

한국 근해에서의 실측 데이터를 이용한 합성 어퍼처 소나 실험에 관한 연구

An Experimental Study on Synthetic Aperture Sonar under Korean Littoral Environment

강 현 우*, 박 회 영**, 도 경 철***

(Hyun-Woo Kang*, Hee-Young Park**, Kyeong-Cheol Dho***)

*강남대학교 컴퓨터미디어공학부, **연세대학교 전기전자공학과, ***국방과학연구소

(접수일자: 2004년 7월 14일; 채택일자: 2004년 8월 9일)

물리적으로 제한된 길이의 어레이를 확장함으로써 소나 시스템의 표적 탐지 성능을 향상시키기 위한 합성 어퍼처 소나에 대한 실험을 하였다. 어퍼처 영역이나 빔 영역에서 어레이를 합성하는 기존의 실험에서는 어레이의 형상을 선형으로 가정하기 때문에 실제 상황과 오차가 발생하게 된다. 본 논문에서는 왜곡된 어레이의 형상을 추정하여 왜곡을 보상한 후에 어퍼처 영역에서 어레이를 합성하는 실험을 하였다. 실험 데이터로는 한국 근해에서 견인 어레이로부터 획득한 데이터를 이용하였으며 실측된 데이터만으로 중첩되는 부어레이 간의 시·공간적인 위상 차이를 보상함으로써 어레이 길이를 확장하였다. 실험 결과 합성에 의해서 방향 탐지 분해능이 향상되는 것을 확인할 수 있었고, 5번 합성으로 3dB 빔폭이 약 70% 줄어드는 결과를 얻었다.

핵심용어: 합성 어퍼처 소나, 어레이 형상 추정, 한국 근해 실측 데이터, 방향 탐지

투고분야: 수중음향 분야 (5.6)

Synthetic Aperture Sonar is a technique of extending physically limited length of an array by signal processing to enhance bearing resolution of a system. The previous techniques estimate most of array shapes as linear, so when towed array shapes are distorted, this can create a deviation from actual situation. In this paper, we estimated perturbed array shapes, and compensated distortion by using estimated array shapes and synthesized arrays in aperture domain. As experimental data, we used the one obtained from towed array in neighboring waters of the Korean peninsula. We extended array by compensating differences in time and spatial position between overlapped subarrays by using SAS techniques. In simulation results, we confirmed that the bearing resolution was enhanced.

Keywords: Synthetic aperture sonar, Array shape estimation, Korean littoral environment, Bearing estimation

ASK subject classification: Underwater acoustics (5.6)

I. 서론

수중 음향 시스템에서 선형 어레이는 수중 음원의 방향을 탐지하기 위해 널리 이용된다. 저주파 신호를 검출하여 신호 처리하는 선형 어레이 시스템에서는 신호 방향에 대한 각분해 능력과 출력 신호 대 잡음비 (SNR)가

중요한 요소이며, 이는 어레이 어퍼처의 길이와 목표 신호 파장의 비에 의해 결정이 된다[1]. 일반적으로 어레이 어퍼처 길이가 길수록 어레이 시스템의 성능이 향상되지만 물리적으로 긴 길이의 어레이를 운용하기 위해서는 많은 제약이 따른다. 이를 해결하기 위해 견인 어레이 (towed array)를 이용하여 한정된 길이의 어퍼처로부터 입력되는 신호를 코히어런트하게 합성함으로써 어퍼처 길이를 확장한 것과 같은 효과를 얻을 수 있는 합성 어퍼처 소나 (SAS : Synthetic Aperture Sonar) 기술

[2-4]이 개발되었다.

SAS 기법은 크게 어퍼쳐 영역에서 처리하는 방법과 빔 영역에서 처리하는 방법으로 나눌 수 있다. 어퍼쳐 영역에서 처리하는 대표적인 방법으로는 ETAM (Extended Towed Array Measurements) 기법[2]이 있고, 빔 영역에서의 기법은 Yen과 Carey 기법[3], FFTSA (Fast Fourier Transform Synthetic Aperture) 기법[4] 등이 있다. ETAM 기법은 견인 어레이를 이동시키면서 일정 시간 간격으로 연속적으로 얻어지는 부어레이 신호들 사이에 중첩되는 부분의 데이터들을 중첩 상관기 (overlap correlator)를 이용하여 위상 보정 성분을 구하고, 이를 이용하여 어퍼쳐의 길이를 늘이는 합성 기법이다. Yen과 Carey 기법은 신호원과 수신기의 상대 속도를 이용하여 위상 보정 성분을 구함으로써 부어레이의 빔을 코히어런트하게 합성하는 기법이다. FFTSA 기법은 Yen과 Carey 기법에서 요구되는 상대 속도를 직접 사용하지 않고, 연속적인 시간 간격으로 얻어지는 부어레이 신호를 FFT 변환함으로써 빔 영역에서 코히어런트하게 합성하는 기법이다.

실제 해양 환경에서 ETAM 방법을 이용하여 어레이를 합성하는 실험 논문들이 발표되었다[5-6]. 이 논문들은 모두 어레이를 장착한 견인선의 속도가 일정하고 어레이가 선형을 유지한다는 가정을 하고 있다. 하지만 실제 상황에서는 견인선의 방향 전환, 조류나 파도의 영향 등으로 인해 어레이가 선형을 유지하기는 불가능하고 이로 인해 방향 탐지 성능의 저하가 불가피하게 된다[7]. 따라서 전처리단에서 어레이 형상 추정 기법을 이용하여 형상이 왜곡된 어레이의 하이드로폰 위치를 추정하여 형상 왜곡을 보정한 후에 어레이를 합성하는 방법이 필요하다. 또한 기존의 SAS 기법들은 복소수 데이터를 이용하여 위상 보정 성분을 계산하는데 실제 하이드로폰으로부터 획득한 데이터는 실수 값이기 때문에 기존의 SAS 기법에서는 Hilbert 변환 등을 이용하여 실수 값을 복소수 값으로 변환하여 위상 보정 성분을 계산할 수밖에 없다. 따라서 실수 값만을 이용하여 어레이를 합성하는 방법의 도입이 필요하다.

본 논문에서는 실측 데이터로부터 선형 견인 어레이의 왜곡된 형상을 추정하여 왜곡을 보정한 후에 어퍼쳐 영역에서 어레이를 합성하는 실험을 하였다. 실험 데이터로는 한국 근해에서 선형 견인 어레이로부터 획득한 데이터를 이용하였으며, 견인선의 속도 성분을 이용하여 실측된 실수부 데이터만으로 중첩되는 부어레이 간의 시

간, 공간적인 위상 차이를 보상함으로써 어레이의 길이를 확장하였다. II장에서는 어퍼쳐 영역에서 어레이를 합성하는 기법에 대한 설명을 하였고, III장에서는 실측 데이터를 이용한 어레이 합성과 방향 탐지 실험 결과를 살펴보았다. 이어서 IV장에서 결론을 맺는다.

II. 어퍼쳐 영역에서의 어레이 합성 방법

대표적인 어퍼쳐 영역에서의 어레이 합성 방법인 ETAM 방법에 대해 살펴본 후 본 논문에서 사용한 어레이 합성 방법에 대해 설명하겠다. 이어서 본 논문에서 어레이의 형상 추정을 위해 사용한 반복 다항 근사 기법을 이용한 어레이 형상 추정 기법에 대해 설명하겠다.

2.1. ETAM (Extended Towed Array Measurements)

ETAM 방법[2]은 그림 1에서의 같이 N 개의 하이드로폰으로 구성된 선형 견인 어레이를 이동하면서 연속하는 스냅샷 (successive snapshot) ($l=0, 1, \dots, L$)에 받아들인 하이드로폰 신호들 가운데 공간적으로 중첩되는 $N-q$ 개 샘플들의 상관관계 (correlation)를 통해 부어레이 간의 위상 보정 성분을 계산한다. 이 방법은 위상 보정 성분을 중첩 상관기에 의해 직접 계산하기 때문에 어퍼쳐를 합성하기 위해 목표물의 주파수를 사전에 추정할 필요가 없다. 여기에서 L 은 합성 횟수를 나타낸다.

N 개의 하이드로폰으로 구성된 선형 어레이에서, θ 의 입사각으로 n 번째 하이드로폰에 입력되는 신호는 일반적으로 다음과 같이 표현된다.

$$x_n(t_i) = s\left(t_i - \frac{(n-1)d}{c} \sin \theta\right) + \varepsilon_n(t_i), \quad n=1, 2, \dots, N \quad (1)$$

여기서 입력된 신호 $s(t)$ 는 Δt 시간 간격으로 표본화되며, 각 하이드로폰 출력에서 샘플 개수는 M 개이다. 즉, $t_i = i\Delta t$, $i=0, 1, 2, \dots, M-1$ 이다. d 는 센서 간의 간격, c 는 수중에서 음향 신호의 전파 속도이며, $\varepsilon_n(t_i)$ 는 평균값이 0이고 샘플 간에 상관관계가 없는 가우시안 (Gaussian) 잡음 신호이다.

$s(t_i)$ 가 식 (2)와 같은 협대역 (narrowband) 신호라고 가정하자.

$$s(t_i) = A \exp(j\omega_d t_i) \quad (2)$$

여기서 A는 신호의 크기이며, ω_d 는 수신 신호의 라디안 주파수이다. 어레이의 이동 속도가 v이고, 입사각 방향으로의 속도 성분은 무시할 수 있을 정도로 작다고 가정하며, 중심 주파수 ω_0 를 갖는 원거리 신호원의 이동 속도 역시 무시할 수 있을 정도로 작을 때, 수신 신호의 라디안 주파수 ω_d 는 식 (3)으로 표현할 수 있다.

$$\omega_d = \omega_0 \left(1 \pm \frac{v \sin \theta}{c} \right) \quad (3)$$

따라서 식 (1)을 식 (4)와 같이 근사화시킬 수 있다.

$$x_n(t_i) = A \exp \left[j\omega_0 \left(t_i - \frac{vt_i + (n-1)d}{c} \sin \theta \right) \right] + \varepsilon_n(t_i) \quad (4)$$

τ 만큼 시간이 흐른 뒤 부어레이에서 취득된 데이터는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$x_n(t_i + \tau) = \exp(j\omega_0 \tau) \cdot A \exp \left[j\omega_0 \left(t_i - \frac{vt_i}{c} \sin \theta - \frac{v\tau + (n-1)d}{c} \sin \theta \right) \right] + \varepsilon_n(t_i + \tau) \quad (5)$$

또한 시간 t_i 에서 n+q번째 하이드로폰으로부터 얻은 데이터의 표현은 식 (6)과 같이 된다.

$$x_{n+q}(t_i) = A \exp \left[j\omega_0 \left(t_i - \frac{vt_i}{c} \sin \theta - \frac{(n+q-1)d}{c} \sin \theta \right) \right] + \varepsilon_{n+q}(t_i) \quad (6)$$

여기서 q는 그림 1에서와 같이 측정 시간 간격인 τ 시간 동안 이동한 센서의 개수이며, 이는 첫 번째 부어레이의 q+1 번째 하이드로폰과, τ 만큼 시간이 흐른 뒤의 상태인 두 번째 부어레이의 첫 번째 하이드로폰 사이의 공간적 위치가 일치함을 의미한다. 결국 이 위상 성분은 τ 만큼의 시간 지연과 어레이의 이동으로 인한 공간상의 위치 변화가 모두 고려된 결과이다. 배경 잡음이 없는 이상적인 환경이 가정되고 $v\tau = qd$ 조건이 성립될 때 식 (5)와 식 (6)사이에는 식 (7)과 같은 관계가 성립된다.

$$x_n(t_i + \tau) = \exp(j\omega_0 \tau) x_{n+q}(t_i) \quad (7)$$

따라서 첫 번째 부어레이와 두 번째 부어레이 사이에 중첩된 하이드로폰들 간의 위상 성분은 식 (8)에 의해 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Psi_n &= \arg \{ x_{n+q}(t_i) x_n^*(t_i + \tau) \} \\ &= \arg \{ A^2 \exp(-j\omega_0 \tau) \} \\ &= -\omega_0 \tau, \quad n = 1, 2, \dots, q \end{aligned} \quad (8)$$

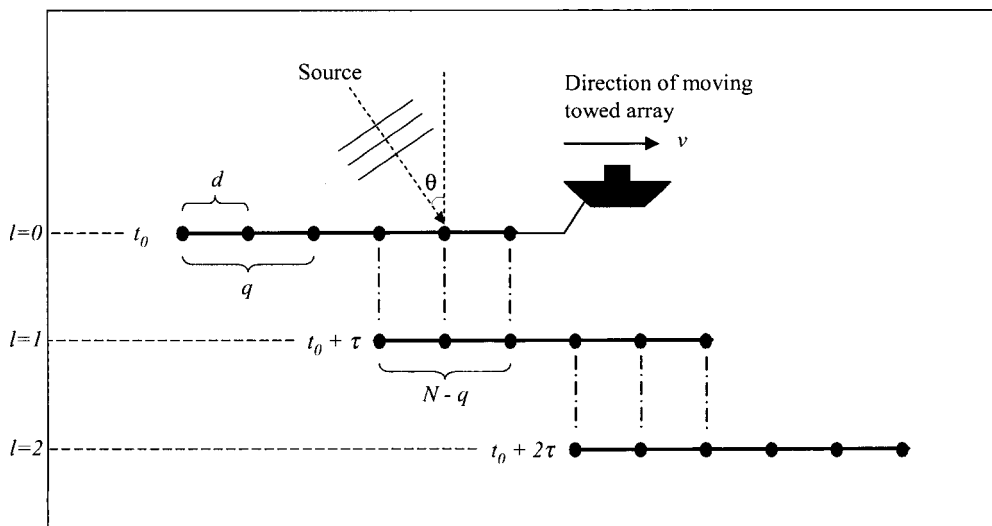


그림 1. ETAM 방법.
Fig. 1. The ETAM method.

여기서 (*)는 공액 복소 연산자를 나타내고, arg()는 괄호 안에 해당하는 부분의 위상 성분을 의미한다. N-q는 중첩되는 하이드로폰의 개수를 의미한다. 잡음이 없는 이상적인 경우에 ψ_n 은 모든 n에 대해 같은 값을 갖게 되지만 실제로는 잡음 성분으로 인해 각각의 ψ_n 값은 오차를 포함하게 되므로 N-q개의 추정된 위상 성분으로부터 최소자승법(least square method)에 의해 확장될 어레이 부분의 신호를 위한 위상 보정 성분을 식 (9)와 같이 추정한다.

$$\Psi = \frac{1}{N-q} \sum_{n=1}^{N-q} \psi_n + \hat{\epsilon}_\Psi \quad (9)$$

여기서 신호의 코히어런스가 유지되는 동안에는 위상 성분들의 값이 거의 일치하기 때문에 위상 성분들 사이에 존재하는 오차 $\hat{\epsilon}_\Psi$ 는 매우 작은 값이 되며 중첩되는 하이드로폰의 개수 N-q가 증가함에 따라 0에 가까워진다. 식 (8), (9)에서 구한 위상 보정 성분을 식 (7)의 관계와 같이 $x_n(t_i + \tau)$, $n = N - q + 1, \dots, N$ 에 적용시켜 $x_n(t_i)$, $n = N + 1, \dots, N + q$ 를 구할 수 있다. 따라서 한번의 합성으로 어레이 길이가 q 개만큼 늘어나는 효과를 얻을 수 있다. 전체 하이드로폰 개수의 50%를 중첩시켰을 때 최적의 합성 효과를 얻을 수 있다고 알려져 있다[5].

2.2. 어퍼쳐 영역에서 건인선의 속도를 이용한 어레이 합성 방법

일반적인 SAS 기법에서는 데이터를 복소수로 가정하고 공간적으로 중첩되는 하이드로폰 사이의 위상 보정 성분을 계산하지만, 실제 해양 환경에서 하이드로폰으로

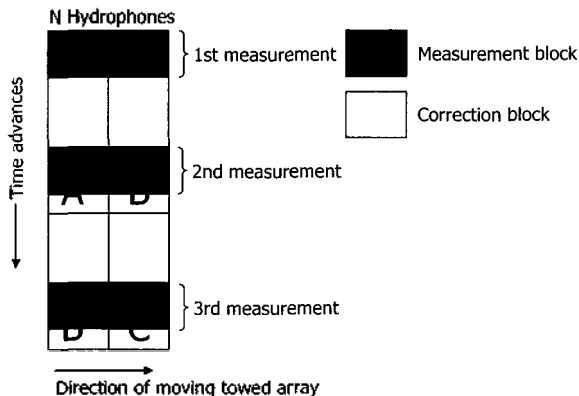


그림 2. 실측 데이터를 이용한 어퍼쳐 영역에서의 어레이 합성 방법.
Fig. 2. A Synthetic aperture array method using the data obtained from towed array in aperture domain.

부터 획득한 데이터는 복소수 값이 아닌 실수 값이기 때문에 이러한 방법이 불가능하다. 따라서 실수부 데이터만으로 중첩되는 부어레이간의 공간적인 위상 차이를 보상하는 방법이 필요하다. Hilbert 변환을 이용하여 실수부 데이터를 복소수로 변환한 후 처리하는 방법이 일반적이지만 본 논문에서는 실제 구현을 고려하여 실수부 데이터만을 이용하는 방법을 고려하였다. 어퍼쳐 영역에서 실수부 데이터만을 이용하여 중첩되는 부어레이 간의 공간적인 위상 차이를 보상함으로써 어레이를 합성하는 방법을 그림 2에 나타내었다.

실측 데이터는 N개의 하이드로폰으로부터 매초마다 샘플링 주파수에 해당되는 개수만큼씩 연속적으로 얻어진다. 이와 같이 연속적으로 얻어지는 데이터를 그림 2에 나타낸 바와 같이 동일한 공간상에서 수신된 데이터들 (A-A', B-B', ...)간의 위상 차이를 고려하여 코히어런트하게 합성하기 위해 다음과 같은 과정을 거친다.

먼저 알고 있는 건인선의 속도 성분을 이용하여 하이드로폰이 N-q개만큼 중첩되는 시간 지연을 계산하여 첫 번째 측정 데이터 블록 A와 공간적으로 중첩되는 두 번째 측정 데이터 블록 A'을 찾는다. 다음은 공간적으로 중첩되는 블록 A와 블록 A'내 하이드로폰간의 공간적인 위상 차이를 시간 단위로 계산하고, 샘플링 주파수를 이용하여 이를 샘플 단위로 변환한다. 이와 같이 구한 중첩되는 블록 사이의 공간적인 위상 차이 정보와 전처리단에서 추정한 어레이의 형상 왜곡 정보를 이용하여 B의 보정된 블록을 찾는다. 첫 번째 측정 데이터 블록의 앞쪽에 B의 보정된 블록을 연결함으로써 합성된 데이터를 얻는다. 이와 같은 방법으로 원하는 횟수만큼 어레이를 합성하면 신호 처리적으로 어레이의 길이를 늘일 수 있고, 합성된 데이터를 이용하여 분해능이 좋은 빔 형성을 할 수 있게 된다. 최적의 결과를 얻기 위해 물리적인 어퍼쳐 길이의 50%를 중첩시켜서 합성한다면 한번 합성으로 어퍼쳐의 길이가 50% 늘어난 효과를 얻을 수 있다.

2.3. 반복 다항 근사 기법을 이용한 어레이 형상 추정 기법[8, 9]

다항 근사화 (polynomial fitting) 기법은 추정하려는 어레이의 형상을 n차 다항식으로 표현할 수 있다는 가정 하에 수평 좌표를 등간격으로 가정하고 수직 왜곡 정도를 추정하는 기법이다. 이 기법을 이용하는 경우, 수평 좌표가 하이드로폰 사이의 실제 간격과 동일하게 되므로 추정된 좌표들의 수평 좌표에는 오차가 발생하게 된다.

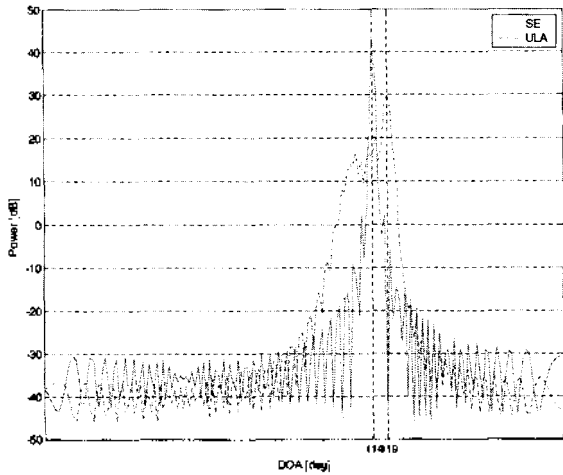


그림 3. 왜곡된 어레이를 이용한 방향 탐지 성능 비교(점선 : ULA 가정, 실선 : 형상 왜곡 보상).

Fig. 3. The comparison of bearing estimation results for perturbed array: dotted line is in case of ULA assumption, solid line is in case of compensating distortion.

스플라인 보간법 (spline interpolation)을 후처리로 이용하여 수평 좌표를 보정해 주어 어레이의 형상을 추정하면 형상 추정 오차가 감소하게 된다. 그러나 이 경우 어레이 형상을 추정하기 위하여 이용한 보조 센서의 위치 정보는 등간격으로 가정한 경우와 달라지게 되어 형상 추정에 이용된 보조 센서의 위치 정보와 실제 보조 센서의 위치 사이에 오차가 발생하게 된다. 따라서 이러한 오차를 줄이기 위해 스플라인 보간법을 이용하여 보조 센서의 수평 좌표를 수정하고 여기에서 결정된 수평 좌표를 이용하여 다시 기존의 어레이 형상 추정 기법에 적용하는 반복 과정이 필요하게 된다. 이러한 반복 스플라인 보간법을 이용하게 되면 어레이 형상 추정의 수평 좌표와 보조 센서 위치 오차로 인한 형상 추정 오차를 줄일 수 있다. 3차에서 5차 정도의 다항식을 사용하여 어레이의 형상을 추정하는 것이 일반적이다.

III. 실험 결과

이론적으로 신호를 모델링하는 경우에 어레이 형상 왜곡이 방향 탐지 성능에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 왜곡된 어레이의 형상 정보를 알고 있는 상황에서, 왜곡을 보정한 후의 목표물 방향 탐지 결과와 왜곡된 어레이를 ULA (Uniformly Linear Array)로 가정했을 때의 목표물 방향 탐지 결과를 비교하는 모의실험 결과를 그림 3에 나타내었다. 알고 있는 형상 정보를 이용하여 왜곡을 보정한 후 방향을 탐지했을 경우 (실선)는 정확히 목표물의 방향 (DOA : Direction Of Arrival)을 탐지할 수 있었으나, 어레이를 ULA로 가정하여 방향을 탐지했을 경우 (점선)는 목표물 추정 방향에 오차가 발생하는 것을 볼 수 있다. 어레이의 최대 수직 왜곡이 전체 어레이 길이 대비 4% 정도일 경우 방향 탐지 오차가 약 5° 발생하였다.

다음은 2003년 9월 한국 근해에서 선형 견인 어레이를 통해 획득한 데이터를 사용하여 그림 4와 같은 절차로 어레이 합성 실험을 하였다. 실험에 사용한 데이터는 저주파 대역 신호에 맞추어진 어레이로부터 획득한 데이터를 사용하였으며 실험의 편의를 위해 견인선의 속도가 어느 정도 일정하게 유지되는 부분의 데이터를 이용하였다. 이 때 견인선의 속도는 5.2knot 였다.

먼저 실측 데이터를 각 어레이의 목표 주파수 대역에 해당하는 대역 통과 필터를 통과시킨 후 어레이 형상 추정을 통해 어레이의 형상 정보를 구하였다. 이를 이용해 어레이의 형상 왜곡을 보정하고 견인선의 속도 성분을 이용하여 어퍼처 영역에서 중첩되는 부어레이간의 공간적인 위상 차이를 보상함으로써 어레이의 길이를 신호 처리적으로 확장시켰다. 어레이의 형상 왜곡을 보정한 경우와 보정하지 않은 경우를 비교함으로써 형상 왜곡이 목표물의 위치 추정에 미치는 영향에 대해 살펴볼 수 있

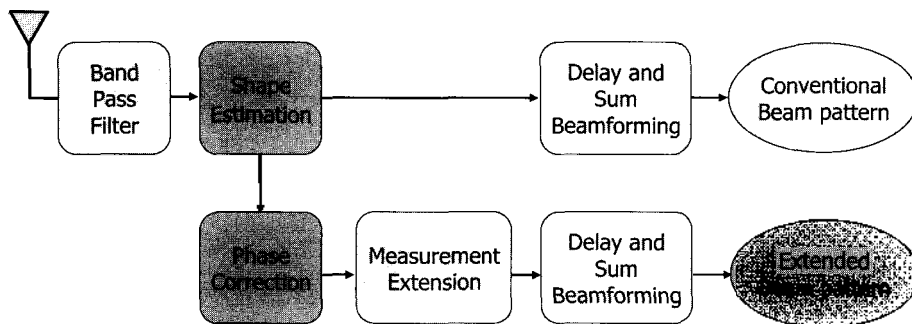


그림 4. 실측 데이터를 이용한 어레이 합성 실험 환경 블록도.
Fig. 4. The block diagram of simulation environments of synthetic aperture array.

다. 또한 물리적인 어레이를 이용한 방향 탐지 결과와 신호 처리적으로 합성된 어레이를 이용한 방향 탐지 결과를 비교함으로써 SAS의 효과를 살펴볼 수 있다. 이 때 형상 추정 기법으로는 반복 스플라인 보간법을 이용한 다항 근사 방법[8, 9]을 이용하였으며, Delay and Sum 범형성기[10]를 이용하여 방향을 탐지하였다. 데이터 획득에 사용한 물리적인 어레이의 하이드로폰 개수는 80개이며, 이 중 일부의 하이드로폰으로 SAS를 할 때는 50%씩 중첩시켜서 합성하였다.

그림 5는 어레이를 형상 왜곡이 없는 ULA로 가정했을 때의 방향 탐지 결과 (점선)와 어레이의 형상 왜곡을 추정하여 왜곡된 정도를 보정한 후의 방향 탐지 결과 (실선)를 비교한 것이다. 실측 데이터로부터 형상 추정된 어레이의 최대 수직 왜곡은 전체 어레이 길이 대비 4% 정도로 나타났다. ULA로 가정한 경우와 형상 왜곡을 보정한 경우의 방향 탐지 오차는 이론적으로 신호를 모델링한 그림 3의 결과와 비슷한 6° 정도 발생함을 알 수 있다. 따라서 어레이의 형상이 왜곡될 수밖에 없는 실제 상황에서 목표물의 정확한 방향 탐지를 위해서는 어레이의 형상 왜곡을 추정하여 보정한 후에 신호 처리를 하는 것이 바람직하다고 할 수 있다.

SAS의 효과를 관찰하기 위하여 하이드로폰 개수가 80개인 물리적인 어레이 중 앞부분 40개만의 하이드로폰 데이터를 이용하여 합성하는 실험을 하였고, 그 결과를 그림 6에 표시하였다. 이 때 어레이의 형상을 추정하여 왜곡을 보정한 후에 합성을 하였다. 그림 6의 점선은 40개의 하이드로폰 데이터로 방향 탐지한 결과이고, 파선은 40개를 50% 중첩시켜서 한 번 합성하여 60개로 길이

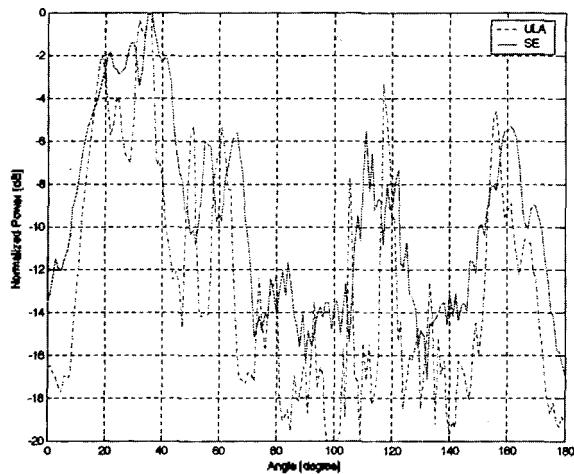


그림 5. ULA로 가정했을 경우와 형상 추정 결과를 이용했을 경우의 방향 탐지 결과 비교 (점선 : ULA 가정, 실선 : 형상 왜곡 보상).

Fig. 5. The comparison of bearing estimation results in case of ULA assumption(dotted line) and compensating distortion (solid line).

를 확장한 후 방향 탐지한 결과를 나타내었다. 그리고 실선은 40개를 두 번 합성하여 80개로 길이를 확장한 후 방향 탐지한 결과를 나타내었다. 합성 횟수가 늘어날수록 표적의 방향을 유지하면서도 방향 탐지 분해능이 점차 좋아지는 것을 볼 수 있다.

그림 7은 하이드로폰 개수가 80개인 물리적인 어레이의 앞부분 20개만의 하이드로폰 데이터를 이용하여 합성 효과를 살펴본 결과이다. 20개로 방향 탐지한 결과 (점선), 20개를 50% 중첩시켜서 세 번 합성한 후 방향 탐지한 결과(파선), 그리고 20개를 여섯 번 합성한 후 방향 탐지한 결과 (실선)를 나타내었다. 역시 어레이의 형상을 추정하여 왜곡을 보정한 후에 합성을 하였다. 마찬가지로 합성 횟수가 늘어날수록 표적의 방향을 유지하면서도 방향 탐지 분해능이 점차 좋아지는 것을 확인할 수 있다. 약간의 방향 탐지 오차가 발생한 것은 SAS를 위해 데이터를 취득하는 동안 견인선이 이동함에 따른 영향으로 보인다.

그림 8에서는 물리적인 어레이와 합성한 어레이가 동일한 길이인 경우 방향 탐지 성능을 비교하였다. 그림 8의 점선은 물리적인 어레이 80개로 방향 탐지한 결과를 보여주며, 파선은 40개의 어레이를 두 번 합성하여 가상으로 80개의 어레이를 만든 후 방향 탐지한 결과를 보여준다. 또한 실선은 20개의 어레이를 여섯 번 합성하여 가상으로 80개의 어레이를 만든 후 방향 탐지한 결과를 보여준다. 이 결과를 비교해 봤을 때 20개로 합성한 어레이의 결과보다는 40개로 합성한 어레이의 결과가 물리적인 80개로 방향 탐지한 결과에 훨씬 더 비슷하게 나

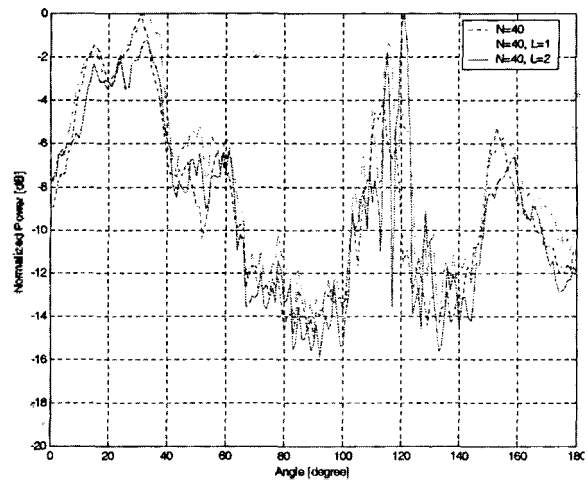


그림 6. 40개의 하이드로폰으로 합성 횟수에 따른 방향 탐지 결과 비교 (점선 : 40개로 방향 탐지, 파선 : 40개로 한 번 합성, 실선 : 40개로 두 번 합성).

Fig. 6. The comparison of bearing estimation results with respect to the number of synthesis using the data obtained from 40 hydrophones. distortion(solid line).

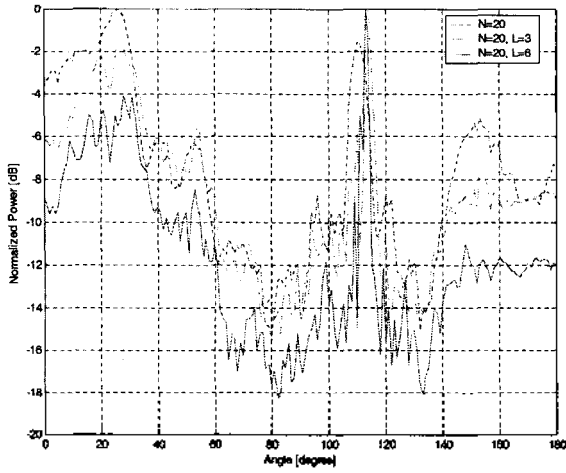


그림 7. 20개의 하이드로폰으로 합성 횟수에 따른 방향 탐지 결과 비교 (점선 : 20개로 방향 탐지, 파선 : 20개로 세 번 합성, 실선 : 20개로 여섯 번 합성).

Fig. 7. The comparison of bearing estimation results with respect to the number of synthesis using the data obtained from 20 hydrophones.

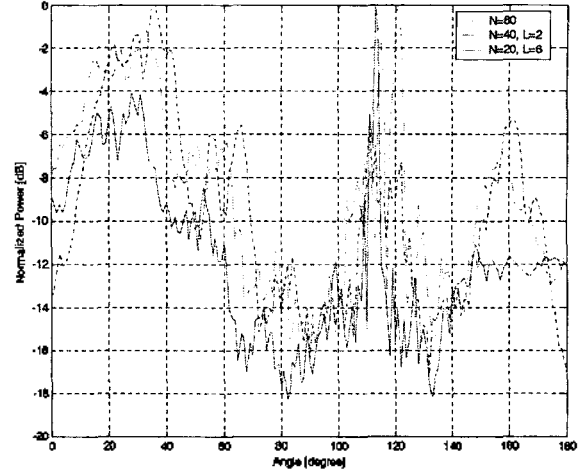


그림 8. 물리적 어레이를 이용한 방향 탐지 결과(N=80)와 합성 어레이를 이용한 방향 탐지 결과 비교 (점선 : 물리적인 어레이 80개, 파선:40개로 두 번 합성, 실선:20개로 여섯 번 합성).

Fig. 8. The comparison of bearing estimation results in case of using the physical array and synthetic array: dotted line is in case of physical array, dashed line is 2 times synthesis using 40 hydrophones, and solid line is 6 times synthesis using 20 hydrophones.

타남을 알 수 있다.

방향 탐지 분해능의 향상 정도를 살펴보기 위하여 합성 횟수에 따른 3dB 빔폭을 그림 9에 나타내었다. 그림 7에서와 같이 하이드로폰 개수가 20개인 어레이를 10번 까지 합성하면서 방향 탐지한 결과 중 113° 부근 빔의 3dB 빔폭을 측정하였다. 형상 왜곡이 없는 ULA로 가정한 결과 (○)와 형상 왜곡을 보정한 결과 (■) 모두 5번 합성할 때까지는 지속적으로 3dB 빔폭이 줄어드는 것으로 보아 합성 효과가 있음을 알 수 있다. 그 이후는 다소 불규칙한 양상을 보이고 있는데, 이는 합성 횟수가 늘어남에 따라 실측 데이터의 코히어런스가 떨어지기 때문으로 판단된다. 형상 왜곡을 보정한 경우 3dB 빔폭이 합성 전 5.6°에서 5번 합성하였을 때 1.7°로 3.9°만큼 감소하여, 합성 전 대비 약 69.6% 줄어드는 효과를 얻을 수가 있었다.

실험에 사용한 실측 데이터의 코히어런스와 합성 횟수에 따른 합성 효과와의 관계를 분석하기 위해 실측 데이터의 시·공간적인 코히어런스에 대해 살펴보고자 한다. 이론적으로는 실험에 사용한 데이터의 공간적인 코히어런스가 총 합성 시간동안 유지되어야 한다[5, 11]. 또한 코히어런스가 충분히 유지되고 목표 신호의 SNR이 높을 때 코히어런스가 1에 가깝게 된다. 본 실험에서 사용된 실측 데이터에 대해 다음과 같은 방법으로 코히어런스를 측정하였다. 중심 주파수가 f_0 이고 $f_0 - \Delta f/2 \leq f \leq f_0 + \Delta f/2$ 를 만족하는 주파수 대역에서 normalized cross-correlation

coefficients $\hat{\rho}_{nm}$ 즉 코히어런스는 다음과 같이 정의된다[5].

$$\hat{\rho}_{nm}(f_0, \delta_{nm}) = \frac{\sum_{n=1}^N X_n(f) X_m^*(f)}{\sqrt{\sum_{n=1}^N |X_n(f)|^2 \sum_{m=1}^N |X_m(f)|^2}} \quad (10)$$

여기에서 $X_n(f)$ 와 $X_m(f)$ 는 각각 n번째와 m번째 하이드로폰 입력 데이터들의 푸리에 변환을 나타내며, *는 켈레 복소수를 뜻한다. 이 때 $n=1, \dots, N, m=1, \dots, N$

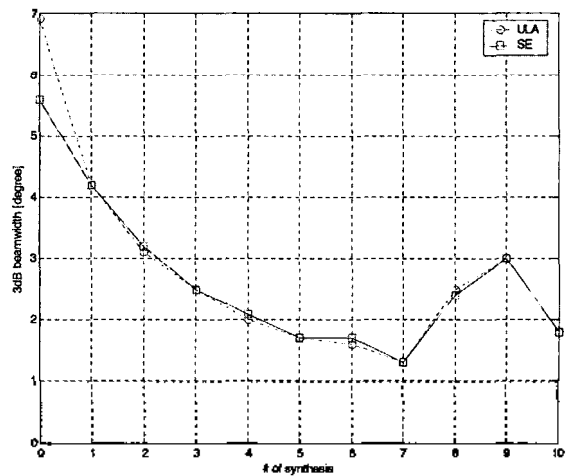


그림 9. 합성 횟수에 따른 3dB 빔폭 비교 (○:ULA 가정, ■:어레이 형상 왜곡 보정).

Fig. 9. The comparison of 3dB beamwidth with respect to the number of synthesis: ○ is in case of ULA assumption and ■ is in case of compensating distortion.

이다. 또한 δ_{nm} 은 n번째 하이드로폰과 m번째 하이드로폰 사이의 거리를 나타낸다. $f_l (l=1, 2, \dots, Q)$ 은 $f_0 - \Delta f/2 \leq f_l \leq f_0 + \Delta f/2$ 주파수 대역을 Q개로 나눈 작은 주파수 대역을 의미한다.

그림 10 (a)는 합성에 의해 확장된 하이드로폰간의 공간적인 코히어런스를 측정한 그림이다. 먼저 40개의 어레이를 50% 증첩 조건으로 10번 합성시켜서 240개의 가상 어레이를 만든 후 $\hat{\rho}_{nm}, n=1, \dots, 240$ 을 계산하였다. 그림 10 (a)에서 하이드로폰간의 공간적인 코히어런스가 1에 가까운 값에서 유지되지 못하고 낮은 값을 가질 경우가 많은 것으로 보아, 주어진 데이터가 좋지 않은 환경에서 얻어진 데이터임을 간접적으로 알 수 있다. 그림 10 (b)는 합성 횟수에 따른 동일 하이드로폰 간의 시간적 코히어런스를 측정한 그림이다. 즉 한번 합성할 때마다 $q\tau$ 만큼의 시간이 흐르게 되고, 이 시간 간격이 지남에 따라 코히어런스가 얼마나 지속되는지를 알 수 있는 결과이다. 그림 10 (b)로부터 합성 횟수가 늘어나더라도 코히어런스가 어느 정도는 유지되지만 6번 합성 이후로는 불규칙한 결과를 보여주고 있다. 이러한 이유로 인해 이상적인 시뮬레이션 결과에 비해 실측 데이터의 합성 효과가 크지 않은 것으로 판단할 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 실수부만으로 이루어진 실측 데이터를

이용하여 어레이의 형상 왜곡을 보상한 후 어레이를 합성하는 실험을 하였다. 다항 근사화 기법에 반복 스플라인 보간법을 후처리로 이용하여 왜곡된 어레이의 형상을 추정하였으며, 어레이를 합성하기 위해 어퍼쳐 영역에서 공간적으로 증첩되는 부어레이간의 위상 차이를 코히어런트하게 보상함으로써 어퍼쳐 길이를 가상적으로 늘리는 방법을 사용하였다. 왜곡된 어레이의 형상을 고려하지 않고 선형 어레이로 가정했을 때 목표물 탐지 방향이 차이 나는 것으로 보아 어레이의 형상이 왜곡될 수밖에 없는 실제 해양 환경에서는 반드시 어레이 형상을 추정하여 왜곡을 보상해주는 것이 필요함을 알 수 있었다. 어레이의 형상을 추정하여 왜곡을 보상하고 물리적인 어레이 중 일부분으로 합성을 하여 가상적으로 길이를 확장한 어레이로 방향 탐지한 결과가 물리적인 어레이로 방향 탐지한 결과에 근접함을 확인하였다. 하지만 합성 과정에서 견인선이 이동함에 따라 약간의 차이가 발생함을 확인하였다. 또한 합성 횟수를 늘릴수록 방향 탐지 분해능이 좋아지는 것을 방향 탐지 결과와 3dB 빔폭 측정을 통해 알 수 있었고, 5번 합성으로 3dB 빔폭을 약 70% 줄일 수 있었다. 따라서 신호의 코히어런스가 유지되는 동안에는 합성 효과가 있음을 확인하였다. 실험에 사용한 실측 데이터에 대해 시·공간적 코히어런스를 측정된 결과 코히어런스가 전반적으로 좋지 않은 환경이었기 때문에 이상적인 환경의 실험 결과보다는 합성의 효과가 떨어지게 된다고 판단할 수 있었다. 다양한 환경의 경우에 대해 합성 효과 실험이 필요하며, 특히 견인선의 함속에 따라 코히어런스가 어느 정도 유지되는 지에 관한 연구가 추후 필요하다.

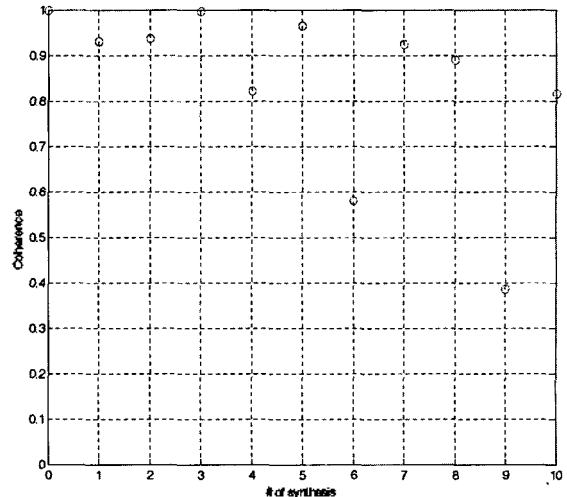
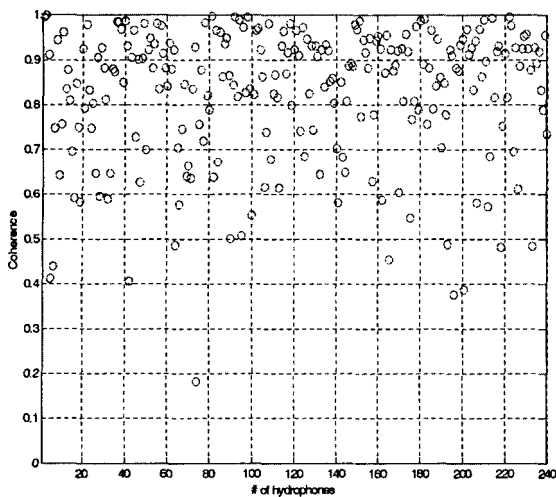


그림 10. 시·공간적 코히어런스 (a) 하이드로폰 간의 공간적 코히어런스 (b) 동일 하이드로폰 간의 시간적 코히어런스.
 Fig. 10. A temporal and spatial coherence: (a) is a spatial coherence between hydrophones and (b) is a temporal coherence by the same hydrophone.

감사의 글

본 논문은 수중음향특화센터의 연구비 지원으로 이루어졌습니다. (과제번호 : UA-00)

참고 문헌

1. R. O. Nielsen, Sonar Signal Processing, Norwood, MA : Artech House, 1991.
2. S. Stergiopoulos and E. J. Sullivan, "Extended Towed Array Processing by an Overlap Correlator," J. Acoust. Soc. Am., 86(1), 158-172, July 1989.
3. N. Yen and W. Carey, "Application of Synthetic-Aperture Processing to Towed-Array Data," J. Acoust. Soc. Am., 86(2), 754-765, Aug. 1989.
4. S. Stergiopoulos and H. Urban, "A New Passive Synthetic Aperture Technique for Towed Arrays," IEEE J. of Oceanic Eng., 17(1), 16-25, Jan. 1992.
5. S. Stergiopoulos and H. Urban, "An Experimental Study in Forming a Long Synthetic Aperture at Sea," IEEE J. of Oceanic Eng., 17(1), 62-72, Jan. 1992.
6. M. E. G. D. Colin and J. Groen, "Passive Synthetic Aperture Sonar technique in combination with tow ship noise canceling: application to a triplet towed array," MTS/IEEE Oceans 2002, 4, pp.2302-2309, Oct. 2002.
7. P. Felisberto and S. M. Jesus, "Towed-array Beamforming during Ship's Maneuvering," IEE Proceedings, Radar, Sonar and Navigation, 143(3), 210-215, June 1996.
8. 박희영, 김안익, 오원천, 윤대희, 이종용, "소나 시스템을 위한 어레이 형상 추정 기법의 성능 비교 및 개선," 한국음향학회지, 20(4), 12-16, 2001년 5월.
9. 조요한, 조치영, 서희선, "비선형 선배열 형상 추정을 위한 반복 다항 근사 기법," 한국음향학회지, 20(8), 74-80, 2001년 11월.
10. Ronald A. Mucci, "A Comparison of Efficient Beamforming Algorithms," IEEE Tr. on ASSP, ASSP-32(3), June 1984.
11. S. Stergiopoulos, "Limitations on Towed-array Gain Imposed by a Non-isotropic Ocean," J. Acoust. Soc. Am., 86(1), 158-172, July 1991.

저자 이력

• 강 현 우 (Hyun-Woo Kang)

한국음향학회지 제 23권 제2호 참조

• 박 회 영 (Hee-Young Park)

한국음향학회지 제 23권 제2호 참조

• 도 경 철 (Kyeong-Cheol Dho)

한국음향학회지 제 21권 제5호 참조