벡터 하이드로폰을 위한 두께 전단형 진동자의 빔 패턴 해석

Analysis of the beam pattern of a thickness shear mode vibrator for vector hydrophones

김정석,¹ 김회용,¹ 노용래^{2†}

(Jungsuk Kim,¹ Hoeyong Kim,¹ and Yongrae Roh^{2†})

¹(주)한화, ²경북대학교 기계공학부 (Received March 17, 2017; accepted May 30, 2017)

로: 수중에서 은밀하게 움직이는 표적을 조기에 탐지하기 위한 선배열센서에 적용되는 통상의 하이드로폰은 표적신호의 크기만 측정할 뿐, 외부에서 들어오는 음향신호의 방향은 파악할 수 없는 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 표적으로부터의 음향신호의 크기와 방향을 동시에 탐지할 수 있는 관성형 벡터 하이드로폰의 기본 구성품으로 두께 전단형 진동자를 제안하였다. 외력에 대한 진동자의 출력 전압을 해석할 수 있는 수식을 유도하였으며, PMN-PT 단결 정 진동자에 대한 유한요소해석을 통해 수식의 타당성을 검증하였다. 본 연구에서 얻어진 해석 결과는 향후 두께 전단 형 진동자로 구성된 관성형 벡터 하이드로폰 설계에 활용될 것이다.
 핵심용어: 벡터 하이드로폰, 두께 전단형 진동자, 쌍극자 빔패턴, PMN-PT 단결정, 유한 요소해석

ABSTRACT: Typical hydrophones in line array sensors for early detection of covert underwater targets can measure only sound-pressure-magnitude with the limitation of being unable to identify the direction of an incoming wave. In this study, a thickness shear mode vibrator was proposed as the main component of an inertia type vector hydrophone to measure both magnitude and direction of acoustic signals from targets. The equation to analyze the output voltage of the vibrator to an external force was derived, and the validity of the equation was verified through finite element analysis of a PMN-PT single crystal vibrator. The analysis results from this study will be utilized in the future for the design of inertia type vector hydrophones made of thickness shear vibrators.
Keywords: Vector hydrophone, Thickness shear mode vibrator, Dipole beam pattern, PMN-PT single crystal, Finite element analysis

PACS numbers: 43.30.Yj, 43.38.Fx

I.서 론

잠수함이나 어뢰와 같이 수중에서 은밀하게 움직 이는 표적을 조기에 탐지하기 위해 해군에서 일반적 으로 사용하는 수중음향탐지 장비는 함정 하부에 부 착된 능동음탐기와 함정 후미에서 예인 운용하는 예 인 선배열 음탐기이다. 이중에서 수중표적의 장거리 탐지를 위해서는 저주파 탐지 능력이 상대적으로 뛰

(Tel: 82-53-950-6828, Fax: 82-53-943-8716)

어난 예인 선배열 음탐기가 주로 사용된다. 예인 선 배열 음탐기의 핵심 구성품인 선배열 센서는 일반적 으로 구형 또는 원통형의 하이드로폰을 다채널로 구 성하여 표적탐지 능력이 뛰어난 장점이 있으나, 표 적의 좌우 구분을 위해 별도의 함정기동분석을 위한 시간이 필요한 한계가 상존한다. 이는 선배열 센서 를 구성하는 하이드로폰이 음파의 크기만 감지하는 스칼라 센서이기 때문이며, 음파의 크기와 방향을 동시에 감지하는 센서인 벡터 하이드로폰^[1]의 필요 성이 점차 높아지고 있다.

음파의 크기와 방향을 동시에 감지하기 위한 연구

[†]**Corresponding author:** Youngrae Roh (yryong@knu.ac.kr) School of Mechanical Engineering, Kyungpook National University, 80 Daehak-ro, Buk-gu, Daegu, 41566, Republic of Korea

는 수중에서 직접 입자속도를 측정하기 위한 연구결 과¹²가 1956년에 발표된 이래 최근까지 지속적으로 진행되어 왔다. 벡터 하이드로폰은 무지향 빔패턴과 쌍극자 빔패턴¹³을 합성하여 최종적으로 입사된 음 파에 대해 심장형 빔패턴⁽⁴⁾ 출력을 나타낸다. 이러한 쌍극자 빔패턴 형성을 위해 다양한 형태의 센서 구 조가 제안되었는데, 함정 후미에서 예인되는 선배열 센서에 적용 가능한 구조는 크게 다중 모드형 벡터 하이드로폰과 관성형 벡터 하이드로폰으로 구분할 수 있다.

다중모드형벡터하이드로폰은무지향빔패턴특 성을 가지는 구형 또는 원통형 하이드로폰을 몇 개 의 조각으로 나눈 후, 조각난 각각의 하이드로폰의 출력특성을 조합하여 특정한 방향으로 높은 수신감 도를 가지는 쌍극자 빔패턴을 만들고, 무지향 빔패 턴과의 조합을 통해 심장형 빔패턴을 구현한다. Ko et al.이 1974 년에 구형의 압전 세라믹을 8개의 조각 으로 나누어 쌍극자 빔패턴을 구현한¹⁵¹ 이후로 Gordon et al.은 2조각을 낸 원통형 압전 세라믹에 대한 등가 회로를 구성하였고,⁶⁰ Butler et al.이 구형 및 원통형 압전 세라믹을 분할한 다중 모드형 벡터 하이드로폰 에 대한 연구를 활발하게 진행하였다.[5-7] 나아가 Butler et al.은 몇 개의 분할된 원통형 압전 세라믹을 적층하여음향송수신능력을향상시킨지향성트랜스 듀서를 개발하여 수중통신에 적용하였고,^[89] McConnell et al.은 각각 4개와 8개로 분할된 원통형 하이드로폰 의 1차 및 2차 쌍극자 빔패턴 특성을 분석하고 미 해 군의 수중음향탐지 장비에 적용한 바 있다.¹⁰⁰ 국내 에서도 최근 구형 및 원통형 다중 모드 벡터 하이드 로폰에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.^[4,11,12] Roh et al.은 음향신호 송수신을 위해 널리 사용되는 Tonpilz형 트랜스듀서의 전면추를 분할하여 음파의 크기와 방향을 동시에 감지하는 Tonpilz형 벡터 하이 드로폰을 최초로 제안하기도 하였다.[13,14]

이와 같은 다중 모드형 벡터 하이드로폰은 일반적 으로 많이 사용하는 구형 및 원통형 하이드로폰을 활용하기에 비교적 제작이 간편하고 선배열 센서에 적용하기 위한 센서 전자부도 많이 개발되어 있어 손쉽게 수중음향탐지 장비에 적용할 수 있다. 그러 나, 분할된 각각의 조각에 입사되는 음파의 위상 차 이를 이용하여 방향을 검출하기 때문에 저주파 영역으로 갈수록 하이드로폰의 크기가 커져야하는 단점이 있다. 최근 이러한 한계를 극복하기 위한 다양한 신호처리 기법이 연구되고 있으나,^[15] 수 백 Hz 이하 의 저주파 대역을 탐지하고자 하는 시스템에는 적용 하기 어려운 한계가 있다.

따라서 별도의 신호처리가 필요없이 센서 자체로 입자 속도를 측정하여 저주파 대역에서도 방향 정보 를 획득하기 위한 연구가 다양하게 진행되었다.^[16,17] 일례로 2000년대에 가속도 센서의 쌍극자 빔 패턴과 구형또는원통형하이드로폰의무지향빔패턴을합 성하여 심장형 빔 패턴을 형성하는 관성형 벡터 하이 드로폰을 선배열 센서에 적용하는 연구가 미국을 중 심으로 활발하게 진행되었다. Silvia et al. 은 압전 세라 믹 가속도 센서 기반의 벡터 하이드로폰으로 미국의 Seneca 호수에서 50~2,000 Hz 대역의 음향 수신특성 을 측정하였고,^[18] Shipps *et al*.은 선배열 센서에 적용 하기 위한 관성형 벡터 하이드로폰의 사양을 제시하 고 PMN-PT 단결정 가속도 센서를 적용한 벡터 하이 드로폰의 성능을 평가하였다.^[19] McConnel은 구형의 하이드로폰 내에 가속도 센서를 장착한 관성형 벡터 하이드로폰을 수학적으로 모델링하고, 외부 유체의 밀도 및 점도 변화에 대한 영향을 고찰했고,^[20] Kim et al.은직경 38.1 mm의 원통형 하이드르폰 내에 가속도 센서를 장착한 관성형 벡터 하이드르폰의 중성부력 상태에서의 음향수신 특성을 평가하였다.[21]

한편, 가속도 센서는 센서 자체의 출력특성이 쌍극 자 형태를 이루고 저주파 측정이 가능하여 선배열 센 서에 적용하기에 적합한 센서이다. 그러나 수중 표적 을 조기에 탐지하기에는 수중음향신호에 대한 감도 가 매우 낮아 결과적으로 시스템의 전기적 자체잡음 특성의 개선이 필요하다. 이를 위해 Wookowski *et al*.은 단결정 진동자를 적용한 굽힘형 가속도 센서를 개발 하여 수신감도를 향상시킴으로써 전기적 자체잡음 수준 을 약 15 dB 감소시켰으며,^[22] Deng은 PMN-PT 단결정 진 동자를 적용한 전단형 가속도 센서를 제안하였다.^[23] 이와 같이 별도의 신호처리가 필요없이 방향탐지가 가능한 관성형 벡터 하이드로폰을 선배열 센서에 적용

가능한 관성형 벡터 하이느로폰을 선배열 센서에 적용 하기 위해서는 수신감도가 우수하고, 쌍극자 빔 패턴 출 력을 가지는 소형의 가속도 센서 개발이 필수적이다. 일 반적으로 전단형 가속도 센서는 압축형 가속도 센서에 비해서 감도가 높고 온도 안정성이 우수하다고 알려져 있 다. 그러나 벡터 하이드로폰에 적용되는 이러한 전단형 가 속도 센서의 장점을 극대회하기 위해서는 기본 구성품인 전단형 진동자에 대한 엄밀한 해석과 설계가 필요하다. 따 라서 본 연구에서는 정방정계 4 mm 결정구조를 가지는 PMN-PT 단결정 재료의 두께 전단형 진동자에 대한 파동 방정식의 해를 유도하고, 외력에 대한 빔 패턴 특성을 도 출하였으며, 유한요소해석을 통해 그 타당성을 검증하 였다.

II. 두께 전단형 진동자의 빔 패턴 특성 해석

Fig. 1은 가속도 센서 및 두께 전단형 진동자의 개 념을 나타내고 있는데, 진동자의 상/하면에 전극이 부착되어 외력에 대해 전기 신호가 출력되며, P는 분 극방향을 나타낸다.

두께 전단형 진동자의 파동방정식의 해를 유도하 기 위한 해석모델은 Fig. 2와 같으며, 진동자의 상부 (*x* = *r*)는 외력에 대한 출력 특성을 증폭시켜주기 위 한 질량체에 구속되어 있고, 하부(*x* = 0)는 베이스에 의해 구속되어 있다.

여기서 τ , W, L은 각각 진동자의 세 방향에 대한 치 수이고, 진동자의 상/하부에 작용하는 임의 방향의 외력은 $F_1 e^{j\omega t}$ 와 $F_2 e^{j\omega t}$ 로 표시하였으며, 진동자 상부 $(x = \tau)$ 및 하부(x = 0)의 전극 부착과 기구적 구조에 의한 경계조건은 Eqs. (1)과 (2)와 같다.

$$E_2 = E_3 = 0,$$
 (1)

$$T_2 = T_3 = T_4 = 0, S_1 = 0, \tag{2}$$



여기서 *E*, *T*, *S*는 각각 전기장, 응력 및 변형률을 나타 내며 응력 및 변형률의 아래첨자는 편의상 행렬 표 시법^[24]을 따랐다. Fig. 2 및 Eqs. (1)과 (2)와 같이 모델 링된 두께 전단형 진동자의 파동방정식의 해를 도출 하기 위해 필요한 방정식은 아래와 같다.^[25]

탄성 운동 방정식,

$$\frac{\partial T_{ij}}{\partial x_j} = \rho \frac{\partial^2 \xi_i}{\partial t^2},\tag{3}$$

여기서 *T_{ij}*는 응력 텐서, *ξ*_i는 변위 텐서이고, 아래첨 자*i*와*j*는 1, 2, 3을 나타낸다. Eq. (2)를 Eq. (3)에 적용 한 후 행렬 표시법으로 표시하면 Eqs. (4)와 (5)와 같 이 정리된다.

$$\frac{\partial T_5}{\partial x} = \rho \frac{\partial^2 \xi_3}{\partial t^2},\tag{4}$$

$$\frac{\partial T_6}{\partial x} = \rho \frac{\partial^2 \xi_2}{\partial t^2}.$$
(5)

정전기 전하 방정식,



Fig. 2. Analytic model of the thickness shear mode vibrator.



(b) vibrator

Fig. 1. Concept of the accelerometer and thickness shear mode vibrator.

$$\frac{\partial D_i}{\partial x_i} = 0, \tag{6}$$

여기서 D_i 는 전기 변위장이고 Eqs. (1)과 (6)에 의해 아래와 같이 정리되는데, 진동자 내에서 $D_1 = D_0 e^{j\omega t}$ 로 일정하다.

$$\frac{\partial D_1}{\partial x} = 0. \tag{7}$$

변형률-변위 관계식,

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \xi_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \xi_j}{\partial x_i} \right), \tag{8}$$

여기서 *S_{ij}*는 변형률 텐서이고, 각 성분을 정리한 후 행렬 표시법으로 표시하면 Eq. (9)와 같다.

$$S_{1} = 0$$
(9)

$$S_{2} = 0$$

$$S_{3} = 0$$

$$S_{4} = 0$$

$$S_{5} = \frac{\partial \xi_{3}}{\partial x}$$

$$S_{6} = \frac{\partial \xi_{2}}{\partial x}.$$

압전 구조 방정식,

$$T_I = c_{IJ}^{\rm E} S_J - e_{In} E_n, \tag{10}$$

$$D_m = e_{mJ}S_J + \varepsilon_{mn}^{\rm S}E_n, \tag{11}$$

여기서 c_{ij}^{E} 는 일정한 전기장 하에서 측정된 탄성계 수, $e_{m,J}$ 는 압전상수 그리고 e_{mn}^{S} 은 일정한 변형량 하 에서 측정된 유전계수를 각각 나타낸다. 그리고 아 래첨자 *I*와 *J*는 1, 2, 3, 4, 5, 6을 나타내고, *m*과 *n*은 1, 2, 3을 나타낸다. 한편, 본 연구에서 해석하고자 하는 진동자는 정방정계 4 *mm* 구조의 결정구조를 가지므 로 Eq. (12)와 같은 물성 행렬을 가진다.

$$\boldsymbol{c}^{\mathbf{B}} = \begin{pmatrix} c_{11}^{\mathrm{E}} c_{12}^{\mathrm{E}} c_{13}^{\mathrm{E}} & 0 & 0 & 0 \\ c_{21}^{\mathrm{E}} c_{22} c_{23}^{\mathrm{E}} & 0 & 0 & 0 \\ c_{31}^{\mathrm{E}} c_{32}^{\mathrm{E}} c_{33}^{\mathrm{E}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44}^{\mathrm{E}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{55}^{\mathrm{E}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66}^{\mathrm{E}} \end{pmatrix}$$
$$\boldsymbol{e} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{24} & 0 & 0 \\ e_{31} e_{32} e_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$
$$\boldsymbol{\varepsilon}^{\mathbf{S}} / \boldsymbol{\varepsilon}_{0} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{11}^{\mathrm{S}} / \varepsilon_{0} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{22}^{\mathrm{S}} / \varepsilon_{0} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33}^{\mathrm{S}} / \varepsilon_{0} \end{pmatrix}. \tag{12}$$

Eqs. (10)과(11)의 각 성분을 전개하여 Eqs. (1)과(2) 및 (9)를 적용하고, 물성치를 대입하면 Eqs. (10)과 (11)은 아래와 같이 정리된다.

$$T_5 = c_{55}^{\rm E} S_5 - e_{15} E_1, \tag{13}$$

$$T_6 = c_{66}^{\rm E} S_6, \tag{14}$$

$$D_1 = e_{15}S_5 + \varepsilon_{11}^{\rm S}E_1.$$
⁽¹⁵⁾

Eqs. (7), (9), (13) 및 (15)를 Eq. (4)에 적용하고, Eqs. (9)와 (14)를 Eq. (5)에 적용하면 아래와 같이 다시 쓸 수 있다.^[25]

$$\left(c_{55}^{\rm E} + \frac{e_{15}^2}{\varepsilon_{11}^{\rm E}}\right) \frac{\partial^2 \xi_3}{\partial x^2} = \rho \frac{\partial^2 \xi_3}{\partial t^2},\tag{16}$$

$$c_{66}^{\rm E} \frac{\partial^2 \xi_2}{\partial x^2} = \rho \frac{\partial^2 \xi_2}{\partial t^2}.$$
 (17)

Eqs. (16)과 (17)은 *x*방향으로 진행하는 2개의 독립적 인 전단 파동을 나타내고 있으며, 각각의 일반 해를 Eqs. (18)과 (19)로 두고, 외력에 대한 경계조건을 대 입하여 계수*A*, *B*, *G*, *H*를 구하면 두께 전단형 진동자 의 파동방정식의 해를 구할 수 있다.

$$\xi_3 = A e^{j(\omega t + k_5 x)} + B e^{j(\omega t - k_5 x)},$$
(18)

The Journal of the Acoustical Society of Korea Vol.36, No.3 (2017)

$$\xi_2 = G^{j(\omega t + k_6 x)} + H e^{j(\omega t - k_6 x)},$$
(19)

여기서 k_5 와 k_6 은 각각 $\sqrt{\frac{\rho\omega^2}{c_{55}^{\rm E} + e_{15}^2/\varepsilon_{11}^{\rm N}}}$, $\sqrt{\frac{\rho\omega^2}{c_{66}^{\rm E}}}$ 이고, ρ 는 진동자의 밀도이며, 외력에 대한 경계조건은 아

래와 같다.

at
$$x = 0$$
, $T_5 = \frac{F_1 \cos \theta}{WL} e^{j\omega t}$, $T_6 = \frac{F_1 \sin \theta}{WL} e^{j\omega t}$, (20)

$$at \ x = \tau, \ T_5 = -\frac{F_2 \cos\theta}{WL} e^{j\omega t}, \ \ T_6 = -\frac{F_2 \sin\theta}{WL} e^{j\omega t}.$$
(21)

Eqs. (20)과(21)을 Eqs. (18)과(19)에 대입하여 구해진 계수는 Eqs. (22)~(25)와 같고, 이를 Eqs. (18)과(19)에 대입하면 정방정계 4 mm 결정 구조를 갖는 두께 전 단형 진동자의 파동방정식의 해가 되며, 최종적으로 외력에 대한 출력 전압은 Eq. (15)로부터 Eq. (26)과 같이 유도된다.

$$A = \frac{-j \left\{ F_2 c_{66}^{\rm E} e_{11}^{\rm S} \cos\theta + F_1 e_{11}^{\rm S} \cos\theta e^{-j k_5 \tau} - D_0 W L e_{15} (1 - e^{-j k_5 \tau}) \right\}}{W L k_5 (e^{-j k_5 \tau} - e^{j k_5 \tau}) (e_{15}^2 + e_{55}^{\rm E} e_{11}^{\rm S})},$$
(22)

$$B = \frac{-j \left\{ F_2 c_{66}^{\mathbb{E}} e_{11}^{\mathbb{S}} \cos\theta + F_1 e_{11}^{\mathbb{S}} \cos\theta e^{jk_5\tau} - D_0 WL e_{15} (1 - e^{jk_5\tau}) \right\}}{WL k_5 (e^{-jk_5\tau} - e^{jk_5\tau}) (e_{15}^2 + c_{55}^{\mathbb{E}} e_{11}^{\mathbb{S}})},$$
(23)

$$G = \frac{-j \left(F_2 \sin \theta + F_1 \sin \theta e^{-jk_6 \tau} \right)}{WL c_{66}^{\rm E} k_6 \left(e^{-jk_6 \tau} - e^{jk_6 \tau} \right)},$$
(24)

$$H = \frac{-j \left(F_2 \sin \theta + F_1 \sin \theta e^{jk_6 \tau} \right)}{W L c_{66}^{\rm E} k_6 \left(e^{-jk_6 \tau} - e^{jk_6 \tau} \right)},\tag{25}$$

$$V = \int_{0}^{\tau} E_{1} dx$$

= $Ae_{15}e^{j\omega t} (-e^{jk_{5}\tau} + 1)/\varepsilon_{11}^{S} + Be_{15}e^{j\omega t} (-e^{-jk_{5}\tau} + 1)/\varepsilon_{11}^{S} + D_{0}\tau e^{j\omega t}/\varepsilon_{11}^{S}.$ (26)



Fig. 3. Analyzed beam pattern of the thickness shear mode vibrator.

Eq. (26)을 이용하여 가로(*L*), 세로(*W*), 두께(*t*)가 각각 8 mm, 6 mm, 0.5 mm인 PMN-28% PT 단결정^[26] 진동자 에 대한 빔패턴 특성을 해석하였다. 1 kHz에서의 *x*축 을 기준으로 한 빔 패턴 특성은 Fig. 3과 같이 쌍극자 빔패턴 특성을 나타내고 있으며, 최대 출력 각도가 0°, 180°로서 Deng이 압전 상수의 비로 최대 출력 각 도를 도출한 것과 일치하는 결과를 보이고 있다.^[23]

이와 같이 본 연구에서 도출한 수식을 활용하여 결정의 최대 출력 방향을 확인한 후 결정의 절단 각 도를 결정한다면, 결과적으로 가속도 센서의 성능을 향상시킬 수 있을 것이다.

Ⅲ. 해석 결과 검증

앞 절에서 유도한 수식으로 두께 전단형 진동자의 빔 패턴을 해석한 결과의 타당성을 검증하기 위해, 해석에 사용된 진동자와 동일한 크기의 PMN-28 % PT 단결정 진동자에 대한 유한요소해석을 수행하였 다. 해석에 사용된 물성은 Eq. (27)과 같다.^[26] ANSYS 를 이용한 단결정 진동자의 유한요소 모델은 Fig. 4 와 같으며, 총 17,400여 개의 요소로 구성되어있다. 세라믹과 유체의 경계면은 유체-구조 연성층을 적 용하였고, 매질의 최외곽에서는 반사가 일어나지 않 도록 무반사 경계조건을 설정하였다.

$$\boldsymbol{c}^{\boldsymbol{E}} \!=\! \begin{pmatrix} 12.04 \ 10.68 \ 9.19 & 0 & 0 & 0 \\ 10.68 \ 12.04 \ 9.19 & 0 & 0 & 0 \\ 9.19 \ 9.19 \ 10.35 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 6.57 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 6.57 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6.12 \end{pmatrix} \!\!\times\! 10^{10} \,\mathrm{N/m^2}$$

한국음향학회지 제36권 제3호 (2017)



(a) vibrator



Fig. 4. Finite element model of the thickness shear mode vibrator.



Fig. 5. Comparison of the beam pattern in Fig. 3 with that from the measurement.

$$\boldsymbol{e} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 8.02 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 8.02 & 0 & 0 \\ -20.6 & -20.6 & 17.75 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} C/m^2$$
$$\boldsymbol{e}^{\mathbf{S}}/\boldsymbol{e}_{\mathbf{0}} = \begin{pmatrix} 1561.5 & 0 & 0 \\ 0 & 1561.5 & 0 \\ 0 & 0 & 452.2 \end{pmatrix}.$$
(27)

Fig. 5는 앞 절에서 유도한 정방정계 4 mm 결정 구 조의 두께 전단형 진동자의 출력 전압 수식을 활용 한 빔 패턴 계산 결과와 유한요소 해석 결과를 비교 한 것으로, 각도별 최대 오차가 0.48 dB로 두 결과가 잘 일치함을 알 수 있다.

Ⅳ.결 론

본 연구에서는 표적신호의 크기와 방향을 동시에 탐지할 수 있는 관성형 벡터 하이드로폰에 적용 가 능한 두께 전단형 진동자의 빔 패턴 특성을 해석하 였다. 운동 방정식, 변형률-변위 관계식, 압전 구조방 정식 및 경계조건을 활용하여 정방정계 4 mm 결정 구조의 두께 전단형 진동자의 파동방정식의 해를 도 출하고, 외력에 대한 출력 전압 식을 유도하였다. 유도 된 수식과 해석결과의 타당성은 PMN-28% PT 단결정 진동자의 외력 방향에 따른 출력 전압 특성의 유한요 소 해석을 통해 검증하였다.

본 연구에서 유도된 수식은 두께 전단형 가속도 센서의 설계에 활용되어 궁극적으로 표적의 크기와 방향을 동시에 탐지할 수 있는 벡터 하이드로폰 개 발에 기여할 것이다.

References

- C. H. Sherman and J. L. Butler, *Transducers and Arrays* for Underwater Sound (Springer, New York, 2007), pp. 176-194.
- C. B. Leslie, J. M. Kendall, and J. L. Jones, "Hydrophone for measuring particle velocity," J. Acoust. Soc. Am. 28, 711-715 (1956).
- B. M. Abraham, "Lowcost dipole hydrophone for use in towed arrays," AIP Conf. Proc. 368, 189-201 (1996).
- Y. Lim, J. Lee, C. Joh, H. Seo, and Y. Roh, "Design of a multimode piezoelectric spherical vector sensor for a cardioid beam pattern" (in Korean), J. Acoust. Soc. Kr. 32, 32-42 (2013).
- S. H. Ko, G. A. Brigham, and J. L. Butler, "Multimode spherical hydrophone," J. Acoust. Soc. Am. 56, 1890-1898 (1974).
- 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).
- J. L. Butler and S. L. Ehrlich, "Superdirective spherical radiator," J. Acoust. Soc. Am. 61, 1427-1431 (1977).
- A. L. Butler, J. L. Butler, W. L. Dalton, and J. A. Rice, "Multimode directional telesonar transducer," in Proc. IEEE OCEANS 2000 MTS Conf. and Exhi. 1289-1292 (2000).
- A. L. Butler, J. L. Butler, J. A. Rice, W. L. Dalton, J. Baker, and P. Pietryka, "A tri-modal directional modem transducer," in Proc. IEEE OCEANS 2003, 1554-1560 (2003).
- 10. J. A. McConnell, S. C. Jensen, and J. P. Rudzinsky, "Forming first-and second-order cardioids with multi-

mode hydrophones," in Proc. IEEE OCEANS 2006, 1-6 (2006).

- Y. Lim, J. Lee, C. Joh, H. Seo, and Y. Roh, "Design of a multimode type ring vector sensor" (in Korean), J. Acoust. Soc. Kr. **32**, 484-493 (2013).
- Y. S. Lim, C. Y. Joh, H, S. Seo, J. Y. Kim, and Y. R. Roh, "Design and fabrication of a multimode ring vector hydrophone," Jap. J. App. Phy. 53, 07KD07 (2014).
- Y. Lim and Y. Roh, "Incidence angle estimation by the Tonpilz type underwater acoustic vector sensor with a quadrupole structure" (in Korean), J. Acoust. Soc. Kr. **31**, 569-579 (2012).
- Y. Lim and Y. Roh, "Fabrication and characterization of an underwater acoustic Tonpilz vector sensor for the estimation of sound source direction" (in Korean), J. Acoust. Soc. Kr. 34, 351-359 (2015).
- W. Kim, W. Kim, H. Bae, C. Joh, H. Seo, and S. Choi, "Direction-of-arrival estimation for the ring-type multimode vector hydrophone based on the pressure graidient-acceleration relationship" (in Korean), J. Acoust. Soc. Kr. 34, 66-74 (2015).
- T. B. Gabrielson, D. L. Gardner, and S. L. Garrett, "A simple neutrally buoyant sensor for direct measurement of particle velocity and intensity in water," J. Acoust. Soc. Am. 97, 2227-2237 (1995).
- K. J. Bastyr and G. C. Lauchle, "Development of a velocity gradient underwater acoustic intensity sensor," J. Acoust. Soc. Am. **106**, 3178-3188 (1999).
- M. T. Silvia and R. T. Richards "A theoretical and experimental investigation of low-frequency acoustic vector sensors," in Proc. IEEE OCEANS 2002, 1886-1897 (2002).
- J. C. Shipps and K. Deng, "A miniature vector sensor for line array applications," in Proc. IEEE OCEANS 2003, 2367-2370 (2003).
- J. A. McConnell, "Analysis of a compliantly suspended acoustic velocity sensor," J. Acoust. Soc. Am. 113, 1395-1405 (2003).
- K. Kim, T. B. Gabrielson, and G. C. Lauchle, "Development of an accelerometer-based underwater acoustic intensity sensor," J. Acoust. Soc. Am. 116, 3384-3392 (2004).
- P. A. Wlodkowski, K. Deng, and M. Kahn, "The development of high-sensitivity, low-noise accelerometers utilizing single crystal piezoelectric materials," J. Sensors and Actuators, **90**, 125-131 (2001).
- K. K. Deng, "Underwater acoustic vector sensor using transverse-response free, shear mode, PMN-PT crystal," US Patent 7066026, 2006.
- 24. J. F. Nye, *Physical Properties of Crystals* (Oxford University Press, New York, 1986), pp. 134.
- 25. V. M. Ristic, Principles of Acoustic Devices (John

Wiley & Sons, New York, 1983), pp. 212-213.

 E. Sun and W. Cao, "Relaxor-based ferroelectric single crystals: Growth, domain engineering, characterization and applications," Progress in Materials Science 65, 124-210 (2014).

저자 약력

▶김정석 (Jungsuk Kim)



1995년2월: 경북대학교 기계공학과 공학사 1997년2월: 경북대학교 기계공학과 공학 석사

1997년 2월 ~ 2005년 11월: 국방과학연구 소 선임연구원

2005년 11월 ~ 2007년 3월: 대구기계부품 연구원 책임연구원

2007년 9월 ~ 현재: (주)한화 수석연구원 <관심분야> 수중음향센서, 소나시스템

▶김회용(Hoeyong Kim)



2005년2월:영남대학교 기계공학부 공학사 2007년 2월: 경북대학교 기계공학과 공학 석사

2012년 8월: 경북대학교 기계공학과 공학 박사

2013년 1월 ~ 현재: (주)한화 선임연구원 <관심분야> 음향/초음파 트랜스듀서, 수중음향

▶노용래 (Yongrae Roh)



1984년2월: 서울대학교 자원공학과 공학사 1986년2월: 서울대학교 자원공학과 공학 석사

1990년 5월: 미국 펜실베니아주립대학교 공학박사

1990년 5월 ~ 1994년 2월: 포항산업과학 연구원 선임연구원

1994년 3월 ~ 현재: 경북대학교 기계공학 부 교수

<관심분이> 음향/초음파 트랜스듀서, 압전 Device, 전자재료, 파동해석