

L-자형 선배열을 이용한 지음향학적 인자 역산 및 음원 위치 추정

Geoacoustic Inversion and Source Localization with an L-Shaped Receiver Array

김 경 섭*, 이 근 화*, 성 우 제*, 김 성 일**, 김 영 규**

(Kyungseop Kim*, Kuenhwa Lee*, Woojae Seong*, Seongil Kim**, Young-Gyu Kim**)

*서울대학교 조선해양공학과, **국방과학연구소

(접수일자: 2006년 9월 7일; 채택일자: 2006년 10월 9일)

본 논문에서는 동해 천해 영역에서 예인 음원과 L-자형 수신 선배열을 이용한 해상 실험(MAPLE IV)을 통해 수집된 신호 자료에 대해 정합장처리를 이용한 지음향 역산 및 음원 위치 추정을 수행하였다. L-자 형태의 수신 선배열은 수직 선배열과 해저면에 수평으로 놓여진 수평 선배열로 구성되어 있으며, 음원은 협대역 다중 주파수 성분을 가지는 저주파 연속 음원이 예인되었다. 역산 목적함수는 선배열 수신 신호벡터 처리 방식에 따라 다음과 같이 Bartlett 프로세서를 기반으로 한 세 가지 형태 - (1) 수직 및 수평선배열 자료 전체를 하나의 신호 벡터로 상관 처리할 경우, (2) 수직 및 수평선배열 각각에 대한 결과를 비상관 평균할 경우, (3) 수직 및 수평선배열 상호간의 상관 관계만을 이용할 경우 - 를 사용하고 그 결과들을 수직 및 수평 선배열 신호를 단독으로 사용할 경우의 결과들과 함께 비교하였다. 역산 결과의 타당성을 확인하기 위해 역산 과정에서 사용한 각 프로세서와 역산된 지음향 인자를 이용하여 낮은 신호 대 잡음비를 갖는 주파수 성분에 대해 음원 위치 추정을 수행하고 성능을 비교하였다.

핵심용어: 정합장처리, 지음향학적 인자 역산, 음원 위치 추정, L-자 선배열, MAPLE 실험

투고분야: 수중 음향 분야 (5.5)

Acoustic data from a shallow water experiment in the East Sea of Korea (MAPLE IV) is processed to investigate the performance of matched-field geo-acoustic inversion and source localization. The receiver array consists of two legs as in an L-shape, one vertical and the other horizontal lying on the seabed. Narrowband multi-tone CW source was towed along a slightly inclined bathymetry track. The matched-field geo-acoustic inversion includes comparisons between three processing techniques, all based on the Bartlett processor as: (1) the coherent processing of the data from the full array, (2) the incoherent product of each output from both the horizontal and vertical arrays, and (3) the cross correlation between the horizontal and vertical arrays, as well as processing each array leg separately. To verify the inversion results, matched-field source localization for low level source signal components were performed using the same processors used at the inversion stage.

Key words: MFP, geoacoustic inversion, source localization, L-shaped array, MAPLE experiment

ASK subject classification: Underwater Acoustics (5.5)

I. 서론

천해 지역에서 해저퇴적층의 지음향학적 특성을 예측하기 위한 방법으로 가장 널리 연구되어 온 기법 중 하

나가 모델기반 정합장 역산기법 (model-based matched field inversion method)이다. 이러한 정합장처리 (MFP, matched field processing) 기법은 기본적으로 수신기 배열에서 얻어진 음장의 공간적 상관특성 (coherence)를 이용하는데 [1, 2] 수신기 배열은 전통적으로 수직 선배열 (VLA, vertical line array)이나 수평 선배열 (HLA, horizontal line array)이 많이 사용되어 왔다.

책임저자: 성 우 제 (wseong@snu.ac.kr)
(151-744) 서울시 관악구 신림동 산 56-1
서울대학교 공과대학 조선해양공학과
(전화: 02-880-8359; 팩스: 02-888-9298)

수직 선배열은 원거리에 위치한 음원을 사용하는 경우가 많으며, 도파관에서 전파되는 음향에너지를 모든 각도에서 포착할 수 있기 때문에 환경에 따라 깊이 방향으로 다른 분포 특성을 보이는 모드 구조를 계측하는데 적합하다. 수평 선배열의 경우 수직 선배열에 비해 상대적으로 설치와 유지가 간편하고 목적에 따라 설치 깊이와 선배열 길이를 자유롭게 조절할 수 있다는 장점 때문에 많이 사용되어 왔다. 수평 선배열은 설치 방법에 따라 크게 선박에 의해 예인되는 형태와 해저면에 고정형으로 설치되는 형태로 나눌 수 있는데, 선박 예인형의 경우 설치 깊이를 조절할 수 있고 음원뿐만 아니라 수신기의 이동이 가능해지므로 주로 거리 종속 역산에 많이 사용되었다 [3-5]. 해저면 고정형의 경우는 예인형과는 달리 운용 시 유동성이 떨어지나 상대적으로 선배열의 안정성이 좋고, 여러 형태로 변환하기 쉬우며, 설치 주변 해역의 환경변화나 선박 및 잠수체의 모니터링에 상시적으로 사용할 수 있기 때문에 최근 이에 대한 관심이 높아지고 있다 [6-9].

한편 근래의 정합장처리 연구들에서는 전통적인 수직, 수평 선배열 이외에 다양한 형태의 수신기 배열을 사용하여 이득을 얻고자 하는 노력이 계속 되고 있는데, 비교적 많이 사용되는 방법인 기울어진 선배열 (tilted line array)의 사용 [10]이나 다수의 수직 또는 수평 선배열을 나열하여 사용 (tomographic inversion)하는 경우 [11] 등이 대표적인 예이다. 이러한 선배열을 사용할 경우 단순한 수직, 수평 선배열을 사용할 때에 비해 역산 인자의 모호성을 줄이거나, 수신 신호로부터 추가적인 정보를 추출해 낼 수 있다는 장점이 있다. 최근에는 L-자 형태 [12]나 V-자 형태 [13]의 복합 선배열을 이용한 지음향 역산 및 음원 위치 추정 결과들이 발표되기도 했는데, 전자의 경우 수직-수평 선배열로 이루어진 L-자 형태의 복합 선배열과 실험선의 선박 소음 신호를 이용하여 실험선 이동에 따라 연속적으로 역산과 음원 위치 추정을 동시에 수행 (focalization)하였다. 그리고 목적함수로써 수직 및 수평 선배열의 신호를 하나의 신호 벡터로 결합 (super-vector)하여 상관 비교하는 full array 방식 및 각각을 독립적으로 처리하여 비상관 평균을 취하는 방식을 사용하여 각 프로세서의 음원 위치 추정 성능을 비교한 바 있다. 후자의 경우는 두 개의 선배열이 V-자 형태로 결합된 해저면 고정형 수평 선배열을 사용하였으며 마찬가지로 full array 방식으로 지음향 역산 및 음원 위치 추정을 수행하였다.

본 논문에서는 국방과학연구소가 지난 2005년 5월 동해에서 예인 음원과 L-자형 수신 선배열을 이용해 수행한 MAPLE IV 실험 [14-17]의 자료에 대해 지음향 역산 및 음원 위치 추정 분석을 하였으며, Bartlett 프로세서를 기반으로 선배열 신호 벡터의 사용 형태에 따라 역산 목적함수를 다르게 구성하여 각각의 성능을 비교하고자 하였다. L-자형 복합 선배열의 경우 수평 선배열 부분이 포함되어 3차원 음원 위치 추정이 가능해지고, 또한 상대적으로 거리 및 깊이 추정 능력이 좋은 수직 선배열 부분으로 인해 수평형 복합 선배열보다 좋은 성능을 보이게 된다. 이 경우 선배열의 형태적 이득을 얻을 수 있는 프로세서 형태로는 기본적으로 참고문헌 [12]에서와 같이 full array 방식 및 비상관 평균 방식을 생각할 수 있는데, 본 실험에서와 같이 선배열의 수신기 개수가 많을 경우에는 계산 비용이 많이 들고, 모의음장 구성 시 수신기 위치 오차의 영향이 커질 가능성이 있다. 따라서 본 논문에서는 수직 및 수평 선배열 신호의 상호 상관 성분만을 이용하는 방식을 제안하였으며 이를 앞의 두 방식과 비교 분석하였다. 결과 비교에는 수직 및 수평 선배열 신호를 단독으로 사용했을 경우도 추가하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2장에서 실험 자료와 역산 환경 모델에 대한 설명을 하고, 제 3장에서는 각 형태 별 역산 목적함수에 대해 기술하였다. 제 4장에서는 역산 과정과 결과를 제시하였으며, 역산된 지음향 인자와 각 방식 별로 역산에서와 같은 프로세서를 사용한 음원 위치 추정 결과들을 분석하였다. 마지막으로 제 5장에서 결론을 맺는다.

II. 실험 자료 및 역산 환경 모델

2.1. 실험 및 실험 자료

동해의 천해환경에서 국방과학연구소의 정합장 기법 연구를 위한 일련의 실험들 중 MAPLE IV (The 4th Matched Acoustic Properties and Localization Experiment) 실험이 2005년 5월 수행되었다 [14-17]. 저주파 예인 음원과 L-자형 복합 수신 선배열이 사용되었으며, 복합 선배열은 그림 1과 같이 각각 48개의 청음기가 장착된 수직 및 수평 선배열이 결합된 형태로서 이들 하부 선배열이 연결된 설치들이 수심 170 m 가량의 해저면에 설치되었다. 수직 선배열은 청음기 사이의 간격이 2.5 m로 총 124 m의 길이를 가지며 깊이 방향으로

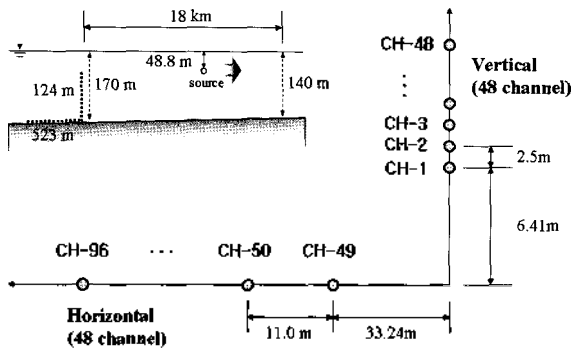


그림 1. L-자형 복합 선배열 구조와 대략적인 실험 모식도
 Fig. 1. Layout of the L-shaped receiver array and schematic diagram of the experiment.

전체 수층의 70% 이상을 포함하므로 수층 음속 분포 등을 감안했을 때 깊이 방향 모드 정보를 파악하기에 충분하다. 수평 선배열은 청음기 사이의 간격이 11 m로서 총 523 m의 길이를 가지며 수직 선배열 설치 후 해저 바닥면을 따라 놓여졌다.

음원은 실험선에 의해 측정심도 48.8 m에서 수심변화가 적은 직선 경로를 따라 약 2 m/s의 속도로 왕복 예인되었다. 그림 2는 실험선에 설치된 위성항법장치 (GPS) 정보를 이용해 나타낸 실험선 이동 경로이며 수평 선배열과 거의 평행한 방향 (endfire)으로 일정한 방위각을 유지한 채 이동하였음을 알 수 있다. 예인 경로를 따라 선배열로부터의 음원 최대 거리는 약 18.5 km 정도이며 예인 중 측심기를 이용한 수심 측정과 일정 구간마다 XBT를 사용한 음속 측정이 이루어졌다. 그림 3은 XBT에서 얻은 온도 정보를 이용한 실험 해역의 수층 음속 구조를 나타낸다. 표층 음속은 1500~1510 m/s 사이에, 바닥 쪽 음속은 1460 m/s 전후로 분포하며 수심 40 m

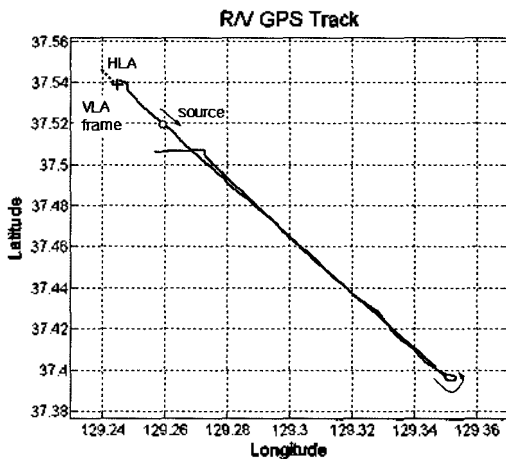


그림 2. 위성항법장치(GPS) 정보를 이용한 실험선 이동 경로
 Fig. 2. The track of research vessel from the onboard GPS navigation system.

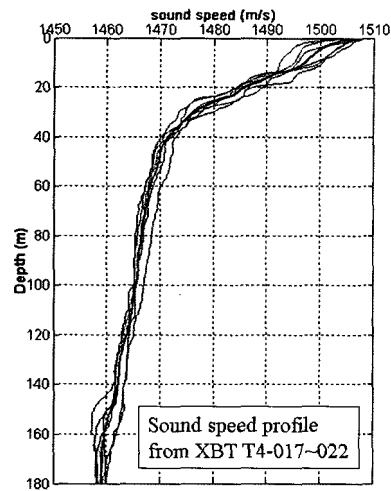


그림 3. 음원 이동 경로를 따른 수층 음속 구조 분포
 Fig. 3. The water column sound speed profile measured along the track.

이전까지 수온약층이 강하게 형성되어 있는 하향굴절 (downward-refracting) 구조를 나타내고 있다.

음원이 예인되는 동안 방사한 신호는 크게 두 종류인데, 음원이 선배열에서 멀어지는 동안에는 다중 주파수 성분을 가지는 협대역 연속 신호를 송신하였고, 다시 선배열을 향해 다가오는 동안에는 협대역 펄스 신호를 주파수 성분 별로 번갈아가며 송신하였다. 본 분석에서는 음원이 선배열에서 멀어지는 동안에 수신된 연속 신호만을 분석 대상으로 고려하였으며 이 때 음원이 송신한 신호의 주파수 성분 및 음원준위는 표1과 같다. 주파수 성분은 70 Hz 대에서 200 Hz 대까지 크게 10개의 그룹으로 나눌 수 있으며 각 그룹은 음원준위가 다른 3 Hz 간격의 주파수 성분들로 구성되어 있다. 음원준위는 200 Hz 성분이 160 dB로서 제일 크며 각 주파수 그룹의 3번째 준위 신호들은 공통적으로 135 dB의 낮은 음원준위로 방사되었다.

그림 4는 선배열 48번 채널에서 수신한 신호의 주파수 스펙트로그램이며 음원 이동 경로 앞 부분에 해당하는 7

표 1. 예인 음원 신호의 협대역 다중 주파수 정보 및 음원준위
 Table 1. The narrow band multiple frequencies of towed source and its source level.

주파수(Hz)	음압(dB)	주파수(Hz)	음압(dB)	주파수(Hz)	음압(dB)
70	150	73	145	76	135
80	150	83	145	86	135
90	150	93	145	96	135
100	150	103	145	106	135
110	155	113	150	116	135
120	155	123	150	126	135
130	155	133	150	136	135
140	155	143	150	146	135
150	155	153	150	156	135
200	160	203	155	206	135

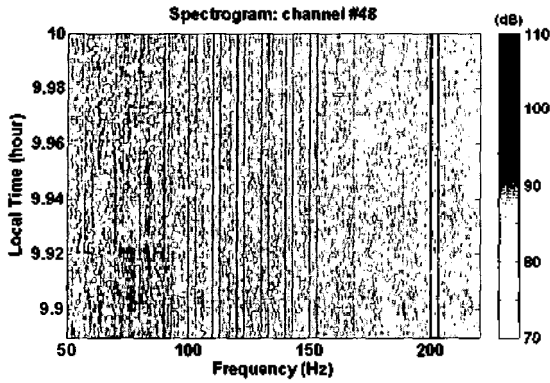


그림 4. 예인 경로 앞부분에 대한 선배열 수신 주파수 스펙트로그램 (채널 #48)
 Fig. 4. The frequency spectrogram of the source signal (channel #48).

분간의 신호에 대해서만 나타내었다. 각 주파수 그룹에서 첫번째, 두번째 신호 성분들은 대부분 20~30 dB 이상의 높은 신호 대 잡음비를 보이며 잘 나타나고 있으나 음원준위가 가장 낮은 세번째 신호들은 약 0 dB 정도의 신호 대 잡음비를 보이며 스펙트로그램 상에서는 거의 구별할 수 없다. 그리고 100 Hz 이하 영역에서도 배경 소음의 영향으로 인해 신호 대 잡음비가 상당히 낮게 나타나고 있으며, 그 밖의 영역에서도 예인 음원 주파수 성분 이외에 주변에서 운항하는 선박들의 소음으로 보이는 토널 성분들이 다수 관찰되고 있음을 알 수 있다. 한편 음원이 수신기에서 멀어지는 방향으로 이동하고 있기 때문에 도플러 효과에 의한 주파수 편이 현상이 관찰되었는데, 신호처리 파라미터에 따라 약간의 차이가 있지만 대략 -0.2 Hz의 편이가 나타났으며 이후 신호 분석에 이를 고려하였다.

2.2. 역산 환경 모델

본 논문에서는 선배열 형태에 따른 목적함수 성능 평가를 위해 음원 이동 경로 중 수신기로부터 약 2.6 km 이내인 거리 독립 환경에서의 수신 신호만을 분석 대상으로 하였다. 그림 5는 음원 이동 경로 주변의 몇몇 지점들에 대한 해저 퇴적층 지질 자료 (한국지질자원연구원) 상의 P파 음속 분포를 나타내는데, P43 지점을 제외한 나머지 지점들의 경우 상당히 일관성 있는 분포를 보여 주고 있다. 퇴적층 가장 상부의 경우 약 1550 m/s 정도로 나타나 있으며 10 m 이내의 상부에 다수의 얇은 퇴적층들이 있는 것으로 보이나 전체적으로 보면 2000 m/s 이상의 음속을 가지는 하부층까지 선형적으로 음속이 증가하고 있는 것으로 볼 수 있다.

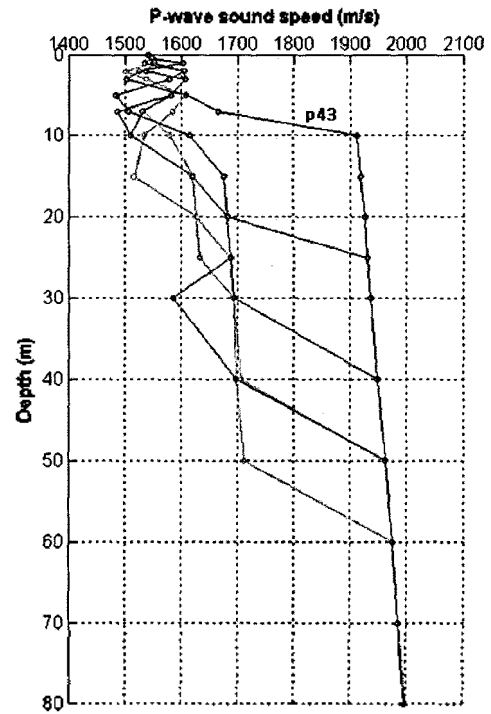
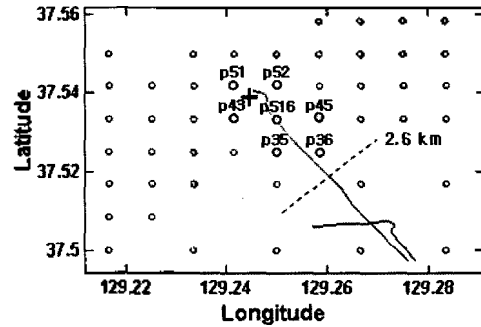


그림 5. 음원 이동 경로 주위의 지질 자료 상 퇴적층 P파 음속 분포
 Fig. 5. The P-wave sound speed from geophysical data at locations adjacent to the tow track.

역산을 위한 퇴적층 환경 모델 설정 문제에서 먼저 퇴적층 개수를 결정하는 일이 중요한데, 이를 위해 퇴적층의 개수를 0~3개까지 바꿔가며 Bartlett 프로세서를 이용한 역산 테스트를 수행한 결과, 퇴적층에 음속 기울기의 영향이 있는 것으로 나타났고 퇴적층 개수가 많을 경우 인자들의 민감도가 떨어지고 지역해가 너무 많아진다는 점에서 1개 또는 2개의 퇴적층이 적당한 것으로 생각되었다. 그리고 이 두 경우의 역산 목적함수 값이 큰 차이가 없었다는 점과 사용된 음원 신호의 해상도 (신호 성분 중 가장 짧은 파장이 약 7.5 m 가량) 등을 고려하여 본 분석에서는 그림 6과 같이 하부층 위에 하나의 퇴적층을 가정하는 것이 최적이라고 판단하였다. 지음항 인자의 경우, 퇴적층 내의 음속과 감쇠계수는 선형적으로 변하고 밀도는 일정한 값을 가진다고 가정하였으며

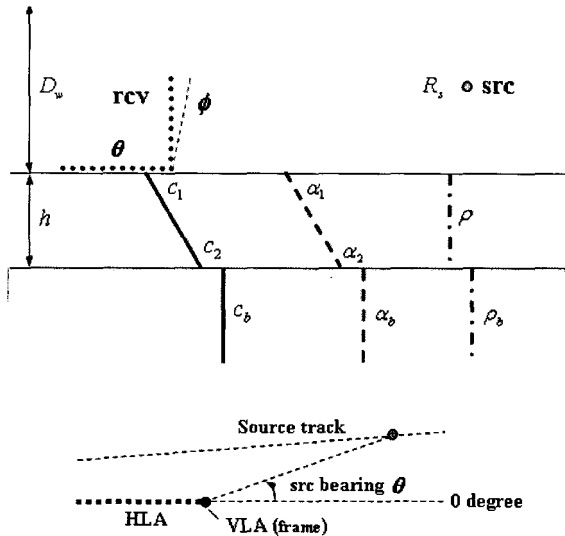


그림 6. 역산을 위한 환경 모델링 및 탐색 인자
 Fig. 6. The environmental model and 13 search parameters that are searched for during the inversion.

모든 층에서 전단파 (shear wave)의 영향은 무시하였다. 설정된 지음향 인자는 퇴적층 두께 (h), 퇴적층 상부 및 하부 음속 (c_1, c_2), 퇴적층 상부 및 하부 감쇠계수 (α_1, α_2), 퇴적층 밀도 (ρ), 하부층 음속 (c_b), 하부층 감쇠계수 (α_b), 하부층 밀도 (ρ_b)이다. 지음향 인자 이외에 음원 거리 (R_s), 수심 (D_w), 수직 선배열 기울기 (ϕ) 및 수평 선배열에 대한 음원 방위각 (θ)과 같은 기하학적 인자도 탐색 인자에 포함하였는데, 음원 깊이의 경우 탐색 인자에 포함된 수심과 연동성이 큰 것으로 생각해서 측정값인 48.8 m로 고정하였다. 지음향 역산과 관련된 최근 연구들을 살펴보면 음원의 위치를 고정하고 지음향 인자만을 탐색 인자로 설정했던 예전 방식과는 달리 음원의 위치도 탐색 인자에 포함하는 것이 대체적인 추세인데, 이는 비록 음원 위치를 미리 설정해 놓았다고 하더라도 정확한 위치를 파악하는 것이 실질적으로 어렵기 때문이다. 이 경우 전체적인 해 탐색 과정이 지음향학적 인자 보다 민감도가 훨씬 큰 기하학적 인자에 의해 주도될 위험이 커지나, 대신 기하학적 인자의 경우 사전 정보를 이용하여 탐색 범위를 상대적으로 많이 좁힐 수 있기 때문에 이러한 인자들의 탐색 과정이 구속조건으로 작용하여 지음향학적 인자의 탐색을 유도할 수 있다. 즉, 좁은 탐색 범위 내에서 기하학적 인자들에 유동성을 줌으로서 이와 강한 상호 연관성을 갖는 지음향학적 인자들이 좀 더 좋은 품질의 해로 수렴할 수 있게 된다.

III. 역산 목적함수

역산을 위한 목적함수는 Bartlett 형태를 기본으로 사용하였으며 역산 결과로 얻어지는 지음향 인자 값의 모호성을 줄이기 위해 다수의 주파수 성분에 대한 비상관 평균을 취하였다. 다음과 같이 몇 개의 다른 프로세서로 목적함수를 설정하여 그 결과를 비교하였다.

먼저 수직 및 수평 선배열을 단독으로 사용할 경우에는 식 (1)과 같이 일반적인 Bartlett 프로세서를 사용하였다.

$$P = \frac{1}{N_f} \sum_{n=1}^{N_f} w_n^* C_n w_n \quad (1)$$

여기서 C_n 은 n 번째 주파수 성분에 대한 CSDM (cross spectral density matrix)이며 수직 (또는 수평) 선배열에서 수신한 신호 벡터만을 사용하여 구성한다. w_n 은 모의음장을 나타내며 N_f 는 비상관 평균할 주파수 개수이다. 수직 선배열을 단독으로 사용할 경우 음원의 거리 및 깊이 추정은 되나 방위각 추정은 어렵다. 반면 수평 선배열을 단독으로 사용할 경우는 기본적으로 음원의 거리, 깊이 및 방위각 추정이 다 가능하나 기존 연구 결과들에 따르면 깊이 추정 성능은 수직 선배열에 비해 떨어지는 것으로 알려져 있다.

다음으로 full array 방식은 복합 선배열의 수직 및 수평 선배열 신호벡터를 결합하여 하나의 신호벡터 (super-vector)를 구성하고 이를 상관 비교하게 되므로 기본적으로 식 (1)과 같은 형태를 가지지만 CSDM C_n 의 크기가 그만큼 늘어나게 (본 연구의 경우 96×96) 된다. 음원 거리, 깊이, 방위각 모두 추정 가능하며 수직 선배열 신호벡터와 수평 선배열 신호벡터 사이의 상관관계 (correlation)가 가중벡터 (모의음장)와의 비교 과정에서 구속조건으로 작용하므로 선배열의 위치 오정합이 없다면 수직 및 수평 선배열을 단독으로 사용할 경우보다 좋은 결과를 줄 것으로 예상할 수 있다. 하지만 본 실험과 같이 수신 선배열의 청음기 개수가 많을 경우 계산 비용이 많이 들고, 수평 선배열이 놓여진 곳의 지형변화나 수직 선배열의 기울어짐 등으로 인해 수신기 위치 정보를 완전히 파악하지 못하고 있을 경우 모의음장 구성 시 모델링 오차가 증가하게 된다. 또한 본 연구에서와는 달리 적응 프로세서를 사용할 경우에는 신호단편 부족 (snapshot deficient) 문제도 해결해야만 한다.

다음으로 식 (2)와 같이 수직 및 수평 선배열 신호벡터를 각각 따로 처리하여 비상관 평균을 취하는 방법을 생각할 수 있다. 이 방식의 경우 full array 방식과는 달리 수직수평 선배열 간의 상관 부분이 없기 때문에 각각의 목적함수를 평균적으로 만족하는 인자 값을 주게 된다.

$$P = \frac{1}{N_f} \sum_{n=1}^{N_f} \sqrt{w_{nv}^* C_{nv} w_{nv} \cdot w_{nh}^* C_{nh} w_{nh}} \quad (2)$$

마지막으로 수직 및 수평 선배열 신호의 상호 상관 성분만을 이용하는 방식의 경우 식 (3)과 같은 형태를 생각할 수 있다.

$$P = \frac{1}{N_f} \sum_{n=1}^{N_f} |w_{nv}^* C_{ncross} w_{nh}| \quad (3)$$

$$C_{ncross} = \frac{1}{N_s} \sum_{s=1}^{N_s} p_{nv} p_{nh}^* \quad (4)$$

여기서 p_{nv} 와 p_{nh} 는 각각 수직 및 수평 선배열에서 수신된 음압 신호벡터이고 N_s 는 신호단편 개수를 나타낸다. 그림 7에는 수직 및 수평 선배열 신호벡터를 결합한 super-vector를 이용해 CSDM을 구성할 경우 그 절대값을 표시하였는데, 여기서 수직 선배열이나 수평 선배열의 자체 청음기 간 상관 부분을 제외한 수직수평 간 상호 상관 부분만을 고려한 것이 이 방식에 해당된다. 따라서 수신신호의 CSDM은 식 (4)와 같이 수직 선배열 신호벡터와 수평 선배열 신호벡터 사이의 상호 상관값으로 정의할 수 있으며 본 실험 자료의 경우 48×48 행렬

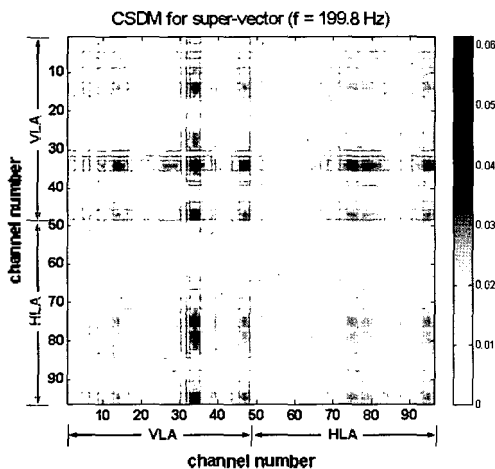


그림 7. 수직 및 수평 선배열 신호벡터를 결합한 super vector CSDM의 절대값 분포
Fig. 7. Absolute values of CSDM using super vector from VLA and HLA signal vectors.

이 된다. 한편 Westwood [18]는 다수의 주파수 성분을 사용하는 광대역 프로세서들을 제안하면서 CSDM의 주대각 (diagonal) 성분을 포함하지 않는 경우가 일반 Bartlett과 같이 전체 행렬에 대한 상관값을 포함하는 경우보다 좋은 결과를 준다고 발표한 바 있는데, CSDM에서 필요한 부분적인 정보를 사용한다는 점에서 본 상호 상관 방식의 경우도 이와 유사한 개념을 가진다고 할 수 있다. 다만 주대각 성분을 제거하는 방식의 경우 청음기 각각의 자기상관 (autocorrelation) 성분을 배제하고 선배열 내의 다른 청음기 간 공간적 상관 성분을 이용하는 반면, 본 상호 상관 방식의 경우 형태적으로 다르게 분포되어 있는 수직 및 수평 선배열 청음기 사이의 공간적 상관 성분을 이용한다. 이는 수평 및 수직 선배열 전체를 하나의 선배열로 볼 때 훨씬 적은 정보만을 사용하는 셈이 된다.

IV. 역산 결과 및 음원 위치 추정

4.1. 지음향 역산 및 역산 결과

역산에 사용될 신호의 주파수 성분은 표 1의 각 주파수 그룹 중에서 높은 신호 대 잡음비를 갖는 첫번째 신호들을 고려하였다. 목적함수의 비상관 평균에 필요한 주파수 성분 개수는 3개로 정하였고 109.8, 149.8, 199.8 Hz를 선택하여 각각의 CSDM을 구성하였다. 음원이 이동하고 있었기 때문에 CSDM에 사용되는 신호단편 수가 제한될 수밖에 없었는데, 청음기 샘플링 주파수는 4 kHz이고 5초 FFT에 신호의 50%를 겹쳐 사용하여 10초 동안 3개의 신호단편을 평균하였다. 따라서 하나의 CSDM에는 음원이 약 20여 m 이동할 동안의 신호 정보가 포함되어 있다. 모의 음장을 계산하기 위한 음전달 모델은 정상모드 (normal mode)법 프로그램 중의 하나인 ORCA [19]를 사용하였으며, 목적함수의 최적화 과정은 광역 최적화 기법인 VFSA (very fast simulated annealing)을 사용하였다 [15, 20]. 전체 냉각 스케줄은 100 단계의 온도 상태에서 각 단계마다 최대 200회의 목적함수 평가가 이루어지도록 제한하였다.

표 2에는 음원 이동 경로 앞 부분에 해당하는 신호 중 하나의 시간 프레임 (거리 약 2.4 km)에 대해 지음향 역산을 수행한 결과를 각 목적함수 별로 나타내었다. 각 경우에 대해 랜덤 변수를 바꿔가며 세 번씩 반복하여 역산을 수행하였으며 대부분 일관된 결과를 얻을 수 있었

표 2. 각 목적 함수 별 지음향 인자 역산 결과 (frame = 9h 54m 0s~10s)

Table 2. The geoacoustic inversion results for various cost function types (frame = 9h 54m 0s~10s).

Parameters	search bound	VLA	HLA	Super	Incoh	Cross
D_w (m)	(168 175)	170.3	173.0	171.7	171.1	171.7
R_s (km)	(2.0 3.0)	2.366	2.439	2.417	2.390	2.406
ϕ (°)	(3.0 3.0)	1.02	-	0.71	0.76	0.85
θ (°)	(10.0 10.0)	-	0.33	1.90	2.23	1.10
h (m)	(10 50)	33.8	41.7	36.0	36.6	35.8
c_1 (m/s)	(1480 1650)	1534.7	1552.7	1531.9	1530.8	1531.0
c_2 (m/s)	(1600 1900)	1839.9	1673.1	1839.0	1875.8	1872.1
c_b (m/s)	(1800 2100)	1892.0	1885.6	1879.2	1811.3	1860.5
ρ_b (g/cm ³)	(1.3 2.0)	1.76	1.39	1.53	1.37	1.41
ρ_b (g/cm ³)	(1.7 2.3)	2.17	1.93	2.12	2.04	2.08
α_1 (dB/ λ)	(0.0 0.5)	0.303	0.417	0.238	0.471	0.333
α_2 (dB/ λ)	(0.0 0.5)	0.439	0.315	0.363	0.199	0.323
α_b (dB/ λ)	(0.0 0.5)	0.063	0.423	0.192	0.365	0.405
Cost function value		0.065	0.175	0.183	0.178	0.183

다. 전체적인 역산 결과는 세 복합 프로세서들의 경우 거의 유사한 값으로 추정되었으나 수직 및 수평 선배열을 단독으로 사용한 경우는 약간의 차이를 보였다. 특히 상호 상관 비교 방식의 경우 full array 방식의 결과와 거의 차이가 없는 것으로 보이는데, 각 하부 선배열의 자체 청음기 간 상관 성분이 포함되지 않았음에도 역산에 필요한 정보의 손실이 없음을 간접적으로 유추할 수 있다. 각 인자 별 역산 결과를 살펴보면, 음원 거리 및 수심의 경우 연동되어 수직 선배열은 약간 작은 값으로, 수평 선배열은 약간 큰 값으로 추정되는 경향을 보였다. 이는 수직 선배열 뒤쪽으로 수평 선배열이 놓여진 500 m 가량의 거리에 아주 약간의 수심 경사가 있었기 때문으로 보이는데, 추정된 값은 사전 정보와 거의 무시할만한 오차 범위 (수심의 경우 측심기 정보와 ± 1 m 이내) 내에 있는 것으로 생각된다. 수직 선배열 기울기는 1도 이내로 아주 작은 것으로 파악되었다. 음원 방위각의 경우 실제 위성항법장치상의 방위각은 약 7도 부근이나 역산 결과는 대부분의 프로세서에서 0도 쪽으로 편향되어 둔감하게 나타났다. 이는 음원이 수평 선배열에 대해 endfire 쪽에 위치하여 빔 폭이 커졌기 때문에 나타나는 오차로 생각된다. 한편 지음향 인자의 경우 평균적으로 퇴적층 두께가 35 m 안팎, 퇴적층 상부 음속이 모래-실트의 중간 정도로 생각되는 1530 m/s 안팎으로 추정되었고, 하부층 음속은 1900 m/s 부근으로 추정됨으로서 그림 5의 지질 자료에 나타난 분포와 비교적 잘 일치하

였다. 반면 퇴적층 하부 음속이나 밀도 및 감쇠계수들의 경우 민감도가 매우 낮게 나타났는데 특히 감쇠계수의 경우 통상적으로 알려진 값보다 높게 나타나는 경향을 보였다.

4.2. 음원 위치 추정

표 2에 제시된 역산 결과들 중 지음향 인자들을 이용하여 모의음장을 만들고 음원 위치를 역으로 추정하여 보았다 (backpropagation). 다만 역산에서는 높은 품질의 해를 얻고 모호성을 줄이기 위해 신호의 질이 좋은 첫번째 신호 성분들 중 다수의 주파수 성분들을 사용하였지만, 음원 위치 추정에서는 역산 결과의 간접적인 검증과 각 프로세서의 효과적인 성능 비교를 위하여 낮은 신호 대 잡음비 (~ 0 dB)의 세번째 신호 성분들 중 단일 주파수 성분만을 고려하였고 그 중 가장 높은 주파수인 206 Hz를 선택하였다. 그림 8은 각 목적함수를 사용하여 역산된 지음향 인자들을 바탕으로 같은 프로세서를 사용하여 음원 위치를 추정한 결과 (AMS, ambiguity surface)들이다. 각 '거리-방위각' 또는 '거리-깊이' AMS에서 격자 간격은 방위각 1도, 거리 20 m, 깊이 2 m 이며, 첨단 (peak) 값은 0 dB가 되도록 정규화 하였고 동적 범위 (dynamic range)는 모두 10 dB로 설정하였다.

그림 8의 (a)는 수직 선배열을 단독으로 사용했을 때의 결과이며 음원 거리 및 깊이가 잘 추정되었으나 낮은 신호 대 잡음비의 영향으로 부엽들이 다소 존재하는 것을 볼 수 있다. 그림 (b)는 수평 선배열 결과인데, '거리-깊이' AMS를 보면 부엽들이 상당히 많은 것을 볼 수 있다. 음원이 원거리에 있고 수평 선배열이 바닥에 놓여져 있기 때문에 음원 깊이 추정 성능이 떨어짐을 확인할 수 있다. 한편, '거리-방위각' AMS를 보면 방위각 방향으로는 상대적으로 부엽이 적은 것을 볼 수 있으나 음원 근처의 방위각에서 거리 별 부엽들이 다수 존재함을 볼 수 있다. 120도와 75도 부근의 거리 방향 부엽은 수평 선배열의 청음기 간 간격 (11 m)이 사용된 주파수 성분의 파장에 비해 넓어서 생긴 공간적 간섭현상 (aliasing) 때문이다. (c)에는 full array 방식을 사용한 결과를 나타내었다. '거리-깊이' AMS의 경우 수직 선배열 신호의 영향으로 거리 및 깊이 추정이 잘 되고 있으며 단독 수직 선배열 결과에 비해 부엽도 많이 줄어들었음을 알 수 있다. '거리-방위각' AMS에서도 수직 선배열 신호가 구속 조건으로 작용해 단독 수평 선배열 처

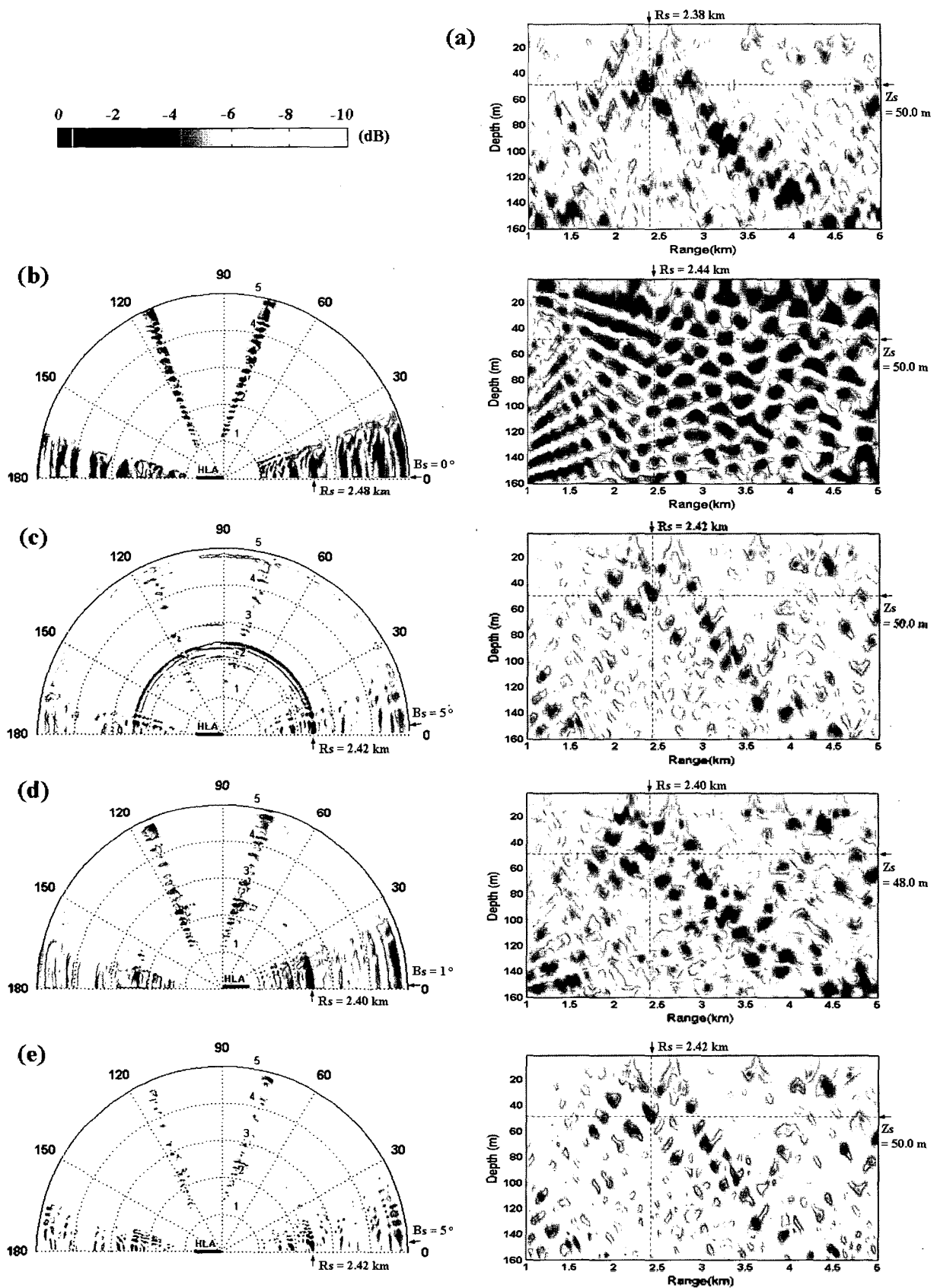


그림 8. 각 프로세서 별 '거리 방위각 및 '거리 깊이' AMS ($f = 205.8 \text{ Hz}$, $\text{SNR} \sim 0\text{dB}$)

Fig. 8. 'range bearing' and 'range depth' AMS for various processor types ($f = 205.8 \text{ Hz}$, $\text{SNR} \sim 0\text{dB}$): (a) vertical array data, (b) horizontal array data, (c) the coherent processing of the data from the full array, (d) the incoherent product of each output from both the horizontal and vertical arrays, (e) the cross correlation between the horizontal and vertical arrays.

라 시 나타났던 음원 방위각 근처의 거리 방향 부엽들이 상당히 억제된 것을 볼 수 있다. 한 가지 문제점은 방위각 방향으로 고리모양의 부엽이 나타나는데 이는 모의음장 구성 시 super-vector를 만들면서 수직 선배열 부분은 '방위각 독립환경'을 가정하여 방위각 방향으로 모두 같은 값이 포함되었기 때문이다. 하지만 모의음장에 방위각 방향으로 수심 변화를 반영 [12]하는 등의 3D효과를 주게 되면 이러한 모호성은 없앨 수 있다. (d)는 비상관 평균 방식의 결과인데, full array 방식과 유사한 결과가 나타나고 있으나 이 방식의 경우 수직 선배열 신호 성분과 수평 선배열 신호 성분이 각각 따로 처리되기 때문에 수직 선배열 성분이 수평 선배열 신호 성분에 어떤 구속 조건으로 작용할 수 없다. 따라서 각 AMS에서 부엽 억제 성능은 상대적으로 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 마지막으로 (e)는 상호 상관 비교 방식의 결과이다. 역산된 지음향 인자의 값이 full array 방식의 결과와 거의 차이가 없음에도 '거리-깊이' AMS와 '거리-방위각' AMS 모두에서 full array 방식에 비해 부엽 억제 성능이 좋은 것을 확인할 수 있다. 이는 선배열의 청음기 개수가 많고 위치 정보 등에 오차가 있을 경우 full array 방식에 포함된 각 하부 선배열 자체 간의 상관 성분이 성능 저하의 원인으로 작용하기 때문으로 생각된다. 이 부분을 포함하지 않는 상호 상관 비교 방식의 경우 이러한 요인을 포함하지 않을뿐더러 자료 처리 시 full array 방식에 비해 계산 부담도 줄일 수 있는 장점을 가진다. 그러나 수직 선배열과 수평 선배열의 상대적 위치 오차가 클 경우에는 '거리-깊이' 추정 성능이 많이 저하되었다.

V. 결론

L-자형 복합 선배열을 활용한 역산 및 음원 위치 추정 기법의 성능 분석을 위해 주파수 영역 역산에서 가장 널리 사용되는 Bartlett 형태의 목적함수를 기반으로 세 가지 형태의 프로세서를 살펴보고, 실 해상 실험 자료에 대한 처리 결과를 비교 분석하였다. 수직 선배열이나 수평 선배열을 단독으로 사용할 경우에 비해 full array 방식, 비일관성 평균 방식, 그리고 상호 상관 비교 방식 모두 역산이나 음원 위치 추정 시 좀 더 안정적인 결과를 얻을 수 있었다. 비일관성 평균 방식의 경우 각 하부 선배열 신호 성분간의 상호 구속 조건을 이용할 수 없기 때문에 수직 및 수평 선배열 각각의 평균 특성만을 보여

준 반면, full array 방식 및 상호 상관 비교 방식의 경우 하부 선배열 신호 성분들 간의 상관값이 구속조건으로 작용하여 낮은 신호 대 잡음비의 신호 성분에 대해서도 상대적으로 좋은 성능을 보였다. 특히 상호 상관 비교 방식의 경우 full array 방식에 비해 계산의 효율성 측면에서 장점을 가지면서도 역산에서는 같은 성능을 보여주었고 음원 위치 추정 문제에 있어서도 뛰어난 부엽 억제 성능을 보였다. 다만 수직 선배열과 수평 선배열의 상대적 위치 오차가 클 경우에는 성능 저하를 보였으며 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

감사의 글

이 연구는 국방과학연구소 제2체계개발본부의 「적용 적합장처리를 이용한 해양환경 역산기술 연구」 과제의 지원으로 이루어졌습니다.

참고 문헌

1. A. Tolstoy, *Matched Field Processing for Underwater Acoustics* (World Scientific, Singapore, 1993).
2. O. Diachock, A. Caiti, P. Gerstoft, and H. Schmidt, eds. *Full Field Inversion Methods in Ocean and Seism-Acoustics* (Kluwer, Dordrecht, 1995).
3. C. Park, W. Seong, and P. Gerstoft, "Geoacoustic inversion in time domain using ship of opportunity noise recorded on a horizontal towed array," *J. Acoust. Soc. Am.*, 117 (4), 1933-1941, 2005.
4. M. Siderius, P. L. Nielsen, and P. Gerstoft, "Range-dependent seabed characterization by inversion of acoustic data from a towed receiver array," *J. Acoust. Soc. Am.* 112, 1523-1535, 2002.
5. L. T. Fialkowski, T. C. Yang, K. Yoo, E. Kim, and D. K. Dacol, "Consistency and reliability of geoacoustic inversion with a horizontal line array," *J. Acoust. Soc. Am.* 120 (1), 231-246, 2006.
6. D. P. Knobles, R. A. Koch, L. A. Thompson, K. C. Focke, and P. E. Eisman "Broadband sound propagation in shallow water and geoacoustic inversion," *J. Acoust. Soc. Am.* 113, 205-222, 2003.
7. R. A. Koch and D. P. Knobles, "Geoacoustic inversion with ships as sources," *J. Acoust. Soc. Am.* 117 (2), 626-637, 2005.
8. D. Tollefsen, M. J. Wilmut, and N. R. Chapman, "Estimates of geoacoustic model parameters from inversion of horizontal and vertical line array data," *IEEE J. Oceanic Eng.* 30 (4), 764-772, 2005.
9. D. Tollefsen, S. E. Dosso, and M. J. Wilmut, "Matched-field geoacoustic inversion with a horizontal array and low level

source," J. Acoust. Soc. Am. 120 (1), 221-230, 2006.

10. N. O. Booth, A. T. Abawi, P. W. Schey, and W. S. Hodgkiss, "Detectability of low-level broad-band signals using adaptive matched field processing with vertical aperture arrays," IEEE J. Ocean. Eng. 25 (3), 296-313, 2000.
11. P. Pignot and N. R. Chapman, "Tomographic inversion of geoacoustic properties in a range dependent shallow-water environment," J. Acoust. Soc. Am. 110 (3), 1338-1348, 2001.
12. M. Nicholas, J. S. Perkins, G. J. Orris, L. T. Fialkowski, and G. J. Heard, "Environmental inversion and matched-field tracking with a surface ship and an L-shaped receiver array," J. Acoust. Soc. Am. 116 (5), 2891-2901, 2004.
13. R. Matthew, S. Barlee, N. R. Chapman, and M. J. Wilmut, "Geoacoustic model parameter estimation using a bottom-moored hydrophone array," IEEE J. Oceanic Eng. 30 (4), 773-783, 2005.
14. 김경섭, 박철수, 성우제, "협대역 신호를 이용한 전해환경 지음향 역산 및 정합장처리," 한국음향학회 학술대회 논문집 23 (2), 385-388, 2004.
15. 김경섭, 성우제, 박철수, 김성일, "전달손실 비교를 통한 지음향학적 인자 역산과 정합장처리," 한국음향학회지 24 (6), 325-333, 2005.
16. 김성일, 김영규, 박정수, 도경철, 나정렬, 오택환, 성우제, 박철수 외 19명, "MAPLE(Matched Acoustic Properties and Localization Experiment)," 한국음향학회 학술대회 논문집 23 (2), 377-380, 2004.
17. S. Kim, J. Park, Y. Kim, E. Kim, Y. Kim, M. Park, and Y. Na, "Source localization using an L-shaped array in shallow water," proceedings of WESPAC 9, 2006.
18. E. K. Westwood, "Broadband matched field source localization," J. Acoust. Soc. Am. 91 (5), 2777-2789, 1992.
19. E. K. Westwood, ORCA version 1.0 user's guide, Applied Research Laboratory (Univ. of Texas, 1998).
20. L. Ingber, "Very fast simulated reannealing," Math. Comput. Modeling, 12 (8), 967-993, 1989.
21. Z. Michalopoulou, "Robust multi tonal matched-field inversion: A coherent approach," J. Acoust. Soc. Am. 104 (1), 163-170, 1998.
22. S. L. Tatum and L. W. Nolte, "On array design for matched-field processing," J. Acoust. Soc. Am. 107, 2101-2111, 2000.

1991년: M.I.T., Post?doctoral Associate
 1992년~1996년: 인하대학교 선박해양공학과 조교수
 1996년~현재: 서울대학교 조선해양공학과 부교수
 * 주관심 분야: 음전달 모델링, 지음향역산, 정합장처리, AUV

• 김 성 일 (Seongil Kim)

1986년: 서울대학교 해양학과 (학사)
 1988년: 서울대학교 대학원 해양학과 (석사)
 2002년: University of California, San Diego (박사)
 1990년~현재: 국방과학연구소 연구원
 * 주관심 분야: 수중음향

• 김 영 규 (Young-Gyu Kim)

1983년: 서울대학교 해양학과 (학사)
 1985년: 서울대학교 대학원 해양학과 (석사)
 1996년: 서울대학교 대학원 해양학과 (박사)
 1987년~현재: 국방과학연구소 연구원
 * 주관심 분야: 해양수란, 수중음향

저자 약력

• 김 경 섭 (Kyungseop Kim)

2002년: 서울대학교 조선해양공학과 (학사)
 2002년~현재: 서울대학교 대학원 조선해양공학과 석·박사 통합과정
 * 주관심 분야: 배열 신호처리, 정합장처리

• 이 근 화 (Kuenhwa Lee)

2000년: 서울대학교 조선해양공학과 (학사)
 2006년: 서울대학교 대학원 조선해양공학과 (박사)
 2006~현재: 서울대학교 해양기술사업단 BK21 연수 연구원
 * 주관심 분야: 다공성 매질 모델링, 표적 및 확산 산란모델링, 음향 역산 이론

• 성 우 제 (Woojae Seong)

1982년: 서울대학교 조선공학과 (학사)
 1990년: M.I.T., 해양공학과 (박사)