

# 곡면 배열 트랜스듀서의 최적 설계

## Optimal Design of Conformal Array Transducers

김희용 · 노용래

(Hoeyong Kim and Yongrae Roh)

경북대학교 기계공학과

(접수일자: 2011년 10월 12일; 수정일자: 2011년 12월 14일; 채택일자: 2012년 1월 5일)

**초 록:** 본 연구에서는 등각, 등간격 및 측지선 돔 (geodesic dome) 형태로 배열된 곡면 배열 트랜스듀서에 대해서, 음원 간격, 음원 개수 등과 같은 배열 구조 변수들에 따른 방사패턴의 변화 경향성을 분석하였다. 또한 그 결과를 바탕으로 통계적 기법인 다중 회귀 분석을 이용하여 부엽의 크기 및 빔 폭을 설계 변수들의 함수로 도출하였다. 나아가 최적화 기법인 GA (genetic algorithm) 방법을 이용하여 각 방향에 대한 빔폭이 주어진 조건을 만족하며 가장 작은 부엽의 크기를 가지도록 설계 변수들의 최적화를 수행하였다. 최적화 결과를 바탕으로 세 가지 곡면 배열 구조 가운데 곡면 배열 트랜스듀서의 최적 배열 구조로 등간격 배열구조를 선정하였다.

**핵심용어:** 곡면 배열, 등각, 등간격, geodesic dome, 최적화

**투고분야:** 수중음향 분야 (5.6)

**ABSTRACT:** In this research, we have analyzed the trend of radiation pattern variation in relation to the change of design variables such as source interval and source number for conformal array transducers arranged in equi-angle, equi-interval, and geodesic dome forms. Through statistical multiple regression analysis of the results, we derived functional forms of the side lobe level and the beamwidth in terms of the design variables. Furthermore, the structure of the array transducer was optimized to achieve the smallest side lobe level while satisfying the requirements on beam width by the GA (genetic algorithm) method. Based on the optimized results, we have determined the equi-interval form as the optimal array geometry among the three conformal array geometries.

**Key words:** Conformal array, Equi-angle, Equi-interval, Geodesic dome, Optimization

**ASK subject classification:** Underwater Acoustics (5.6)

### 1. 서 론

본 연구의 목적은 잠수함이나 어뢰 등에 사용되는 수중 통신용 음향 배열 트랜스듀서의 특성을 파악하고, 배열 방식에 따라 설계 변수들의 변화에 따른 빔 폭 및 부엽의 영향을 분석하여 트랜스듀서의 최적구조를 설정하는데 있다. 본 연구와 연관된 사전 연구<sup>[1]</sup>에서는 계산하고자 하는 곡면 배열 트랜스듀서의 구조를 설정하였으며, 구조에 적용 가능한 배열로 등각, 등간격 그리고 측지선 돔 배열을 선정하여 각 배열 방식에 대한 장단점을 비교하였다. 또한, 각 배열

방식에 따른 빔 특성을 계산하기 위해 원형 디스크 음원이 적용된 트랜스듀서의 방사 패턴 수식을 전개하고, 각 배열 방식에 대한 방사 특성을 계산하여 비교하였다.

전술한 논문의 계산 결과는 개별 설계 변수들의 변화에 따른 경향성 분석에 그치고 있기 때문에 2개 이상의 변수가 서로 결합하여 나타나는 효과를 동시에 적용한 체계적인 분석이 필요하다. 그러기 위해서는 먼저 구체적인 곡면 배열 트랜스듀서의 구조와 분석하고자 하는 트랜스듀서의 성능 변수 및 구조 변수를 설정하고 그에 적합한 수식을 전개해야 한다.

따라서 본 논문에서는 전개된 방사 패턴 수식을 바탕으로 각 배열 방식에 따라 음향 방사 특성을 분

\*Corresponding author: 노용래 (yryong@knu.ac.kr)  
702-701 대구시 북구 산격동 1370 경북대학교 기계공학과  
(전화: 053-950-6828; 팩스: 053-943-8716)

석하였다. 나아가 분석 결과를 바탕으로 주엽 (main lobe)의 빔폭 (BW: beam width)이 주어진 조건을 모두 만족하며, 부엽의 크기 (SLL: side lobe level)가 가장 작은 값을 가지는 곡면 배열 트랜스듀서의 최적 구조를 설정하고자 하였다. 또한 향후 다양한 조건을 만족시키는 곡면 배열 트랜스듀서를 설계함에 있어 유용한 자료를 제공하고자 한다. 이에 따라 2절에서는 계산하고자 하는 곡면 배열 트랜스듀서의 구조 설명과 각 배열 방식에 따른 방사 패턴 수식을 나타내었다. 3절에서는 방사 패턴 수식을 이용하여 각 설계 변수들이 트랜스듀서의 성능에 미치는 영향을 분석하고, 그 결과를 바탕으로 수행된 최적화 결과를 제시한다. 이어 4절에서는 결과에 관한 토론을 기술하였으며, 마지막으로 5절에서 결론을 맺는다.

## II. 이 론

이번 연구에 사용될 곡면 배열 트랜스듀서의 구조는 그림 1에 나타난 것과 같은 형태이다. 구면 배열의 크기와 사용 주파수는 수중 어뢰에 적용되어 널리 사용되는 대표적인 값을 사용하였다. 이를 적용하여 사전 연구<sup>[1]</sup>의 결과를 바탕으로 음원의 뒤쪽으로 방사되는 특성을 제거하기 위한 Heaviside 함수와 원형 피스톤 음원의 특성이 고려된 등각, 등간격 그리고 축지선 돔 배열에 대한 방사 패턴 수식을 차례로 식 (1)에서 (3)에 나타내었다<sup>[1,2-7]</sup>.  $\theta$  방향으로 배열되는 음원은 그림 1에 나타난 바와 같이 Z축 ( $0^\circ$ )을 기준으로  $49^\circ$ 에서  $90^\circ$  사이에 위치해야 한다. 따라서  $\theta_n$ 은 식 (1)과 같이 정의된다.

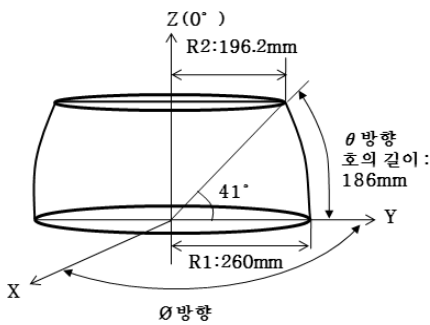


그림 1. 해석 대상 곡면 배열 트랜스듀서의 구조  
Fig. 1. Structure of the conformal array transducer to be analyzed.

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

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

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

$$B_{mn}(d) = \begin{cases} 1, & d > 0 \\ 0, & d \leq 0 \end{cases}, \quad \text{where } d = \frac{|\cos \gamma|}{\cos \gamma}$$

- N 구형 좌표계에서  $\theta$  방향으로 배열된 음원 층의 전체 개수
- $\theta_n$  구형 좌표계에서  $\theta$  방향으로 배열된 n번째 음원의 각도
- M 구형 좌표계에서  $\phi$  방향으로 배열된 음원의 전체 개수
- $\phi_m$  구형 좌표계에서  $\phi$  방향으로 배열된 m번째 음원의 각도
- $\theta$  구형 좌표계에서 r 만큼 떨어진 위치가 Z축과 이루는 각도
- $\phi$  구형 좌표계에서 r 만큼 떨어진 위치가 XY평면상에서 X축과 이루는 각도
- a 구형 배열 트랜스듀서의 반지름
- r 구형 배열 트랜스듀서 중심에서 far field 특정 위치까지 거리
- $B_{mn}(d)$  Heaviside 함수
- $H_{sn}$  n번 음원층에 배열된 음원의 directivity function

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

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

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

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

$$H_{tot}(\theta, \phi) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^{M_n} e^{ika \cos \gamma_n} \times H_{sn}(\theta, \phi) \times B_{mn}(d) \quad (3)$$

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

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

### III. 배열 방식에 따른 곡면 배열 트랜스듀서의 최적 설계

이 절에서는 II 절에 나타난 수식을 이용하여 계산되어진 사전 연구<sup>[1]</sup>의 결과를 바탕으로 곡면 배열 트랜스듀서의 성능에 많은 영향을 미치는 것으로 판단되는 설계 변수를 설정하고, 각 설계 변수들의 변화에 따른 성능의 변화 경향성을 분석하였다. 나아가 경향성 분석 결과를 토대로 설계 변수들의 최적화를 수행하여 각 배열 방식에 따른 트랜스듀서의 최적 구조를 설계하였다. 먼저 사전 연구 결과로부터 트랜스듀서의 성능에 큰 영향을 미치는 것으로 판단되는 설계 변수로  $\theta$  방향 음원 간격,  $\phi$  방향 음원 간격,  $\phi$  방향 음원 범위 및  $\theta$  방향 음원 수를 선정하였으며, 그림 1에서 나타난 바와 같이 트랜스듀서의 구조 반경을 240 mm로 고정하였다. 음원 반경은 음원이 배열되는 간격 중 가장 작은 값의 1/2이 되도록 하였다. 변경해야 할 설계 변수의 범위는 선행 연구 결과를 바탕으로 표 1과 같이 설정하였다.

먼저 최적화는 각 설계 변수들의 영향뿐만 아니라 2개 이상의 설계 변수들이 서로 결합하여 나타나는 효과까지 고려하기 위하여 각각의 설계변수들을 표준화하여 0, ±0.5와 ±1로 구성되는  $2 \times 2^n$  요인 ( $n$ =설계변수 개수) 실험계획법에 의해 계산되었다<sup>[8,9]</sup>. 실험 계획법에 의해 총 49경우의 계산을 수행했으며<sup>[8]</sup>, 그 가운데 17경우는 설계 변수들의 변화에 따른 경향성 분석으로 확보한 자료이며, 나머지 32경우는 설계 변수들의 상호 작용으로 나타나는 효과를 고려한 결과이다. 앞에서 구한 49경우의 계산 결과로부터 최적화에 사용될 함수를 구하기 위해, 상용 프로그램 SAS 9.1<sup>®</sup>을 사용하여 통계적 기법인 다중 회귀 분석법으로 부엽의 크기와  $\theta$  및  $\phi$  방향 빔폭을 설계 변수들의 함수로 도출하였다. 함수화는 2차 회귀모형을 적용하였으며, 2차 회귀모형은 아래 식 (4)와 같다. 각 배열 형태에 대해 최적화를 하기 위하여 목적 함수로 부엽의 크기를 선정하여 그 크기가 최소화 되도록 하였으며, 제한 조건으로는  $\theta$  방향으로의 빔폭이 20도 이상,  $\phi$  방향으로의 빔 폭은 40도 이상이 되도록 하여 GA (genetic algorithm)법을 이용하여 최

표 1. 등각 및 등간격 배열 형태에 대한 설계 변수의 표준화 값  
Table 1. Normalized value of design variables for equi-angle and equi-interval array forms.

	$\phi$ 방향 음원층 적용 범위 [degree]	$\theta$ 방향 음원 간격 [mm]	$\phi$ 방향 음원 간격 [mm]	$\theta$ 방향 음원 수
-1	0	11.5	11.5	3
-0.5	15	17.25	17.25	4
0	30	23	23	5
0.5	45	28.75	28.75	6
1	60	34.5	34.5	7

적화를 수행하였다. 최적화 조건은 식 (5)와 (6)에 나타내었다.

$$f = a_1x_1^2 + \dots + a_4x_4^2 + b_1x_1 + \dots + b_4x_4 + c_1x_1x_2 + \dots + c_6x_3x_4 + d_1x_1x_2x_3 + \dots + d_4x_2x_3x_4 + e x_1x_2x_3x_4 + g \quad (4)$$

여기서,  $x_1 \sim x_4$ 는 설계 변수를 의미하며,  $a_1 \sim a_4, b_1 \sim b_4, c_1 \sim c_6, d_1 \sim d_4, e, g$ 는 회귀 계수를 나타낸다.

목적 함수

$$\text{Minimize : Side lobe level} \quad (5)$$

제한 조건

$$\begin{aligned} 20 \text{ degree} &\leq \theta \text{ 방향 Beam width} \\ 40 \text{ degree} &\leq \phi \text{ 방향 Beam width} \end{aligned} \quad (6)$$

#### 3.1 음원의 등각배열에 따른 곡면 배열 트랜스듀서의 최적화

이 절에서는 식 (1)을 바탕으로 음원이 등각으로 배열된 곡면 배열 트랜스듀서의 최적 구조를 설계하였다. 먼저 등각 배열에 대한 경향성 분석 결과를 그림 2에서 4에 나타내었다.  $\theta$  방향 빔폭의 경우는  $\phi$  방향 음원의 범위가 커질수록 빔 폭은 소폭 커졌으나  $\phi$  방향 음원 간격의 변화에 따른 빔폭은 큰 변화가 없었다. 반면  $\theta$  방향 빔폭은  $\theta$  방향의 음원 간격이나 음원의 개수의 변화에 큰 변화를 보였으며, 변수값이 증가함에 따라  $\theta$  방향 빔폭은 반비례하는 경향을 보였다. 마찬가지로  $\phi$  방향 빔폭은  $\phi$  방향 음원의 범위와  $\phi$  방향 음원 간격의 변화에 따라 큰 변화를 보였

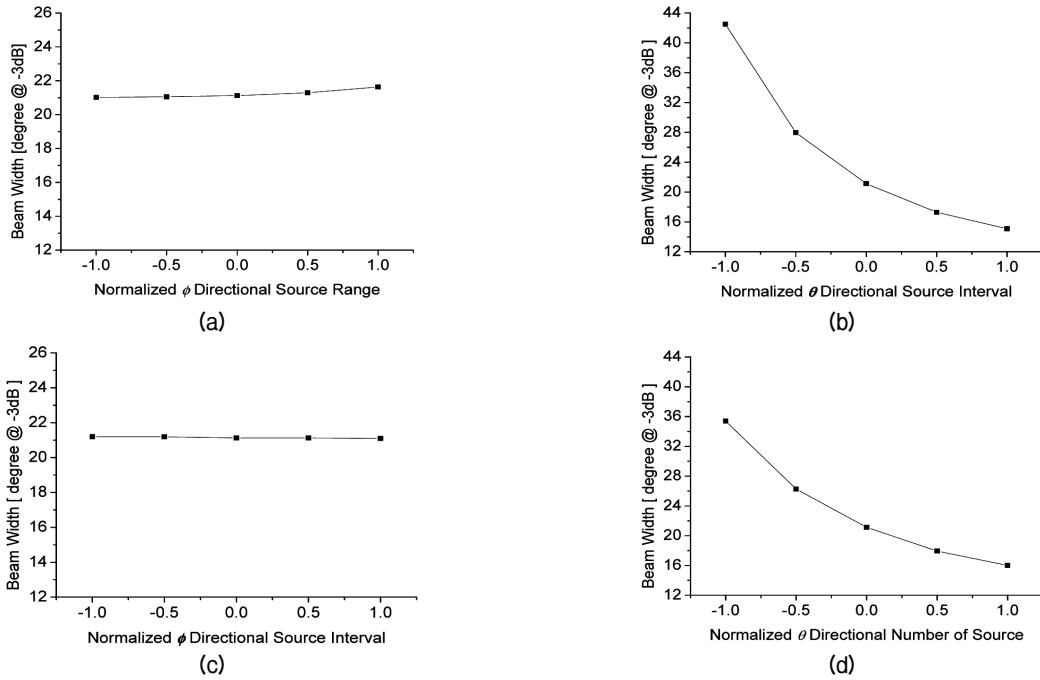


그림 2. 등각 배열 형태의 설계 변수 변화에 따른  $\theta$  방향 빔폭의 변화

(a)  $\phi$  방향 음원 범위, (b)  $\theta$  방향 음원 간격, (c)  $\phi$  방향 음원 간격, (d)  $\theta$  방향 음원 수

Fig. 2. Variation of  $\theta$  direction beam width in relation to the change of design variables for the equi-angle array form. (a)  $\phi$  direction source range, (b)  $\theta$  direction source interval, (c)  $\phi$  direction source interval, (d)  $\theta$  direction number of sources

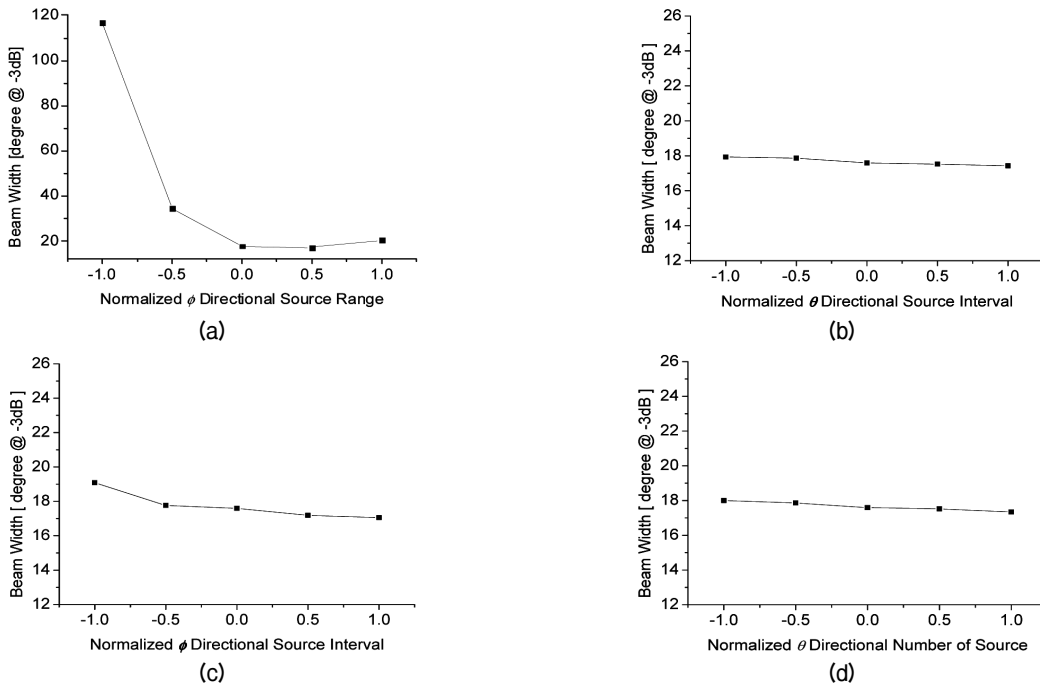


그림 3. 등각 배열 형태의 설계 변수 변화에 따른  $\phi$  방향 빔폭의 변화

(a)  $\phi$  방향 음원 범위, (b)  $\theta$  방향 음원 간격, (c)  $\phi$  방향 음원 간격, (d)  $\theta$  방향 음원 수

Fig. 3. Variation of  $\phi$  direction beam width in relation to the change of design variables for the equi-angle array form. (a)  $\phi$  direction source range, (b)  $\theta$  direction source interval, (c)  $\phi$  direction source interval, (d)  $\theta$  direction number of sources

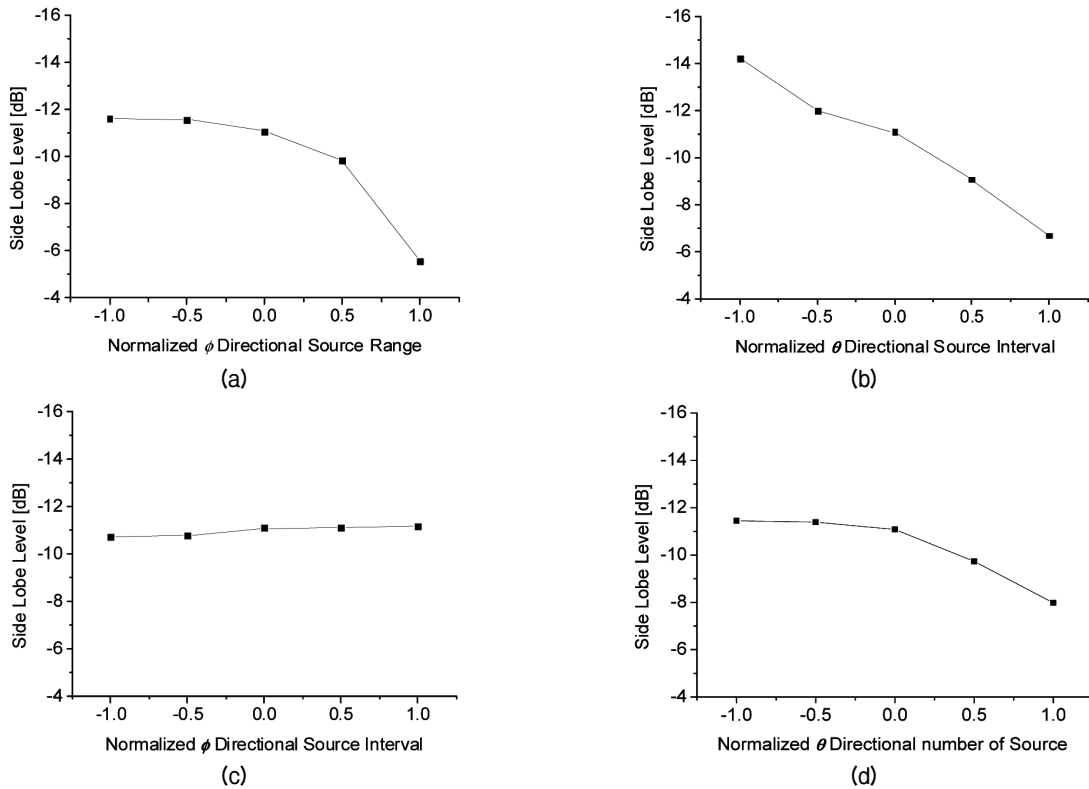


그림 4. 등각 배열 형태의 설계 변수 변화에 따른  $\theta$  방향 부엽의 크기 변화

(a)  $\phi$  방향 음원 범위, (b)  $\theta$  방향 음원 간격, (c)  $\phi$  방향 음원 간격, (d)  $\theta$  방향 음원 수

Fig. 4. Variation of  $\theta$  direction side lobe level in relation to the change of design variables for the equi-angle array form.

(a)  $\phi$  direction source range, (b)  $\theta$  direction source interval, (c)  $\phi$  direction source interval, (d)  $\theta$  direction number of sources

표 2. 등각 배열 형태에 대한 기본 모델과 최적화 모델의 결과

Table 2. Results of the basic and optimized models for the equi-angle array form.

	$\phi$ 방향 음원층 적용 범위 [degree]	$\theta$ 방향 음원 간격 [mm]	$\phi$ 방향 음원 간격 [mm]	$\theta$ 방향 음원 수	$\theta$ 방향 BW [-3 dB: degree]	$\phi$ 방향 BW [-3 dB: degree]	$\theta$ 방향 SLL [dB]
기본 모델	30	23	23	5	21.12	17.59	-11.08
최적화모델	8.3	11.5	11.5	6	34.69	51.91	-12.93

며 그 값은 변수 변화에 반비례하는 경향을 보였다. 반면  $\theta$  방향의 음원 간격이나 음원의 개수의 변화에 따라서는 그 변화가 미미하였다. 이러한 결과는 빔 패턴을 측정하고자 하는 방향과 음원이 배열되는 방향에 영향을 받아 나타나는 현상으로, 각 방향에 대해 음원의 개수와 적용 범위가 증가하면 방사 면적이 넓어지는 효과가 발생하여 빔폭은 작아지는 경향을 보이고, 각 방향으로의 음원 간격이 커지면 음원의 반경(음원 간격의 1/2로 정의)이 커지게 되어 방

사 면적이 넓어지게 되므로 빔폭은 작아지게 된다. 이는 널리 알려진 이론과 일치하는 한다.  $\theta$  방향 부엽의 경우  $\phi$  방향 음원 간격에는 큰 변화가 없었지만 나머지 3경우에 대해서는 변수값이 증가함에 따라 반비례하는 경향을 보였다. 이는 음원의 개수와 간격이 증가하면 주엽의 빔폭은 좁아지기 때문에 상대적으로 부엽의 크기가 증가하게 되는 것으로 판단된다. 다음으로 앞에서 행한 경향성 분석 결과와 설계 변수들의 상호 작용을 고려한 실험 계획법에 의한

결과를 바탕으로 식 (5)와 (6)을 적용하여 등각 배열에 대한 최적화를 수행하였으며, 그 결과를 표 2에 나타내었다. 그 결과는 주어진 조건을 모두 만족하면서 기본 모델의 부엽보다 1.85 dB 더 작아진 값을 가지는 등각 배열의 최적 구조를 설계하였다.

### 3.2 음원의 등간격 배열에 따른 곡면 배열 트랜스듀서의 최적화

이 절에서는 등간격으로 배열된 곡면 배열 트랜스듀서의 최적 구조를 설계하였다. 먼저 등간격 배열에 대한 경향성 분석 결과를 그림 5에서 7에 나타내었다. 그 결과를 보면  $\theta$  및  $\phi$  방향 빔폭은 등각 배열과 비슷한 경향을 보였다. 다만  $\phi$  방향 빔폭의 경우  $\theta$  방향 음원 간격과 개수에 따른 빔폭의 변화는 등각 배열과 달리 변수 값이 증가함에 따라 소폭 증가하는

경향을 보였다. 이는 음원의 배열 방식에 따른 차이로 보이며, 등각 배열의 경우  $\theta$  방향 음원층에 따라  $\phi$  방향 음원 간격이 변하는데 (적도로 갈수록 넓어짐) 반해 등간격 배열의 경우는 모든  $\theta$  방향 음원층에 음원이 동일한 간격으로 배열되기 때문에 등각 배열과 비교 했을때 등각 배열보다 상대적으로 적도층으로 갈수록 음원간의 간격이 좁아져서 등각 배열과 달리  $\phi$  방향 빔폭이 소폭 증가한 것으로 판단된다.  $\theta$  방향 부엽의 경우는 등각 배열과 비슷하게  $\phi$  방향 음원 간격의 증가에 따라서는 변화가 미미하였지만 나머지 3경우에 대해서는 반비례하는 경향을 보였다. 등간격 배열의 경우도 최적화는 식 (5)와 (6)을 적용하여 수행하였으며, 그 결과를 표 3에 나타내었다. 최적화 결과는 주어진 조건을 모두 만족하였으며, 기본 모델의 부엽보다 1.76 dB 더 작아진 값을 나타내었다.

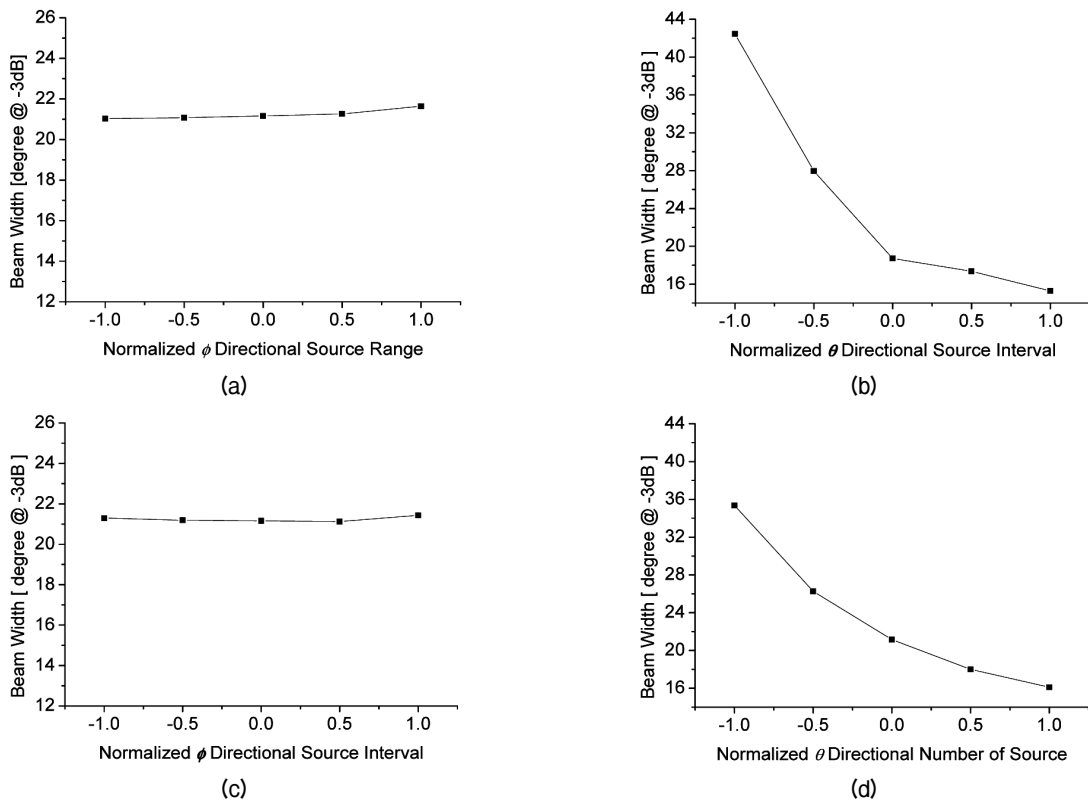


그림 5. 등간격 배열 형태의 설계 변수 변화에 따른  $\theta$  방향 빔폭의 변화

(a)  $\phi$  방향 음원 범위, (b)  $\theta$  방향 음원 간격, (c)  $\phi$  방향 음원 간격, (d)  $\theta$  방향 음원 수

Fig. 5. Variation of  $\theta$  direction beam width in relation to the change of design variables for the equi-interval array form. (a)  $\phi$  direction source range, (b)  $\theta$  direction source interval, (c)  $\phi$  direction source interval, (d)  $\theta$  direction number of sources

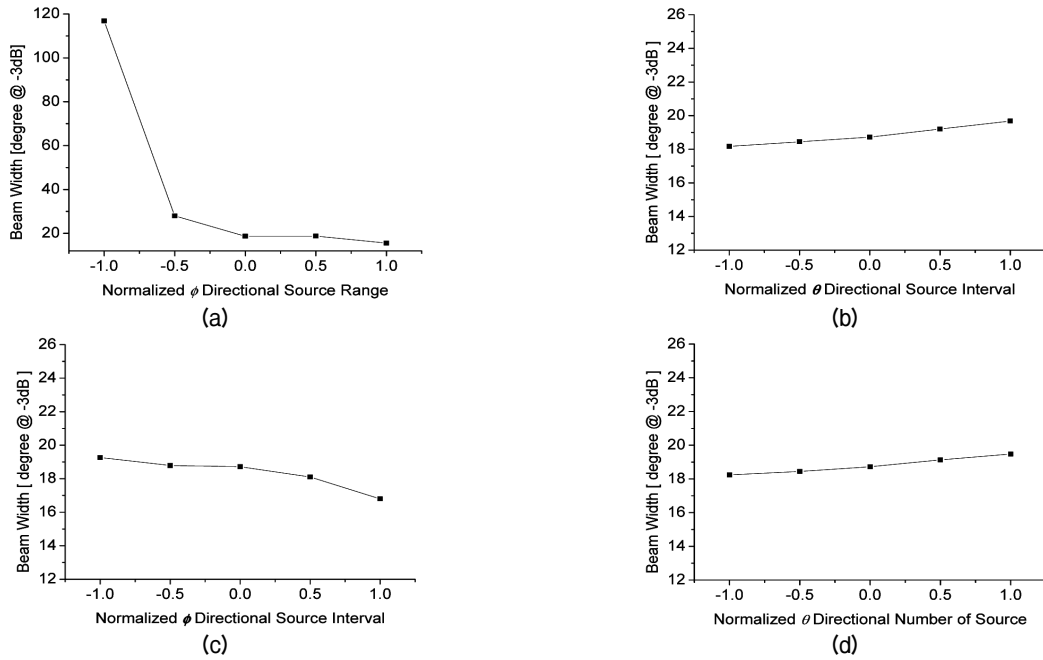


그림 6. 등간격 배열 형태의 설계 변수 변화에 따른  $\phi$  방향 빔폭의 변화

(a)  $\phi$  방향 음원 범위, (b)  $\theta$  방향 음원 간격, (c)  $\phi$  방향 음원 간격, (d)  $\theta$  방향 음원 수

Fig. 6. Variation of  $\phi$  direction beam width in relation to the change of design variables for the equi-interval array form. (a)  $\phi$  direction source range, (b)  $\theta$  direction source interval, (c)  $\phi$  direction source interval, (d)  $\theta$  direction number of sources

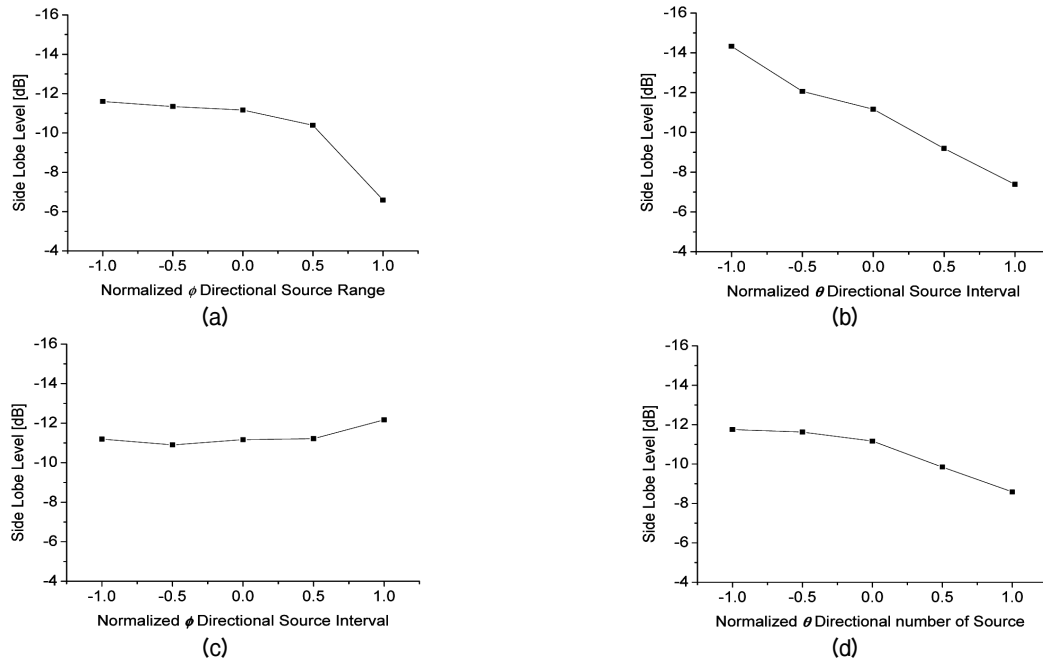


그림 7. 등간격 배열 형태의 설계 변수 변화에 따른  $\theta$  방향 부엽의 크기 변화

(a)  $\phi$  방향 음원 범위, (b)  $\theta$  방향 음원 간격, (c)  $\phi$  방향 음원 간격, (d)  $\theta$  방향 음원 수

Fig. 7. Variation of  $\theta$  direction side lobe level in relation to the change of design variables for the equi-interval array form.

(a)  $\phi$  direction source range, (b)  $\theta$  direction source interval, (c)  $\phi$  direction source interval, (d)  $\theta$  direction number of sources

표 3. 등간격 배열 형태에 대한 기본 모델과 최적화 모델의 결과

Table 3. Results of the basic and optimized models for the equi-interval array form.

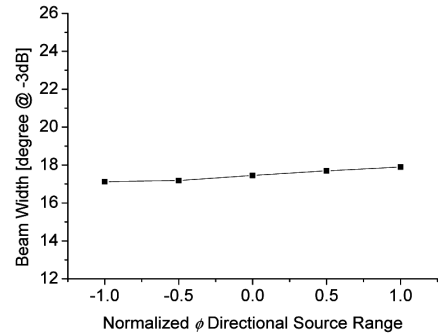
	$\phi$ 방향 음원층 적용 범위 [degree]	$\theta$ 방향 음원 간격 [mm]	$\phi$ 방향 음원 간격 [mm]	$\theta$ 방향 음원 수	$\theta$ 방향 BW [-3 dB: degree]	$\phi$ 방향 BW [-3 dB: degree]	$\theta$ 방향 SLL [dB]
기본 모델	30	23	23	5	21.16	18.72	-11.17
최적화모델	5.62	11.5	11.5	6	34.70	75.29	-12.93

표 4. 측지선 돔 배열 형태에 대한 설계 변수의 표준화 값  
Table 4. Normalized value of design variables for  
geodesic dome array forms.

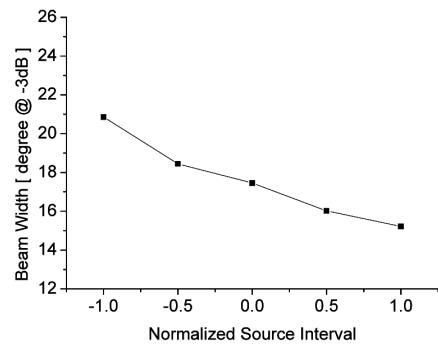
	$\phi$ 방향 음원층 적용 범위 [degree]	음원 간격 [mm]	$\theta$ 방향 음원 수
-1	0	11.5	3
-0.5	15	17.25	4
0	30	23	5
0.5	45	28.75	6
1	60	34.5	7

### 3.3 측지선 돔 배열에 대한 곡면 배열 트랜스 듀서의 최적화

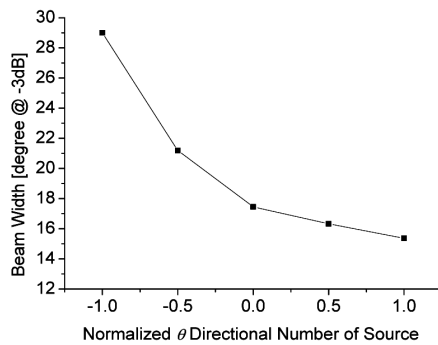
이 절에서는 측지선 돔 형태로 배열된 곡면 배열 트랜스듀서의 방사 패턴을 계산하였다. 측지선 돔 배열의 경우 적도층의 음원 개수가 정해지면  $\phi$  및  $\theta$  방향의 간격이 모두 같은 값으로 고정 되기 때문에 변수는 한 개가 줄어들어 총 3개가 된다. 따라서 측지선 돔 배열의 설계 변수 및 변수들의 변화 범위는 표 4에 나타내었다. 먼저  $\theta$  방향 빔폭의 경향성을 그림 8에 나타내었는데  $\phi$  방향 음원층 적용 범위에는 미소한 변화를 보인 반면  $\theta$  방향 음원 간격 및  $\theta$  방향 음원층 개수에는 변수값이 증가함에 따라 반비례하여 감소하는 경향을 보였다. 그림 9에 나타낸  $\phi$  방향 빔폭의 경향성을 보면  $\phi$  방향 음원층 적용 범위에는 큰 변화를 보인 반면  $\theta$  방향 음원 간격 및  $\theta$  방향 음원층 개수에는 미미한 변화를 보였다. 마지막으로 그림 10에 나타낸  $\theta$  방향 부엽의 크기는 3가지 변수 모두에 반비례하는 경향을 보였다. 이런 결과가 나온 이유는 3.1절에서 설명한 바와 같다. 측지선 돔 배열의 최적화는 앞선 등각 및 등간격 배열처럼 식 (5) 및 (6)과 같은 조건을 적용하였으며, 그 결과를 표 5에 나타내었다. 그 결과 기본 모델보다 1.76 dB 낮아진 부엽의 크기를 가지는 최적 구조 값을 구현하였다.



(a)



(b)



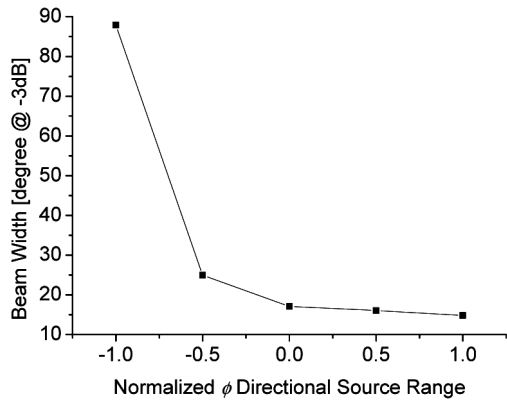
(c)

그림 8. 측지선 돔 배열 형태의 설계 변수 변화에 따른  $\theta$  방향 빔폭의 변화  
(a)  $\phi$  방향 음원 범위, (b) 음원 간격, (c)  $\theta$  방향 음원 수

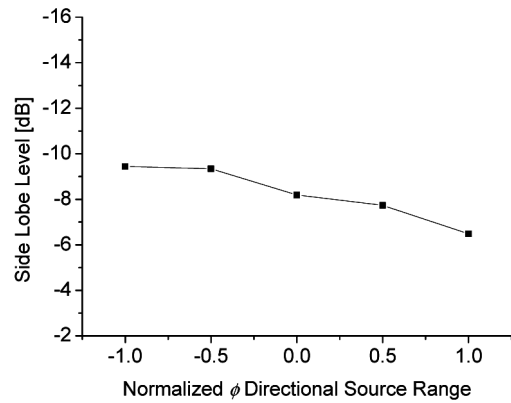
Fig. 8. Variation of  $\theta$  direction beam width in relation to the change of design variables for the geodesic dome array form.

(a)  $\phi$  direction source range, (b)  $\theta$  direction source interval, (c)  $\theta$  direction number of sources

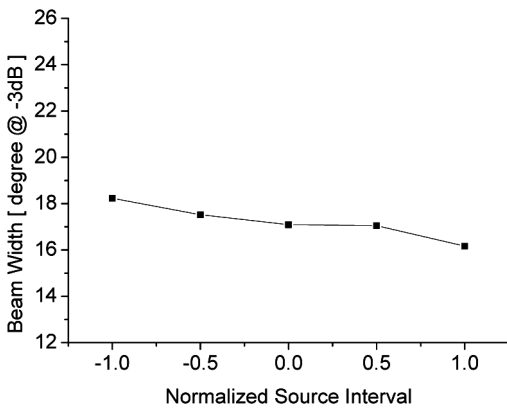




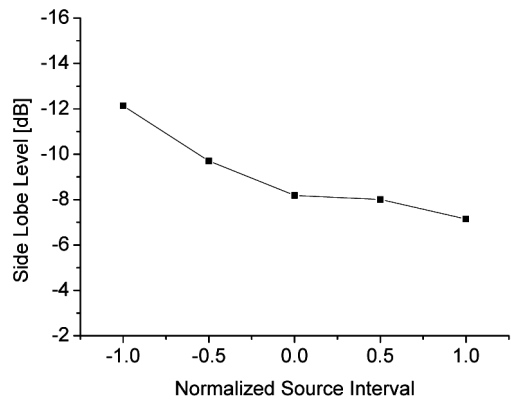
(a)



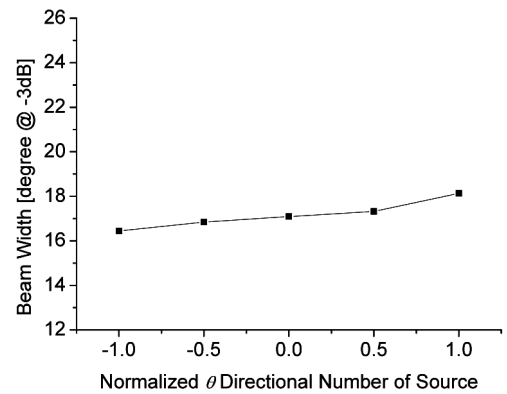
(a)



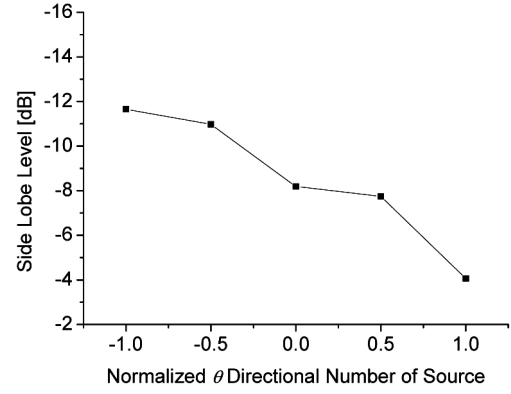
(b)



(b)



(c)



(c)

그림 9. 측지선 돔 배열 형태의 설계 변수 변화에 따른  $\phi$  방향 빔폭의 변화  
(a)  $\phi$  방향 음원 범위, (b) 음원 간격, (c)  $\theta$  방향 음원 수

Fig. 9. Variation of  $\theta$  direction beam width in relation to the change of design variables for the geodesic dome array form.  
(a)  $\phi$  direction source range, (b)  $\theta$  direction source interval, (c)  $\theta$  direction number of sources

그림 10. 측지선 돔 배열 형태의 설계 변수 변화에 따른  $\theta$  방향 부엽의 크기 변화  
(a)  $\phi$  방향 음원 범위, (b) 음원 간격, (c)  $\theta$  방향 음원 수

Fig. 10. Variation of  $\theta$  direction side lobe level in relation to the change of design variables for the geodesic dome array form.  
(a)  $\phi$  direction source range, (b)  $\theta$  direction source interval, (c)  $\theta$  direction number of sources

표 5. 측지선 돔 배열 형태에 대한 기본 모델과 최적화 모델의 결과

Table 5. Results of the basic and optimized models for the geodesic dome array form.

	$\phi$ 방향 음원층 적용 범위 [degree]	음원 간격 [mm]	$\theta$ 방향 음원 수	$\theta$ 방향 BW [-3 dB: degree]	$\phi$ 방향 BW [-3 dB: degree]	$\theta$ 방향 SLL [dB]
기본 모델	30	23	5	20.58	17.52	-11.03
최적화모델	6	11.5	7	29.01	65.02	-12.79

## IV. 토 론

지금까지 계산한 3가지 배열 방법의 결과를 보면  $\theta$  및  $\phi$  방향 빔폭은 설계 변수를 측정하고자 하는 빔폭의 방향과 동일하게 변화시킬 때 큰 변화가 발생하는 경향을 보였으며, 부엽의 경우는 음원의 개수와 적용 범위가 증가하면 부엽의 크기는 증가하는 경향을 보였다. 이는 음원의 개수나 간격이 증가하게 되면 방사되는 면적이 증가하게 되어 지향성이 높은 빔폭을 가지게 되므로 빔폭이 작아지는 것으로 판단된다. 이는 널리 알려진 이론과 일치한다.

3가지 배열 방식에 대한 최적화 결과를 살펴보면 부엽의 크기는 등각 및 등간격 배열이 가장 작게 나왔으나,  $\theta$  및  $\phi$  방향의 빔폭을 부엽의 크기와 동시에 고려하면 등간격에서 가장 좋은 특성이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 등각 배열의 경우  $\theta$  방향 음원층에 따라  $\phi$  방향으로 배열되는 음원의 개수가 달라지기 때문인 것으로 판단된다. 또한 측지선 돔 배열은 모든 간격이 동일하나 등간격 배열과 달리 배열 방식 때문에 적도 층에 4의 배수 형태로 배열되기 때문에 배열 간격을 조절하는데 한계가 있기 때문으로 판단된다.

## V. 결 론

본 연구에서는 전술한 논문에서 유도한 곡면 배열 트랜스듀서의 3가지 배열 방식 (등각, 등간격, 측지선 돔)에 따른 방사 패턴 수식을 이용하여 트랜스듀서의 성능인  $\theta$  및  $\phi$  방향의 빔폭과 부엽의 크기에 영향을 끼치는 것으로 판단되는 설계 변수로  $\phi$  방향의 음원 적용 범위,  $\theta$  방향 음원간 간격,  $\phi$  방향 음원간 간격 그리고  $\theta$  방향 음원 수를 설정하였으며, 이 설계 변수들의 변화에 따른 성능의 변화 경향성을 분

석하였다. 이와 더불어  $2 \times 2^n$  요인 ( $n$ =설계변수 개수) 실험계획법에 따라 변수의 변화에 따른 상호 효과까지 고려하여 설계 변수의 최적화를 위한 자료를 확보하였다. 앞에서 계산된 결과를 바탕으로 3가지 배열 방식에 대해 주어진 빔폭의 조건을 만족하면서 가장 작은 부엽을 크기를 가지는 트랜스듀서의 구조를 최적화하였다. 배열 방식에 따른 결과를 비교해보면 부엽의 크기는 등각 및 등간격 배열이 가장 작게 나왔으나, 등간격 배열이  $\theta$  및  $\phi$  방향의 빔폭이 더 넓은 특성을 나타내어 곡면 배열 트랜스듀서의 최적 구조로 선정하였다. 이 결과는 향후 다양한 조건을 만족시키는 곡면 배열 트랜스듀서를 설계함에 있어 유용한 자료로 활용 될 수 있을 것으로 기대된다.

## 감사의 글

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다 (계약번호 UD070054AD).

## 참고문헌

1. 김희용, 노용래, “곡면 배열 트랜스듀서의 방사 특성 해석,” *한국음향학회지*, 29권, 7호, 431-438쪽, 2010.
2. 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.
3. G. H. Du, Z. M. Zhu, and X. F. Gong, *Fundamentals of Acoustics*, Nanjing University Press, Nanjing, 2001.
4. L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens, and J. V. Sanders, *Fundamentals of Acoustics*, John Wiley & Sons, New York, 2000.
5. C. H. Sherman and J. L. Butler, *Transducers and Arrays for Underwater Sound*, Springer, New York, 2007.

6. L. J. Ziomek, *Fundamentals of Acoustic Field Theory and Space-Time Signal Processing*, CRC Press, Boca Raton, 2000.
7. L. L. Beranek, *Acoustics*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1954.
8. R. O. Kuehl, *Design of experiments: Statistical principles of research design and analysis*, Duxbury Press, Pacific Grove, 2000.
9. R. J. Freund and W. J. Wilson, *Regression analysis: Statistical modeling of a response variable*, Academic Press, San Diego, 1998.

#### 저자 약력

---

- ▶ 김 회 용 (Hoeyong Kim)  
한국음향학회지 제29권 제7호 참조
- ▶ 노 용 래 (Yongrae Roh)  
한국음향학회지 제30권 제8호 참조