

곡면 배열 트랜스듀서의 방사 특성 해석

Analysis of the Radiation Pattern of Conformal Array Transducers

김 회 용*, 노 용 래*
(Hoeyong Kim*, Yongrae Roh*)

*경북대학교 기계공학과

(접수일자: 2010년 7월 21일; 수정일자: 2010년 9월 1일; 채택일자: 2010년 9월 6일)

곡면에 지지된 음원의 경우 음원의 배열 방식에 따라 방사되는 음장이 매우 복잡한 특성을 가진다. 본 연구에서는 곡면 배열 트랜스듀서를 구성하는 음원을 등각, 등간격 그리고 geodesic dome 형태로 배열하여, 각각의 배열 방식에 따른 음향 방사 패턴 함수를 유도하고, 그에 따라 방사 패턴을 해석하였다. 해석 결과를 바탕으로 3가지 배열 방법 가운데 상대적으로 주엽의 빔 폭이 크고 부엽의 크기가 작은 경향을 보이는 등간격 배열을 곡면 배열 트랜스듀서의 구조로 선정하였다. 본 연구 결과는 곡면 배열 트랜스듀서의 구조 설계에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어: 곡면 배열, 등각, 등간격, Geodesic dome

투고분야: 수중 음향 (5.6)

The radiation pattern of conformal transducers installed on a curved surface is likely to be complicated depending on the array pattern on the curved surface. In this research, the acoustic sources constituting a conformal transducer are arrayed in equi-angle, equi-interval, and geodesic dome forms, and the radiation pattern function of each of the array geometries has been derived, and therewith the radiation pattern has been analyzed for each array geometry. Based on the analysis result, we have determined the equi-interval array geometry that provides the widest beam width with the lowest side lobe level among the three array geometries. Results of the present work are expected to be utilized to the design of conformal transducer structures.

Keywords: Conformal array, Equal angle, Equal interval, Geodesic dome

ASK subject classification: Underwater Acoustics (5,6)

I. 서론

잠수함이나 어뢰 등에 사용되는 수중 통신용 음향 배열 트랜스듀서는 음파가 매우 복잡한 경로를 통해서 전파되는 수중 환경에서 다양한 잠수함이나 트랜스듀서 등과 통신을 수행 할 수 있어야 한다. 잠수함이나 어뢰 등은 평면 뿐만 아니라 여러 형태의 곡면으로 이뤄져 있기 때문에 통신의 성능을 높이기 위해서는 곡면에 트랜스듀서가 장착 될 수 있어야 하는데, 이를 위해서는 먼저 곡면에 트랜스듀서가 배열된 곡면 배열형 (Conformal Array) 음향 트랜스듀서에 대한 특성 연구가 필수적으로 요구된다.

곡면에 지지된 음원의 경우 곡면의 영향으로 방사되는

음장이 매우 복잡한 특성을 가지고 있다 [1]. 이는 곡면이라는 기하학적인 구조 때문에 나타나는 현상으로 곡면 배열 트랜스듀서 설계 시 고려해야 할 중요한 요소이다 [2-5]. 음원간의 상호작용에 관한 연구는 Audoly [6] 외 다수에 의해 수행되었다. 또한, 불균일한 음장 분포를 발생시키는 요인 중의 하나인 음원이나 트랜스듀서의 산란 특성에 대해서는 Carson 및 Bobber에 의해 연구가 수행되었으며 [7, 8], 또 다른 주요 원인인 배플의 영향에 관해서는 He, Ma 및 Audoly 등에 의해 연구가 이뤄졌다 [6, 9]. 앞에서 언급한 원인 외에 곡면 배열 트랜스듀서의 방사특성에 영향을 끼치는 중요한 요소 가운데 하나가 음원의 배열 구조이다.

본 연구에서는 곡면 배열 트랜스듀서의 구조에서 배플과 산란의 영향은 일정하다고 가정하고, 등각 배열, 등간격 배열 그리고 geodesic dome 배열 방식 등의 3가지 음

원 배열 방식에 따른 곡면 배열 트랜스듀서의 방사 특성을 연구하였다. 먼저 등각 배열 방식은 곡면 상에서 일정 간격을 가지는 각층에 배열되는 음원의 개수와 음원간의 각도를 동일하게 하는 것이다. 이 방법은 음원이 배열되는 각 층의 원주가 곡면의 극으로 갈수록 작아지기 때문에 각 층에 따라 음원간의 간격이 달라지는데, 극 쪽 (Z축)에 가까운 층일수록 음원 간격이 작아지는 배열 방법이다. 다음으로 모든 음원의 간격을 일정하게 하는 등간격 배열 방식으로서, 각 층간의 간격과 각 층에 배열된 음원간의 간격을 같게 하는 것이다. 하지만 이 경우 음원의 크기는 고정되어있고, 음원이 위치하게 될 각 층의 원주의 길이는 조금씩 차이가 발생하게 되는데 그 차이가 음원의 크기와 정확하게 일치하지 않기 때문에 각 층에 놓인 음원의 간격에는 서로 간에 약간의 오차가 존재하게 된다. 마지막으로 geodesic dome 형태의 배열 방법으로 모든 음원들 간의 간격을 등간격으로 배열하는 방식의 경우, 적도 층 (가장 음원이 많이 배열되는 층)에 배열되는 음원의 수가 4의 배수여야 하고, 극 방향으로 한 개씩 층이 올라갈 때마다 음원의 수는 4개씩 감소하고, 음원 층의 개수도 적도 층의 음원 개수에 의해 결정된다. 이는 음원의 간격은 등간격으로 배열 할 수 있으나 음원의 개수 선정에는 제약이 따르는 방식이다.

본 논문에서는 앞에서 언급한 3가지 배열 방식에 대해서 곡면 배열 트랜스듀서의 방사 특성 계산에 사용될 수식을 전개하였으며, 이 수식을 바탕으로 각 배열 방식에 따른 음향 방사 특성을 분석하였다. 나아가 분석 결과를 바탕으로 넓은 탐지 영역을 가질 수 있도록 주엽 (main lobe)의 빔 폭은 최소화시키고 부엽 (side lobe)의 크기가 상대적으로 작은 빔 형상을 가지는 곡면 배열 트랜스듀서의 구조를 구현하고자 한다.

II. 곡면 배열 트랜스듀서의 방사 패턴

본 연구에 사용될 곡면 배열 트랜스듀서의 형태는 그림 1에 나타난 것처럼 반구의 윗면을 제거한 형태이다. 구면 배열의 크기와 사용 주파수는 현재 수중 어뢰에 적용되어 널리 사용되어 지고 있는 대표적인 값을 선정하여 사용하였으며, 음원의 크기는 구면 배열의 크기와 주파수를 고려하여 기준에 사용되어 지고 있는 트랜스듀서 중 음원의 간격을 반 파장으로 배열 할 수 있는 트랜스듀서의 크기인 직경 23 mm를 적용하였다.

그림 2에 나타난 반경이 a 인 구형 배열 트랜스듀서로

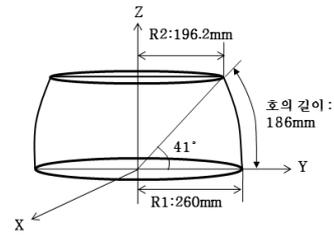
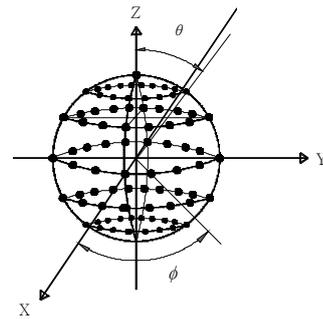


그림 1. 해석 대상 곡면 배열 트랜스듀서의 구조
Fig. 1. Structure of the conformal array transducer to be analyzed.



- N 구형 좌표계에서 θ 방향으로 배열된 음원 층의 개수
- θ_n 구형 좌표계에서 θ 방향 n 번째 음원의 각도
- M 구형 좌표계에서 ϕ 방향으로 배열된 음원의 개수
- ϕ_m 구형 좌표계에서 ϕ 방향 m 번째 음원의 각도
- θ 구형 좌표계에서 r 만큼 떨어진 위치가 Z축과 이루는 각도
- ϕ 구형 좌표계에서 r 만큼 떨어진 위치가 XY평면상에서 X축과 이루는 각도
- a 구형 배열 트랜스듀서의 반지름
- r 구형 배열 트랜스듀서 중심에서 far field 특정위치까지 거리

그림 2. 구 상에 배열된 점 음원
Fig. 2. Array of point sources on a sphere.

부터 방사 음압의 기본 수식을 유도하고, 이 수식을 이용하여 방사 특성을 분석하고자 하는 그림 1의 곡면 배열 트랜스듀서의 구조에 적합하도록 방사 패턴 함수를 도출하였다. 먼저 구형 배열 트랜스듀서의 방사 음압 수식을 식 (1)에 나타내었다 [10-13].

$$P = \frac{A}{r} e^{i(\omega t - kr)} \left[\sum_{m=1}^M \sum_{n=2}^{N-1} e^{jka \cos \gamma} + \sum_{n=1}^1 e^{jka \cos \gamma} + \sum_{n=N}^N e^{jka \cos \gamma} \right]$$

where $\cos \gamma = \sin \theta_n \sin \theta \cos(\phi - \phi_m) + \cos \theta_n \cos \theta$ (1)

$$\theta_n = \frac{180 \times (n-1)}{N-1}, \phi_m = \frac{360 \times (m-1)}{M}$$

단, ω 는 각 주파수, t 는 시간, k 는 파수, A 는 음압의 크기를 나타낸다. 식 (1)에 나타난 구형 배열 트랜스듀서의 수식으로부터 Z축 상의 극 부분 (가장 위쪽과 아래쪽)에 해당하는 항을 제거하여 정리하면, 그림 1에 나타난 곡면 배열 트랜스듀서의 방사 패턴을 구현하기 위해 사용

될 음압 수식을 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

$$P = \frac{A}{r} e^{j(\omega t - kr)} \left[\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N e^{jka \cos \gamma} \right] \quad (2)$$

특정 음원을 이용하여 배열 트랜스듀서를 구현할 경우 개별 음원의 형태에 따른 directivity를 동시에 고려해 주어야 하는데, 본 연구에서는 그림 2의 구형 배열 트랜스듀서에 적용될 음원의 종류로 반지름이 r_a 인 디스크 음원을 사용하였으며, 1차 Bessel 함수 (J_1)로 이뤄진 디스크 음원의 방사 패턴 함수를 식 (3)에 나타내었다.

$$H_s(\theta, \phi) = \left[\frac{2J_1(kr_a \sin \gamma)}{kr_a \sin \gamma} \right] \quad (3)$$

식 (3)의 J_1 는 식 (1)에서의 정의와 동일하다. 또한, 그림 1의 곡면 배열 트랜스듀서에서 음원 뒤쪽으로 방사되는 음향이 전면으로 방사되는 방사 패턴에 영향을 끼치지 않도록 하기 위해서, 각 음원의 방사 패턴에 식 (4)의 특성을 가지는 Heaviside 함수를 적용하였다 [14].

$$B_{mn}(d) = \begin{cases} 1, & d > 0 \\ 0, & d \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

where $d = \frac{|\cos \gamma|}{\cos \gamma}$

예를 들어서 Heaviside 함수를 적용하지 않은 디스크 음원의 방사 패턴을 그림 3에 나타내었고, 이를 적용한 디스크 음원의 방사 패턴을 그림 4에 나타내었다.

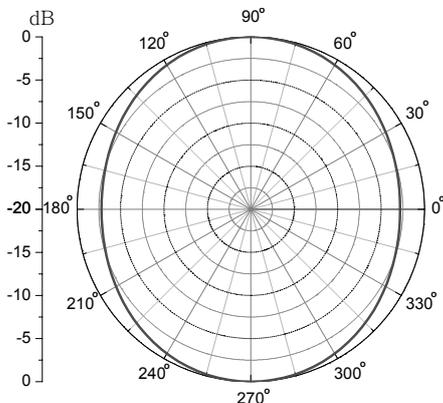


그림 3. Heaviside 함수를 고려하지 않은 디스크 음원의 방사 패턴 ($kr_a = 1.56$)
 Fig. 3. Beam-pattern of a disc source without the Heaviside function ($kr_a = 1.56$).

결론적으로 곡면 배열 트랜스듀서의 방사패턴 함수는 점 음원으로 구성된 곡면 배열 트랜스듀서의 방사패턴 함수와 디스크 음원의 방사패턴 함수 및 Heaviside 함수를 모두 적용한 식 (5)로 나타내어진다.

$$H_{tot}(\theta, \phi) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N e^{jka \cos \gamma} \times \left| \frac{2J_1(kr_a \sin \gamma)}{kr_a \sin \gamma} \right| \times B_{mn}(d) \quad (5)$$

식 (5)는 그림 2의 곡면 배열에 대한 일반적인 수식이다. 아래에서는 그림 1에 보인 구체적인 곡면 형태에 대해 기본 수식인 식 (5)와 음원의 위치를 나타내어주는 요소인 θ_n 및 ϕ_m 을 수정하여 다음의 각 배열 방식에 적합한 수식을 유도하였다.

2.1. 등각 배열방식

등각 배열 방식의 경우 θ 방향으로 형성된 각각의 음원 층에 배열되는 음원의 개수는 모두 동일하기 때문에, 모든 음원층의 ϕ 방향 음원들의 간격은 등각을 유지하게 된다. 등각 배열의 경우 그림 5 (a)에 보인 바와 같이 극으로 갈수록 음원간의 간격이 작아지며, 적도로 갈수록 음원간의 간격이 넓어지는 특징을 가지고 있다. 본 논문에서는 그림 1에 나타낸 크기의 곡면 배열 구조에 대해서 그림 5 (b)와 같이 θ 방향으로의 음원 간격이 사용 주파수에서의 반 파장에 해당하는 23 mm가 되도록 8개의 음원 층을 구성하여 번호를 1 ~ 8번으로 지정하였다. ϕ 방향으로의 계산하고자 하는 음원층 중에 번호가 가장 작은 음원층의 음원 간격이 $\lambda/2$ (λ : 파장)에 가장 가깝도록 하고, 그때의 음원의 개수를 나머지 모든 음원층에 동일하게 적용하였다. 즉, 계산에 사용되는 모든 음원층의 음원 개

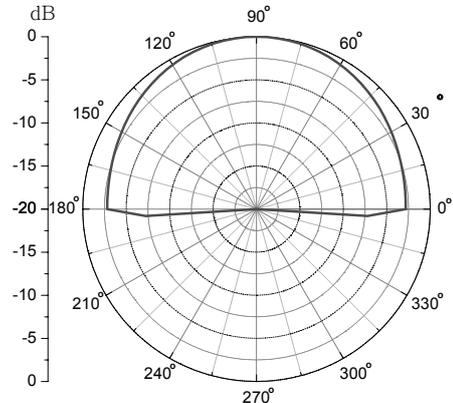


그림 4. Heaviside 함수를 고려한 디스크 음원의 방사 패턴 ($kr_a = 1.56$)
 Fig. 4. Beam-pattern of a disc source coupled with the Heaviside function ($kr_a = 1.56$).

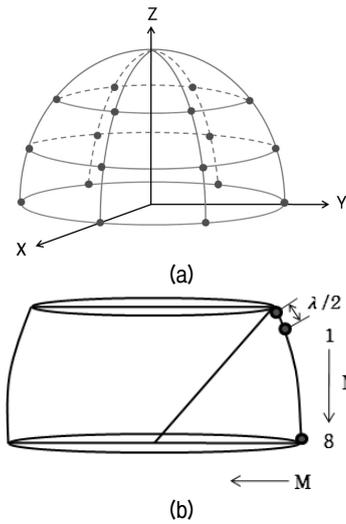


그림 5. 음원의 등각 배열: (a) 등각 배열 형태 (b) 배열간격
 Fig. 5. Equi-angle arrangement of the conformal array:
 (a) structure of the equi-angle arrangement
 (b) arrangement interval and axes.

수는 동일하고, 각 음원들이 이루는 간격의 극점을 중심으로 각도로 환산한 값 또한 모두 동일한 구조를 가진다. 식 (6)은 이 원리를 적용하여 음원 위치를 나타내어 주는 식 θ_n 및 ϕ_m 의 수정을 통해 얻은 등각 배열 방식 곡면 배열 트랜스듀서의 방사패턴 함수이다.

$$H_{tot}(\theta, \phi) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N e^{ika \cos \gamma} \times \left| \frac{2J_1(kr_a \sin \gamma)}{kr_a \sin \gamma} \right| \times B_{mn}(d) \quad (6)$$

where $\cos \gamma = \sin \theta_n \sin \theta \cos(\phi - \phi_m) + \cos \theta_n \cos \theta$

$$\theta_n = 49 + \frac{41 \times (n-1)}{N-1}, \phi_m = \frac{360 \times (m-1)}{M}$$

2.2. 등간격 배열 방식

모든 음원간의 간격을 동일하게 배열한 곡면 배열 트랜스듀서의 방사패턴 함수는 식 (7)에 나타내었다. 그림 6에 나타낸 것처럼 등각 배열의 경우 각각의 음원층에 배열되는 음원의 개수가 동일하기 때문에 음원간의 원주 방향 길이 간격은 다르다. 그러나 등간격 배열 방식에서는 원칙적으로 각 층에 배열되는 음원간의 간격은 동일해 되, 각 층의 원주 길이에 따라 음원의 개수가 달라지게 된다. 그러나 실제로는 원주의 길이가 항상 특정 간격의 정수 배일 수는 없으므로, 본 연구에서는 θ 방향으로는 8개의 음원층으로 구성하였고, ϕ 방향으로는 수치적 계산을 통해 최대한 $\lambda/2$ 에 가장 가까운 간격으로 배열하였다. 이렇게 배열된 각층의 방사패턴들을 더하면 등간격 배열 방식 곡면 배열 트랜스듀서에 대한 방사패턴 합

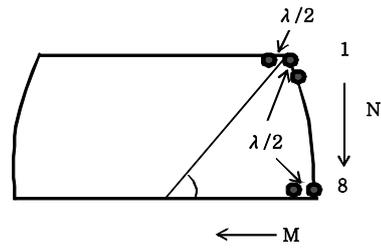


그림 6. 음원의 등간격 배열
 Fig. 6. Equi-interval arrangement of acoustic sources.

수 식 (7)을 얻을 수 있다.

여기서, M_1, M_2, \dots, M_N 은 각 음원층에 배열되는 음원의 개수이고, 그림 6에 나타낸 것처럼 전체 음원층의 개수를 나타내는 N 은 8이다.

$$H_{tot}(\theta, \phi) = \sum_{m=1}^{M_1} e^{ika \cos \gamma_1} \times H_{s1}(\theta, \phi) \times B_{m1}(d) \Bigg|_{n=1} + \sum_{m=1}^{M_2} e^{ika \cos \gamma_2} \times H_{s2}(\theta, \phi) \times B_{m2}(d) \Bigg|_{n=2} + \dots + \sum_{m=1}^{M_N} e^{ika \cos \gamma_N} \times H_{sN}(\theta, \phi) \times B_{mN}(d) \Bigg|_{n=N} \quad (7)$$

$$\text{where } \begin{cases} \cos \gamma_1 = \sin \theta_1 \sin \theta \cos(\phi - \phi_{m1}) + \cos \theta_1 \cos \theta \\ \vdots \\ \cos \gamma_N = \sin \theta_N \sin \theta \cos(\phi - \phi_{mN}) + \cos \theta_N \cos \theta \end{cases}$$

$$\theta_n = 49 + \frac{41 \times (n-1)}{N-1},$$

$$\phi_{m1} = \frac{360 \times (m-1)}{M_1}, \phi_{m2} = \frac{360 \times (m-1)}{M_2}, \dots, \phi_{mN} = \frac{360 \times (m-1)}{M_N}$$

H_{sN} = n 번 음원층에 배열된 음원의 directivity function

$$= \left[\frac{2J_1(kr_a \sin \gamma)}{kr_a \sin \gamma} \right]$$

2.3. Geodesic 배열 방식

Geodesic 배열 방식은 모든 음원간의 간격을 동일하게 배열하는 것이다 [15-16]. 적도에 해당 되는 음원층에 4의 배수의 음원 개수를 배열하면 음원간의 간격과 θ 방향 층의 개수가 정해진다. 그리고 음원층이 극쪽으로 갈수록 음원의 개수는 4개씩 감소하게 된다. 그림 7에서 보이는 바와 같이 구를 8등분한 후 다시 분리된 1/8의 구를 정삼각형 형태로 분리하는 방법으로 꼭지점 간의 간격을 모두 동일하게 한다. Geodesic 배열 방식은 음원이 삼각형의 꼭지점에 위치하기 때문에 앞에서 계산한 등각 배열 방식과 달리 모든 음원간의 간격을 동일하게 배열할 수 있다. 또한 등간격 배열 방식은 원주의 길이에 따라 배열되는 음원의 개수가 달라지기 때문에 모든 음원의 간격이 정확히 동일하지 않으며, 따라서 실제로는 등간격에 가장 가까운 근사값을 적용하여 배열하므로 geodesic 배열

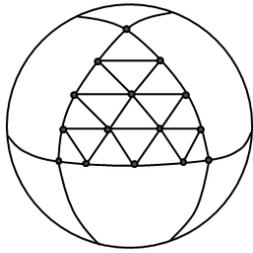


그림 7. 음원의 geodesic 배열
Fig. 7. Geodesic arrangement of acoustic sources.

방식과는 차이가 있다. 하지만 geodesic 배열법은 음원의 개수를 제한적으로 적용해야하는 단점이 있다. Geodesic 배열법으로 배열하는 경우 아래 그림 7에서와 같이 적도 부근의 음원의 수는 최소 4개부터 적용이 가능하고, θ 방향으로 한 개의 층이 증가할 때 마다 4개씩 음원이 감소 되어야 하기 때문에 항상 4의 배수 개수만 적용이 가능하다. 이 배열 방법을 그림 1에 나타난 곡면 배열 트랜스듀서에 적용하였으며, ϕ 및 θ 방향으로는 수치적 계산을 통해 최대한 $\lambda/2$ 에 가까운 간격으로 배열하였다. 따라서 이러한 배열 방식을 기본 수식인 식 (5)에 적용하면 geodesic 배열 방식 곡면 배열 트랜스듀서에 대한 방사 패턴 함수를 식 (8)과 같이 구할 수 있다. 여기서 M 은 적도에 위치한 음원층의 음원 개수이며, M_n 는 각 음원층에 배열되는 음원의 개수이다.

$$H_{tot}(\theta, \phi) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^{M_n} e^{ika \cos \gamma_n} \times H_{sn}(\theta, \phi) \times B_{mn}(d) \quad (8)$$

where $\cos \gamma_n = \sin \theta_n \sin \theta \cos(\phi - \phi_{mn}) + \cos \theta_n \cos \theta$

$$\theta_n = 49 + \frac{41 \times (n-1)}{(M/4)-10}, \phi_{mn} = \frac{360 \times (m-1)}{M_n}, M_n = 4(n+9)$$

where n = 음원층의 번호

III. 음원의 등각배열에 따른 곡면 배열 트랜스듀서의 방사 특성

이 절에서는 2.1 절에서 유도한 식 (6)을 바탕으로 그림 5에 나타난 것처럼 음원이 등각으로 배열된 곡면 배열 트랜스듀서의 방사특성을 계산하였다. 먼저, θ 방향으로 마지막 층, 즉 적도에 해당하는 층이 8번이 되도록 하였으며, 음원층의 개수를 4개 (5 ~ 8번)부터 시작하여 곡면 배열 트랜스듀서의 치수 상 배치될 수 있는 가장 작은 음원층 번호인 1번까지 (8개) 한 개 층씩 증가시키면서 각각의 경우에 대해 방사 패턴을 계산하였다. 또한 θ 방향의 마지막에 해당하는 층을 8번에서 5번까지 하나씩

표 1. 여러 등각 배열의 방사 특성

Table 1. Radiation properties of different equi-angle arrangements.

마지막 음원층 번호	case	음원층 번호 및 개수	-3dB Beam width (degree)	side lobe level (dB)
8번	1	5 - 8 (4개 층)	24	-2.5
	2	4 - 8 (5개 층)	18	-4.8
	3	3 - 8 (6개 층)	16	-4.3
	4	2 - 8 (7개 층)	15	-5
	5	1 - 8 (8개 층)	12	-5
7번	6	4 - 7 (4개 층)	25	-6.5
	7	3 - 7 (5개 층)	20	-1
	8	2 - 7 (6개 층)	16	-2
6번	9	1 - 7 (7개 층)	16	-5
	10	3 - 6 (4개 층)	26	-2
	11	2 - 6 (5개 층)	20	-4
5번	12	1 - 6 (6개 층)	14	-2
	13	2 - 5 (4개 층)	26	-4
	14	1 - 5 (5개 층)	18	-3.5

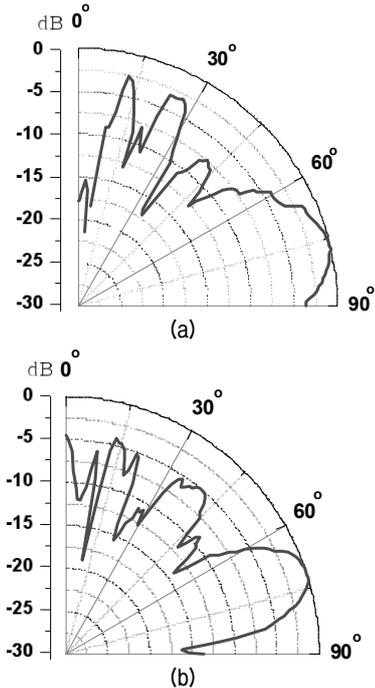


그림 8. 등각배열에 따른 방사 패턴 (마지막 음원층 번호: 8): (a) $n = 5 \sim 8, M = 66$ (b) $n = 3 \sim 8, M = 60$

Fig. 8. Beam pattern for different equi-angle arrangements (last source layer number: 8): (a) $n = 5 \sim 8, M = 66$ (b) $n = 3 \sim 8, M = 60$.

줄여 가면서 방사특성을 확인하였으며, 그 결과를 표 1에 나타내었다. 그림 8은 마지막 층 번호가 8인 몇 가지 경우의 YZ 면에서의 방사 패턴을 예시로 나타낸 것으로서, 모든 계산을 그림 8과 같은 형태로 수행하였다. 결과에 나타난 그래프의 좌표축 방향은 그림 5 (a)와 동일하다.

대부분의 결과에 나타난 부엽의 경우 빔 폭은 작으나 음압의 크기가 크고 그 개수가 많은데, 이는 구의 표면에 위치한 음원들의 배열이 극쪽으로 모이는 곡면의 형태를 취하고 있기 때문인 것으로 보인다. θ 방향 층의 개수가 증가 할수록 주엽의 음압 크기는 커지나 -3dB 에서의 빔 폭은 작아지는 경향을 나타내는데 이는 음원의 개수의 증가로 인해 방사 면적이 넓어졌기 때문인 것으로 판단된다. 계산에 사용된 음원층의 개수가 같고 θ 방향의 마지막 층에 해당하는 번호가 작아질수록 (즉, 같은 개수의 음원층이 Z축에 가까워질수록) 주엽의 경우 각도는 Z축 방향으로 올라오는 경향을 나타냈으며, 음압은 감소하였고, -3dB 빔 폭은 뚜렷한 변화 경향이 나타나지 않았다. 이는 극쪽에 가까울수록 음원간의 간격이 작아지고 부엽들 간의 상호 작용이 커지기 때문에 상대적으로 주엽의 음압이 작아지고 부엽의 음압이 커지는 것으로 판단된다. 첫 번째 부엽의 경우 음압이 조금 다르게 나타나기는 하나 큰 변화 경향을 보이지는 않았다.

IV. 음원의 등간격 배열 따른 곡면 배열 트랜스듀서의 방사 특성

이 절에서는 2.2 절에서 유도한 식 (7)을 바탕으로 그림 6에 나타난 것처럼 ϕ 및 θ 방향의 음원 간격이 모두 $\lambda/2$ 가 되도록 배열된 곡면 배열 트랜스듀서의 방사 패턴을 계산하였다. 계산은 등각 배열과 같은 방법으로 수행하였으

며, 그 결과를 표 2에 나타내었다. 결과를 살펴보면 θ 방향 음원층의 수가 증가 할수록 전체 방사면적이 넓어지기 때문에 주엽의 빔 폭은 작아지고 음압은 커지는 것을 알 수 있다. 또한, θ 방향의 마지막 층에 해당하는 번호가 작아질수록 주엽의 각도는 Z축 방향으로 가까워지며, 빔 폭은 증가하는 경향을 보였다. 이 경우에도 Z축 방향으로 부엽의 크기가 크게 나오는데 그 이유는 등각 배열에서 설명한 것과 같이 Z축으로 모이는 곡면 구조의 특성 때문인 것으로 판단된다. 등간격으로 배열한 경우 등각 배열의 경우보다 음압이 높게 나왔는데, 이는 배열된 음원의 수가 증가했기 때문이다. 빔 폭의 경우도 등각 배열보다 더 크게 나타나는데, 등각 배열의 경우 가장 위쪽에 해당하는 음원층의 간격을 $\lambda/2$ 로 배열했기 때문에 나머지 음원층들은 $\lambda/2$ 보다 더 큰 간격을 가지는 반면, 등간격 배열의 경우는 모든 음원층의 음원 간격이 $\lambda/2$ 이기 때문에 이러한 결과가 나오는 것으로 판단된다. 주엽과 부엽의 상대적 크기는 음원층의 개수에는 큰 영향을 받지 않으나 음원층이 Z축 방향으로 가까워질수록 그 크기는 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 앞에서 설명한 것과 같이 Z축으로 모이는 형상을 지닌 곡면의 특성 때문에 Z축에 가까워질수록 주엽의 크기는 감소하는 반면 부엽의 크기는 더 증가하기 때문에 발생하는 것으로 판단된다.

V. Geodesic 배열에 대한 곡면 배열 트랜스듀서 방사특성

이 절에서는 2.3 절에서 유도한 식 (8)을 바탕으로 geodesic dome 형태로 배열된 곡면 배열 트랜스듀서의 방사 패턴을 계산하였다 [15-16]. 먼저 θ 방향은 8개의 층이 되도록 하였으며 각층의 숫자가 작아짐에 따라 (적도에서 극으로 올수록) 음원의 개수가 4개씩 감소하도록 하여 모든 음원간의 간격이 동일하도록 하였다. 계산은 앞에서 수행한 방법과 동일하게 하였으며, 그 결과를 표 3에 나타내었다. 먼저 주엽과 부엽의 상대적 크기는 음원층의 수와 음원층의 마지막 층 번호에 대해 뚜렷한 변화 경향을 보이지 않았다. θ 방향 음원층의 개수가 증가할수록 전체적인 음원의 개수의 증가와 방사 면적의 증가로 인해 주엽의 음압은 커지고 빔 폭은 작아지는 경향을 나타내었다. θ 방향의 마지막 층에 해당하는 번호가 작아질수록 주엽의 방사 각도는 Z축 방향으로 가까워지고, 주엽의 빔 폭도 커졌다.

표 2. 여러 등간격 배열의 방사 특성
Table 2. Radiation properties of different equi-interval arrangements.

마지막 음원층 번호	case	음원층 번호 및 개수	-3dB Beam width (degree)	side lobe level (dB)
8번	1	5 - 8 (4개 층)	33	-9
	2	4 - 8 (5개 층)	27	-12
	3	3 - 8 (6개 층)	23	-7
	4	2 - 8 (7개 층)	20	-8
	5	1 - 8 (8개 층)	17	-5.5
7번	6	4 - 7 (4개 층)	40	-7
	7	3 - 7 (5개 층)	29	-8
	8	2 - 7 (6개 층)	26	-9
	9	1 - 7 (7개 층)	23	-6
6번	10	3 - 6 (4개 층)	44	-2
	11	2 - 6 (5개 층)	32	-2
	12	1 - 6 (6개 층)	30	-5
5번	13	2 - 5 (4개 층)	45	-4
	14	1 - 5 (5개 층)	30	-6

표 3. 여러 Geodesic 배열의 방사 특성
Table 3. Radiation properties of different geodesic arrangements.

마지막 음원층 번호	case	음원층 번호 및 개수	-3dB Beam width (degree)	side lobe level (dB)
8번	1	5 - 8 (4개 층)	29	-7
	2	4 - 8 (5개 층)	21	-7
	3	3 - 8 (6개 층)	19	-4.5
	4	2 - 8 (7개 층)	16	-5
	5	1 - 8 (8개 층)	14	-7
7번	6	4 - 7 (4개 층)	30	-2
	7	3 - 7 (5개 층)	23	-7
	8	2 - 7 (6개 층)	21	-3
	9	1 - 7 (7개 층)	15	-3.5
6번	10	3 - 6 (4개 층)	31	-6
	11	2 - 6 (5개 층)	27	-3
	12	1 - 6 (6개 층)	18	-5
5번	13	2 - 5 (4개 층)	30	-4
	14	1 - 5 (5개 층)	19	-6

VI. 토론

지금까지 계산한 3가지 배열 방법의 결과를 나타낸 표 1, 2, 3을 바탕으로 그 경향을 비교하기 위해 대표적인 예시로 음원층의 끝 번호가 8로 끝나는 1-5 case들에 대한 비교를 그림 9에 나타내었다. 표 1-3에서 음원층의 끝 번호가 다른 숫자로 끝나는 나머지 case들에 대해서도 유사한 경향들이 확인되었다. 그림 9의 비교 결과를 보면 음원층의 개수가 증가 할수록 3가지 배열 방법 모두 빔폭은 감소하는 경향을 보였으나, 부엽의 크기는 뚜렷한 경향을 보이지 않았다. 음원층의 위치를 극 (Z축)에 가깝게 할수록 등각 배열 방식은 빔 폭이 줄어들고 주엽의 음압이 증가하는 경향을 보인 반면, 등간격 배열 방식과 geodesic 배열 방식은 주엽의 빔 폭이 증가하는 경향을 보였다. 부엽의 크기에 대한 전체적인 경향을 보면 등간격 배열에서는 극 (Z축)에 가까워질수록 감소하지만 등각 배열과 geodesic dome 배열에서는 뚜렷한 변화 경향을 보이지 않았다. 3가지 배열 방법에 대한 비교 결과, 가장 넓은 빔 폭과 상대적은 작은 부엽의 크기는 등간격으로 배열한 경우에 나타났다.

VII. 결론

본 연구에서는 곡면 배열 트랜스듀서의 방사 패턴 함수를 유도하였고, 음원을 등각, 등간격 및 geodesic 방법을

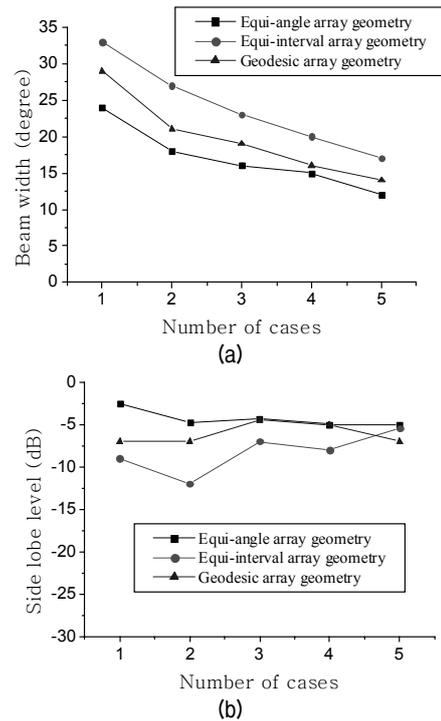


그림 9. 배열 방식에 따른 결과 비교 (마지막 음원층 번호: 8): (a) beam width (b) side lobe level

Fig. 9. Comparison of result in relation to array geometries (last source layer number: 8): (a) beam width (b) side lobe level.

배열하여 그에 따른 곡면 배열 트랜스듀서의 방사 특성을 해석하였다. 그 결과 3가지 배열 방법 가운데 상대적으로 넓은 빔 폭과 작은 부엽의 크기는 등간격으로 배열한 경우에 나타났다.

나아가 각 배열 방식의 특징과 장단점을 비교하면, 음원을 배열함에 있어서 등각 배열의 경우는 한 개 층의 간격이 결정되면 나머지 층에서의 간격은 자동적으로 결정이 되기 때문에 음원의 간격을 조절하는데 한계가 있다. Geodesic 배열의 경우는 모든 음원간의 간격이 일정하다는 장점이 있으나 적도에 해당되는 음원층에 배열되는 음원 개수가 정해지면, 음원층의 개수와 음원의 간격이 자동으로 정해질 뿐만 아니라 음원의 개수 변경이 4의 배수로만 조절이 되므로 정해진 구의 치수에 원하는 간격으로 배열하지 못하는 단점이 있다. 반면 등간격 배열의 경우는 정확한 등간격은 아니지만 등간격에 가깝게 구현할 수 있고, 구의 치수에 따라 음원의 개수를 유연하게 배열시킬 수 있다. 또한, 해석 결과에서도 설계하고자 하는 곡면 배열 트랜스듀서의 성능을 가장 잘 구현하는 것으로 나타났다. 따라서 등간격 배열 방식은 다른 배열 방식에 비해 앞에서 언급한 조건을 가장 잘 구현할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다 (계약번호 UD070054AD).

참고 문헌

1. Z. Y. He and Y. L. Ma, "Optimization of transmitting beam patterns of a conformal transducer array," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 123, no. 5, pp. 2563–2569, 2008.
2. J. N. Decarpigny, "The Design of low-frequency underwater acoustic projectors: Present status and future trends," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 16, pp. 107–122, 1991.
3. G. H. Du, Z. M. Zhu, and X. F. Gong, *Fundamentals of Acoustics*, Nanjing University Press, Nanjing, 2001.
4. J. Lee and I. Seo, "Radiation power estimation for sensor transducer arrays considering acoustic interaction," *Sensors and Actuators A*, A90, pp. 1–6, 2001.
5. Z. Y. He and Y. L. Ma, "Sound field calculating of underwater acoustic projecting transducer array of arbitrary shape," *Applied Acoustics*, 25, pp. 69–75, 2006.
6. C. Audoly, "Some aspects of acoustic interactions in sonar transducer arrays," *Journal of the Acoustical Society of America*, 89, pp. 1428–1433, 1991.
7. D. L. Carson, "Diagnosis and cure of erratic velocity distribution in sonar projector arrays," *Journal of the Acoustical Society of America*, 34, pp. 1191–1195, 1962.
8. R. J. Bobber, "Diffraction constants of transducers," *Journal of the Acoustical Society of America*, 37, pp. 591–595, 1965.
9. Z. H. He and Y. L. Ma, "Calculation of baffle effect and mutual interaction between elements for an underwater

acoustic conformal array with application to the optimization of projecting beam pattern," *Chinese Science Bulletin*, 52, pp. 2584–2591, 2007.

10. L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens, and J. V. Sanders, *Fundamentals of Acoustics*, John Wiley & Sons, New York, 2000.
11. C. H. Sherman and J. L. Butler, *Transducers and Arrays for Underwater Sound*, Springer, New York, 2007.
12. L. J. Ziomek, *Fundamentals of Acoustic Field Theory and Space-Time Signal Processing*, CRC Press, Boca Raton, 2000.
13. B. Tomasic, J. Turtle, and S. Liu, "Spherical arrays—design considerations," *Proceedings of IEEE 18th International Conference on Applied Electro-magnetics and Communications*, pp. 1–8, 2005.
14. L. L. Beranek, *Acoustics*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1954.
15. B. Tomasic, J. Turtle, and P. Oleski, "The geodesic dome phased array antenna for satellite control and communication – subarray design, development and demonstration," *Proceedings of IEEE International Symposium on Phased Array System and Technology*, pp. 411–416, 2003.
16. G. D. Ouder Kirk, "Geodesic dome phased array radars," *Proceedings of IEEE Radar Conference*, pp. 431–436, 2007.

저자 약력

•김 회 용 (Hoeyong Kim)

2005년: 영남대학교 기계공학과 (학사)
 2007년: 경북대학교 기계공학과 (석사)
 2007년 ~ 현재: 경북대학교 기계공학과 (박사과정)

•노 용 래 (Yongrae Roh)

한국음향학회지 제26권 제2호 참조