,  $c+d$  according to the incident azimuthal angle of the sound wave: (a)  $0^\circ$ , (b)  $45^\circ$ , (c)  $90^\circ$ , (d)  $135^\circ$ .

하여 측정된 세라믹 조각들의 출력전압  $V_a$ ,  $V_b$ ,  $V_c$ ,  $V_d$  들을  $V_a+V_d$ ,  $V_a+V_b$ ,  $V_b+V_c$  그리고  $V_c+V_d$ 의 조합으로 나타낸 결과이다. Fig. 6(a)는 음원의 입사 방위각이  $0^\circ$  인 경우이다. 이 경우 세라믹 조각의 출력전압  $V_a+V_b$  를 계산한 결과 첫 번째 피크가 (-)값을 가지고,  $V_c+V_d$  의 첫 번째 피크는 (+)값을 가진다. 이때  $V_a+V_d$ 와  $V_b+V_c$ 의 첫 번째 피크 값은 0이 된다. 그 이유는 서로 반대 부호를 가지는 세라믹 조각  $a$ 와  $d$  그리고  $b$ 와  $c$  에 각각 동시에 음압이 도달하기 때문에  $V_a+V_d$ ,  $V_b+V_c$  의 조합으로 서로 상쇄되기 때문이다. Fig. 6(b)는 음원의 입사 방위각이  $45^\circ$ 인 경우이다. 이 경우  $V_a+V_d$ 와  $V_a+V_b$ 의 첫 번째 피크는 (-)값을 가지고,  $V_b+V_c$ 와  $V_c+V_d$ 의 첫 번째 피크는 (+)값을 가진다. 이 같은 방법으로 음원의 입사 방위각에 따른 각 세라믹 조각 출력 전압들의 조합을 통해 나머지 방위각 구분도 가능하다.

이상 Fig. 6의 결과들을 종합해보면 Fig. 7과 같은 경향을 얻을 수 있다. Fig. 7은 선행연구<sup>[16]</sup>에서 나타

낸 음원의 입사 방위각에 따른  $V_a+V_d$ ,  $V_a+V_b$ ,  $V_b+V_c$ ,  $V_c+V_d$ 의 첫 번째 피크 값 변화의 유한요소 해석 결과와 이번 실험에서의 측정 결과를 서로 비교하여 나타낸 것이다. 전체적으로 매우 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. Table 2는 음원의 방위각을 추정하기 위하여  $V_a+V_b$ 와  $V_b+V_c$ 의 측정값들을 선행연구에서 나타낸 식에 각각 대입하여 나타낸 결과<sup>[16]</sup>이다. 전체적으로 상당히 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서 제안한 Tonpiliz 벡터 센서 구조는 시제품의 제작과 실험을 통하여 해석 결과와 실험 결과가 잘 일치함이 검증되었다. 더불어 음원의 방위각을 탐지할 수 있는 벡터 센서로 활용될 수 있음을 확인하였다.

### 3.2 음원의 고각 측정

본 연구에서는 시제작된 Tonpiliz 벡터 센서를 이용하여 음원의 고각을 추정하기 위한 실험을 하였다. 외부에서 들어오는 음원의 고각에 따른 세라믹 출력 전압을 얻기 위하여 Fig. 4에 나타난 실험과정을 반

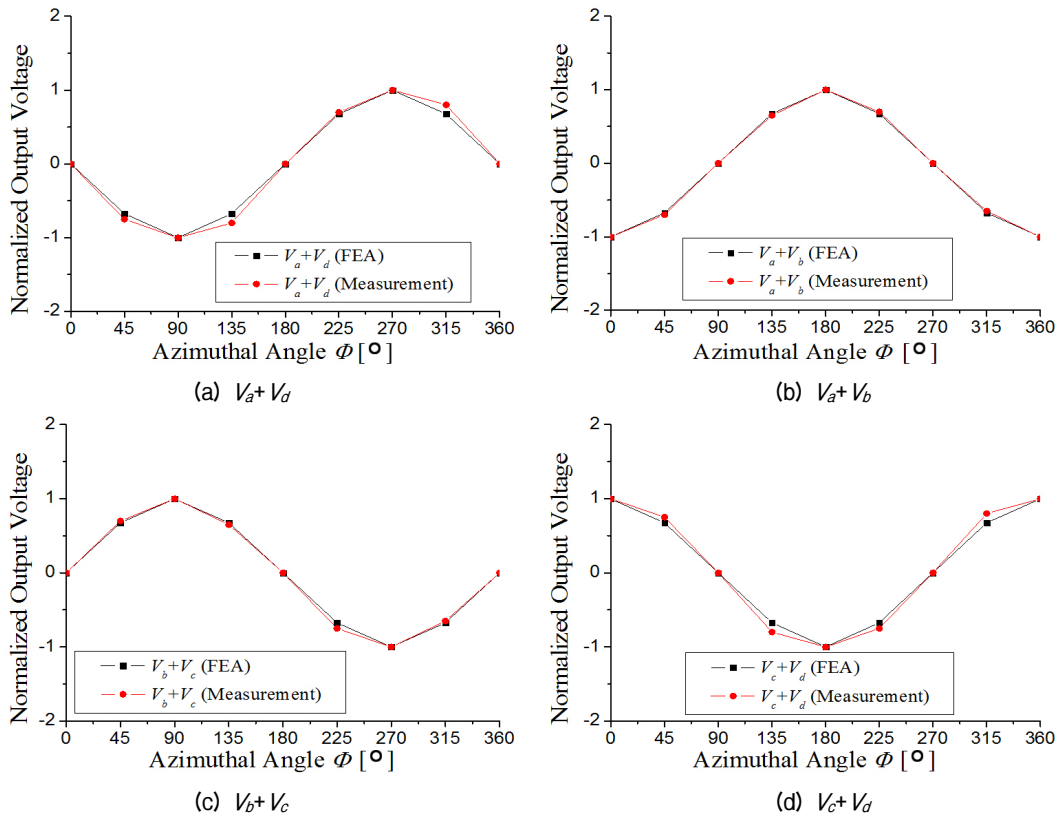


Fig. 7. Comparison of calculated and measured first peak values of the  $V_a+V_d$ ,  $V_a+V_b$ ,  $V_b+V_c$ ,  $V_c+V_d$  according to the incident azimuthal angle of the sound wave.

복하였다. 단, 고각 측정은 방위각을 찾는 방법과 다르게 구형 프로젝터와 Tonpilz 벡터 센서를 같은 높이로 물속에 담근 다음 Tonpilz 벡터 센서의 전면추를 구형 프로젝터로 향하게 하였다. 그리고 둘 사이의 거리를 0.7 m 떨어뜨려 놓은 다음 센서가 제자리에서 회전하도록 하였다. 전면추가 구형 프로젝터를 바라보는 각도를 90°로 정하고 Tonpilz 벡터 센서를 30°에서 90°까지 20° 간격으로 회전시키면서 측정하였고, 그 결과를 Fig. 8에 나타냈다. Fig. 8에 나타낸 고각에 따른 세라믹 조각의 출력전압을 보면, 고각이 30°에서 70°로 갈수록  $V_a$ 와  $V_b$ 의 피크 값 간의 시간차가 점점 좁아지는 것을 알 수 있다. 그리고 고각 90°인 경우 구형 프로젝터를 정면으로 바라보고 있기 때문에 출력전압들 간의 시간차가 없는 것으로 나타났다. Fig. 8에 나타난  $V_a$ 와  $V_b$ 의 피크 값 간의 시간차 ( $x$ )와 고각( $\theta$ ) 사이의 관계 데이터를  $x$ 의 2차함수로 적합화하면 Eq.(1)과 같다.  $V_a$ 와  $V_b$ 의 피크 값 간의 시간차가 없는 경우  $x$ 의 값이 0이 되면서 고각 90°를 나

타내도록 하였다. Eq.(1)을 이용하면, 센서에 의해 측정되는  $V_a$ 와  $V_b$ 의 피크 값 간의 시간차만 알면 그에 해당하는 고각을 매우 쉽게 구할 수 있다. 단 Eq. (1)은 고각이 30°에서 90° 사이에일 때만 유효하다고 할 수 있다. Eq.(1)의 적용방법의 예시로서,  $V_a$ 와  $V_b$ 의 첫 번째 피크 값 간의 시간차 값을 Eq.(1)에 대입하여 각 경우에 해당하는 고각을 추정된 결과를 Table 3에 나타내었다. Eq.(1)에 의해 계산된 고각이 주어진 각도와 최대 3°의 오차를 가지면서 전체적으로 잘 일치함을 알 수 있다. 이것으로 본 연구에서 제안한 Tonpilz 벡터 센서 구조는 음원의 고각을 탐지할 수 있는 벡터 센서로 활용될 수 있음을 확인하였다.

$$\theta = -(9.79 \times 10^{12})x^2 - (4.31 \times 10^7)x + 90. \quad (1)$$

### 3.3 Tonpilz 벡터 센서를 이용한 음원의 방향 추정 성능 검증

제안한 Tonpilz 벡터 센서를 이용하여 음원의 방향

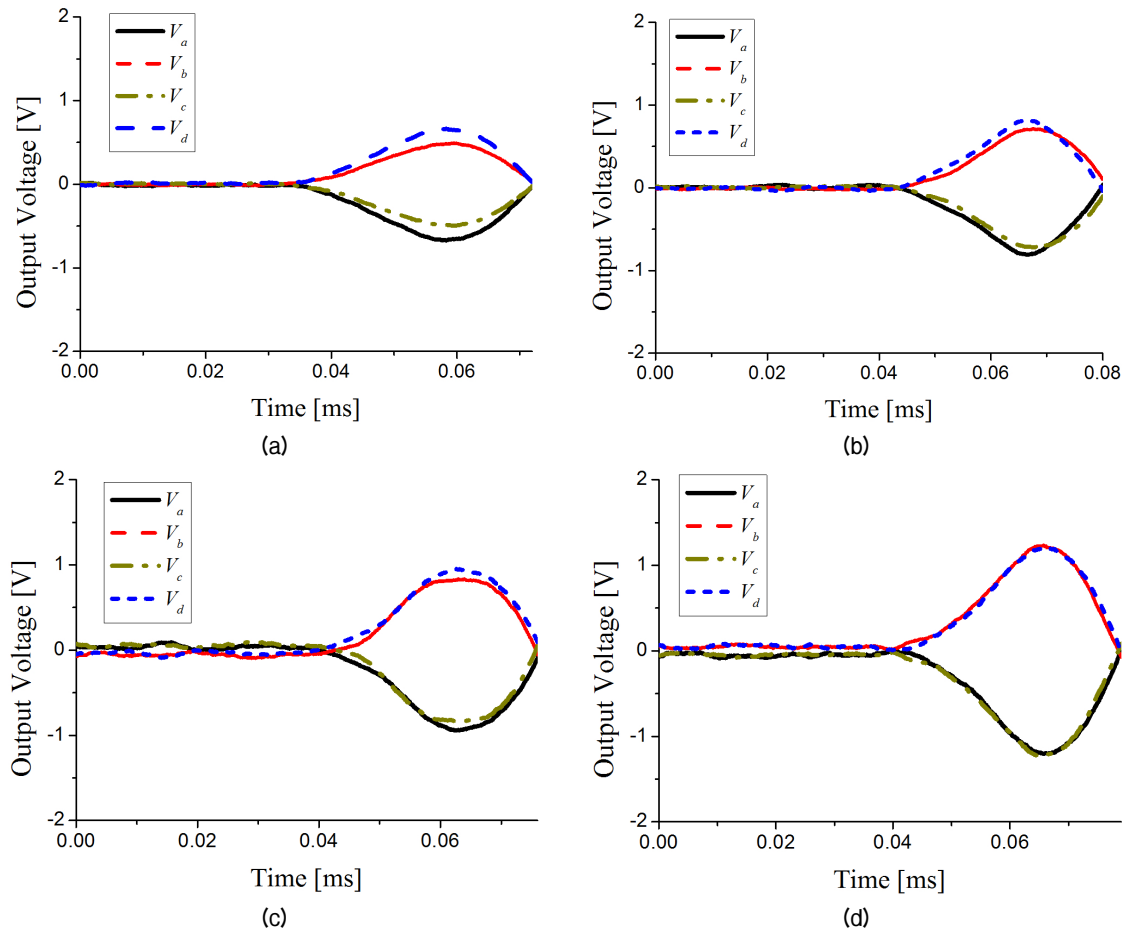


Fig. 8. Measured output voltages of the ceramic pieces *a*, *b*, *c*, *d* according to the incident altitudinal angle of the sound wave: (a) 30°, (b) 50°, (c) 70°, (d) 90°.

Table 4. Estimation of the incident direction of the acoustic signal by the Tonpilz vector sensor.

Incident sound wave direction		Measured sound wave direction		$V_a+V_b+V_c+V_d$ [V]
Altitudinal angle [°]	Azimuthal angle [°]	Estimation of the altitudinal angle [°]	Estimation of the azimuthal angle [°]	
40	10	41	11	17
	30		31	
	45		46	
45	10	46	11	20
	30		30	
	45		44	

추정 성능을 검증하기 위하여 임의의 방향에서 입사되는 음원의 방위각을 추정하고, 나아가 추정된 방위각에서의 고각을 찾으려 하였다. 아울러 세라믹에서 출력된 전압 값을 이용하여 Tonpilz 벡터 센서에 도달한 음압의 크기를 같이 찾으려 하였다. 먼저 임의의 방향에서 Tonpilz 벡터 센서를 향하여 음압을

가한 후 각 세라믹 조각에서 나타나는 출력전압  $V_a$ ,  $V_b$ ,  $V_c$ ,  $V_d$ 를 측정하였다. 그리고 측정된 전압을  $V_a+V_b$ ,  $V_a+V_c$ ,  $V_b+V_c$  그리고  $V_c+V_d$ 의 조합으로 나타낸 다음 각 조합의 첫 번째 피크 값 부호를 관찰함으로써 음원의 방위각이 어느 사분면에 속하는지를 추정하였다. 그 다음 결정된 사분면 내에서 구체적인 방

위각을 선행연구<sup>[16]</sup>에서 제안한 수식을 이용하여 찾을 수 있었다. 수식 중 어느 것을 사용하더라도 결과에는 차이가 없으므로 사용하기 편리한 식을 선택하면 된다. 여기서, 관찰된 전압들을 정규화 시키기 위한 각 전압 신호의 첫 번째 피크 크기는 벡터 센서의 스칼라 반응 값을 사전에 안다면 스칼라 반응 값과 Fig. 7의 그래프간의 비례관계에 의해 사전에 구할 수 있다. 이렇게 음원의 방위각을 추정하고 나면 음원의 고각은  $V_a$ 와  $V_b$ 의 첫 번째 피크 값 간의 시간차를 이용하여 찾을 수 있었다. 아울러 벡터 센서에 도달한 음압의 크기는  $V_a+V_b+V_c+V_d$ 의 조합으로 간단히 알 수 있었다. 인가한 음원의 방향과 측정을 통하여 추정된 음원의 방향을 Table 4에 서로 비교하여 나타내었다. 추정된 음원의 방향이 인가한 음원의 방향과 전체적으로 잘 일치함을 알 수 있다.

이상의 결과들을 종합해보면, 본 연구에서 제안한 Tonpizl 벡터 센서는 음원의 크기와 방향을 동시에 탐지할 수 있음이 확인되었다고 할 수 있다.

#### IV. 결 론

본 논문의 저자들은 Tonpizl 트랜스듀서를 바탕으로 단일체로서 음압의 크기와 방향을 동시에 탐지해 낼 수 있는 새로운 벡터 센서구조를 제안한 바 있는데, 본 연구에서는 그 구조의 타당성을 Tonpizl 벡터 센서 시제품의 제작과 측정을 통하여 검증하고자 하였다. 측정 결과 본 연구에서 제안한 Tonpizl 트랜스듀서 구조는 음원의 크기와 방향을 동시에 탐지할 수 있는 벡터 센서로 사용될 수 있음을 확인하였다. 본 논문에서 개발한 Tonpizl 벡터 센서는 기존의 벡터 센서에서 볼 수 없었던 새로운 형태의 벡터 센서이다.

#### 감사의 글

본 연구는 방위사업청, 국방과학연구소의 지원(계약번호 UD130007DD)과 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2013R1A2A2A01015248).

#### References

1. O. B. Wilson, *Introduction to Theory and Design of Sonar Transducers* (Peninsula Publishing Co., Los Altos, 1988).
2. X. Yaosong, W. Dandan, and F. Hua, "Underwater acoustic source localization method based on TDOA with particle filtering," in Proc. IEEE 26th CCDC, 4634-4637 (2014).
3. N. Zou and A. Nehorai, "Circular acoustic vector-sensor array for mode beamforming," IEEE Trans. Sig. Processing **57**, 3041-3052 (2009).
4. C. H. Sherman and J. L. Butler, *Transducers and Arrays for Underwater Sound* (Springer, New York, 2007).
5. M. Hawkes and A. Nehorai, "Wideband source localization using a distributed acoustic vector-sensor array," IEEE Trans. Sig. Processing **51**, 1479-1491 (2003).
6. G. L. D'Spain, J. C. Luby, G. R. Wilson, and R. A. Gramann, "Vector sensors and vector sensor line arrays: comments on optimal array gain and detection," J. Acoust. Soc. Am. **120**, 171-185 (2006).
7. R. S. Gordon, L. Parad, and J. L. Butler, "Equivalent circuit of a ceramic ring transducer operated in the dipole mode," J. Acoust. Soc. Am. **58**, 1311-1314 (1975).
8. A. L. Butler, J. L. Butler, W. L. Dalton, and J. A. Rice, "Multimode directional telesonar Transducer," in Proc. IEEE OCEANS MTS Conf., 1289-1292 (2000).
9. J. L. Butler, A. L. Butler, and S. C. Butler, "The modal projector," J. Acoust. Soc. Am. **129**, 1881-1889 (2011).
10. S. L. Ehrlich, U. S. Patent No. 3, 732, 535 *Spherical Acoustic Transducer*, 1973.
11. S. H. Ko, G. A. Brigham, and J. L. Butler, "Multimode spherical hydrophone," J. Acoust. Soc. Am. **56**, 1890-1898 (1974).
12. S. H. Ko and H. L. Pond, "Improved design of spherical multimode hydrophone," J. Acoust. Soc. Am. **64**, 1270-1277 (1978).
13. J. L. Butler and S. L. Ehrlich, "Superdirective spherical radiator," J. Acoust. Soc. Am. **61**, 1427-1431 (1977).
14. J. Zhang, A. C. Hladky-Hennion, W. J. Hughes, and R. E. Newnham, "A miniature class V flexensional cymbal transducer with directional beam patterns: the double-driver," Ultrasonics **39**, 91-95 (2001).
15. R. E. Newnham, D. C. Markley, R. J. Meyer Jr., W. J. Hughes, A. C. Hladky-Hennion, and J. K. Cochran Jr., "Multimode underwater transducers," J. Am. Ceram. Soc. Bulletin **83**, 25-28 (2004).
16. Y. Lim and Y. Roh, "Incidence angle estimation by the Tonpizl type underwater acoustic vector sensor with a quadrupole structure" (in Korean), J. Acoust. Soc. Kr. **31**, 569-579 (2012).



## 저자 약력

### ▶ 임 영 섭 (Youngsub Lim)



2007년 2월: 대구대학교 정보통신공학부  
공학사  
2009년 2월: 경북대학교 센서 및 디스플레이  
공학과 공학석사  
2015년 2월: 경북대학교 센서 및 디스플레이  
공학과 공학박사  
2015년 3월~ 현재: LIG넥스원(주) Maritime 1  
연구센터 선임연구원  
<관심분야> 수중 음향, 초음파 및 탄성파

### ▶ 노 용 래 (Yongrae Roh)



1984년 2월: 서울대학교 자원공학과  
공학사  
1986년 2월: 서울대학교 자원공학과  
공학석사  
1990년 5월: 미국 펜실베이니아주립대학교  
공학박사  
1990년 5월 ~ 1994년 2월: 포항산업과학  
연구원 선임연구원  
1994년 3월 ~ 현재: 경북대학교 기계공학부  
교수  
<관심분야> 음향/초음파 트랜스듀서, 압  
전 Device, 전자재료, 파동해석