

# Quadrupole 구조를 가진 Tonpiliz형 수중 음향 벡터 센서를 이용한 입사각 추정

## Incidence Angle Estimation by the Tonpiliz Type Underwater Acoustic Vector Sensor with a Quadrupole Structure

임영섭, 노용래\*<sup>†</sup>

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

경북대학교 센서 및 디스플레이공학과, 경북대학교 기계공학과\*  
(접수일자: 2012년 8월 6일; 수정일자: 2012년 9월 20일; 채택일자: 2012년 10월 16일)

**초 록:** 압전 세라믹을 이용한 전형적인 Tonpiliz형 수중 음향센서는 외부에서 들어오는 음향 신호를 이에 상응하는 전압으로 변환해 스칼라 양인 음압의 크기만 측정할 뿐 외부에서 들어오는 신호의 방향은 파악할 수 없는 한계가 있다. 이와 같은 문제점을 해결하고자 본 논문에서는 Tonpiliz형 트랜스듀서를 이용해 단일 센서만으로도 음압의 크기와 방위각 방향을 동시에 분석해 낼 수 있는 새로운 벡터 센서 구조를 제안하고, 제안된 구조의 타당성을 수식 및 유한요소 해석을 통해 검증하였다.

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

**투고분야:** 측정 및 센서 분야(14), 음향재료 분야(16)

**ABSTRACT:** Typical Tonpiliz type underwater acoustic transducers making use of piezoelectric ceramics detect the magnitude of an acoustic pressure, a scalar quantity, and convert this pressure into a proportional output voltage. The scalar sensor has no directional sensitivity. In this paper, we have proposed a new vector sensor based on the Tonpiliz transducer structure, which is sensitive to both the magnitude and the azimuthal direction of an acoustic wave. Validity of this new design has been confirmed with analytic equations and finite element analyses.

**Key words:** Tonpiliz, Vector sensor, Underwater acoustics, Transducer

**ASK subject classification:** Acoustical Measurements and Sensors (14), Acoustic Materials (16)

### 1. 서 론

수중에서 음파를 이용하여 표적을 탐지 및 위치 추정을 하기 위한 방법으로 압전 세라믹을 이용한 트랜스듀서를 많이 사용한다. 수중 음향 트랜스듀서로 가장 널리 사용되는 종류로 Tonpiliz 트랜스듀서를 들 수 있는데, 전형적인 Tonpiliz 트랜스듀서는 단일 센서로 사용될 때 외부에서 들어오는 음압의 크기만 측정할 뿐 음원의 방향은 파악할 수 없는 한계가 있다.<sup>[1]</sup> 일반적으로 음원의 방향을 파악하기 위해서는 다수의 스칼라 트랜스듀서를 사용한 배열형 센서를

이용하는데, Schau<sup>[2]</sup>와 Rendas<sup>[3]</sup> 등이 제안한 두 개 이상의 하이드로폰을 이용하여 배열센서에 도달하는 음향 신호의 시간 지연차를 이용해 음원의 방위각 (azimuth), 고각(altitude), 거리를 추정하는 방법 또는 Baggeroer<sup>[4]</sup>와 Zou<sup>[5]</sup> 등이 제안한 외부에서 들어오는 음향 신호의 입사각을 추정하는 빔 형성 기법에 대한 연구가 대표적이다. 하지만 이들 방법은 많은 수의 센서를 필요로 하므로 센서 구조뿐만 아니라 이를 운용하는 시스템 또한 복잡해지고 계산량이 증가하는 어려움이 있다. 이와 같은 문제점을 해결할 수 있는 방안으로 벡터 센서를 들 수 있는데, 벡터 센서란 하나의 패키지로 구성된 구조로 음압의 크기 뿐 아니라 음원의 방향도 동시에 측정할 수 있는 센서

<sup>†</sup>Corresponding author: Yongrae Roh (yryong@knu.ac.kr)  
School of Mechanical Engineering, Kyungpook National University, 1370 Sankyukdong, Bukgu, Daegu 702-701, Republic of Korea  
(Tel: 82-53-950-6828; Fax: 82-53-943-8716)

이다. 음압의 크기만 측정하는 스칼라 센서에 비해서 음원의 방향을 동시에 분석할 수 있는 장점이 있고, 종래의 배열형 센서에 비해서 센서 구조가 간단하고 크기가 작다는 등의 많은 장점을 제공할 수 있다.<sup>[6]</sup>

벡터 센서는 작동 원리에 따라 다양한 구조를 가질 수 있는데, 현재까지의 연구 경향은 기존의 음향 센서 몇 개를 여러 가지 패턴으로 연결하여 음향 신호의 방향을 측정하고자 한 것이 주류이다. 초기 연구 사례로는 Leslie<sup>[7]</sup>, Scheiber<sup>[8]</sup>와 Mongiovi<sup>[9]</sup> 등이 압전 가속도 센서 여러 개를 이용하여 개발한 압력경도형 벡터 센서가 있고, 이후 이루어진 연구들 중 dipole 하이드로폰을 이용한 Butler의 연구<sup>[10]</sup>, 여러 개의 sound intensity meter를 결합한 Hickling의 연구<sup>[11]</sup>, Moffett 등이 원반 형태의 압전소자 두개를 알루미늄 판 양쪽에 부착시킨 형태의 가속도 센서를 부표에 연결해 음원의 방향을 측정한 것과<sup>[12]</sup>, Wlodkowski 등이 원반 형태의 단결정 압전소자 PMN-PT를 이용한 벡터 센서에 대해 연구한 것 등이 대표적인 사례이다<sup>[13]</sup>. 나아가 EDO Electro-Ceramic Products Division과 Wilcoxon Research Inc.가 수중 3축 가속도계와 하이드로폰을 결합한 음향 벡터 센서를 제작한 바 있다.<sup>[14]</sup> 하지만 이상의 연구 사례들은 단일 센서 소자에 의한 것이 아니라 하나의 패키지 내에 몇 개의 하이드로폰이나 다축 가속도 센서를 설치하여 서로간의 신호차를 비교해 음향 신호의 방향성을 측정하는 것으로서, 기존 배열구조 센서에 비해서는 크기나 구조에서 많이 간단해졌지만 단일 센서 소자는 아니라는 한계를 가지고 있다. 반면, 단일 소자를 이용한 연구로는 Ko<sup>[15]</sup>가 구형 트랜스듀서를, Gordon<sup>[16]</sup>이 링 트랜스듀서를 이용한 벡터 센서를 개발한 바 있다. 이들은 벡터 센서내 진동소자의 다중 진동 모드를 이용해 음원의 방향을 찾는 것으로서, 주로 첫 번째 무지향성 모드와 두 번째 dipole 모드를 결합한 형태이다. 최근에는 Butler<sup>[17]</sup>가 세 번째 quadrupole 모드를 추가로 이용해 수신 빔 특성을 향상시킨 quadrant 빔 패턴에 대한 연구도 수행하였다.

본 연구에서는 이상의 기존 연구 사례들과는 달리 Tonpitz 트랜스듀서를 이용하여 음압의 크기와 음원의 입사방위각(azimuth)을 동시에 측정할 수 있는 새로운 구조의 벡터 센서를 제안하고, 제안한 구조의

타당성을 유한요소 모델링 및 해석을 통해 검증하였다. 하나의 패키지가 아니라 하나의 소자로서 벡터 센서의 기능을 가질 수 있다면 종래에 비해 획기적으로 센서 구조를 간단하게 할 수 있을 뿐만 아니라 크기 또한 줄일 수 있다. 나아가 Tonpitz 트랜스듀서는 현재 수중 음향 트랜스듀서로 가장 널리 사용되는 종류이므로, 이를 이용해 벡터 센서를 구현할 수 있다면 기존의 Tonpitz 트랜스듀서 재료 및 제작 기법 그리고 수중 탐지 시스템을 그대로 이용할 수 있는 장점을 가질 수 있다. 또한 지금까지 Tonpitz형 벡터 센서에 대한 연구 사례는 없는 상태이므로, 본 연구에서 제안한 Tonpitz형 벡터 센서는 선행 연구 사례들이 가지는 구조 및 크기의 한계를 극복할 수 있는 방안이 될 수 있을 것으로 기대된다.

## II. Tonpitz 트랜스듀서 모델링

본 연구에서 개발하고자 하는 벡터 센서는 기존의 대표적인 수중 음향 트랜스듀서인 Tonpitz 트랜스듀서를 기본 모델로 삼았다. Tonpitz 트랜스듀서의 일반적인 형태는 그림 1에 보는 바와 같이 음향방사체

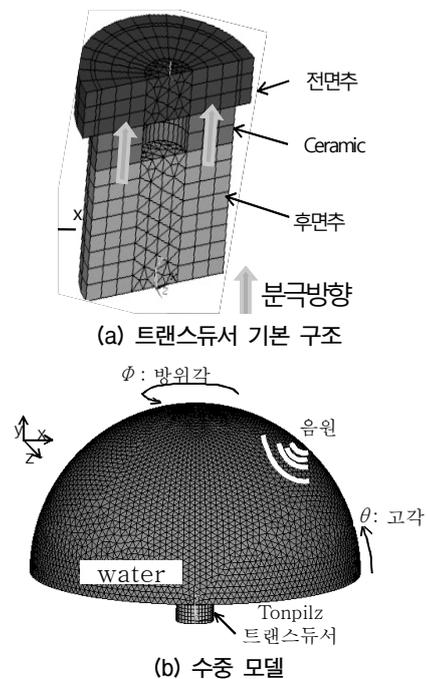


그림 1. Tonpitz 트랜스듀서의 유한요소 모델  
Fig. 1. Finite element model of the Tonpitz transducer.

역할을 하는 전면추, 압전 세라믹에서 발생한 변위를 반사시켜 전면추의 변위를 증폭시켜주는 후면추, 구동자 역할을 하는 압전 세라믹 링으로 구성되어 있다.<sup>[18]</sup> 이때 전면추 직경은 수신 음파의 파장의 절반 이하로서, Tonpilz 트랜스듀서는 무지향성의 빔 특성을 가지도록 하였다. 그림 1에 보인 Tonpilz 트랜스듀서에 사용된 물성은 표 1에 나타내었고, 상용 유한요소 해석도구인 ANSYS를 이용해 Tonpilz 트랜스듀서를 3차원 구조로 모델링했다. 트랜스듀서의 수중 음향 특성을 해석할 모델은 트랜스듀서 구조체,

표 1. Tonpilz 트랜스듀서 구성 재료들의 물성  
Table 1. Properties of the materials composing the Tonpilz transducer.

	Young's modulus(GPa)	Poisson's ratio	Density (kg/m <sup>3</sup> )
전면추	69.0	0.33	2,700
후면추	195.0	0.28	7,700
압전 세라믹	PZT - 4		

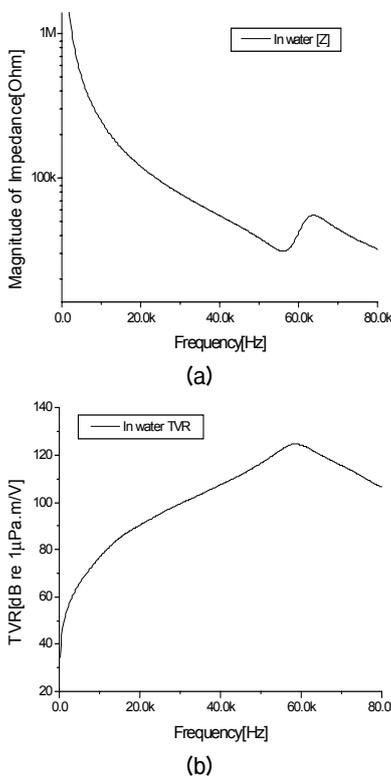


그림 2. Tonpilz 트랜스듀서의 수중 임피던스와 TVR 스펙트럼: (a) 임피던스, (b) TVR  
Fig. 2. Underwater impedance and TVR spectrum of the Tonpilz transducer: (a) impedance, (b) TVR.

물, 물과 구조체간의 경계층(FSI)으로 구성하였다. 구조체를 향해 평면파 입사 조건을 주기위해 구조체 표면으로부터 충분히 먼 거리의 원 거리장까지 물을 묘사했으며, 물의 최 외각지점에서 구조체를 향해 음압을 발생시켰다. 경계조건은 후면추 밀면을 고정시키고 나머지 부분은 자유 상태로 가정하였으며, 물의 최외곽층에는 무반사 조건을 적용하였다. 먼저 그림 1에 보인 모델의 임피던스와 TVR(Transmitting Voltage Response) 값을 하모닉 해석을 통해 계산했고, 결과는 그림 2에 나타났다. 모델에서 묘사한 Tonpilz 트랜스듀서의 수중 공진주파수는 56 kHz이고, TVR의 중심 주파수는 58.8 kHz이다.

### III. Tonpilz형 벡터센서의 작동 원리

일반적인 Tonpilz 트랜스듀서는 외부에서 인가되는 음압을 이에 반응하는 전압으로 변환하여 음압의

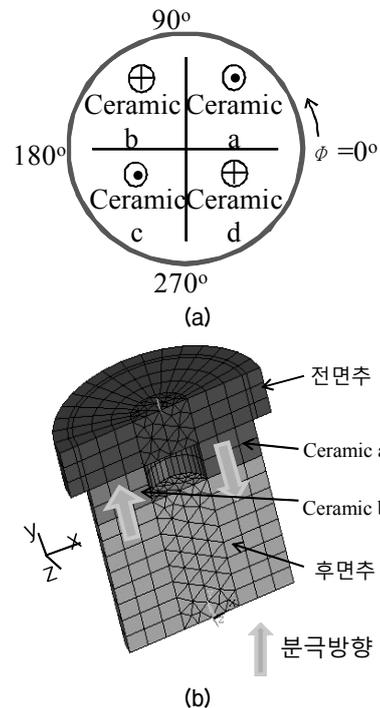


그림 3. Tonpilz형 벡터 센서내 세라믹 링 구조도, (a) 세라믹 조각들의 분극방향, (b) 센서 내에 세라믹 조각들이 장착된 형태  
Fig. 3. Structure of the ceramic ring inside the Tonpilz vector sensor: (a) polarization direction of the ceramic pieces, (b) configuration of the ceramic piece installation inside the sensor.

크기만 측정할 뿐 입사되는 음압의 방향은 파악할 수 없는 한계가 있다. 이와 같은 문제점을 해결하고자 본 연구에서는 Tonpilz 트랜스듀서를 이용해 음압의 크기와 입사되는 방위각을 동시에 분석해 낼 수 있는 벡터 센서 구조를 그림 3과 같이 제안하였다. 통상의 Tonpilz 트랜스듀서 내부에 장착된 압전 세라믹 링은 단면상의 분극방향이 동일한 형태를 가지고 있다. 하지만 본 연구에서 제안한 벡터 센서는 그림 3에 나타낸 것처럼 세라믹 링을 4등분하여 quadrupole 구조와 같이 각 세라믹 조각들의 분극 방향이 서로 교차되도록 나열한 형태를 가진다. 이 구조를 이용해 그림 1(b)에 나타낸 유한요소 모델을 이용해 물속 각 방향에서 센서를 향해 음압을 가한 후 각 세라믹 조각에서 출력되는 전압을 분석하여, 그 결과를 그림 4와 5에 나타내었다. 이때 음압이 입사되는 각도는 고

각  $\theta$ 가  $45^\circ$ 인 지점에서 방위각  $\phi$ 가  $0^\circ$ 에서  $360^\circ$  까지  $45^\circ$  간격이 되도록 하여 해석하였다. 그림 4(a)는 음원의 방위각이  $0^\circ$ 인 경우 각 세라믹 조각 a, b, c 그리고 d의 출력 전압  $V_a, V_b, V_c, V_d$ 를 나타낸 것이고, (b)는 방위각이  $90^\circ$ 인 경우, (c)는  $180^\circ$ 인 경우, 그리고 (d)는  $270^\circ$ 인 경우 각 세라믹 조각의 출력 전압을 나타낸 것이다. 또한 그림 5는 음원의 입사 방위각이 각각  $45^\circ, 135^\circ, 225^\circ$  그리고  $315^\circ$ 인 경우의 각 세라믹 조각 출력 전압을 나타낸 것이다.

그림 4(a)는 음원의 방위각  $\phi$ 가  $0^\circ$ 인 경우이다. 세라믹 조각 a와 d는 첫 번째 피크 값이 같은 크기이며 부호가 서로 반대인 출력 전압 값을 보였다. 그리고 세라믹 조각 b와 c도 첫 번째 피크 값이 크기는 같되 서로 반대 부호를 가진 출력 전압을 나타냈다. 그러나  $V_a$ 와  $V_d$ 가  $V_b$ 와  $V_c$ 보다 더 빨리 나타났다. 이를 이

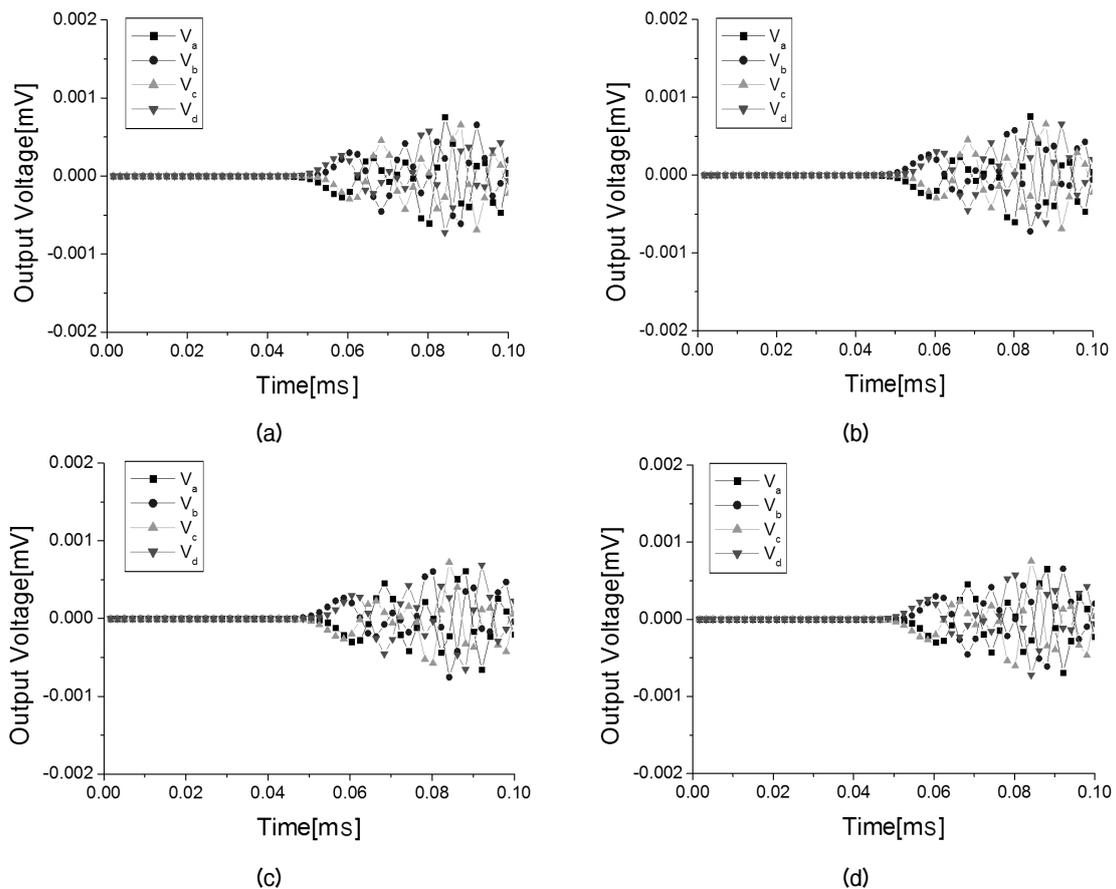


그림 4. 음원의 방위각  $\phi$ 에 따른 세라믹 조각 a, b, c 그리고 d의 출력 전압: (a)  $0^\circ$ , (b)  $90^\circ$ , (c)  $180^\circ$ , (d)  $270^\circ$   
 Fig. 4. Output voltages of the ceramic pieces a, b, c and d according to the azimuth  $\phi$  of the acoustic source: (a)  $0^\circ$ , (b)  $90^\circ$ , (c)  $180^\circ$ , (d)  $270^\circ$ .

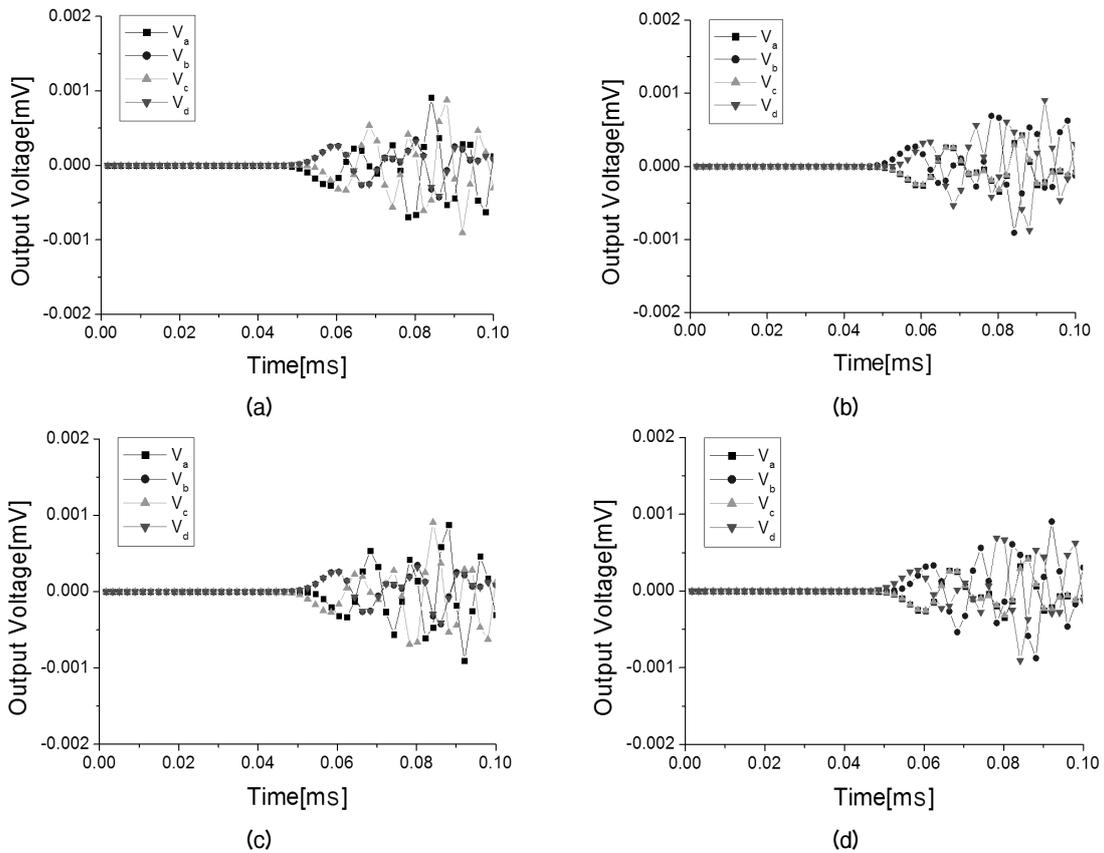


그림 5. 음원의 방위각  $\phi$ 에 따른 세라믹 조각 a, b, c 그리고 d의 출력 전압: (a)  $45^\circ$ , (b)  $135^\circ$ , (c)  $225^\circ$ , (d)  $315^\circ$   
 Fig. 5. Output voltages of the ceramic pieces a, b, c and d according to the azimuth  $\phi$  of the acoustic source: (a)  $45^\circ$ , (b)  $135^\circ$ , (c)  $225^\circ$ , (d)  $315^\circ$ .

용해  $V_a$ 와  $V_d$ 의 첫 번째 피크 값이 서로 반대 부호를 가지면서,  $V_b$ 와  $V_c$ 의 피크 신호 발생 시간보다 앞서면 음원의 방위각  $\phi$ 가  $0^\circ$ 인 것을 알 수 있다. 이때 각 출력 전압의 첫 번째 피크 값의 부호는 음원의 방향과 세라믹 분극 방향에 따라 바뀐다. 음원의 방향과 분극 방향이 같으면 출력 전압 첫 번째 피크 부호가 (+)로 나타나고, 서로 반대 방향이면 (-)부호가 나타난다.

그림 4(b)는 음원의 방위각  $\phi$ 가  $90^\circ$ 인 경우이다. 세라믹 조각 a와 b는 첫 번째 피크 값이 크기는 같되 부호가 반대인 출력 전압 값을 나타낸다. 그리고 세라믹 조각 c와 d도 첫 번째 피크 값이 크기는 같되 반대 부호를 가진 출력 전압을 나타낸다. 그러나  $V_a$ 와  $V_b$ 가  $V_c$ 와  $V_d$ 보다 더 빨리 나타났다. 즉,  $V_a$ 와  $V_b$ 의 첫 번째 피크 값이 서로 반대 부호를 가지면서,  $V_c$ 와  $V_d$ 의 첫 번째 피크 값 발생 시간보다 앞서면 음원의 방위각  $\phi$ 가  $90^\circ$ 인 것을 알 수 있다. 같은 방법으로 음원의

방위각  $\phi$ 가  $180^\circ$ ,  $270^\circ$ 일 때의 구분도 가능하다.

그림 5(a)는 음원의 방위각  $\phi$ 가  $45^\circ$ 인 경우이다. 세라믹 조각 a의 첫 번째 피크 전압 값이 먼저 나타나고, 그 뒤를 세라믹 조각 b와 d의 첫 번째 피크 값이 같은 시간 같은 부호의 (+)전압 값을 가지며 나타난다. 그리고 세라믹 조각 c의 첫 번째 피크 전압 값이 (-)부호를 가지고 나타난다. 그림 5(b)는 음원의 방위각  $\phi$ 가  $135^\circ$ 인 경우이다. 세라믹 조각 b의 첫 번째 피크 전압 값이 먼저 나타나고, 그 뒤를 세라믹 조각 a와 c의 첫 번째 피크 값이 같은 (-)부호 전압 값을 가지며 나타난다. 그리고 세라믹 조각 d의 첫 번째 피크 전압 값이 (+)부호를 가지며 나타난다. 이 같은 방법으로 방위각이  $225^\circ$ ,  $315^\circ$ 일 때 들어오는 음압에 따른 각 세라믹 조각 출력 전압의 첫 번째 피크 값을 통해 음원의 방향 추적이 가능하다.

이때 세라믹 링 전체의 출력 전압을  $V_b+V_d(V_a+V_c)$

의 형태로 구하면 음압의 크기를 같이 알 수 있다. 음원의 입사 방위각  $\phi$ 에 따른  $V_b+V_d-(V_a+V_c)$  값의 변화

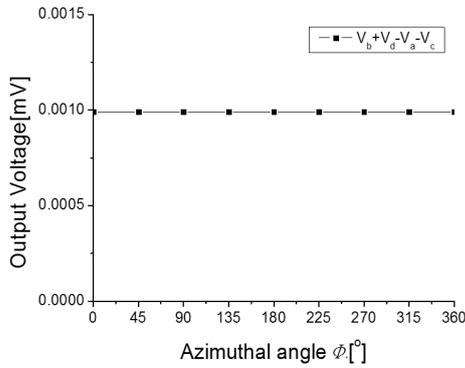


그림 6. 음원의 방위각  $\phi$ 에 따른 출력 전압  $V_b+V_d-V_a-V_c$ 의 변화

Fig. 6. Variation of the output voltage  $V_b+V_d-V_a-V_c$  according to the azimuth  $\phi$  of the acoustic source.

를 그림 6에 나타내었다. 이 경우 스칼라 센서와 같은 형태로 모든  $\phi$ 방향에서 출력되는 전압은 같고, 통상의 Tonpilz 트랜스듀서처럼 음압의 크기를 측정할 수 있다.

앞서 제안한 quadrupole 구조를 가지는 Tonpilz형 벡터 센서는 각 세라믹 조각들 출력 전압의 첫 번째 피크 값과 발생 시간을 통해 입사 방위각  $\phi$ 를 개략적으로 추정할 수 있었다. 여기서 더 나아가 좀 더 쉽게 음원의  $\phi$ 방향을 추정하기 위해 세라믹 조각들의 출력 전압들을  $V_a+V_d$ ,  $V_a+V_b$ ,  $V_b+V_c$  그리고  $V_c+V_d$ 와 같이 조합한 결과들을 비교했다. 계산 결과들은 그림 7과 8에 나타냈다.

그림 7(a)는 방위각  $\phi$ 가  $0^\circ$ 인 방향에 음원이 있는 경우이다. 음압에 따른 세라믹 조각 a+b의 출력 전압을 계산한 결과 첫 번째 피크가 (-) 값을 가지며, 세라

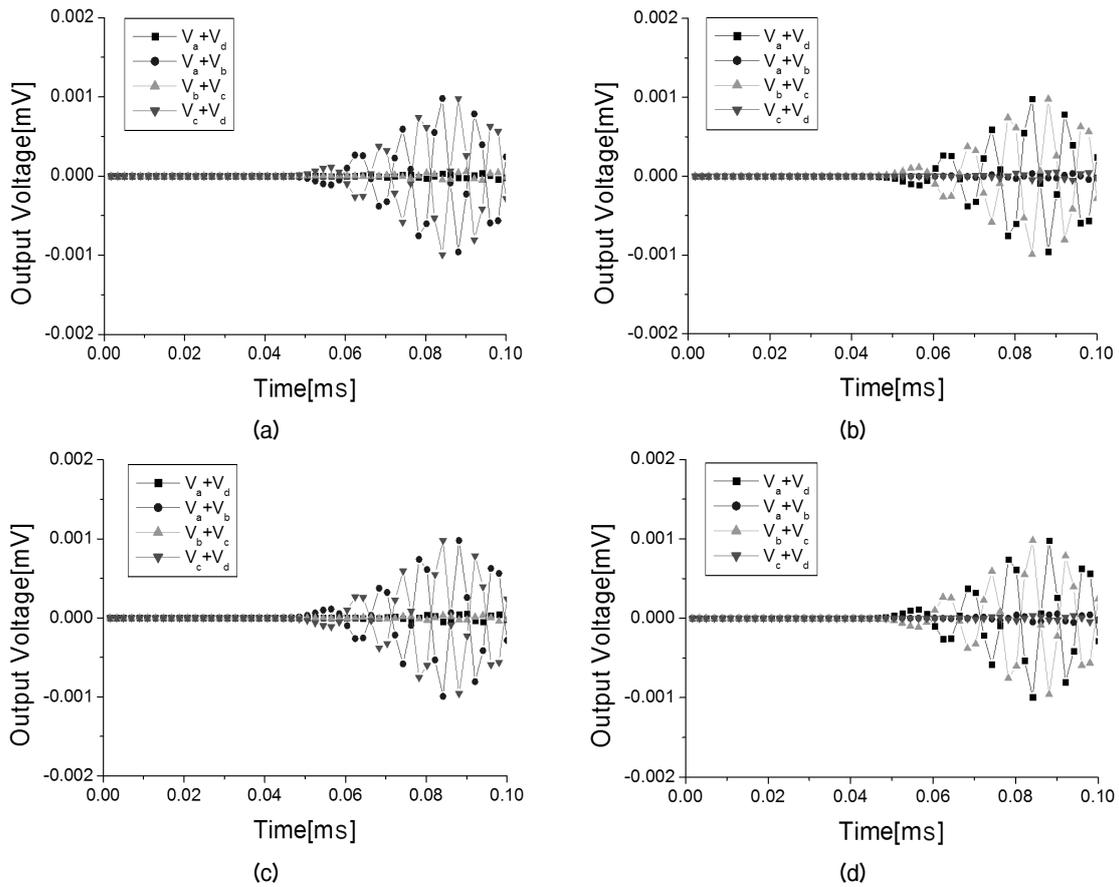


그림 7. 음원의 방위각  $\phi$ 에 따른 세라믹 조각 a+d, a+b, b+c 그리고 c+d의 출력 전압: (a)  $0^\circ$ , (b)  $90^\circ$ , (c)  $180^\circ$ , (d)  $270^\circ$   
 Fig. 7. Output voltages of the ceramic pieces a+d, a+b, b+c and c+d according to the azimuth  $\phi$  of the acoustic source: (a)  $0^\circ$ , (b)  $90^\circ$ , (c)  $180^\circ$ , (d)  $270^\circ$ .

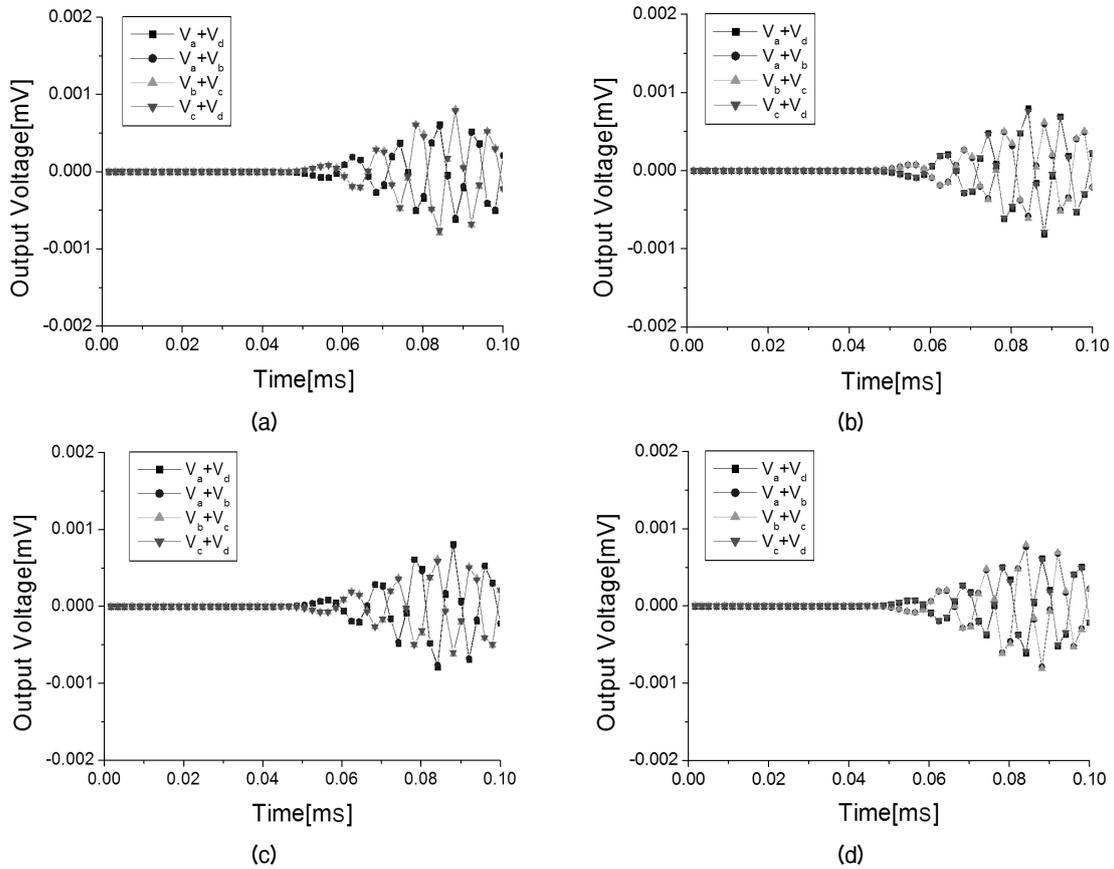


그림 8. 음원의 방위각  $\phi$ 에 따른 세라믹 조각 a+d, a+b, b+c 그리고 c+d의 출력 전압: (a) 45°, (b) 135°, (c) 225°, (d) 315°  
 Fig. 8. Output voltages of the ceramic pieces a+d, a+b, b+c and c+d according to the azimuth  $\phi$  of the acoustic source: (a) 45°, (b) 135°, (c) 225°, (d) 315°.

믹 조각 c+d의 출력 전압의 첫 번째 피크는 (+) 값을 가진다. 이때  $V_a+V_d$ 와  $V_b+V_c$ 의 값은 0이 되는데, 이유는 서로 반대 방향을 가지는 세라믹 조각 a와 d 그리고 b와 c에 각각 동시에 음압이 도달함으로써 두 세라믹 조각의 출력 전압이 서로 상쇄되기 때문이다. 이 결과를 통해  $V_a+V_b$ 와  $V_c+V_d$ 의 부호만을 이용해 음원의 방위각  $\phi$ 는 0°이라는 것을 알 수 있다.

그림 7(b)는 방위각  $\phi$ 가 90°인 방향에 음원이 있는 경우이다. 음압에 따른 세라믹 조각들의 출력 전압을 계산한 결과,  $V_a+V_d$ 의 첫 번째 피크는 (-) 값을 가지고  $V_b+V_c$ 의 첫 번째 피크는 (+) 값을 가진다. 이때  $V_a+V_b$ 와  $V_c+V_d$ 의 값은 각각 0이 된다. 위에서와 마찬가지로 서로 반대 방향을 가지는 세라믹 조각 a와 b 그리고 세라믹 조각 c와 d에 같은 시간에 같은 음압이 도달함으로써 두 세라믹 조각의 출력 전압 합이 0이 되기 때문이다. 음원의 방위각  $\phi$ 가

180°인 경우는  $\phi$ 가 0°인 경우와 유사하되  $V_a+V_b$ 의 첫 번째 피크 부호만 바뀌게 된다. 즉,  $\phi$ 가 0°인 경우에는 분극 방향이 음압의 입사 방향과 반대 방향인 세라믹 조각 a가 먼저 반응하고 입사 방향과 동일한 분극 방향을 가진 세라믹 조각 b가 그 다음으로 반응하므로, 세라믹 조각  $V_a+V_b$ 의 첫 번째 피크는 (-) 값을 나타낸다. 반면에 음원의 방향이 180°인 경우에는 세라믹 조각 b가 먼저 반응하고 그 다음 세라믹 조각 a가 반응하므로,  $V_a+V_b$ 의 첫 번째 피크는 (+) 값을 나타낸다. 이로써 음압의 입사 방위각  $\phi$ 가 0°인 경우와 180°인 경우는  $V_a+V_b$ 의 첫 번째 피크 부호를 통해 쉽게 구분할 수 있다.

마찬가지 방법으로 음원의 방위각  $\phi$ 가 270°인 경우는  $V_a+V_d$  또는  $V_b+V_c$ 의 첫 번째 피크 값 부호를 관찰함으로써 90°일 때와 구분할 수 있다.  $V_b+V_c$ 의 첫 번째 피크 값이  $\phi$ 가 270°인 경우에는 (-) 값을 가지고,

90°인 경우에는 (+) 값을 가진다.

그림 8은 그림 7과 마찬가지로 음원의 방위각  $\phi$ 가 각각 45°, 135°, 225°, 315°일 때의 출력 전압 변화를 해석한 결과이다. 그림 8(a)는  $\phi$ 가 45°인 경우로서  $V_a+V_d$ 와  $V_a+V_b$ 의 첫 번째 피크는 (-) 부호를 가지고,  $V_b+V_c$ 와  $V_c+V_d$ 의 첫 번째 피크는 (+) 부호를 나타낸다. 그림 8(b)는  $\phi$ 가 135°인 경우로서  $V_a+V_b$ 와  $V_b+V_c$ 의 첫 번째 피크가 (+)값을 가지고,  $V_a+V_d$ 와  $V_c+V_d$ 의 첫 번째 피크는 (-)값이 나타난다. 그림 8(c)는  $\phi$ 가 225°인 경우로서  $V_b+V_c$ 와  $V_c+V_d$ 의 첫 번째 피크가 (-)값을 가지고,  $V_a+V_d$ 와  $V_a+V_b$ 의 첫 번째 피크는 (+)값이 나타난다. 그림 8(d)는  $\phi$ 가 315°인 경우로서  $V_a+V_d$ 와  $V_c+V_d$ 의 첫 번째 피크가 (+)값을 가지고,  $V_a+V_b$ 와  $V_b+V_c$ 의 첫 번째 피크는 (-)값이 나타난다.

이상의 그림 7과 8의 결과들을 종합해보면 그림 9와 같다. 그림 9는 방위각  $\phi$ 에 따른 출력전압  $V_a+V_b$ ,  $V_a+V_b$ ,  $V_b+V_c$  그리고  $V_c+V_d$  를 각각의 첫 번째 피크 값으로 정규화시킨 것이다. 전체적으로 두 개의 sin과 cos 형태 그래프로 나타난다. 정규화시의 기준 값이 되는 각 신호들의 첫 번째 피크 값은 그림 7과 8로부터 직접 구할 수 있다. 혹은, 그림 6에 나타난 스칼라 반응 값인  $V_b+V_d(V_a+V_c)$ 의 절대값이 사전에 주어진다면, 그림 6의 값과 그림 7과 8의 그래프 간의 비례 관계에 의해 첫 번째 피크 값의 크기를 간접적으로

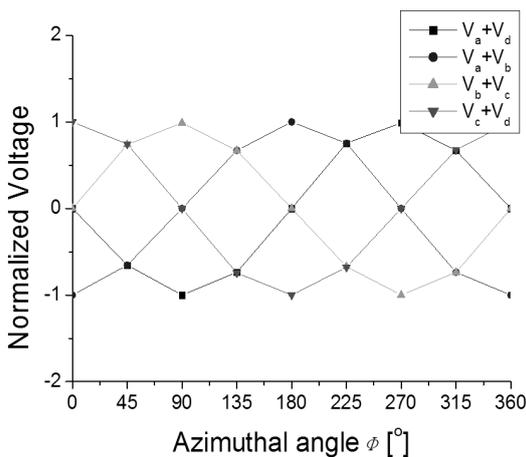


그림 9. 음원의 방위각  $\phi$ 에 따른 각 출력 전압의 첫 번째 피크 값의 변화

Fig. 9. Variation of the first peak of each output voltage according to the azimuth  $\phi$  of the acoustic source.

로 구할 수도 있다.

그림 9에서  $V_a+V_b$ 와  $V_b+V_c$ 의 결과를 예로 들어 음원의 방위각을 추정하는 방안을 정리해보면,  $V_a+V_b$ 의 첫 번째 피크 부호가 (-)일 때는 음원의 입사 방위각  $\phi$ 가 0°~90° 혹은 270°~360°에 속하고, (+)일 때는  $\phi$ 가 90°~270°에 속한다. 또한,  $V_b+V_c$ 의 첫 번째 피크 부호가 (+)일 때는  $\phi$ 가 0°~180°에 속하고, (-)일 때는  $\phi$ 가 180°~360°에 속한다. 따라서 이러한 특성을 이용하면  $\phi$ 가 어느 사분면에 속하는지를 구체화시킬 수 있는데,  $V_a+V_b$ 와  $V_b+V_c$ 의 첫 번째 피크 값이 모두 (+)이면  $\phi$ 가 90°~180°에 속하고, 모두 (-)이면  $\phi$ 가 270°~360°에 속하는 식이다. 이렇게 출력 전압 값들의 첫 번째 피크 부호를 이용해  $\phi$ 가 어느 사분면에 속하는지를 판단할 수 있는 기준을 표 2에 정리하였다. 표 2의 결과는 입사 음압이 양의 부호를 가진 경우  $\phi$ 의 방향을 판단하는 기준을 나타낸 것이다. 만약 음의 부호를 가지는 음압이 들어온다면 그림 6에 나타난 방위각에 따른 출력 전압  $V_b+V_d(V_a+V_c)$ 이 음의 값을 가질 것이다. 그러므로 센서의 출력 전압  $V_b+V_d(V_a+V_c)$ 에 의해 입사 음압이 어떠한 부호를 가지는지를 먼저 판단한 다음, 만약 음의 부호를 가진다면 표 2에 나타난 방위각에 따른 각 출력 전압의 부호를 반대가 되도록 한 후, 동일한 방법에 의해 음원이 어느 사분면에 속하는지를 찾으면 된다.

이렇게 방위각  $\phi$ 가 어느 사분면에 속하는지가 결정되고 나면, 그 사분면 내에서의 보다 구체적인  $\phi$ 의 값은 그림 9에 보인 각 전압 변화 그래프들을 적합화 (fitting)시킨 함수인 식(1)-(4)로부터 구할 수 있다. 그림 9는 이미 각각의 최대값으로 정규화가 된 그래프들이므로 역삼각함수로 간단하게 적합화할 수 있다.

표 2. 음원의 방위각  $\phi$ 에 따른 각 출력 전압의 첫 번째 피크 부호 비교

Table 2. Comparison of the sign of the first peak of each output voltage according to the azimuth  $\phi$  of the acoustic source.

음원의 방위각 $\phi$	압전세라믹 조각의 출력신호 조합			
	$V_a+V_d$	$V_a+V_b$	$V_b+V_c$	$V_c+V_d$
0°~90°	< 0	< 0	> 0	> 0
90°~180°	< 0	> 0	> 0	< 0
180°~270°	> 0	> 0	< 0	< 0
270°~360°	> 0	< 0	< 0	> 0

$$\Phi_{a+d} = \sin^{-1}[(V_a + V_d)_{normalized}] \quad (1)$$

$$\Phi_{a+b} = \cos^{-1}[(V_a + V_b)_{normalized}] \quad (2)$$

$$\Phi_{b+c} = \sin^{-1}[(V_b + V_c)_{normalized}] \quad (3)$$

$$\Phi_{c+d} = \cos^{-1}[(V_c + V_d)_{normalized}] \quad (4)$$

식(1)-(4)에 의한 방위각  $\phi$ 의 계산의 정확성을 검증하기 위하여, 예를 들어서 그림 9에 보인  $V_a+V_b$  값들에 대해 식(2)를 이용해 각각에 해당하는 방위각  $\phi$ 를 구한 다음 그림 9의 그래프와 비교한 결과를 그림 10에 나타냈다. 그림 9의 결과는 그림 1(b)에 보인 모델에 의한 유한요소해석 결과인데, 그림 10에 나타낸 바와 같이 식(2)에 의해 계산한 방위각이 유한요소해석 결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 따라서 식(1)-(4)의 적합화 식들은 매우 타당함을 알 수 있다. 하지만 그림 10의 결과만으로는 동일한  $V_a+V_b$  값에 대해 두 개의 각도가 제시되므로, 이 식만으로는 방위각을 유일하게 결정할 수 없다.

따라서 이상의 원리들을 정리하면, 임의의 방향에서 외부 음압이 인가되었을 때, 우선 관찰된 전압

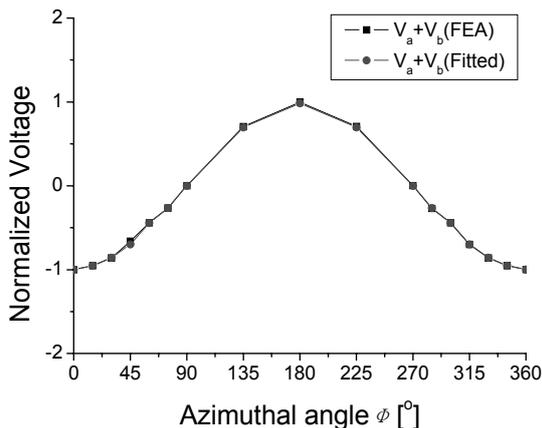


그림 10. 음원의 방위각  $\phi$ 에 따른  $V_a+V_b$ 의 변화에 대한 유한요소해석 결과와 적합화 함수에 의한 계산 결과의 비교

Fig. 10. Comparison of the results from the finite element analysis with those from the calculation with the fitted equations for the variation of  $V_a+V_b$  in relation to the azimuth  $\phi$  of the acoustic source.

$V_a+V_b, V_a+V_d, V_b+V_c,$  그리고  $V_c+V_d$  들의 첫 번째 피크 부호를 관찰함으로써 음원의 방위각이 어느 사분면에 속하는지를 표 2에 의해 먼저 결정한다. 다음으로 결정된 사분면 내에서의 구체적인 방위각  $\phi$ 는 식(1)-(4) 중 어느 한 식에 정규화된 전압 값을 대입함으로써 구할 수 있다. 식(1)-(4) 중 어느 것을 사용하더라도 결과에는 차이가 없으므로, 사용하기 편리한 식을 채택하면 된다. 관찰된 전압들을 정규화시키기 위한 각 전압 신호의 첫 번째 피크 크기는 이 벡터 센서의 스칼라 반응 값을 사전에 안다면 그림 6의 스칼라 반응 값과 그림 7과 8의 각 그래프 간의 비례 관계에 의해 사전에 구할 수 있다. 그리고 그림 6에 나타낸 스칼라 반응 값은 임의의 방향에서 외부 음압이 인가되었을 때 4개 소자 모두에 의해 측정된 전압들을  $V_b+V_d(V_a+V_c)$ 와 같이 더함으로써 간단히 구할 수 있다.

#### IV. Tonpitz형 벡터센서에 의한 방위각 탐지

본 연구에서 제안한 Tonpitz형 벡터센서의 방위각 탐지 성능을 검증하기 위하여, 임의의 방향에서 음압이 입사된다고 할 때 3절에서 설명한 원리에 의해 음원의 방위각을 추정하고, 그 결과를 원래 유한요소 모델에서 인가한 음원의 방향과 비교하였다.

해석 시 음압 입사점의 고각은  $45^\circ$ 로 고정되었다고 가정하고, 우선 그림 1(b)의 유한요소 모델을 이용하여 임의의 방위각을 가지는 지점에 음압을 가한 후 각 세라믹 조각에 나타나는 출력전압을 구하였다. 다음으로 3절에서 설명한 식(1)-(4)와 표 2를 이용하는 방법에 의해 음원의 방위각을 추정하였다. 식(1)-(4) 중 어느 것을 사용하더라도 결과에는 차이가 없으므로, 본 시험에서는  $V_a+V_b$ 와 식(2) 그리고  $V_c+V_d$ 와 식(4)를 사용하여 방위각을 각각 추정하여 보았다. 이렇게 추정된 방위각을 원래 유한요소 모델에서 인가한 음원의 방향과 비교한 결과를 표 3에 정리하였다. 추정된 방위각들이 유한요소 모델에서의 인가한 음압 방위각과 최대  $2.2^\circ$ 의 오차를 가지며 전체적으로 잘 일치함을 알 수 있다. 약간의 오차 가 나는 원인은 그림 9에 나타낸 계산 점들을 그림 10과

표 3. 벡터 센서를 이용해 추정된 음원의 방위각  
Table 3. Azimuth  $\phi$  of the acoustic source estimated with the vector sensor.

유한요소 모델에서의 음압 인가 방위각	적합화 함수에 의한 추정된 방위각	
	$V_a+V_b$ & 식(2) 사용	$V_c+V_d$ & 식(4) 사용
15°	16.0°	15.7°
30°	30.2°	30.4°
45°	46.8°	46.2°
60°	60.2°	60.7°
75°	72.8°	73.4°

같이 적합화함에 있어서 어느 정도의 오차가 있을 수 있고, 무엇보다도 그림 1(b)의 3차원 모델에서 해석 요소의 크기가 무한히 작을 수 없어서 2.2° 정도의 각 오차를 유발할 만큼의 크기를 가지도록 요소 분할을 하였기 때문으로 판단된다. 이로써 본 연구에서 제안한 Tonpiliz형 벡터 센서는 외부 음원의 고각이 일정하다고 할 때 임의의 방향에서 입사되는 음압의 방위각을 정확히 탐지할 수 있음을 확인하였다.

## V. 결 론

본 연구에서는 수중 음향 트랜스듀서의 일반적 모델인 Tonpiliz 트랜스듀서를 이용해 외부에서 들어오는 음압의 크기 뿐 아니라 음원의 방위각도 동시에 분석해 낼 수 있는 벡터 센서 구조를 제안하고, 그 타당성을 검증하였다.

음원의 방위각을 파악하기 위한 방법으로 압전 세라믹 링을 4개의 조각 a, b, c, d로 나누고, 분극 방향을 서로 다르게 하여 quadrupole 구조로 배열한 구조를 제안하였다. 제안된 구조에서 모든 세라믹 조각들의 출력 전압을  $V_b+V_d-(V_a+V_c)$ 의 형태로 조합하면 통상의 Tonpiliz 트랜스듀서처럼 음압의 크기를 측정할 수 있다. 다음으로 외부 음원의 고각이 일정하다고 하면, 임의의 방향에서 음압이 인가되었을 때 센서에 탐지되는 전압  $V_a+V_b$ ,  $V_a+V_d$ ,  $V_b+V_c$  그리고  $V_c+V_d$  들의 첫 번째 피크의 부호와 정규화된 크기를 이용하면 음원의 방위각을 정확히 구할 수 있음을 확인하였다. 이상의 결과를 통해 본 연구에서 제안한 quadrupole 구조의 Tonpiliz 센서는 하나의 센서로 음

압의 크기뿐만 아니라 음원의 방향도 동시에 측정할 수 있는 벡터 센서로 사용할 수 있음을 확인하였다. Tonpiliz 트랜스듀서는 수중 음향 트랜스듀서로 가장 널리 사용되는 종류이므로, 본 연구 결과는 링형 혹은 구형 트랜스듀서를 이용한 여타 벡터 센서에 비해서 기존의 Tonpiliz 트랜스듀서 재료 및 제작 기법을 그대로 이용할 수 있다. 따라서 본 연구에서 제안한 연구 결과는 수중에서 수동 음향 방향 탐지 시스템의 음향센서 개발에 충분히 활용될 수 있을 것이라 기대된다.

단, 본 연구에서는 음원의 고각이 45°로 일정하고 설정을 하고 방위각만 탐지하고자 하였는데, 향후 연구에서는 고각의 변화까지도 동시에 탐지할 수 있도록 벡터 센서 구조를 발전시키는 연구를 수행할 필요가 있다. 또한 본 논문의 결과는 수치해석을 통한 결과이므로, 향후 quadrupole 구조를 가진 Tonpiliz 벡터센서의 제작을 통해 해석된 결과의 검증을 수행할 예정이다.

## 감사의 글

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다(계약번호 UE120005DD).

## 참고문헌

1. O. B. Wilson, *Introduction to Theory and Design of Sonar Transducers*, Peninsula Publishing, Los Altos, CA, 1988.
2. H. C. Schau and A. Z. Robinson, "Passive source localization employing intersecting spherical surfaces from time-of-arrival differences," *IEEE Trans. Acoust. Speech Sig. Processing*, vol. 35, no. 8, pp. 1223-1225, 1987.
3. M. J. D. Rendas and J. M. F. Moura, "Cramer-rao bound for location systems in multipath environments," *IEEE Trans. Sig. Processing*, vol. 39, no. 12, pp. 2593-2610, 1991.
4. A. B. Baggeroer, W. A. Kuperman, and H. Schmidt, "Matched field processing: source localization in correlated noise as an optimum parameter estimation problem," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 83, no. 2, pp. 571-587, 1988.
5. N. Zou and A. Nehorai, "Circular acoustic vector-sensor

- array for mode beamforming,” *IEEE Trans. Sig. Processing*, vol. 57, no. 8, pp. 3041-3052, 2009.
6. C. H. Sherman and J. L. Butler, *Transducers and Arrays for Underwater Sound*, Springer, New York, 2007.
  7. C. B. Leslie, J. M. Kendall, and J. L. Jones, “Hydrophone for measuring particle velocity,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 28, no. 4, pp. 711-715, 1956.
  8. D. J. Scheiber, “Directional pressure gradient hydrophone,” in *Proc. of 27th Navy Symposium on Underwater Acoustics*, pp. 1113-1119, 1969.
  9. M. P. Mongiovi, “Low frequency pressure gradient sensor,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 59, no. S1, pp. S62-S62, 1976.
  10. J. L. Butler, “Directional transducer,” *U. S. Patent 4,326,275*, 1982.
  11. R. Hickling, W. Wei, and R. Raspet, “Finding the direction of a sound source using a vector sound-intensity probe,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 94, no. 4, pp. 2408-2412, 1993.
  12. M. B. Moffett, D. H. Trivett, P. J. Klippel, and P. D. Baird, “A piezoelectric, flexural-disk, neutrally buoyant, underwater accelerometer,” *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control.*, vol. 45, no. 5, pp. 1341-1346, 1998.
  13. P. A. Wlodkowski, K. Deng, and M. Kahn, “The development of high-sensitivity, low-noise accelerometers utilizing single crystal piezoelectric Materials,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 90, no. 1-2, pp. 125-131, 2001.
  14. M. T. Silvia and R. T. Richards, “A theoretical and experimental investigation of low-frequency acoustic vector sensors,” in *Proc. IEEE OCEANS '02 MTS Conf.*, vol. 3, pp. 1886-1897, 2002.
  15. S. H. Ko, G. A. Brigham, and J. L. Butler, “Multimode spherical hydrophone,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 56, no. 6, pp. 1890-1898, 1974.
  16. 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.*, vol. 58, no. 6, pp. 1311-1314, 1975.
  17. J. L. Butler, A. L. Butler, and J. A. Rice, “A tri-modal directional transducer,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 115, no. 2, pp. 658-665, 2004.
  18. 강국진, 노용래, “유한요소법을 이용한 Tonpiliz 트랜스듀서의 최적구조 설계,” *한국음향학회지*, 22권, 8호, pp. 637-644, 2003.

### 저자 약력

▶ 임 영 섭(Youngsub Lim)

2007년 2월: 대구대학교 전자시스템공학(공학사)  
 2009년 2월: 경북대학교 센서및디스플레이공학과(공학석사)  
 2009년 3월 ~ 현재: 경북대학교 센서및디스플레이공학과 박사 과정  
 <관심분야> 음향/초음파 트랜스듀서, 초음파 및 탄성파

▶ 노 용 래(Yongrae Roh)

1984년 2월: 서울대학교 자원공학과(공학사)  
 1986년 2월: 서울대학교 자원공학과(공학석사)  
 1990년 5월: 미국 펜실베니아주립대학교(공학박사)  
 1990년 5월 ~ 1994년 2월: 포항산업과학연구원 선임연구원  
 1994년 3월 ~ 현재: 경북대학교 기계공학부 교수  
 <관심분야> 음향/초음파 트랜스듀서, 압전 Device, 전자재료, 파동해석