

논문 2017-54-3-3

착저 원통형 물체 탐지를 위한 소나 어레이 설계

(Design of SONAR Array for Detection of Bottoming Cylindrical Objects)

김 선 호*, 정 장 원*, 온 백 산*, 임 성 빈**, 서 의 수**

(Sunho Kim, Jangwon Jung, Baeksan On, Sungbin Im[Ⓞ], and Iksoo Seo)

요 약

능동 소나시스템에서 수신 신호의 해상도를 높이기 위한 방법은 다양하게 연구되어 왔다. 본 논문에서는 착저 물체의 탐지 해상도를 높이기 위한 방법으로 소나의 평면 배열(planar array) 설계를 수행하였다. 해상력이 높은 좁은 형태의 빔 패턴을 얻기 위해서는 평면 형태의 어레이를 고려하는 것이 필요하다. 어레이를 구성하는 개별 음향 트랜스듀서의 송신 주파수는 13 kHz를 사용하였다. 비대칭 크기를 갖는 목표물의 효율적인 탐지를 위해 어레이 디자인에서 방위각(azimuth angle)과 고도각(elevation angle)에 따른 해상도를 동시에 고려하기 위해 areal angle 개념을 사용하였다. 그에 따라 목표 해상도를 만족하는 areal angle을 먼저 구하고 이를 역산하여 각각 목표 방위각과 고도각을 계산하여 어레이의 설계를 진행하였다.

Abstract

In the active SONAR system, various studies have been carried out to enhance the resolution of a received signal. In order to obtain higher resolution for detecting a bottoming cylindrical object, the design of a planar array for SONAR is investigated in this paper. It is necessary to employ planar structures for SONAR array to obtain narrower beam pattern which gives high resolution. In this study, the transmit frequency of each acoustic transducer, which consists of an array is 13 kHz. For efficient detection of a target of an asymmetric size, the concept of areal angle is applied, which considers resolution according to both azimuth and elevation angles in array design. In the design, the areal angle is first investigated to satisfy the resolution requirements, and then based on the value of areal angles, the azimuth angle and the elevation angle are calculated respectively to design an array.

Keywords : 능동 소나 시스템, 평면 어레이, 탐지 해상도, 빔 형성, 어레이 디자인

I. 서 론

바다는 자연이 선물한 천혜의 자원이다. 3면이 바다로 둘러싸이고 주변국과 바다를 통해 인접해 있는 국내의 경우 특히 천혜 환경에서의 목표물의 탐지와 식별은 매우 중요한 문제이다. 그러나 주변 소음의 영향이 크고 탐지 목표 물체의 산란과 간섭이 심한 천해 수중 환경의 특성으로 인해 천해 환경에서 목표물의 탐지와 식별은 해결이 어려운 실정이다^{[1~2])}.

이러한 문제 해결을 위해 최근 능동소나 시스템에서 소나의 수신해상도를 향상시키거나 탐지 및 식별 능력을 증가시키기 위한 다음과 같은 다양한 기법들의 연구가 활발하게 진행되고 있다.

* 학생회원, 숭실대학교 일반대학원 정보통신공학과
(School of Electronic Engineering, Soongsil University)

** 정회원, 숭실대학교 전자정보공학부
(School of Electronic Engineering, Soongsil University)

*** 정회원, 국방과학연구소(SONAR Systems PEO, Agency of Defences and Developments)

Ⓞ Corresponding Author (E-mail : sbi@ssu.ac.kr)

※ 본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었으며, 이에 대해 깊이 감사를 드립니다.

(계약번호 UD14004DD)

Received ; October 27, 2016 Revised ; February 3, 2017

Accepted ; February 16, 2017

수중 표적 탐지 및 식별 능력을 향상시키기 위해서 천해 환경에서 실제 착저중인 표적의 신호를 획득하기 어려운 문제를 해결하기 위해 패턴 인식이, 머신 러닝, 신경망 등을 이용한 표적 신호 합성기법이 연구되고 있으며^[3-4], 소나 시스템의 관점에서는 주로 단상태 소나만을 이용한 기존의 방법에서 벗어나 양상태 소나의 적용 가능성을 확인하는 연구가 진행되고 있다^[5-6].

또한 음향신호 전달과정에 있어 주요 고려 대상이 되는 물체의 전후방 산란과 해저면 특성에 대한 연구가 미국 워싱턴대학의 APL(Applied Physics Lab.)에서 수행되고 있으며^[7-8], 송신신호 모델링의 관점에서는 최근 들어 중국의 하얼빈대학에서 생태계를 모방하여 돌고래의 울음소리를 이용하여 착저중인 물체를 탐지하고 두께를 인식하는 연구가 진행되고 있다^[9].

여기에 더해 복잡한 천해의 수중 환경을 고려할 때 능동소나 시스템을 이용해 착저중인 물체의 탐지 및 식별을 수행하기 위해서는 소나 어레이의 설계 또한 매우 중요한 요소이다.

따라서 본 논문에서는 천해환경에서 착저 물체의 탐지 해상도를 높이기 위한 방법으로 능동소나의 평면 배열 설계를 수행하고자 한다. 이를 위해 선행 연구를 통해 얻은 결과를 바탕으로 1 km 이내의 단거리 탐지 환경을 만족시키는 13 kHz의 중심주파수를 갖는 LFM 송신신호를 이용하고^[10-11], 다양한 크기의 착저 물체를 탐지하기 위한 최적 빔 패턴을 찾기 위해 areal angle의 개념을 사용하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 서론에서 탐지 해상도를 향상시키기 위한 2장에서 어레이 설계에 필요한 요소를 살펴본다. 3장에서는 실제 목표 환경에 맞추어 설계한 어레이의 방위각, 고도각 해상도를 만족하는 목표 빔 폭을 모의실험을 통해 보이고 마지막으로 4장에서 결론을 맺는다.

II. 어레이 설계 기법

어레이를 설계하기 위해서는 먼저 목표의 크기를 설정하고, 해당 목표를 탐지하기 위한 목표 빔 폭을 계산한 뒤, 음향 트랜스듀서의 배치를 고려하여 어레이 크기를 결정한다. 이러한 관점에서 어레이 설계에서는 다양한 형태의 어레이 구조를 고려할 수 있으며 특정 해상도를 만족시키기 위한 빔 패턴의 빔 폭의 크기를 방위각과 고도각 측면에서 각각 계산하고 실제 구현 측면까지 반영하는 경우 어레이를 구성하는 개별 음향 트랜

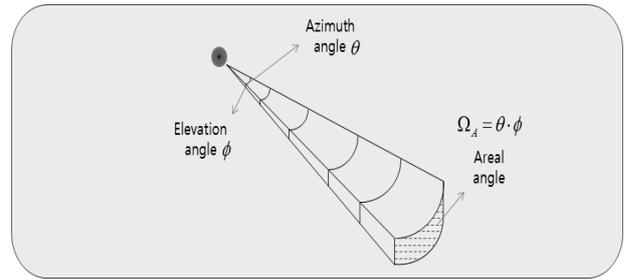


그림 1. Areal angle 개념

Fig. 1. Concept of areal angle.

스듀서의 배치도 정밀하게 이루어져야 한다.

구체적으로 소나 어레이의 빔 패턴은 소자의 배열 형태에 따라 달라진다. 빔 패턴에 따른 이득의 차이로 신호의 방향성이 정해지며, 소음에 의한 간섭을 감소시키고 해상도를 높이는 역할을 한다. 물체의 해상도는 빔 패턴의 빔 폭과 관계되어 있다. 일반적으로 탐지 해상력을 의미하는 공간 분해능 (spatial resolution)은 거리 분해능 (distance resolution)과 수평/수직 분해능 (horizontal/vertical resolution)으로 구분할 수 있으며, 거리 분해능은 신호의 주파수에 의해 결정되고 수평/수직 분해능은 어레이 빔 패턴의 수평 및 수직 빔 폭으로 결정된다^[12-13].

먼저 거리 분해능을 결정하기 위해 목표의 최적 탐지 거리는 1 km 이내로 제한한다. 1 km 이내의 근거리 물체를 탐지하기 위해 송신신호의 주파수는 13 kHz로 결정하였다^[10-11].

높은 공간 분해능을 얻기 위해서는 좁은 빔 폭의 설계가 필수적이며, 좁은 빔 폭을 구현하기 위해서는 어레이를 구성해야 한다. 따라서 본 논문에서는 평면 어레이를 고려하였다.

비대칭 크기를 갖는 목표물의 검출을 위해 평면 어레이를 설계 할 때 방위각 해상도와 고도각 해상도를 동시에 고려해야 한다. 그림 1에서 areal angle의 개념을 보였다. 계산하는 areal angle은 탐지 목표의 단축의 길이를 기준으로 하였다^[12-13].

Areal angle Ω_A 을 구하기 위한 식은 다음과 같다.

$$\Omega_A = \theta \times \phi \quad (1)$$

Areal angle은 방위각 θ 와 고도각 ϕ 의 곱, 즉 수평 빔 폭과 수직 빔 폭의 곱으로 나타낼 수 있다. Areal angle의 단위는 각도의 제곱으로 표현된다.

평면 배열 어레이의 설계를 위해 먼저 등간격으로 배치한 선형 배열 소나의 빔 패턴을 다음과 같이 유도할 수 있다. 단일 주파수 점 음원에 평면파를 가정하고 위치 q 에서 음압 $p(r, \theta, t)$ 는 다음과 같다^[14].

$$p(r, \theta, t) = \frac{j\omega\rho Q}{4\pi r} \sum_{n=0}^{N-1} e^{jkd n \sin\theta} e^{j(\omega t - kr)} \quad (2)$$

$$= \frac{j\omega\rho NQ}{4\pi r} \left[\frac{e^{jNkd \sin\theta} - 1}{N(e^{jkd \sin\theta} - 1)} \right] e^{j(\omega t - kr)}$$

위 식에서 θ 는 위치 q 와 선형 배열이 이루는 각도이며 r 은 위치 q 와 0번째 트랜스듀서 사이의 거리를 의미한다. 개별 트랜스듀서 간 간격이 d 일 때 n 번째 트랜스듀서와의 거리는 $r + dnsin\theta$ 이다. 위치 q 에서의 전체 음압 $p(r, \theta, t)$ 는 각각 점 음원에 의한 음압의 합이 된다. 또한 ω 는 각주파수, ρ 는 음향밀도, Q 는 음원 신호의 크기, N 은 트랜스듀서의 수, k 는 파수를 의미한다. 식 (2)에서 각 θ 에 의해 결정되는 중간항의 분수 항이 방향성을 나타내고, 어레이 팩터(array factor)로 이를 표현할 수 있다. 선형 배열의 어레이 팩터는 다음과 같다.

$$AF = \sum_{n=0}^{N-1} w_n e^{-jkr_n} = \sum_{n=0}^{N-1} e^{jkn d \cos\theta_d} e^{-jkr_n} \quad (3)$$

$$w_n = e^{jkn d \cos\theta_d}$$

w_n 은 어레이의 가중치 (weight function)이며, θ_d 는 조향각 (steering angle)을 의미한다. Wave vector의 정의에 의해서, $r_n = nd \cos\theta$ 가 성립하고 이를 위 수식에 대입하여 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$AF = \sum_{n=0}^{N-1} e^{jkn d \cos\theta_d} e^{-jkn d \cos\theta} \quad (4)$$

$$= \sum_{n=0}^{N-1} e^{jkn d (\cos\theta_d - \cos\theta)}$$

여기서 $e^{jkn d (\cos\theta_d - \cos\theta)}$ 를 G 라고 놓고 정리하면 다음과 같다.

$$AF = \sum_{n=0}^{N-1} G^n = \frac{1 - G^N}{1 - G} \quad (5)$$

$$= \frac{1 - e^{jkn d N (\cos\theta_d - \cos\theta)}}{1 - e^{jkn d (\cos\theta_d - \cos\theta)}}$$

어레이의 방사 빔 패턴은 AF의 magnitude 부분으로 나타낼 수 있으므로 다음의 식으로 정리할 수 있다.

$$|AF| = \frac{\sin(kNd(\cos\theta_d - \cos\theta)/2)}{\sin(kd(\cos\theta_d - \cos\theta)/2)} \quad (6)$$

$$= \frac{\sin(QNd)}{\sin(Qd)}$$

N 은 어레이를 구성하는 개별 트랜스듀서의 개수를, k 는 파수(wave number), d 는 트랜스듀서의 배치 간격

을 의미한다. 식 (6)을 통해 어레이 방사 빔 폭을 구할 수 있다.

이를 통해 계산한 수평 및 수직 방사 빔 패턴을 이용하여 평면 어레이의 빔 패턴을 구할 수 있고 목표 areal angle을 만족하는 능동소나 센서 어레이를 설계할 수 있다.

표 1. 어레이 설계목표
Table1. Array design objectives.

목표물 크기	목표 수평 빔폭	목표 수직 빔폭	목표 areal angle
10 × 20 (m)	0.36°	1.592°	0.5732
8 × 20 (m)	0.36°	1.274°	0.4586
6 × 20 (m)	0.36°	0.955°	0.3439
5 × 20 (m)	0.36°	0.796°	0.2866
4 × 20 (m)	0.36°	0.636°	0.2289

III. 설계 결과

본 논문에서는 착저중인 다양한 크기의 물체를 탐지하기 위한 어레이 설계를 수행하였다. 표 1에서 어레이 설계 목표 값들을 확인할 수 있다.

어레이의 형태는 평면 어레이 구조를 고려하였으며 반 파장 간격으로 음향 트랜스듀서를 배치하였다. 개별 트랜스듀서는 무지향성 (omni-directional)으로 가정하였다. 또한 조향각 (steering angle)은 0°로 설정하고 설계를 진행하였다. 설계 편의성을 위해 평면 어레이의 수평 빔 폭을 결정하는 방위각의 크기는 0.36°로 고정하였다. 고정된 수평 방위각의 빔 폭을 그림 2에서 확인할 수 있다. 그림 3에서는 areal angle을 이용하여 구한 목표 수직 고도각의 빔 폭을 보였다. 탐지 목표물의 크기가 작아짐에 따라 설계 빔 폭도 함께 작아지는 것을 확인할 수 있다.

그림 3(a)의 경우 탐지 목표물의 크기가 10 × 20m 인 경우 설계 수직 빔폭이다. 침투값보다 3-dB 낮은 크기를 갖는 유효 빔폭인 HPBW (Half Power Beam Width)는 1.5°로 설계하였다. 따라서 구현된 areal angle은 0.54°로 표 1에 제시한 설계 목표치 이하를 만족하여 목표물의 탐지가 가능하다. 평면 어레이를 구성하는 음향 트랜스듀서의 크기를 3cm 이하로 가정하면 제작된 어레이의 실측 크기는 5.99 × 10.94m가 된다.

그림 3(b)의 경우 탐지 목표물의 크기가 8 × 20m 인 경우 설계 수직 빔폭이다. 설계한 수직 빔폭의 HPBW는 1.2°이며 구현된 areal angle은 0.43이다. 이 경우 어

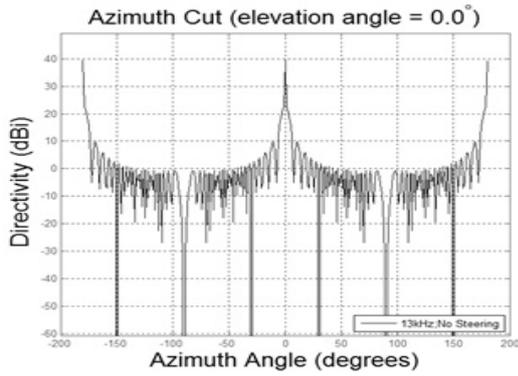
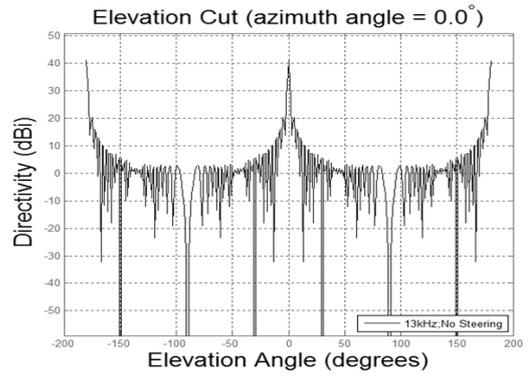
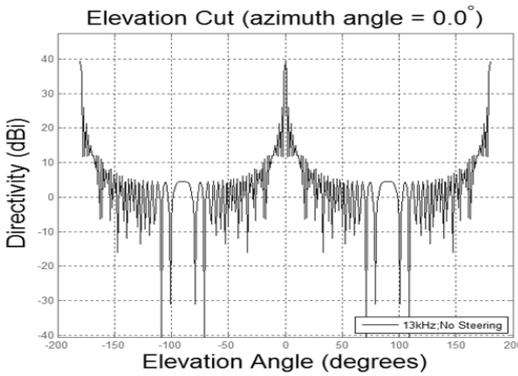


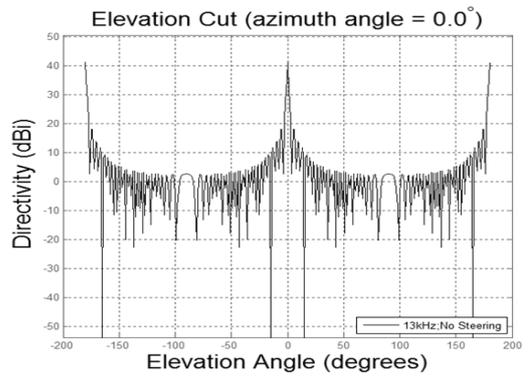
그림 2. 수평 방위각 빔 폭
Fig. 2. Horizontal Azimuth beamwidth.



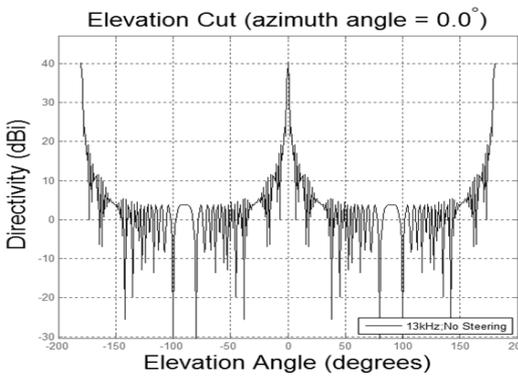
(d) 목표크기 5 × 20m



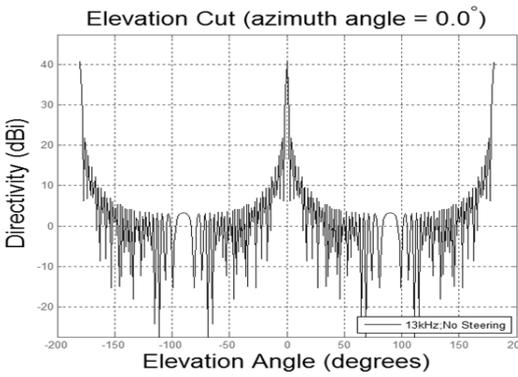
(a) 목표크기 10 × 20m



(e) 목표크기 4 × 20m



(b) 목표크기 8 × 20m



(c) 목표크기 6 × 20m

그림 3. 탐지 목표 크기 별 수직 고도각 목표 빔 폭, (a) 목표크기 10 × 20m, (b) 목표크기 8 × 20m, (c) 목표크기 6 × 20m, (d) 목표크기 5 × 20m, (e) 목표크기 4 × 20m

Fig. 3. Beam-width satisfied for vertical elevation angle with a) 10 × 20m target size, b) 8 × 20m target size, c) 6 × 20m target size, d) 5 × 20m target size, e) 4 × 20m target size

레이의 실측 크기는 7.09 × 10.94m이다.

그림 3(c)의 경우 탐지 목표물의 크기가 6 × 20m 인 경우 설계 수직 빔폭이다. 설계한 수직 빔폭의 HPBW는 0.8°이며 구현된 areal angle은 0.29이다. 이 경우 어레이의 실측 크기는 8.19 × 10.94m이다.

그림 3(d)의 경우 탐지 목표물의 크기가 5 × 20m 인 경우 설계 수직 빔폭이다. 설계한 수직 빔폭의 HPBW는 0.7°이며 구현된 areal angle은 0.25이다. 이 경우 어레이의 실측 크기는 8.74 × 10.94m이다.

그림 3(e)의 경우 실제 전해환경에서 착저중인 물체의 크기를 가정한 4 × 20m 길이의 탐지체를 탐지하기 위한 설계 수직 빔폭을 보였다. 이 경우 설계한 수직 빔폭의 HPBW는 0.58°이며 구현된 areal angle은 0.21로 제시한 설계 목표치인 0.2289를 만족시킨다. 실제 어레이를 제작한다고 가정하는 경우 어레이의 실측 크기는

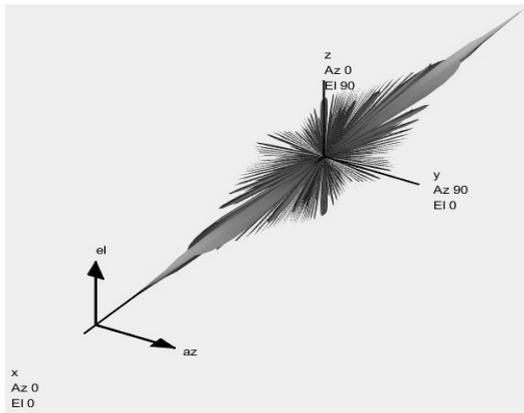


그림 4. 설계한 평면 어레이의 3차원 패턴
Fig. 4. 3-D beam pattern of designed planar array.

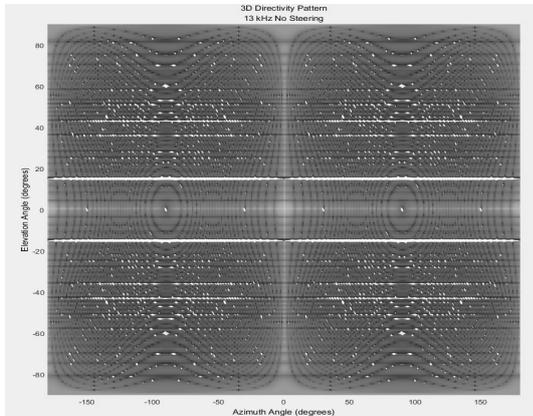


그림 5. 설계한 평면 어레이의 2차원 빔패턴
Fig. 5. 2-D beam pattern of designed planar array.

9.29×10.94m이며, 이 경우 어레이를 구성하기 위해 소요되는 음향 트랜스듀서의 개수는 수평배치 85개×수직배치 100개로 총 소요 음향 트랜스듀서의 갯수는 8500개가 된다.

그림 4에서는 그림 3(e)에서 설계한 어레이의 3차원 응답 빔 패턴 (3-D response beam pattern)을 보였다. 천해환경에서는 원양의 환경이나 심해환경과 비교하여 간섭원의 종류와 크기가 더 다양한 형태로 나타난다. 따라서 어레이의 설계는 부엽의 간섭을 최소화하고, 특히 메인 빔의 지향성 이득 (directivity index)을 최대화하여야 한다. 설계된 어레이의 3차원 빔 패턴을 보면 어레이에서 직교하는 방향으로 매우 좁고 집약된 형태의 메인 빔 패턴을 확인할 수 있다. 메인 빔의 정규화된 지향 이득은 약 10dB이며 가장 근접한 부엽의 지향 이득은 약 -50dB로 관측되어 부엽의 간섭을 최소화 한 것을 확인할 수 있다.

그림 5는 그림 4의 3차원 패턴을 2차원으로 도식한 것으로 설계된 어레이의 빔 집중 형태를 조금 더 명확

하게 확인할 수 있다. 그림의 가로축은 방위각 해상 패턴의 지향성 이득을, 세로축은 고도각 해상 패턴의 지향 이득의 크기를 의미한다. 그림을 통해 적절한 설계로 인해 부엽의 영향이 최소화되고 패턴의 중심에서 방위각과 고도각 해상도의 양 측면에서 간섭 없이 지향성 이득의 크기가 최대화 된 것을 확인할 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 1 km 이내의 근거리에서 다양한 크기의 목표물을 탐지하기 위한 평면 어레이 설계를 수행하였다. 먼저 거리 해상도를 만족시키기 위해 선행 연구를 통해 얻은 결과를 이용하여 13 kHz의 중심주파수를 갖는 LFM 신호를 사용하였다. 목표 공간 해상도를 결정하기 위한 탐지 목표물의 크기는 해저면에 착저중인 미확인 이동물체 (AUV)나 잠수정의 일반적인 크기를 고려하여 임의로 설정하였으며 이를 탐지할 수 있는 공간 분해능을 만족시키는 areal angle을 계산하여 어레이의 설계를 진행하였다. 본 연구에서는 설계 편의성을 위해 목표 수평 방위각의 크기를 고정하고 설계를 진행하여 실제 어레이를 제작하는 문제에 있어 제약 사항으로 작용할 수 있다. 향후 탐지 목표의 크기 이외에 어레이의 제작 크기 역시 고려하여 좀 더 가변적인 평면 어레이의 설계 연구를 진행하고자 한다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었으며, 이에 대해 깊이 감사를 드립니다. (계약번호 UD140004DD)

REFERENCES

- [1] E. M. Sozer, M. Stojanovic and J. G. Proakis, "Underwater acoustic networks," IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 25, no. 1, pp. 72-83, Jan. 2000.
- [2] D. A. Abraham and P. K. Willett, "Active sonar detection in shallow water using the Page test," IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 27, no. 1, pp. 35-46, Jan., 2002.
- [3] B. Erkmen, T. Yildirim, "Improving classification performance of sonar targets by applying general regression neural network with PCA," Expert Systems with Applications, vol. 35, no.

- 1-2, pp.472-475, July, 2008.
- [4] D. Li, M. R. Azimi-Sadjadi, M. Robinson, "Comparison of different classification algorithms for underwater target discrimination," *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 15, no. 1, pp. 189-194, Jan. 2004.
- [5] M. Swift, J. L. Riley, S. Lourey and L. Booth, "An overview of the multistatic sonar program in Australia", *Proc. ISSPA'99*, pp. 321-324.
- [6] L. Yang and Z. M. Cai, "Analysis of detectable region for the bistatic sonar in reverberation background", *J. of Harbin Engineering University*, vol. 27, pp. 597-602, Aug. 2006.
- [7] S. G. Kargl, A. L. Espana, K. L. Williams, J. L. Kennedy and J. L. Lopes, "Scattering From Objects at a Water-Sediment Interface: Experiment, High-Speed and High-Fidelity Models, and Physical Insight," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 40, no. 3, pp. 632-642, July 2015.
- [8] S. G. Kargl, K. L. Williams, T. M. Marston, J. L. Kennedy and J. L. Lopes, "Acoustic response of unexploded ordnance (UXO) and cylindrical targets," *OCEANS 2010 MTS/IEEE SEATTLE*, Seattle, WA, 2010, pp. 1-5.
- [9] X. Qing, D. Nie, G. Qiao and J. Tang, "Dolphin bio-inspired transmitting waveform design for cognitive sonar and its performance analysis", *2016 IEEE/OES China Ocean Acoustics (COA)*, china, 2016.
- [10] S.H. Kim, J.W. Jung, B.S. On, S.B. Im and I.S. Seo "Optimum Frequency Analysis for Sonar Transmit Signal design", *Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers of Korea*, Vol. 53, No. 5, pp. 47-54, May, 2016.
- [11] B.S. On, S.H. Kim, W.S. Moon, S.B. Im and I.S. Seo "Detection of an Object Bottoming at Seabed by the Reflected Signal Modeling", *Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers of Korea*, Vol. 53, No. 5, pp. 55-65, May, 2016.
- [12] D.H. Johnson, D.E. Dudgeon, *Array Signal Processing*, Prentice Hall, New Jersey, 1993.
- [13] T. Van, L. Harry, *Optimum array processing : Detection, estimation, and modulation theory*, Wiley, New Jersey, 2004.
- [14] R. J. Urick, *Principles of Underwater Sound*, McGraw-Hill, 1983.

저 자 소 개



김 선 호(학생회원)
2007년 숭실대학교 정보통신전자공학부 학사
2009년 숭실대학교 정보통신공학과 석사
2009년~현재 숭실대학교 정보통신공학과박사과정 재학중

<주관심분야: 수중신호처리, 통신신호처리, 생체신호처리, 선형·비선형 모델링>



정 장 원(학생회원)
2015년 연세대학교 정보통신공학과 학사
2015년~현재 숭실대학교 정보통신공학과 석사과정 재학중
<주관심분야: 수중음향신호처리, 생체신호처리>



은 백 산(학생회원)
2016년 숭실대학교 정보통신전자공학부 학사
2016년~현재 숭실대학교 정보통신공학과 석사과정 재학중
<주관심분야: 수중음향신호처리, 생체신호처리>



임 성 빈(정회원)-교신저자
1986년 서울대학교 전자공학과 학사
1988년 서울대학교 전자공학과 석사
1994년 University of Texas at Austin 전기 및 컴퓨터 공학과 박사

1995년~현재 숭실대학교 전자정보공학부 교수
<주관심분야: 수중신호처리, 비선형 신호처리, 통신시스템, 저장장치시스템>



서 익 수(정회원)
1999년 명지대학교 전자전기공학과 학사
2001년 연세대학교 전기컴퓨터공학과 석사
2001년~현재 국방과학연구소 선임연구원

<주관심분야: 수중음향신호처리, 소나 표적탐지 및 추적, 표적 식별>