

코히어런스 영향과 시간에 따른 실측 데이터의 합성 효과 실험

Effectiveness Analysis on the Coherence and Time for Synthetic Aperture Sonar

강 현 우*
(Hyun-Woo Kang*)

*강남대학교 컴퓨터미디어공학부
(접수일자: 2006년 3월 14일; 채택일자: 2006년 5월 2일)

소나 시스템의 표적 탐지 성능을 향상시키기 위한 방법으로 합성 어퍼쳐 소나 (SAS : Synthetic Aperture Sonar)에 대한 연구와 실험이 이루어지고 있다. 본 논문에서는 한국 근해에서 견인 어레이를 통해 획득한 데이터를 이용하여 합성을 하는 실험을 수행하였다. 실제 상황에서 형상이 왜곡된 견인 어레이의 형상을 추정하여 왜곡을 보상해주고, 대표적인 합성 기법인 ETAM 기법과 같이 어퍼쳐 영역에서 합성을 하는 실험을 하였다. 합성이 일정하게 유지되는 구간의 데이터에 대해 실험한 결과 표적 신호의 코히어런스가 유지되는 약 1분여 동안 SNR이 높아지고 주엽 (main lobe)의 빔폭이 좁아지는 합성 효과가 나타남을 알 수 있었다. 또한 시간이 지남에 따라서도 합성 효과가 지속적으로 나타남을 확인하였다.

핵심용어: 합성 어퍼쳐 소나, 어레이 형상 추정, 실측 데이터, 코히어런스

투고분야: 수중음향 분야 (5.6)

Various research and development on Synthetic Aperture Sonar technique is under way to enhance bearing resolution of a SONAR system. In this paper, we estimated perturbed array shapes, and compensated distortion by using estimated array shapes and synthesized arrays in aperture domain such as an ETAM technique. As experimental data, we used the one obtained from towed array in neighboring waters of the Korean peninsula. Through simulation on data where tow-ship speed is maintained at a constant level, we confirmed that synthesis effect of increasing SNR and narrowed beam width of main lobe was consistently demonstrated for about 1 minute when coherence of target signal was maintained. Also, we showed that the synthesis effect with respect to time was constantly maintained.

Keywords: Synthetic Aperture Sonar, Array Shape Estimation, Korean Littoral Environment, Coherence

ASK subject classification: Underwater Acoustics (5.6)

I. 서 론

수중 음향 시스템에서 선형 어레이는 수중 음원의 방향을 탐지 (direction finding)하기 위해 널리 이용된다. 저주파 신호를 검출하여 신호 처리하는 선형 어레이 시스템에서는 신호 방향에 대한 각 분해능 (bearing resolution)과 출력 신호 대 잡음비 (SNR)를 높이는 것이 중요하며, 이는 어레이 어퍼쳐의 길이와 목표 신호

파장의 비에 의해 결정이 된다[1]. 일반적으로 어레이 길이가 길수록 어레이 시스템의 분해능이 향상되지만 물리적으로 긴 길이의 어레이를 운용하기 위해서는 많은 제약이 따른다. 이를 해결하기 위해 견인 어레이 (towed array)를 이용하여 한정된 길이의 어퍼쳐로부터 입력되는 신호를 코히어런트하게 합성함으로써 어퍼쳐의 길이를 확장한 것과 같은 효과를 얻을 수 있는 합성 어퍼쳐 소나 (SAS : Synthetic Aperture Sonar) 기술[2-3-4]이 개발되었다.

SAS 기법은 크게 어퍼쳐 영역에서 처리하는 방법과 빔 영역에서 처리하는 방법으로 나눌 수 있다. 어퍼쳐

책임저자: 강 현 우 (hwkang@kangnam.ac.kr)
449-702 경기도 용인시 기흥구 강남대학교 컴퓨터미디어공학부
(전화: 031-280-3755; 팩스: 031-281-4284)

영역에서 처리하는 대표적인 방법으로는 ETAM (Extended Towed Array Measurements) 기법[2]이 있고, 빔 영역에서의 기법은 Yen&Carey 기법[3], FFTSA (Fast Fourier Transform Synthetic Aperture) 기법[4] 등이 있다. 이 중 ETAM 방법은 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 어퍼처의 길이를 늘이는 합성 기법이다.

실제 해양 환경에서 ETAM 기법을 이용하여 어레이를 합성하는 실험 논문들이 발표되었다[5-6]. 이들 기법들은 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 성능 저하가 불가피하게 된다[7]. 따라서 형상이 변형된 어레이에서 하이드로폰의 위치를 찾아서 보상을 해주는 어레이 형상 추정 기법이 필요하다.

본 논문에서는 선형 견인 어레이의 왜곡된 형상을 추정하여 왜곡을 보상한 후에 어퍼처 영역에서 어레이를 합성하는 실험을 하였다. 실험 데이터로는 한국 근해에서 견인 어레이로부터 획득한 데이터 중에서 속도가 어느 정도 일정한 5분 분량의 데이터를 이용하였다. 다항 근사화 기법에 반복 스플라인 보간법을 후처리로 이용하여 왜곡된 어레이의 형상을 추정하였으며[8], 실측된 데이터로부터 견인선의 합속을 이용하여 중첩되는 부어레이 간의 시간, 공간적인 위상 차이를 보상함으로써 어레이의 길이를 확장하는 방법을 이용하였다[9]. 특히 실험 데이터의 코히어런스 유지 정도가 합성 효과에 미치는 영향이 클 것으로 생각되어 코히어런스 영향에 따른 합성 효과를 분석하였다. II장에서는 어퍼처 영역에서 어레이를 합성하는 기법과 실험에 사용한 어레이 형상 추정 패턴을 보여주고, III장에서는 실측 데이터를 이용한 코히어런스 측정, 어퍼처 합성과 방향 탐지, 코히어런스에 의한 영향 분석, 시간에 따른 합성 결과 분석 등을 살펴본다. 이어서 IV장에서 결론을 맺는다.

II. 어레이 합성 기법 및 형상 추정 패턴

본 논문에서는 ETAM 방법과 마찬가지로 방법으로 어퍼처 영역에서 어레이를 합성하는 방법을 이용하였다. 이

때 실제 해양 환경에서 하이드로폰으로부터 획득한 데이터는 복소수 값이 아닌 실수 값이기 때문에 실수부 데이터만으로 중첩되는 부어레이간의 위상 차이를 보상하는 방법이 필요하다. Hilbert 변환을 이용하여 실수부 데이터를 복소수로 변환한 후 처리하는 방법이 일반적이지만 이는 연산량과 메모리 측면에서 효율적이지 못하기 때문에 본 논문에서는 실제 구현을 고려하여 실수부 데이터만을 이용하는 방법을 사용하였다. 어퍼처 영역에서 견인선의 합속을 이용하여 중첩되는 부어레이 간의 위상 차이를 보상함으로써 어레이를 합성하는 방법은 [9]에 설명되어 있다.

형상이 왜곡된 어레이의 형상을 추정하기 위해서 본 논문에서는 다항 근사화 (polynomial fitting) 기법에 반복 스플라인 보간법 (spline interpolation)을 후처리 (post-processing)로 이용하였다. 이에 대한 자세한 방법은 [8]과 [9]에 설명되어 있다.

실험에 사용한 전체 데이터는 한국 근해에서 80개의 하이드로폰으로 구성된 견인 어레이로부터 획득한 31분간의 데이터이며, 견인선의 진행에 따른 어레이 형상 추정 패턴을 그림 1에 나타내었다. 견인 어레이의 하이드로폰 간격은 저주파 대역에 적합하도록 맞추어져 있다. 1분 간격으로 지속적으로 어레이의 형상을 추정하여 그 패턴을 선으로 표시하였으며 어레이의 head 부분을 0로 표시하였다. 이 중 합성 효과와 코히어런스에 의한 영향 분석에는 견인선이 비교적 일정한 속도 (5.2knot)를 유지하면서 직진 기동하고 있는 5분간의 데이터 ('SAS'로 표시)를 이용하였다. 직진 기동을 하고 있기 때문에 어레이의 형상이 거의 일정한 모양으로 유지되는 것을 확인할 수 있다. 하지만 매 순간마다의 어레이 형상이 직선을 유지하지 못하고 어느 정도의 왜곡이 발생하고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 어레이의 형상 왜곡 때문에 어레이 합성을 하기 전에 어레이의 형상을 추정하고 이를 보상해주는 것이 필요하다.

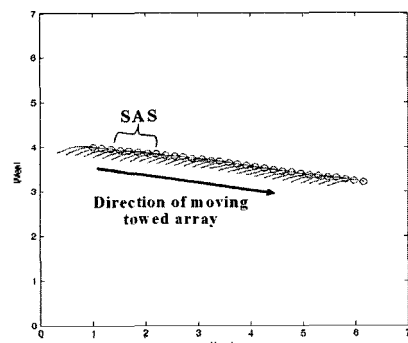


그림 1. 견인선 진행에 따른 어레이 형상 추정 패턴
Fig. 1. Pattern of array shape estimation according to the movement of towed array.

III. 실측 데이터를 이용한 SAS

견인선으로부터 약 15km 떨어진 곳에서 특정 주파수의 신호를 송출하는 표적의 방향을 탐지하기 위하여 하이드로폰 개수가 80개인 견인 어레이를 이용하여 데이터를 획득하였다. 그 중 실험의 편의를 위하여 견인선이 일정한 속도로 유지되는 구간 (그림 1의 'SAS' 표시 구간)의 데이터를 이용하여 실험을 진행하였다.

3.1. 코히어런스 측정

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

$$\tilde{\rho}_{nm}(f_0, \delta_{nm}) = \frac{\sum_{l=1}^Q X_n(f_l) X_m^*(f_l)}{\sqrt{\sum_{l=1}^Q |X_n(f_l)|^2 \sum_{l=1}^Q |X_m(f_l)|^2}} \quad (1)$$

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

실측 데이터에 대해 시간적·공간적 코히어런스를 측정한 결과를 그림 2에 나타내었다. 그림 2(a)는 저주파 대역 앞부분 40개의 하이드로폰을 50% 중첩해서 10번 합성할 때 동일 하이드로폰 간의 시간적인 코히어런스(temporal coherence)를 측정한 결과이다. 한 번 합성할 때의 시간 간격은 약 30초이다. 이 때 40개 하이드로폰 각각의 시간적 코히어런스를 평균하여 도시하였다. 그 결과 약 5분간 대부분 0.7~0.8 사이의 비교적 양호한 코히어런스를 유지하였다. 그림 2(b)는 저주파 대역 앞부분 40개의 하이드로폰을 50% 중첩해서 10번 합성하여 240개의 가상적인 어레이를 만든 후 각 하이드로폰 간의 공간적인 코히어런스(spatial coherence)를 측정하였다. 대부분 0.7~0.8 사이의 비교적 양호한 코히어런스를 유지함을 알 수 있다.

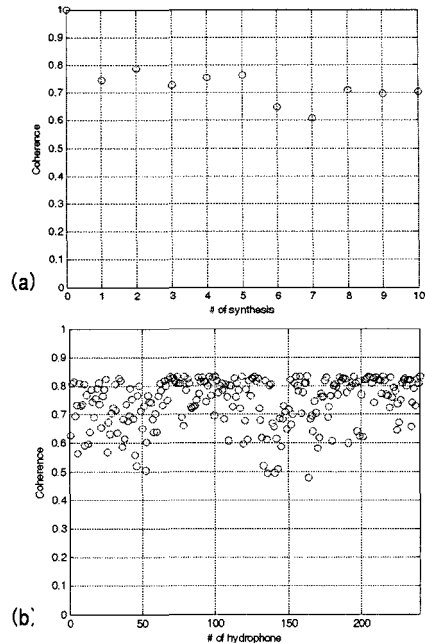


그림 2. 실측 데이터의 시간적·공간적 코히어런스. (a) 시간적 코히어런스, (b) 공간적 코히어런스

Fig. 2. A temporal and spatial coherence: (a) is a spatial coherence between hydrophones and (b) is a temporal coherence by the same hydrophone.

3.2. 어떠한 합성과 방향 탐지

어레이의 형상을 추정하고 추정된 형상 정보를 이용하여 형상 왜곡을 보정한 후에 합성 효과를 살펴보는 실험을 하였다. 그림 3(a)에서는 저주파 대역 80개의 하이드로폰 중 앞부분 40개의 하이드로폰을 이용하여 방향 탐지한 결과 (점선)와 이를 50% 중첩시키면서 1번 합성하여 60개의 가상적인 어레이를 만든 후 방향 탐지한 결과 (일점 쇄선), 그리고 마찬가지로 2번 합성하여 80개의 가상적인 어레이를 만든 후 방향 탐지한 결과 (직선)를 비교하였다. 물리적인 40개의 어레이를 이용하여 방향 탐지한 결과에 비해 가상적인 어레이의 방향 탐지 결과는 합성 횟수가 증가할수록 주엽(main-lobe)의 방향 탐지 분해능이 좋아지고 부엽(side-lobe)의 레벨이 낮아지는 합성 효과가 나타남을 알 수 있다. 3dB 빔폭은 물리적인 40개의 어레이에 비해 1번 합성했을 때 6.0°가 향상되었고, 2번 합성했을 때는 6.6°가 향상되었다. SNR 이득은 물리적인 40개의 어레이에 비해 1번 합성했을 때 2.9dB, 2번 합성했을 때 4.6dB가 향상되었다.

그림 3(b)에서는 저주파 대역 80개의 하이드로폰 중 앞부분 20개의 하이드로폰을 이용하여 방향 탐지한 결과 (점선)와 3번, 6번 합성하여 각각 50개 (일점 쇄선), 80개 (직선)의 가상적인 어레이를 만든 후 방향 탐지한 결과를 비교하였다. 역시 합성 횟수가 늘수록 표적 신호

의 방향 탐지 분해능은 좋아지고, 부엽의 레벨은 낮아지는 합성 효과를 볼 수 있다. 3dB 빔폭은 1번 합성했을 때 0.6°가 향상되었고, 2번 합성했을 때는 3.6°가 향상되었다. SNR 이득은 1번 합성했을 때 1.0dB, 2번 합성했을 때 4.1dB가 향상되었다.

그림 3(c)에서는 물리적인 80개의 어레이로 방향 탐지한 결과 (일점 쇄선)와 40개의 어레이를 2번 합성하여 가상적인 80개의 어레이를 만들고 이를 이용하여 방향 탐지한 결과 (직선), 20개의 어레이를 6번 합성하여 가상적인 80개의 어레이를 만들고 이를 이용하여 방향 탐지한 결과 (점선)를 비교하였다. 합성하는 동안 견인선 이동으로 인해 약간의 차이가 생겼지만 전체적으로는 비슷한 결과를 얻을 수 있었다.

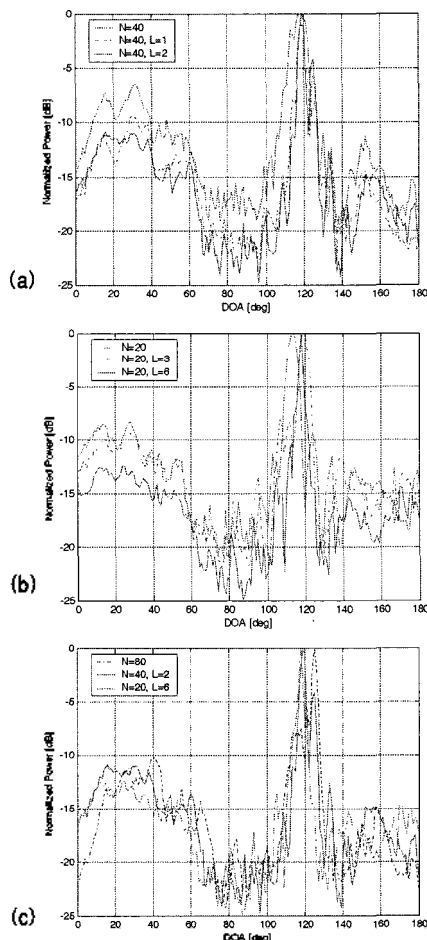


그림 3. 형상 왜곡 보상 방향 탐지 결과 비교. (a) 40개의 하이드로폰을 0, 1, 2번 합성하여 방향 탐지한 결과. (b) 20개의 하이드로폰을 0, 3, 6번 합성하여 방향 탐지한 결과. (c) 물리적인 어레이와 가상 어레이의 방향 탐지 성능 비교

Fig. 3. Comparison on bearing estimation results for distortion compensation: (a) is the results using the data obtained from 40 hydrophones, (b) is the results using the data obtained from 20 hydrophones, and (c) is the comparison of bearing estimation results for physical array and synthetic array.

3.3. 코히어런스에 의한 영향 분석

코히어런스가 합성 효과에 미치는 영향을 살펴보기 위해 합성 횟수에 따른 방향 탐지 결과를 그림 4에서 비교하였다.

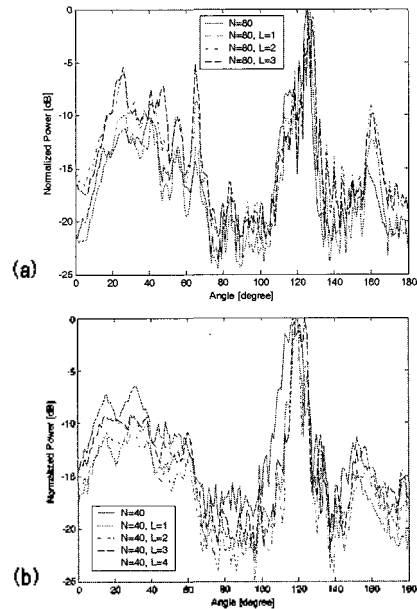


그림 4. 합성 횟수에 따른 방향 탐지 결과 비교. (a) 물리적인 80개의 어레이를 이용한 합성 결과, (b) 물리적인 40개의 어레이를 이용한 합성 결과, (c) 물리적인 20개의 어레이를 이용한 합성 결과

Fig. 4. Comparison on bearing estimation results with respect to the number of synthesis: (a) is the results of using physical 80 hydrophones, (b) is the results of using physical 40 hydrophones, (c) is the results of using physical 20 hydrophones.

그림 4(a)에서는 저주파 대역의 80개 하이드로폰으로 이루어진 어레이의 형상을 추정하여 왜곡을 보정한 후에 50%씩 중첩시키면서 연속적으로 합성한 후 방향 탐지한 결과를 보여준다. 물리적인 80개 어레이로 방향 탐지한 결과 (실선)와 합성 횟수에 따른 방향 탐지 결과를 비교하였다. 합성하는 snap-shot 사이의 시간 간격은 약 60초 정도로, 4번 합성할 때까지 약 4분 동안 견인선이 이동하면서 매 60초 마다 받아들인 8초 분량의 신호를 이용하여 합성을 하고 가상적으로 늘어난 어레이로 방향을 탐지하였다. 이 경우 1번 합성했을 때는 합성 효과가 나타나지만 2번 합성 이후에는 부엽의 레벨이 올라가는 것으로 보아서 약 1분간만 합성 효과가 유지됨을 알 수 있다.

그림 4(b)에서는 저주파 대역 앞부분의 40개 하이드로폰으로 이루어진 어레이의 형상을 추정하여 왜곡을 보정한 후에 50%씩 중첩시키면서 연속적으로 합성한 후 방향 탐지한 결과를 보여준다. 물리적인 40개 어레이로 방향 탐지한 결과 (실선)와 합성 횟수에 따른 방향 탐지 결과를 비교하였다. 합성하는 snap-shot 사이의 시간 간

격은 약 30초 정도이고 이 경우 2번 합성할 때까지 합성 효과가 나타나는 것으로 보아 약 1분간만 합성 효과가 유지됨을 알 수 있다.

그림 4(c)에서는 저주파 대역 앞부분의 20개 하이드로폰으로 이루어진 어레이의 형상을 추정하여 왜곡을 보정한 후에 50%씩 중첩시키면서 연속적으로 합성한 후 방향 탐지한 결과를 보여준다. 물리적인 20개 어레이로 방향 탐지한 결과 (실선)와 합성 횟수에 따른 방향 탐지 결과를 비교하였다. 합성하는 snap-shot 사이의 시간 간격은 약 15초 정도이고 이 경우 6번 합성할 때까지는 합성 효과가 나타나는 것으로 보아 약 1분 30초간은 합성 효과가 유지됨을 알 수 있다.

3.4. 시간에 따른 합성 결과 분석

시간에 따른 합성 결과의 변화를 관찰하기 위하여 8초 간격으로 4분간 지속적으로 방향 탐지한 결과를 그림 5에 나타내었다. 그림 5(a)는 물리적인 80개의 어레이를 이용하여 8초 간격으로 지속적으로 방향 탐지한 결과를 보여준다. 그림에서 표적의 주엽이 분명하고 지속적으로 나타나는 것을 볼 수 있다.

그림 5(b)는 물리적인 40개의 어레이를 이용하여 8초 간격으로 방향 탐지한 결과이며, 80개 어레이로 방향 탐지한 결과에 비해 부엽의 레벨이 높게 나타남을 알 수 있다. 그림 5(c)는 8초 간격으로 물리적인 40개의 어레이를 50% 중첩 조건으로 2번 합성하여 가상적인 80개의 어레이를 만들고 이를 이용하여 역시 8초 간격으로 방향 탐지한 결과를 보여준다. 그 결과 물리적인 80개의 결과에 비해서는 좋지 못하지만, 물리적인 40개의 결과에 비해서는 부엽의 레벨이 전반적으로 낮게 나타나서 전체적으로 SNR이 높아지는 합성 효과가 시간이 지남에 따라 지속적으로 나타나고 있음을 알 수 있다.

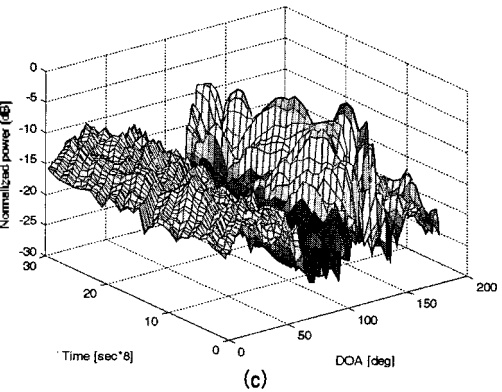
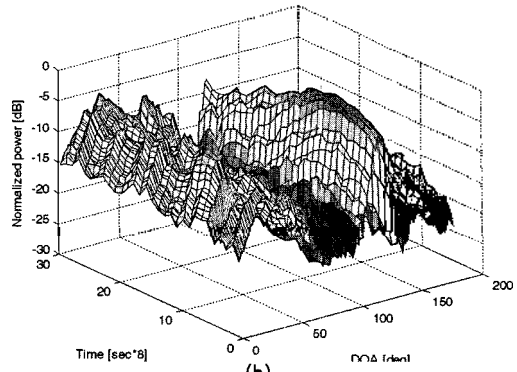
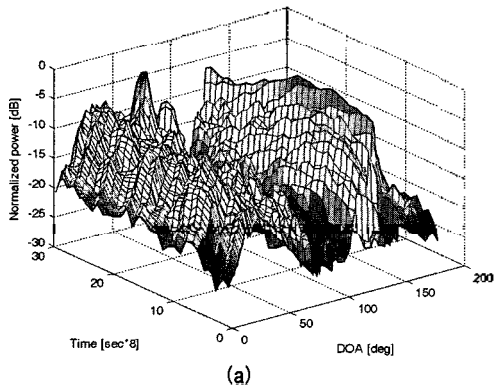


그림 5. 시간에 따른 방향 탐지 결과 비교. (a) 물리적인 80개의 어레이를 이용한 합성. (b) 물리적인 40개의 어레이를 이용한 합성. (c) 가상적인 80개의 어레이를 이용한 합성

Fig. 5. Comparison on bearing estimation results with respect to time: (a) is the results of using physical 80 hydrophones, (b) is the results of using physical 40 hydrophones, (c) is the results of using synthetic 80 hydrophones.

IV. 결 론

실수부 (real)만으로 이루어진 실측 데이터를 이용하여 어레이의 형상 왜곡을 보정한 후 어레이를 합성하는 실험을 하였다.

표적 신호가 강하게 탐지될 때는 물리적인 어레이 중 일부분으로 합성을 하여 가상적으로 어레이의 길이를 늘린 후 방향 탐지를 했을 때가 물리적인 어레이로 방향 탐지를 했을 경우에 비해 성능이 좋아짐을 확인하였다. 물리적인 40개와 20개의 어레이를 합성하여 각각 가상적인 80개의 어레이를 만들었을 때, SNR은 4.1~4.6dB 향상되었고, 3dB 빔폭은 3.6°~6.6° 향상된 결과를 얻었다. 표적 신호의 코히어런스가 0.7~0.8 정도인 환경에서 합성 효과가 1분~1분 30초 정도 유지됨을 알 수 있었고, 물리적인 40개의 어레이를 2번 합성한 결과가 물리적인 40개 어레이의 결과에 비해 시간이 지남에 따라 SNR이 지속적으로 높게 나타나는 합성 효과를 확인하였다.

감사의 글

본 논문은 강남대학교 교내연구비 지원으로 이루어졌습니다.

실험 데이터를 제공해준 국방과학연구소 (ADD)에 감사드립니다.

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, 1989.
3. N. Yen and W. Carey, "Application of Synthetic-Aperture Processing to Towed-Array Data," *J. Acoust. Soc. Am.*, **86** (2) 754-765, 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, 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, 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**, 2302-2309, 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, 1996.
8. 박희영, 김민익, 오원천, 윤대희, 이종웅, "소나 시스템을 위한 어레이 형상 추정 기법의 성능 비교 및 개선," *한국음향학회논문지*, **20** (4) 12-16, 2001.
9. 강현우, 박희영, 도경철, "한국 근해에서의 실측 데이터를 이용한 합성 어퍼처 소나 실험에 관한 연구," *한국음향학회논문지*, **23** (6) 428-436, 2004.

저자 약력

• 강 현 우 (Hyun-Woo Kang)

한국음향학회지 제 23권 제 2호 참조