

# 심장형 빔 패턴을 위한 다중모드 압전 구형 벡터센서 설계

## Design of a Multimode Piezoelectric Spherical Vector Sensor for a Cardioid Beam Pattern

임영섭, 이재영, 조치영\*, 서희선\*, 노용래\*\*†

(Youngsub Lim, Jaeyoung Lee, Cheeyoung Joh\*, Heeseon Seo\*, and Yongrae Roh\*\*†)

경북대학교 센서 및 디스플레이공학과, \*국방과학연구소, \*\*경북대학교 기계공학과  
(접수일자: 2012년 9월 14일; 채택일자: 2012년 10월 24일)

**초 록:** 일반적인 수중 탐지용 압전 구형 센서는 무지향성이어서 스칼라 양인 수신 음압의 크기만 측정할 뿐 전파 방향은 측정할 수 없는 한계를 가지고 있다. 본 논문에서는 이러한 구형 센서를 이용해 음파의 크기와 방향을 동시에 찾을 수 있는 방법을 제안한다. 제안한 방법은 구형 센서의 압전 세라믹을 8등분하여 배열한 다음, 각 압전 세라믹 출력 전압을 특정한 방법으로 조합하여 음압의 크기와 방향을 파악할 수 있도록 하였다. 또한 압전세라믹 구의 반경과 두께와 같은 구조 변수들의 변화에 따른 감도 변화를 분석하여, 벡터 센서의 감도를 향상시킬 수 있는 방안을 제시하였다. **핵심용어:** 구형 센서, 벡터센서, 심장형, 빔 패턴

**ABSTRACT:** Typical underwater piezoelectric spherical sensors are omni-directional, thus can measure the scalar quantity sound-pressure-magnitude only with the limitation not being able to measure the direction of the incoming wave. This paper proposes a method to simultaneously measure both the magnitude and direction of the sound wave with the spherical sensor. The method divides the piezoceramic sphere of the sensor into eight elements, and distinguishes the magnitude and direction of the sound pressure by combining the output voltage of the elements in a particular manner. Further, through the analysis of the sensitivity variation in relation to the structural parameters like radius and thickness of the piezoceramic sphere, we have suggested the way to improve the sensitivity of the vector sensor.

**Key words:** Spherical sensor, Vector sensor, Cardioid, Beam pattern

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

### 1. 서 론

수중에서 표적의 탐지 또는 추적을 위해서는 수중 음향 트랜스듀서를 많이 이용하는데, 압전 소자를 사용한 센서 또는 프로젝터가 널리 이용되고 있다. 수중 음향 트랜스듀서는 생긴 형태에 따라 여러 가지 종류가 있는데, 그 중 구의 형태를 가진 것을 구형 트랜스듀서라고 한다. 거의 완벽에 가까운 무지향성의 방사특성을 가지는 트랜스듀서로서 두 개의 반구 형태의 압전 세라믹을 결합시켜 만든다. 동작원리는

구의 안쪽 면과 바깥쪽 면에 전극을 바르고 세라믹 두께 방향으로 전압을 인가하면 원주 방향으로 진동하면서 무지향성의 방사특성을 나타낸다.<sup>[1]</sup> 그간 구형 트랜스듀서에 대한 연구로는 Battocletti가 구형 좌표계를 이용해 3차원 유한요소 해석법을 통한 구형 자성체를 설계하고 해석하였으며,<sup>[2]</sup> Fielding이 압전 세라믹을 이용한 구형 트랜스듀서의 물리적 구조를 설명하고, 정전용량의 측정값과 계산 값의 차이에 대한 연구를 수행한 바 있다.<sup>[3]</sup> 또한 Alkoy는 구형 트랜스듀서의 제작 방법을 연구하고, 각 주파수별 진동 모드를 유한요소 해석법으로 분석한 바 있다.<sup>[4]</sup>

구형 음향 트랜스듀서의 가장 큰 특징은 형태상 전 방향에 걸쳐 완벽에 가까운 무지향성의 방사 특

†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)

성을 가지고 있고 정확하게 수식으로 해를 구할 수 있다는 것이다.<sup>[5]</sup> 하지만 단일 센서로는 스칼라 양인 외부에서 들어오는 음압의 크기만 측정할 뿐 음원의 방향은 파악할 수 없는 한계가 있다. 통상 음원의 방향을 찾기 위해서는 다수의 스칼라 센서를 나열한 배열 구조를 많이 이용한다. 또는 두 개 이상의 하이드로폰을 이용해 배열센서에 도달하는 음향 신호의 시간 지연차로 음원의 방위각(azimuth), 고각(altitude), 거리를 추정하는 방법과<sup>[6,7]</sup> 외부에서 들어오는 음향 신호의 입사각을 추정하는 빔 형성 기법을 사용하는 방법 등이 있다.<sup>[8]</sup> 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 Ehrlich,<sup>[9]</sup> Ko,<sup>[10,11]</sup> Butler 등<sup>[12]</sup>이 단일 구형 다중 모드 하이드로폰을 이용해 음원의 방향을 찾는 연구를 수행한 바 있다. 이들이 제안한 방법은 구형 센서의 기본 무지향(omni) 측정 모드에 쌍극자(dipole) 모드를 추가함으로써 외부 음원의 방향을 파악하는 것이다. 하지만 이러한 쌍극자 모드는 양 방향 구분이 모호하다는 단점이 있다. 이를 해결하기 위한 방안으로는 통상 수신 방향과 그 반대 방향 간의 감도 차이가 커 음원의 양 방향 구분이 용이하다고 알려진 심장형(cardioid) 빔 패턴이 제시된 바 있다.<sup>[13,14]</sup>

이에 본 논문에서는 구형 센서의 다중 수신 모드를 이용해 앞서 설명한 심장형 빔 패턴을 구현하고, 이에 의해 외부 음압의 크기와 방향을 동시에 탐지하는 방법에 대해 연구하였다. 즉, 구형 센서는 본래 형태로는 완벽에 가까운 무지향성의 빔 패턴을 가지고 있는데, 본 연구에서는 구형 센서의 출력 전압 신호를 분석해서 특정 방향에 대해 높은 감도를 가지는 심장형 수신 빔 패턴을 구현하는 방안을 도출하였다. 이를 위해, 우선 구형 센서를 이루는 압전 세라믹을 8조각으로 나눈 후, 외부 음압에 대한 각 세라믹 조각의 출력 전압을 계산했다. 이 출력 전압들의 조합을 통해 특정한 방향으로 높은 수신 감도를 가지는 빔 패턴을 만들고, 나아가 조합을 통해 심장형 빔 패턴을 구현하였다. 이러한 지향성 구형 센서의 특성 해석을 위하여, 구형 센서가 총 8개의 수신점으로 구성되었다고 가정한 다음, 이 수신점들이 3차원으

로 배열되었을 때의 수신 빔 특성을 나타낼 수 있는 이론식을 유도하였다. 유도된 식을 이용하여, 확실한 방향성을 나타내기 위해 빔 폭이 좁고 수신 방향과 그 반대 쪽 간의 감도 차이가 가장 큰 심장형 빔 패턴을 구현하기 위한 다중 수신 모드의 결합 방안을 도출하였다. 이론식으로 계산된 결과의 타당성은 동일한 경우들에 대한 유한요소 해석 결과와 비교함으로써 검증하였다. 나아가 구형 센서의 반경과 압전 세라믹의 두께와 같은 구조 변수들의 변화에 따른 감도변화를 분석함으로써, 벡터 센서의 감도를 향상시킬 수 있는 방안을 제시하였다.

## II. 이론적 해석

본 연구에서는 구형 벡터 센서의 특성 해석을 위하여, 구형 센서가 총 8개의 수신점으로 구성되어 있다고 가정한 다음, 3차원 배열 센서의 수신 빔 특성을 나타낼 수 있는 이론식을 유도하였다.

Fig. 1은 다중 모드 구현을 위한 구형 센서의 구조를 나타내고 있다. 단일 구형 센서를 8조각내어 8개의 센서들이 구의 중심에서부터 같은 반경만큼 떨어져 있는 것과 같은 3차원 배열구조를 나타낸 것이다. Fig. 2(a)는 Fig. 1에 나타낸 다중 모드 구형 센서가 8개의 수신점들이 정육면체의 중심에서 거리  $d$ 만큼 떨어져 배열되어 있는 3차원 배열구조를 가진다고 묘사한 것이다.  $S_1 \sim S_8$ 은 8개의 수신점을 나타낸 것이고, 정육면체 중심에서 각 수신점으로의 벡터는  $\vec{s}_1 \sim \vec{s}_8$ 로 나타냈다. 한 변의 길이가  $d$ 인 정육면체의 중심에서 각 수신점까지는 길이는  $\frac{\sqrt{3}}{2}d$ 이다. 외부에서 입사되는 음파에 대한 각 수신점의 반응을 나타내는 식은 Fig. 2(b)에 나타낸  $S_1$ 에 대해 전개하듯

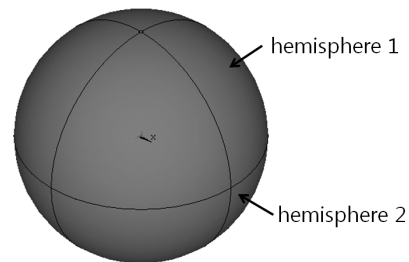
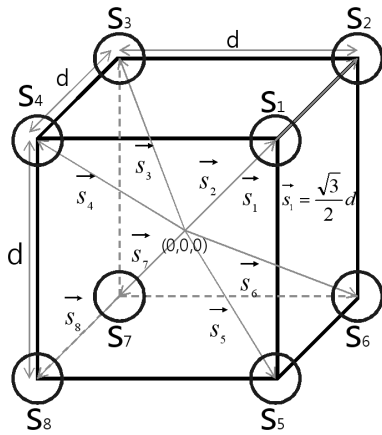
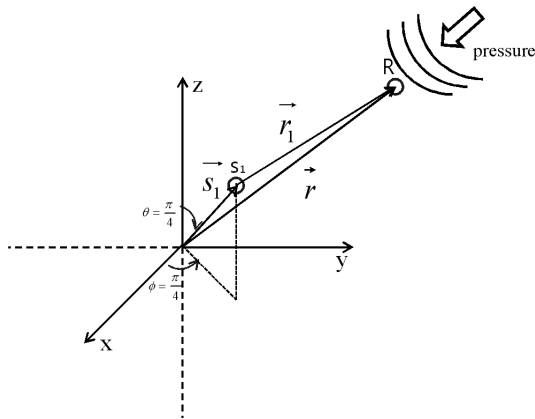


Fig. 1. Structure of the multimode spherical sensor.



(a) Cube composed of 8 receiving points.



(b) Beam pattern model for a receiving point  $S_1$ .

Fig. 2. Model for calculating reception beam pattern of the multimode spherical sensor.

이 8개의 수신점에 대해 동일하게 유도하면 된다.  $r$  은 중심에서 입사점(R)까지의 거리,  $\vec{r}_n$ 은 중심에서 입사점까지의 벡터, 입사점과 각 수신점 간 벡터는  $\vec{r}_1 \sim \vec{r}_8$ 이며  $\theta, \phi$ 는 입사각을 나타낸다. 중심과 입사점간의 거리는 벡터로 식(1)과 같이 표현할 수 있고, 중심과 수신점간 거리를 벡터로 표현하면 식(2)와 같다.

$$\vec{r} = \underline{i} r \sin\theta \cos\phi + \underline{j} r \sin\theta \sin\phi + \underline{k} r \cos\theta, \quad (1)$$

$$\vec{s} = \frac{\sqrt{3}}{2} d (\underline{i} \sin\theta \cos\phi + \underline{j} \sin\theta \sin\phi + \underline{k} \cos\theta). \quad (2)$$

$n$ =수신점 번호,  $\underline{i}, \underline{j}, \underline{k}$ =단위 벡터 성분이고, 이때

입사점과 수신점 사이의 벡터  $\vec{r}_n$ 은 식(1)과 (2)의 차  $\vec{r}_n = \vec{r} - \vec{s}$ 를 이용하면 된다. 예를 들어 수신점  $S_1$ 에 대해서는 식(3)과 식(4)로 표현 할 수 있다.

$$\begin{aligned} \vec{s}_1 &= \frac{\sqrt{3}}{4} d \underline{i} + \frac{\sqrt{3}}{4} d \underline{j} + \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} d \underline{k} \\ \langle \theta &= \frac{\pi}{4}, \phi = \frac{\pi}{4} \rangle, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \vec{r}_1 &= \underline{i} (r \sin\theta \cos\phi - \frac{\sqrt{3}}{4} d) \\ &+ \underline{j} (r \sin\theta \sin\phi - \frac{\sqrt{3}}{4} d) + \underline{k} (r \cos\theta - \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} d). \end{aligned} \quad (4)$$

동일한 방법으로  $S_2 \sim S_8$ 의 중심에서 각 수신점간의 거리는 식(5)~식 (11)로 나타낼 수 있으며, 입사점과 수신점간의 거리는 식(12)~식(18)로 나타 낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \vec{s}_2 &= -\frac{\sqrt{3}}{4} d \underline{i} + \frac{\sqrt{3}}{4} d \underline{j} + \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} d \underline{k} \\ \langle \theta &= \frac{\pi}{4}, \phi = \frac{3\pi}{4} \rangle, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \vec{s}_3 &= -\frac{\sqrt{3}}{4} d \underline{i} - \frac{\sqrt{3}}{4} d \underline{j} + \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} d \underline{k} \\ \langle \theta &= \frac{\pi}{4}, \phi = \frac{5\pi}{4} \rangle, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \vec{s}_4 &= \frac{\sqrt{3}}{4} d \underline{i} - \frac{\sqrt{3}}{4} d \underline{j} + \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} d \underline{k} \\ \langle \theta &= \frac{\pi}{4}, \phi = \frac{7\pi}{4} \rangle, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \vec{s}_5 &= \frac{\sqrt{3}}{4} d \underline{i} + \frac{\sqrt{3}}{4} d \underline{j} - \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} d \underline{k} \\ \langle \theta &= \frac{3\pi}{4}, \phi = \frac{\pi}{4} \rangle, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \vec{s}_6 &= -\frac{\sqrt{3}}{4} d \underline{i} + \frac{\sqrt{3}}{4} d \underline{j} - \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} d \underline{k} \\ \langle \theta &= \frac{3\pi}{4}, \phi = \frac{3\pi}{4} \rangle, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \vec{s}_7 &= -\frac{\sqrt{3}}{4}d\hat{i} - \frac{\sqrt{3}}{4}d\hat{j} - \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}}d\hat{k} \\ \langle \theta &= \frac{3\pi}{4}, \phi = \frac{5\pi}{4} \rangle, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \vec{s}_8 &= \frac{\sqrt{3}}{4}d\hat{i} - \frac{\sqrt{3}}{4}d\hat{j} - \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}}d\hat{k} \\ \langle \theta &= \frac{3\pi}{4}, \phi = \frac{7\pi}{4} \rangle, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \vec{r}_2 &= \hat{i}(r\sin\theta\cos\phi + \frac{\sqrt{3}}{4}d) \\ &+ \hat{j}(r\sin\theta\sin\phi - \frac{\sqrt{3}}{4}d) \\ &+ \hat{k}(r\cos\theta - \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}}d), \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \vec{r}_3 &= \hat{i}(r\sin\theta\cos\phi + \frac{\sqrt{3}}{4}d) \\ &+ \hat{j}(r\sin\theta\sin\phi + \frac{\sqrt{3}}{4}d) \\ &+ \hat{k}(r\cos\theta - \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}}d), \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \vec{r}_4 &= \hat{i}(r\sin\theta\cos\phi - \frac{\sqrt{3}}{4}d) \\ &+ \hat{j}(r\sin\theta\sin\phi + \frac{\sqrt{3}}{4}d) \\ &+ \hat{k}(r\cos\theta - \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}}d), \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \vec{r}_5 &= \hat{i}(r\sin\theta\cos\phi - \frac{\sqrt{3}}{4}d) \\ &+ \hat{j}(r\sin\theta\sin\phi - \frac{\sqrt{3}}{4}d) \\ &+ \hat{k}(r\cos\theta + \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}}d), \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \vec{r}_6 &= \hat{i}(r\sin\theta\cos\phi + \frac{\sqrt{3}}{4}d) \\ &+ \hat{j}(r\sin\theta\sin\phi - \frac{\sqrt{3}}{4}d) \\ &+ \hat{k}(r\cos\theta + \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}}d), \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \vec{r}_7 &= \hat{i}(r\sin\theta\cos\phi + \frac{\sqrt{3}}{4}d) \\ &+ \hat{j}(r\sin\theta\sin\phi + \frac{\sqrt{3}}{4}d) \\ &+ \hat{k}(r\cos\theta + \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}}d), \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \vec{r}_8 &= \hat{i}(r\sin\theta\cos\phi - \frac{\sqrt{3}}{4}d) \\ &+ \hat{j}(r\sin\theta\sin\phi + \frac{\sqrt{3}}{4}d) \\ &+ \hat{k}(r\cos\theta + \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}}d). \end{aligned} \quad (18)$$

위 식들을 이용해 수신 빔 특성을 표현하기 위해서는 각 수신점에서 받아들이는 전압을 구해야 한다. 전압을 구하기 위한 식은 식(19)와 식(20)에 나타났다. 여기서 파수  $\vec{k} = k_x\hat{i} + k_y\hat{j} + k_z\hat{k}$ 이고,  $M$ 은 수신점의 감도,  $P_0$ 는 입사음압,  $\omega$ 는 각속도,  $t$ 는 시간이다.

$$V_n = M \times P_n, \quad (19)$$

$$P_n = \frac{P_0}{r} e^{-j((k_x\hat{i} + k_y\hat{j} + k_z\hat{k}) \cdot \vec{r}_n - \omega t)}. \quad (20)$$

각 수신점들은 각각의 x, y, z에 대한 방향성분을 가지고 있기 때문에 음압이 오는 방향에 따라 이를 다 고려하여 표현하면 계산이 복잡해진다. 그래서 크기로서 식(21)과 같이 표현이 가능하다.

$$\begin{aligned} \vec{k} &= k_x\hat{i} + k_y\hat{j} + k_z\hat{k} = \frac{(\vec{r} - \vec{s})}{|\vec{r} - \vec{s}|} \times k \\ k \times \frac{\vec{r}_n}{|\vec{r}_n|} \times \vec{r}_n &= k \times \frac{|\vec{r}_n|^2}{|\vec{r}_n|} = k \times |\vec{r}_n| \end{aligned} \quad (21)$$

$$V_n = M \times \frac{P_0}{r} e^{j\omega t} e^{-jk(|\vec{r}_n|)}.$$

앞서 전개한  $\vec{r}_n$ 을 식(21)에 대입하면, 8개 수신점에 대한 각각의 전압  $V_1 \sim V_8$ 을 나타낼 수 있다. 각 수신점의 전압은 식(22)~(29)에 나타났다.

$$\begin{aligned} V_1 &= M \times \frac{P_0}{r} e^{j\omega t} \\ &\times e^{-jk[\sqrt{(r\sin\theta\cos\phi - \frac{\sqrt{3}}{4}d)^2 + (r\sin\theta\sin\phi - \frac{\sqrt{3}}{4}d)^2 + (r\cos\theta - \frac{\sqrt{3}}{4}d)^2}]} \end{aligned} \quad (22)$$

$$V_2 = M \times \frac{P_0}{r} e^{j\omega t} \times e^{-jk \left[ \sqrt{(r \sin \theta \cos \phi + \frac{\sqrt{3}}{4} d)^2 + (r \sin \theta \sin \phi - \frac{\sqrt{3}}{4} d)^2 + (r \cos \theta - \frac{\sqrt{3}}{4} d)^2} \right]} \quad (23)$$

$$V_3 = M \times \frac{P_0}{r} e^{j\omega t} \times e^{-jk \left[ \sqrt{(r \sin \theta \cos \phi + \frac{\sqrt{3}}{4} d)^2 + (r \sin \theta \sin \phi + \frac{\sqrt{3}}{4} d)^2 + (r \cos \theta - \frac{\sqrt{3}}{4} d)^2} \right]} \quad (24)$$

$$V_4 = M \times \frac{P_0}{r} e^{j\omega t} \times e^{-jk \left[ \sqrt{(r \sin \theta \cos \phi - \frac{\sqrt{3}}{4} d)^2 + (r \sin \theta \sin \phi + \frac{\sqrt{3}}{4} d)^2 + (r \cos \theta - \frac{\sqrt{3}}{4} d)^2} \right]} \quad (25)$$

$$V_5 = M \times \frac{P_0}{r} e^{j\omega t} \times e^{-jk \left[ \sqrt{(r \sin \theta \cos \phi - \frac{\sqrt{3}}{4} d)^2 + (r \sin \theta \sin \phi - \frac{\sqrt{3}}{4} d)^2 + (r \cos \theta + \frac{\sqrt{3}}{4} d)^2} \right]} \quad (26)$$

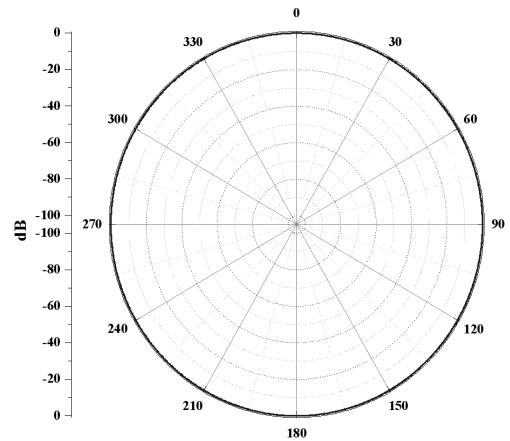
$$V_6 = M \times \frac{P_0}{r} e^{j\omega t} \times e^{-jk \left[ \sqrt{(r \sin \theta \cos \phi + \frac{\sqrt{3}}{4} d)^2 + (r \sin \theta \sin \phi - \frac{\sqrt{3}}{4} d)^2 + (r \cos \theta + \frac{\sqrt{3}}{4} d)^2} \right]} \quad (27)$$

$$V_7 = M \times \frac{P_0}{r} e^{j\omega t} \times e^{-jk \left[ \sqrt{(r \sin \theta \cos \phi + \frac{\sqrt{3}}{4} d)^2 + (r \sin \theta \sin \phi + \frac{\sqrt{3}}{4} d)^2 + (r \cos \theta + \frac{\sqrt{3}}{4} d)^2} \right]} \quad (28)$$

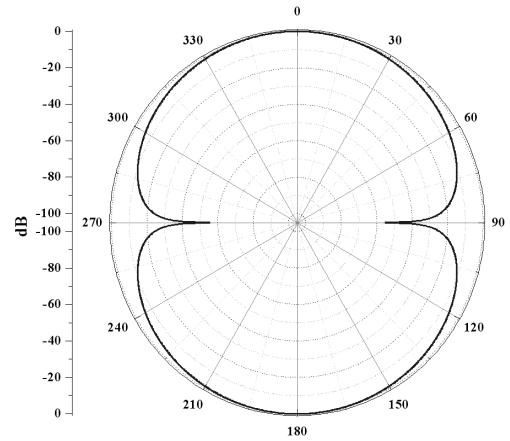
$$V_8 = M \times \frac{P_0}{r} e^{j\omega t} \times e^{-jk \left[ \sqrt{(r \sin \theta \cos \phi - \frac{\sqrt{3}}{4} d)^2 + (r \sin \theta \sin \phi + \frac{\sqrt{3}}{4} d)^2 + (r \cos \theta + \frac{\sqrt{3}}{4} d)^2} \right]} \quad (29)$$

Fig 3은 식(22)~식(29)에 나타낸 8개 전압 값들의 특정한 조합을 통해 나타낸 빔 패턴이다. Fig 3(a)는 무지향 모드를 나타낸 것으로  $(V_1+V_2+V_3+V_4+V_5+V_6+V_7+V_8)$  조합의 빔 패턴이다. (b)는 쌍극자 모드를 나타낸 것으로  $(V_1+V_2+V_3+V_4) - (V_5+V_6+V_7+V_8)$  조합의 빔 패턴이다. (c)는 무지향 모드를 그 최대 수신감도로 정규화(normalize)한 값과 쌍극자 모드를 역시 그 최대 값으로 정규화한 값을 서로 더하여 나타낸 빔 패턴이다. 빔 패턴의 형태가 사람의 심장형과 유사하다고 하여 심장형 패턴이라고 부른다. 이 결과  $0^\circ$ 와  $180^\circ$  간의 감도차가 큰 빔 패턴을 얻을 수 있었다. Fig 3(c)에 보인 심장형 패턴의  $-3\text{ dB}$  빔 폭은  $131^\circ$ 이다.

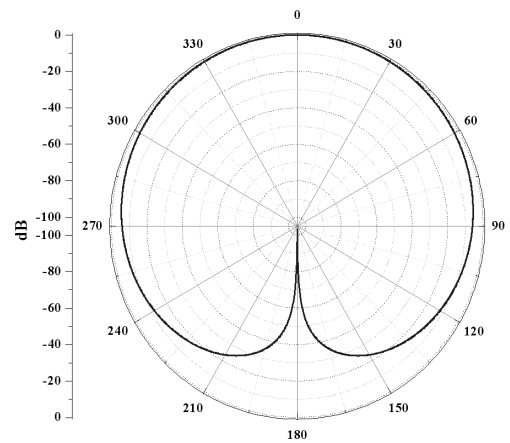
이상에서 설명한 심장형 빔 패턴은 정규화된 무지향 + 쌍극자 모드의 조합으로 만들 수 있었다. 본 연구에서는 여기에서 더 나아가 현 상태의 심장형 빔



(a) Omni-directional mode



(b) Dipole mode



(c) Cardioid beam pattern

Fig. 3. Beam pattern of the multimode spherical sensor.

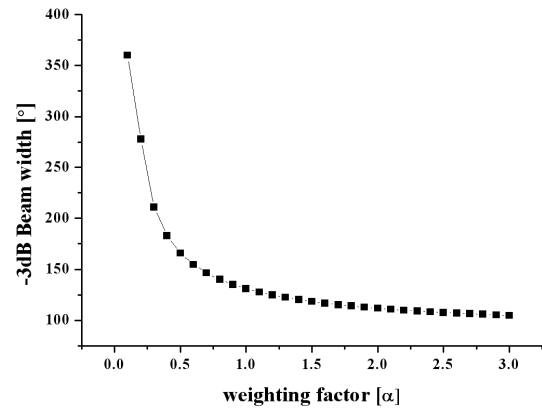
패턴보다  $-3\text{ dB}$  빔 폭이 더 좁고 수신 방향과 그 반대 쪽 간의 감도 차이가 큰 빔 패턴을 구현하고자 하였다. 첫 번째로 심장형 빔 패턴을 나타내기 위한 정규화된 무지향 + 쌍극자 모드의 조합 방법에서 쌍극자 모

드에 가중치( $\alpha$ )값을 증가하여 무지향  $+\alpha \times$ 쌍극자 모드의 빔 패턴을 계산했다. 가중치 값은 0.1에서 3까지 0.1 단위로 증가시켰다. 이때의 -3 dB 빔 폭 그리고 수신 방향과 그 반대 쪽 간의 감도 차 변화를 Fig. 4에 나타냈다. Fig. 4(a)에서, 가중치 값이 증가 할수록 -3 dB 빔 폭이 좁아지는 것을 알 수 있다. Fig. 4(b)는 가중치 증가에 따른 수신 방향과 그 반대 쪽 간의 감도 차( $\Delta Asens$ )의 변화를 나타낸 것이다. 감도차  $\Delta Asens$ 는 Fig. 3의 빔 패턴에서  $0^\circ$  방향 반원의 면적과  $180^\circ$  방향 반원 면적의 차이로 정의하였고, 이 값이 크다는 것은 전면 반원 방향으로 상대적으로 더 높은 감도를 가지는 것을 의미한다. Fig. 4(b)에서 가중치 값이 0.1에서 1.1까지 증가 할수록  $\Delta Asens$ 는 증가하다가 1.1을 넘어서면 다시 감소하는 경향을 보였다.

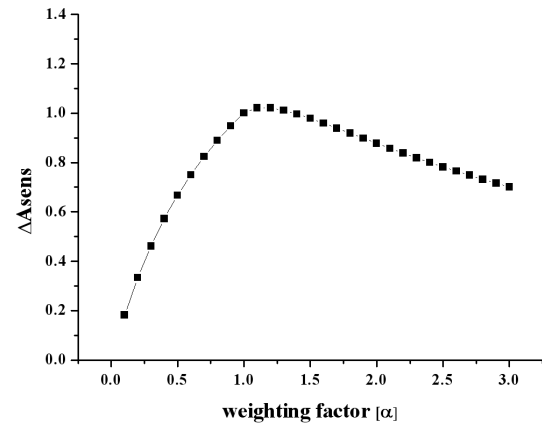
Fig. 4의 결과를 이용해 -3 dB 빔 폭이 좁으면서 동시에 수신 방향과 그 반대 쪽 간의 감도 차가 크게 나타나는 가중치( $\alpha$ ) 값을 선택하기 위해 식(30)과 같이 performance라는 성능지수를 설정하여 분석하였다. 식(30)에서 BW는 -3 dB 빔 폭을 나타내고,  $BW_{min}$ 과  $BW_{max}$ 는 가중치  $\alpha$ 의 분석 범위 이내에서의 빔 폭의 최소값과 최대값을 각각 나타낸다. 그리고  $\Delta Asens_{min}$ 과  $\Delta Asens_{max}$ 는 가중치  $\alpha$ 의 분석 범위 이내에서의 감도차의 최소값과 최대값을 각각 나타낸다. 성능지수 performance를 이루는 두 개의 항목 중에서 빔 폭에 관련된 항은 -3 dB 빔 폭이 좁아질수록 1에 가까운 값을 나타내고, 감도차에 관련된 항은 수신 방향과 그 반대 쪽 간의 감도차가 클수록 역시 1에 가까운 값을 나타낸다. 그러므로 두 경우의 합인 performance값은 최대값 2 이하에서 값이 클수록 빔 폭이 더 좁고 수신 방향으로 높은 감도를 가진다는 두 조건을 가장 잘 만족하는 결과를 낸다. 가중치  $\alpha$ 의 값에 따른 performance의 변화는 Fig. 4(c)에 나타내었다. 식(30)을 이용한 계산 결과 가중치  $\alpha$ 가 1.2인 경우에 가장 큰 performance 값을 얻을 수 있었다.

$$performance = \frac{BW_{max} - BW}{BW_{max} - BW_{min}} + \frac{\Delta Asens - \Delta Asens_{min}}{\Delta Asens_{max} - \Delta Asens_{min}} \quad (30)$$

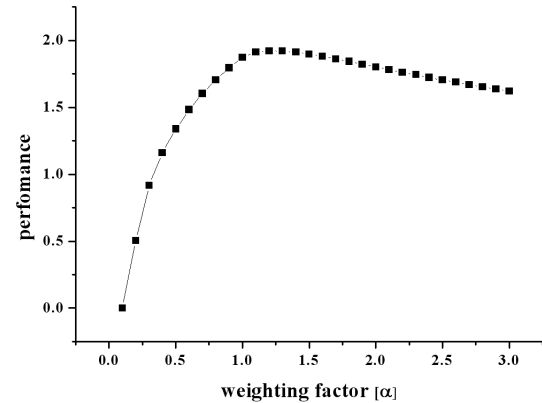
가중치  $\alpha$ 가 1.2일 때의 심장형 빔 패턴은 Fig. 5와 같고, 이때의 -3 dB 빔폭은  $124.8^\circ$ , 감도차는 1.02이다.



(a) Variation of -3dB beam width in accordance with the variation of weighting factor



(b) Sensitivity variation in relation to weighting factor variation



(c) Performance variation in relation to weighting factor variation

Fig. 4. Variation in relation to weighting factor of the multimode spherical sensor.

### III. 유한요소 해석

본 절에서는 2절에서 이론식을 이용해 구한 구형

센서 빔 패턴의 타당성을 검증하고 나아가 구형 센서의 감도를 향상시킬 수 있는 방안을 도출하기 위해, Fig 1에 보인 구형 센서의 수신 특성을 유한요소법을 이용해 해석하고 그 결과를 2절의 결과와 비교하였다. 해석에는 상용 유한요소 해석 도구인 ANSYS를

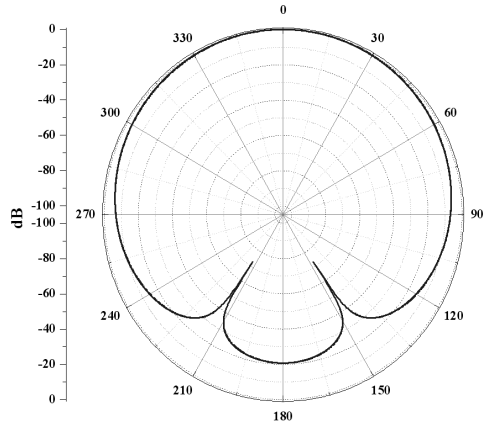


Fig. 5. Optimized cardioid beam pattern.

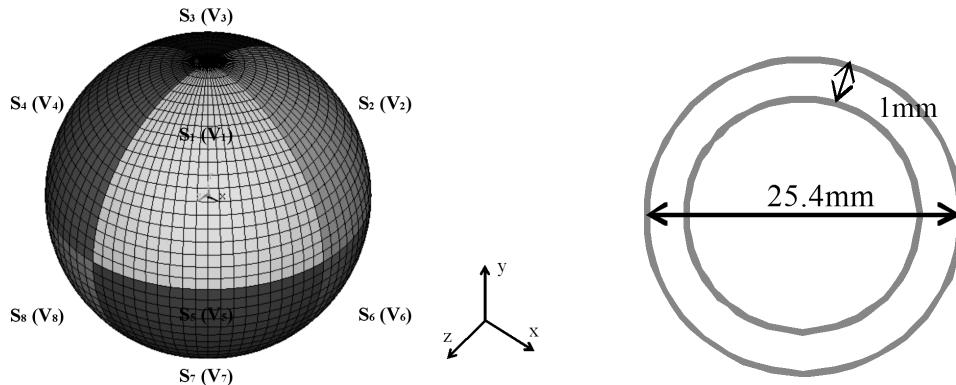


Fig. 6. Finite element model of the multimode spherical sensor.

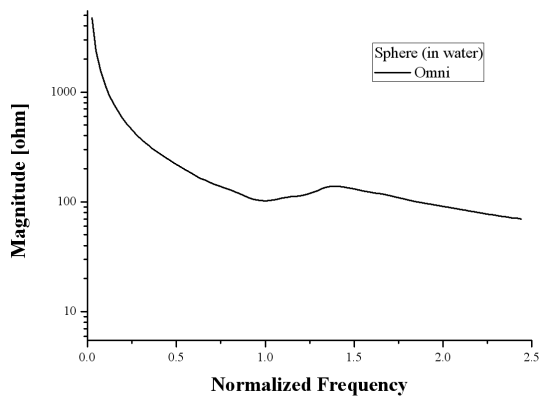


Fig. 7. Underwater impedance spectrum of the spherical sensor.

이용하였다. Fig. 6은 구형 센서의 유한요소 모델이다. 사용된 압전세라믹은 PZT-4이다.<sup>[15]</sup> 수중에서의 특성을 해석할 수중 모델은 Fig 6의 센서, 물, 물과 구조체간의 경계층(FSI)으로 구성하였다. 구조체 표면에서 원거리장까지 충분한 거리의 물을 그렸으며, 물의 최외곽지점에서 구형 센서를 향해 음압을 방사하였다. 센서의 경계조건은 자유 상태로 설정하였으며, 물의 최 외 각층에는 무반사 조건을 적용하였다. 물속에서 구형 센서의 임피던스 스펙트럼을 조화해석을 통해 Fig 7과 같이 구하였으며, 원주방향 공진 주파수는 60 kHz이다. 이 구형 센서의 무지향 모드와 쌍극자 모드 각각에 대해서 주파수별 수신 감도 RVS(Receiving Voltage Response)를 계산하여 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 무지향 수신 모드는 주파수에 따라 감도에 큰 변화가 없으나, 전반적으로 감소하는 경향을 보였다. 쌍극자 모드는 주파수에 따라 상대적으로 큰 폭으로 증가하는 경향을 나타내었다.

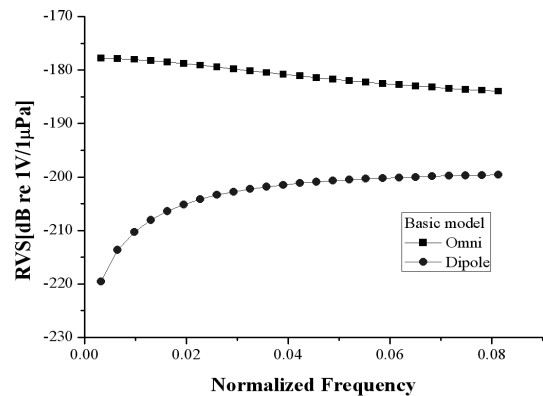


Fig. 8. Receiving voltage sensitivity of the multimode spherical sensor.

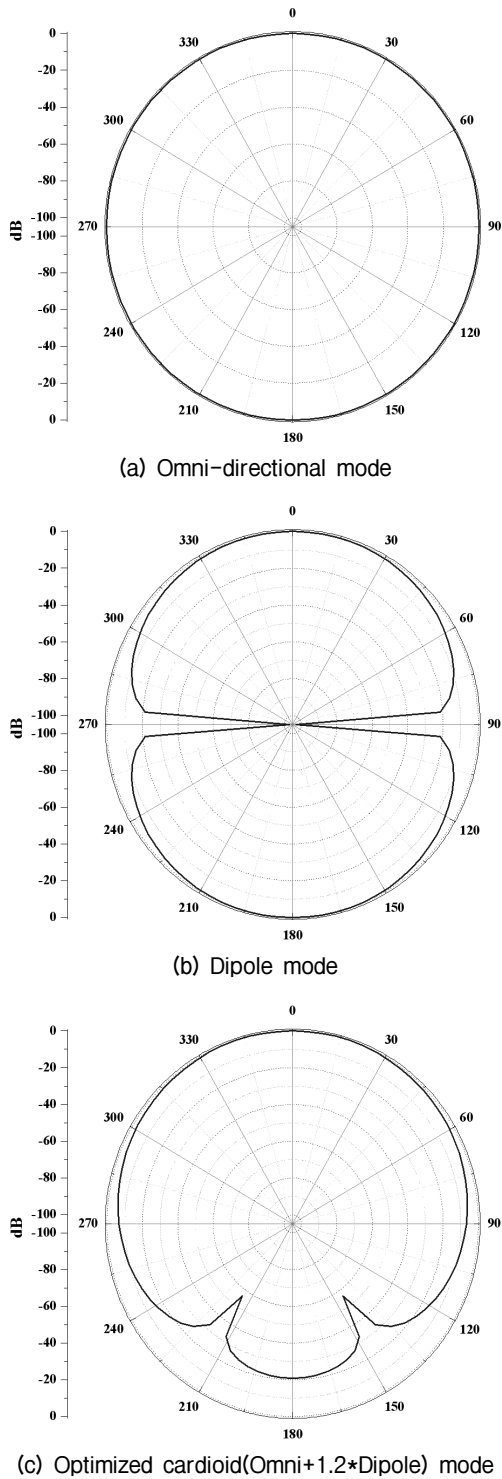


Fig. 9. Reception beam pattern of the multimode spherical sensor using finite element analysis.

Fig. 9는 Fig. 6에 나타낸 구형 센서의  $\theta$ 방향(Y-Z 평면) 수신 빔 패턴이다. 계산된 주파수는 800 Hz이다.

Fig. 9(a)는 8개 세라믹 조각의 출력 전압을 모두 합한 무지향 모드 ( $V_1+V_2+V_3+V_4+V_5+V_6+V_7+V_8$ ) 조합 값을 정규화한 빔 패턴이다. Fig. 9(b)는 쌍극자 모드 ( $V_1+V_2+V_3+V_4 - (V_5+V_6+V_7+V_8)$ ) 조합 값을 정규화한 빔 패턴이다. 그리고 Fig. 9(c)는 무지향 모드 정규화 결과( $omni_{norm}$ )와 쌍극자 모드 정규화 결과( $dipole_{norm}$ )를 합하고 앞서 이론식에서 도출한 1.2의 가중치를 취한 최적화 심장형 빔 패턴이다. Fig. 9의 유한요소 해석 결과는 수식을 이용하여 구한 Fig. 3과 Fig. 5의 빔 패턴 결과와 동일한 것을 확인할 수 있다. 따라서 2절에서 구한 이론식을 이용한 빔 패턴이 타당함을 검증하였고, 동시에 Fig. 6의 유한요소 모델은 구형 벡터 센서의 특성을 적절히 나타낼 수 있음을 확인하였다.

#### IV. 구조 변수에 따른 성능 변화와 특성 분석

본 절에서는 구형 센서를 이루는 구조 변수에 따른 센서의 수신 감도 RVS의 변화를 분석하여, 구형 벡터 센서의 감도를 향상시킬 수 있는 방안을 도출하고자 하였다. 구형 센서의 구조는 Fig. 6과 같이 구의 반경과 압전 세라믹 두께에 의해 결정되므로, 이들 두 변수에 대해서 무지향 모드와 쌍극자 모드 조합의 800 Hz, 1600 Hz에서의 RVS 값을 계산하였다. Fig. 10은 센서의 반경에 따른 RVS의 변화 경향을 나타낸다. 800 Hz, 1600 Hz 모두 구형의 반경이 커짐에 따라 무지향 모드와 쌍극자 모드의 RVS가 증가하는 경향을 보였다. 이는 구형 센서의 전체 크기가 커지면서 수신 면적의 증가로 감도가 상승한 것으로 판단된다.

Fig. 11은 세라믹 두께에 따른 RVS의 변화 경향을 보인다. 800 Hz, 1600 Hz에서 세라믹의 두께가 두꺼워짐에 따라 쌍극자 모드의 RVS는 조금이나마 증가하는 경향이 있지만, 무지향 모드의 RVS는 전체적으로 감소하는 경향을 보인다. 이는 구형 센서의 구조상 8 조각의 각 세라믹들이 서로 부착되어 있으므로, 세라믹 두께가 두꺼워질수록 인접 세라믹과의 구속력이 강해져 나타나는 현상이라 판단된다.

이상의 결과로부터 구형 벡터 센서의 감도를 높이



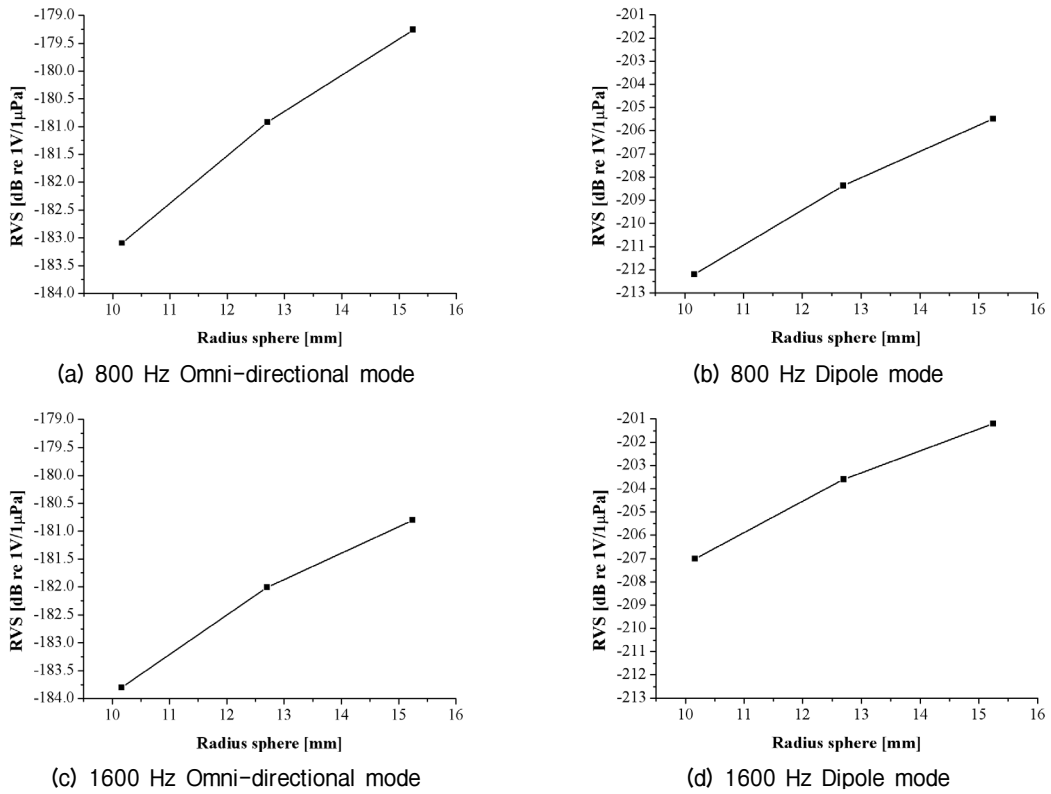


Fig. 10. Variation of RVS in relation to radius of the multimode spherical sensor.

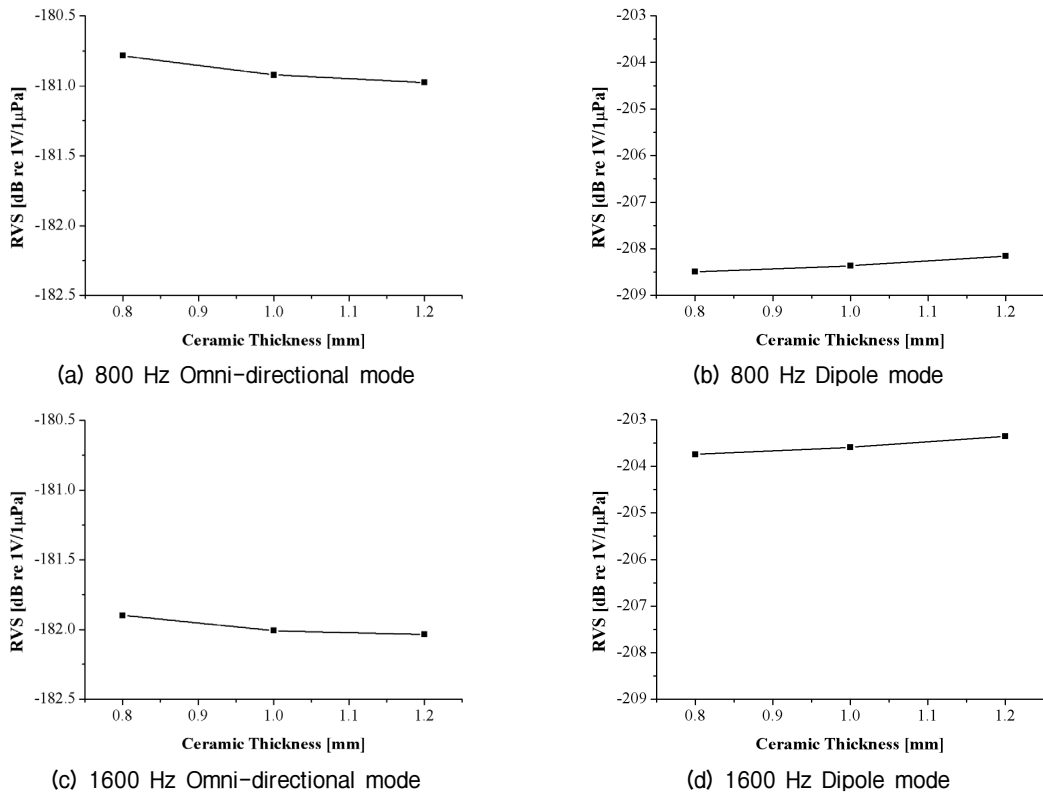


Fig. 11. Variation of RVS in relation to ceramic thickness of the multimode spherical sensor.

기 위해서는 구형의 반경을 크게, 세라믹 두께를 얇게 만들수록 유리한 것으로 나타났다.

### V. 결 론

본 연구에서는 압전 구형 센서를 이용해 외부에서 들어오는 음원의 방향을 분석할 수 있는 수중 음향 벡터 센서를 제안했다. 음원의 방향을 파악하기 위한 방법으로 구형 센서의 다중 수신 모드를 이용하였으며, 무지향 모드를 정규화한 결과와 쌍극자 모드를 정규화한 결과를 더하면 심장형 빔 패턴을 구현할 수 있고, 이 심장형 빔 패턴을 이용하면 특정 방향으로 입사되는 음파만을 수신할 수 있음을 수식과 유한요소 해석을 통해 확인하였다. 이때 외부 음압의 크기는 무지향 모드의 조합으로 알 수 있다. 그리고 무지향 모드와 쌍극자 모드를 단순히 더하기만 한 심장형 빔 패턴보다 빔 폭도 더 좁고 수신 방향 감도도 더 높은 패턴을 구현하기 위해, 쌍극자 모드에 인가되는 가중치( $\alpha$ )의 영향을 분석해서 -3 dB 빔 폭을 124.8°, 감도차를 1.02 까지 구현할 수 있었다.

나아가 구형 센서의 수신 감도를 높이기 위한 방법으로는 설계변수인 구의 반경과 세라믹 두께의 영향을 분석한 결과, 구의 반경을 크게, 세라믹 두께를 얇게 만들수록 유리한 것으로 나타났다.

이상으로 본 연구에서 제안한 다중 수신 모드 구형 센서는 하나의 센서로 외부에서 인가되는 음압의 크기와 방향을 동시에 탐지할 수 있는 벡터 센서로 사용할 수 있음을 확인하였다.

### 감사의 글

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다(계약번호 UE120005DD).

### 참 고 문 헌

1. C. H. Sherman and J. L. Butler, *Transducers and Arrays for Underwater Sound* (Springer, New York, 2007).
2. J. H. Battocletti and T. A. Knox, "Spherical finite element analysis," *IEEE Trans. Mag.* **30**, 5008-5014 (1994).
3. J. T. Fielding, Jr., D. Smith, R. Meyer, Jr., S. Trolier-

4. McKinsty, and R. E. Newnham, "Characterization of PZT hollow-sphere transducers," in *Proc. Ninth IEEE International Symposium on Applications of Ferroelectrics*, 202-205 (1995).
5. S. Alkoy, A. Dogan, A. C. Hladky, P. Langlet, J. K. Cochran, and R. E. Newnham, "Miniature piezoelectric hollow sphere transducers (BBs)," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control.* **44**, 1067-1076 (1997).
6. J. O. Kim, J. G. Lee, and H. Y. Chun, "Radial vibration characteristics of spherical piezoelectric transducers," *Ultrasonics*, **43**, 531-537 (2005).
7. H. C. Schau and A. Z. Robinson, "Passive source localization employing intersecting spherical surfaces from time-of-arrival differences," *IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process.* **35**, 1223-1225 (1987).
8. M. J. D. Rendas and J. M. F. Moura, "Cramer-rao bound for location system in multipath environments," *IEEE Trans. Signal Process.* **39**, 2593-2610 (1991).
9. 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.* **83**, 571-587 (1988).
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. J. L. Butler and S. L. Ehrlich "Superdirective spherical radiator," *J. Acoust. Soc. Am.* **61**, 1427-1431 (1977).
13. S. H. Ko and H. L. Pond, "Improved design of spherical multimode hydrophone," *J. Acoust. Soc. Am.* **64**, 1270-1277 (1978).
14. A. L. Butler and J. L. Butler, "Multimode directional telesonar transducer," in *Proc. IEEE OCEANS 2000 MTS Conference and Exhibition*, **2**, 1289-1292 (2000).
15. A. L. Butler, J. L. Butler, and J. A. Rice, "A tri-modal directional transducer," *J. Acoust. Soc. Am.* **115**, 658-665 (2004).
16. O. B. Wilson, *Introduction to Theory and design of sonar transducers* (Peninsula Publishing, Los Altos, CA, 1988).

### 저자 약력

▶ 임 영 섭 (Youngsub Lim)



2007년 대구대학교 정보통신공학부 학사 졸업  
 2009년 경북대학교 센서 및 디스플레이 공학과 석사 졸업  
 2009년 ~ 현재 경북대학교 센서 및 디스플레이공학과 박사 과정  
 <관심분야> 수중 음향, 초음파 및 탄성파

## ▶ 이 재 영(Jaeyoung Lee)



2012년 영남대학교 신소재공학부 학사  
졸업  
2012년~현재 경북대학교 센서 및 디  
스플레이 공학과 석사 과정  
<관심분야> 수중 음향, 초음파 및 탄성파

## ▶ 조 치 영(Cheeyoung Joh)

1984년 2월: 부산대학교 기계설계학과 (공학사)  
1986년 2월: 한국과학기술원 기계공학과(공학석사)  
1992년 8월: 한국과학기술원 기계공학과 (공학박사)  
1986년 3월 ~ 1988년 2월: 한국중공업 열교환기 설계실 주임  
연구원  
1992년 10월 ~ 현재: 국방과학연구소 수중 음향센서연구실  
책임연구원  
<관심분야> 수중음향센서

## ▶ 서 희 선(Heeseon Seo)

1989년 2월: 부산대 기계설계학과(공학사)  
1991년 2월: KAIST 기계공학과(공학석사)  
2002년 3월 ~ 2005년 8월: KAIST 기계공학과(공학박사)  
1991년 3월 ~ 현재: 국방과학연구소 책임연구원  
2010년 ~ 현재: 국방과학연구소 수중센서연구실 실장  
<관심분야> 수중음향센서

## ▶ 노 용 래(Yongrae Roh)

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