

# 전달손실 비교를 통한 지음향학적 인자 역산과 정합장처리

## Geoacoustic Inversion via Transmission Loss Matching and Matched Field Processing

김 경 섭\*, 성 우 제\*, 박 철 수\*\*, 김 성 일\*\*\*  
(Kyungseop Kim\*, Woojae Seong\*, Cheolsoo Park\*\*, Seongil Kim\*\*\*)

\*서울대학교 조선해양공학과, \*\*한국해양연구원 해양시스템안전연구소, \*\*\*국방과학연구소  
(접수일자: 2005년 6월 24일; 수정일자: 2005년 6월 28일; 채택일자: 2005년 7월 20일)

본 논문에서는 2004년 동해에서 수행된 MAPLE 실험의 음향계측 자료를 이용한 지음향학적 인자 역산기법을 제시하고 제안된 기법의 검증을 위해 음원의 위치추적 테스트를 수행하였다. 역산을 위한 목적함수는 예인 음원과 고정된 수직선배열로부터 획득된 음향신호를 이용하여 구한 전달손실과 모의된 전달손실과의 상관관계를 평가하도록 정의하였다. 목적함수의 최적화는 광역 최적화 알고리즘인 VFSA (Very Fast Simulated Annealing)를 사용하여 수행하였다. 본 역산기법을 5개의 주파수 토널 성분 데이터에 적용한 후 이를 바탕으로 실험해역의 지음향 모델을 구성하였다. 끝으로 정합장처리를 통해 예인 음원의 위치를 추적하여 역산된 지음향학적 인자들의 타당성을 검토하였다.

**핵심용어:** 지음향학적 인자 역산, 전달손실 비교, VFSA, 정합장처리, 음원 위치 추적

**투고분야:** 수중음향분야 (5.5)

This paper proposes a geoacoustic inversion method for the experimental data of MAPLE 2004 experiment conducted in the East Sea of Korea in 2004 and shows source tracking test results to validate the proposed inversion method. An objective function is defined as a correlation function of the measured and the simulated transmission loss data. The measured transmission data were obtained using a multi-tonal towed source and VLA. The VFSA (Very Fast Simulated Annealing) is applied to the inversion problem which optimizes the objective function. After performing the inversion process for the 5 frequencies tonal data independently, geoacoustic models are constructed. Finally matched-field source tracking is performed using the inverted parameters to verify them.

**Keywords:** Geoacoustic inversion, Transmission loss matching, VFSA, Matched-field source tracking

**ASK subject classification:** Underwater Acoustics (5.5)

### I. 서론

최근 천해지역에서 수중음향의 활용이 빈번해짐에 따라 천해환경에서의 음전달에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 알려진 해저퇴적층의 지음향학적 특성을 예측하는 것이 중요한 문제로 대두되었다. 따라서 이러한 지음향학적 인자들을 파악하기 위한 직접 혹은 간접적인 방법들이 현재까지 꾸준히 제안되어 활용되고 있다. 그 중에

서 음전달의 물리적 현상을 바탕으로 한 모델기반 정합장 역산기법 (model-based matched field inversion method)은 시간 및 비용 측면에서의 효율성으로 인해 최근 가장 활발하게 연구되고 있는 역산 방법의 하나로 자리매김 하였다[1].

정합장처리 (Matched Field Processing, MFP)는 수중에서 음원의 위치를 추정하는 목적으로 개발되었다. 이후 꾸준한 연구를 통해 다양한 형태의 프로세서들이 소개되었으며 모의환경과 실제환경과의 오정합 문제가 위치추정 결과에 영향을 끼친다는 사실에 주목하게 되었다[2]. 이에 천해환경에서의 지음향학적 인자 역산의 필

요성이 재차 강조되었고 90년대 이후 활발한 연구가 이루어졌다[3-5].

천해에서의 지음향학적 역산은 고정음원과 원거리에 위치한 수직선배열 (Vertical Line Array, VLA)을 이용하여 수행하는 것이 일반적이다[3-5]. 천해에서의 음전달은 도파관 현상으로 특징지을 수 있는데, 원거리 도파관에서의 음전달은 해저면을 비롯한 경계면과의 활발한 상호작용을 통해 다양한 모드를 형성하게 된다. 이때 각 모드는 환경에 따라 서로 다른 수직방향의 분포특성을 보이며 수층 전체에 걸쳐 설치된 수직선배열은 이러한 모드의 수직구조를 파악하기에 적합하다. 수직선배열과 더불어 모드의 수평구조를 파악하기 위해 수평선배열 (Horizontal Line Array, HLA)이 사용되기도 한다. 그러나 일반적으로 모드의 수평구조를 파악하기 위한 수평선배열은 그 길이가 충분히 길어져야 한다. 지음향학적 역산에 짧은 길이의 예인 수평선배열이 사용되기도 하는데 이는 역산에서 모드구조를 이용하기 보다는 거리중속 역산을 효율적으로 수행하기 위한 목적으로 주로 활용된다[6,7].

모드의 수평구조는 전달손실 (Transmission Loss, TL)에 의해 표현될 수 있다. 기존 연구자들 중 역산결과를 검증하기 위해 전달손실을 비교한 경우는 있으나 [8,9], 역산을 위해 전달손실을 직접적으로 이용한 사례는 드물다. 그 중 Siderius와 Hermand[10]은 고정된 광대역 음원을 사용하여 특정 거리에서 받은 신호의 주파수 별 전달손실을 비교하는 목적함수를 정의하여 역산을 수행한 바 있다.

본 논문에서는 실측된 전달손실과 모의된 전달손실의 직접적인 비교를 통한 역산기법을 제안하였다. 일반적으로 선배열을 이용한 역산 시 음압을 비교하는 Bartlett 형태의 목적함수를 사용하는 경우가 많다. 이는 각 수신기 사이의 공간적 위상정보를 이용할 수 있는 장점이 있으나, 실 해상 실험에서 수신기 위치 오차나 다른 환경요인 등으로 인해 위상정보가 정확하게 추출되지 못할 경우 역산 결과가 좋지 않게 된다. 본 논문에서 사용한 목적함수의 경우 하나의 수신기에 수신된 음장의 시간(거리) 별 크기 정보를 이용함으로써 선배열의 수신기 위치에 따른 공간적 위상정보를 이용하지 않아도 되며, 음원이 예인된 거리에 대한 전달손실을 비교하므로 평균적인 지음향 인자 값을 역산 할 수 있다. 역산에 사용된 전달손실은 2004년 5월 동해에서 수행된 MAPLE (Matched Acoustic Properties and Localization Experiment) 실험[11-13]에서 얻은 것으로서 다중 주파수

성분을 가지는 협대역 예인 음원으로부터 계측된 음향신호를 이용해 전달손실을 계산하였다. 역산 최적화 과정에서 목적함수는 실측 전달손실과 모의 전달손실 간 거리에 따른 패턴의 상관함수 (correlation)로 정의하였으며, 실측된 자료 중 일부 구간의 전달손실에 대해 역산을 수행하였다. 전체 역산 수행은 200 Hz 이하 낮은 주파수 성분의 전달손실을 이용한 경우와 200 Hz 이상의 고주파 성분을 이용한 경우의 두 가지 방향으로 진행하였으며, 역산된 환경인자를 바탕으로 계산된 전달손실을 실측된 전달손실과 전구간 비교함으로써 본 역산 방법의 타당성을 검토하였다. 끝으로 저주파 성분의 역산으로 얻어진 지음향학적 인자를 이용하여 음원의 위치추적 성능을 테스트 하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2장에서 MAPLE 2004 실험과 획득 자료에 대한 설명을 하고, 제 3장에서 전달손실 비교를 이용한 역산 방법과 역산 결과를 기술한다. 제4장에서 역산된 지음향학적 인자들을 이용한 음원의 위치추적 결과를 제시하고, 끝으로 제5장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

## II. MAPLE 실험 및 환경 모델

2004년 5월 동해에서 지음향학적 인자 역산 및 정합장치리를 위한 해양 및 음향자료 획득을 목적으로

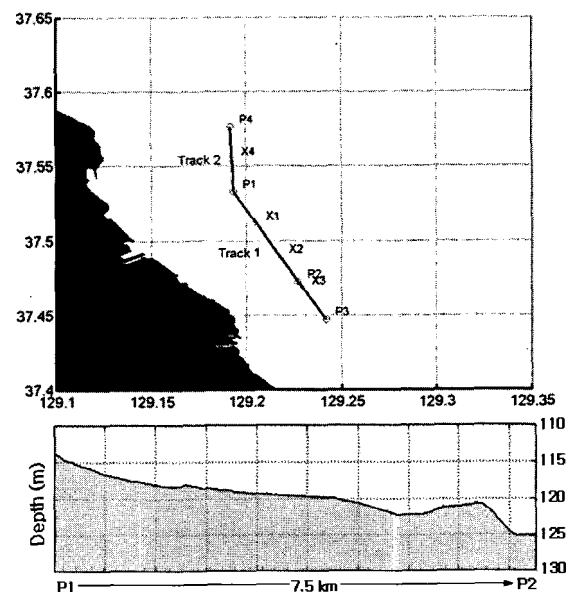


그림 1. MAPLE 2004 실험 해역과 예인 음원 이동 경로 및 측정 수심  
Fig. 1. MAPLE 2004 experimental site, the tracks of the towed source and measured bathymetry.

표 1. 협대역 예인 음원의 다중 주파수 토널 성분  
Table 1. Tonal frequencies of the narrow band towed source.

	주파수 (Hz)	준위 (dB)
Source (60 m)	70, 80, 90	165, 160, 155
	100, 110, 120	165, 160, 155
	150, 160, 170	165, 160, 155
	200, 210, 220	165, 160, 155
	250, 260, 270	165, 160, 155

MAPLE[11] 해상실험이 수행되었다. 해상실험에서는 협대역 연속신호 (Continuous Wave, CW) 와 광대역 전구신호가 각각 위치추정 및 지음향 역산 음원으로 사용되었으나, 본 논문에서는 협대역 CW신호로부터 역산을 위한 전달손실을 구하였다. CW음원은 실험선에 의해 설정수심 60 m에서 3.5 knots의 속도로 그림 1의 track 1을 따라 왕복 예인 되었다 (P1-P2-P1). Track 1의 P1에서 P2까지의 길이는 약 7.5 km로서, 음원 예인 중 실험선의 측심기로 측정된 수심 분포는 P1에서 P2까지 약 114 ~ 125 m 정도의 완만한 경사를 이루었다. 수직선배열은 P1 지점에 설치되었으며, 총 19개의 수신기가 98.0 m (채널1)에서 27.7 m (채널19)까지의 수심 사이에 배열되었다.

음원은 예인되는 동안 70~270 Hz 사이의 15개 다중 주파수 CW 신호를 주파수에 따라 155, 160, 165 dB의 레벨로 방사하였으며 이를 표 1에 정리하였다. 그림 2에는 수직선배열 중 채널1에서 획득한 음향신호의 주파수 스펙트럼을 나타내었는데, 100 Hz 이하의 배경 소음이 심한 영역을 제외하면 각 주파수 토널 성분 대부분이 높은 신호 대 잡음 비 (SNR)를 보이고 있음을 확인할 수 있다. 또한 300 Hz 이상의 고주파 영역에서도 의도되지 않았던 상당수의 주파수 토널 성분들이 관찰되었는데,

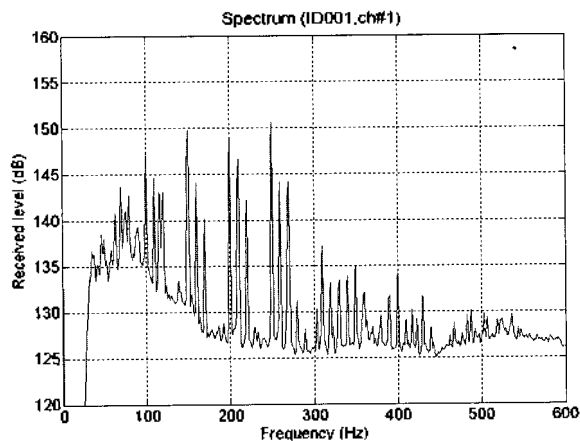


그림 2. 수직선배열 채널 1에서 수신된 예인 음원 신호의 주파수 스펙트럼 평균값  
Fig. 2. The averaged frequency spectrum of the signals recorded at channel 1 of the VLA.

이는 음원의 하모닉에 의한 주파수 성분인 것으로 판단된다. 본 고주파 토널 성분들도 추후 전달손실을 이용한 지음향 역산에 이용되었다.

그림 3은 실험 중 측정된 XBT와 CTD 자료를 이용해 계산한 수심 별 음속 분포이며 전형적인 하향 굴절 (downward refracting) 구조임을 알 수 있다. 그림에서 실선은 음원이 예인되는 동안 측정된 12개의 XBT 자료에서 얻은 track 1의 평균 음속 분포를 나타낸다.

지음향 환경모델은 실험 해역 근처의 기존 지질자료를 근거로 정의되었다. 자료에 의하면 본 해역의 해저 지질 구조는 단단한 (hard) 하부층 (sub-bottom) 위에 부드러운 (soft) 얇은 퇴적층이 뒤덮여 있는 구조로 구성되어 있다. 퇴적층의 P파 속도는 약 1520 m/s 이고, 해저면으로부터 5~10 m 아래의 하부층에서는 약 1900 m/s 의 높은 음속 분포를 보인다. 이 때 퇴적층의 밀도와 감쇠계수는 각각 약 1.6 g/cm<sup>3</sup>, 0.4 dB/λ 의 값으로 파악되었다. 또한 바다 표층에서의 지음향학적 인자들 값이 실험해역 주변에서 비교적 균일한 수평 분포를 보이는 것으로 판단되었고 수심변화 또한 완만하였다. 따라서 이후 역산 과정에서는 본 해역을 하나의 퇴적층과 하부층으로 구성된 거리독립 환경으로 가정하였다.

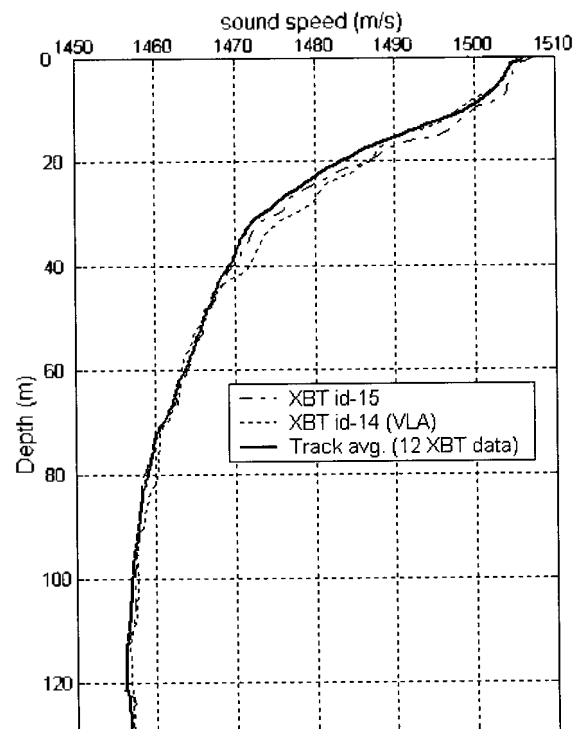


그림 3. Track 1을 따라 음원 예인 중 측정된 실험 해역의 음속 구조  
Fig. 3. The sound speed profile measured along the track 1.

### III. 지음향학적 인자 역산

#### 3.1. 역산 기법

모델기반 역산은 실측신호와 음전달 모델링을 통해 예측된 모의신호와와의 유사도를 정의하는 목적함수를 설정한 후 이를 최대화 또는 최소화 시키는 최적화 과정을 통해 환경 인자들의 값을 추정하는 방식으로 수행된다.

MAPLE 실험에서 고정 수직선배열과 예인 음원을 사용하여 음향신호를 획득하였으므로 이로부터 거리에 따른 전달손실의 계산이 가능하다. 이에 본 논문에서는 목적함수를 식 (1)과 같이 실측된 전달손실 패턴과 지음향학적 인자를 가정하여 모델링 된 모의 전달손실 패턴과의 상관함수로 정의한다.

$$H(\Phi) = 1 - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{\sum_{j=1}^R (TL_{data}(i) - E\{TL_{data}\}) \times (TL_{model}(\Phi, i) - E\{TL_{model}\})}{\sqrt{\sum_{j=1}^R (TL_{data}(i))^2} \sqrt{\sum_{j=1}^R (TL_{model}(\Phi, i))^2}} \right)^2 \quad (1)$$

식 (1)에서  $i$  는 거리를 나타내는 지표이며,  $R$  은 목적함수에 포함할 최대 거리 지표,  $N$  은 수신기 채널 개수 그리고  $\Phi$  는 찾고자 하는 지음향학적 인자를 각각 나타낸다. 또한  $E\{\}$  는 전체 전달손실 곡선의 평균값을 의미한다. 식 (1)은 거리에 따른 전달손실에서 모드간 간섭으로 인해 발생하는 패턴의 유사성을 비교하기 위한 형태이다. 즉, 각 수신기에서 얻어진 거리에 따른 전달손실 곡선에서 그의 평균값을 빼주어서 평균이 0이 되도록 하였고 이를 같은 형태의 모의 전달손실 곡선과 상관함수를 취하여 그 값을 유사도의 기준으로 삼았다. 따라서 모의 전달손실 곡선에서 음장의 보강 및 상쇄로 인한 패턴이 실측 곡선의 그것과 비슷할수록 상관함수 값은 커지게 되며, 식 (1)의 목적함수 값은 0에 가까운 값이 된다. 한편, 모드간 간섭과는 별도로 음파가 전파하면서 거리에 따라 확산에 의해 전달손실이 증가하게 되는데, 여기서는 이동평균을 사용하여 이러한 전달손실 평균선의 변화를 고려하였다. 또한 서론에서 언급하였듯이 본 목적함수의 장점이자 단점인 선배열 수신기의 상대적 위상정보를 이용하지 않는 부분에 대해서는 각 수신기에서의 전달손실 비교 값을 전체 수신기에 대해 비상관 평균함으로써 보완하였다.

거리에 따른 전달손실을 얻기 위해 수신된 신호를 1초 간격으로 FFT하여 주파수 영역으로 변환하였고 각 시간

간격마다 전달손실 값을 계산하였다. 본 목적함수는 계측 및 모의 전달손실의 정량적 크기가 아닌 모드의 간섭 패턴을 이용하여 두 손실곡선의 유사도를 평가한 것이다. 따라서 계측신호의 전달손실의 상대적 크기만이 요구되므로 음원준위와 청음기의 민감도 및 증폭률 등을 고려한 전달손실의 절대 준위를 계산하는 과정을 생략할 수 있다. 수직선배열의 샘플링 주파수는 3000 Hz이다. 그리고 측정 시 발생한 전달손실의 작은 변동 오차는 각 시간 간격, 전후의 평균값을 사용함으로써 순정 된 전달손실 곡선을 얻었다.

모의 전달손실을 구하기 위한 음파전달 모델은 정상모드 (Normal mode)법 프로그램 중의 하나인 ORCA[14]를 사용하였다. 반복적인 계산을 필요로 하는 모델기반 역산에서는 해의 정확성뿐만 아니라 빠른 계산속도가 요구되는데, 이러한 조건을 만족하는 음파전달 모델 중에서도 정상모드법은 원거리 음전달을 모의하는데 효율적이며 상대적으로 계산속도가 빠른 것으로 알려져 있다.

한편, 역산 문제는 앞서 정의한 목적함수를 최소화하는 지음향학적 인자 ( $\Phi$ )를 찾는 것이고, 이는 결국 최적화 문제로 귀결된다. 그런데 지음향 역산문제는 여러 개의 지역 최적해가 공존하는 대표적인 비선형 문제이다 [15]. 역산의 최적화 문제에는 유전알고리즘[16,17]과 SA (simulated annealing)[18-20]로 대표되는 광역 최적화 기법이 일반적으로 널리 적용되었으며 지역 최적화 기법과 연동된 혼합형 알고리즘[21-23]이 사용되기도 하였다. 각 알고리즘이 역산에 적용될 때에는 문제의 성격과 최적화 과정의 방법론에 따라 기본 알고리즘의 기술적인 변형이 가능하며, 이 때 알고리즘의 성능은 문제에 따라 달라질 수 있다. 따라서 역산에서는 역산인자의

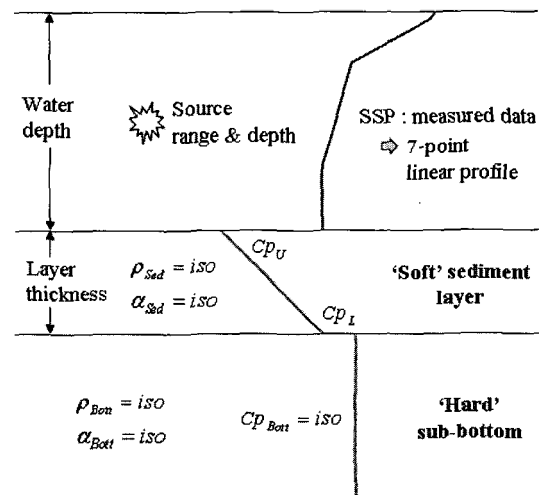


그림 4. 역산을 위한 환경 모델링 및 탐색 인자  
Fig. 4. Environmental model and search parameters.

민감도 등을 고려한 효율적인 최적화 과정을 구성한 후 알고리즘이 해당 최적화 과정에서 가장 좋은 성능을 발휘할 수 있도록 알고리즘의 여러 튜닝인자를 적절히 조절하는 것이 중요하다고 판단된다. 본 논문의 역산에서는 SA에 비해 수렴성능이 개선된 VFSA (very fast simulated annealing)[24]를 사용하였다.

VFSA는 원자들의 집합적인 성질을 분석하는 통계역학에서 사용되는 개념을 차용한 SA의 변형된 한 형태이다. SA는 금속의 담금질 과정을 컴퓨터 시뮬레이션으로 모의한 것으로서 금속은 높은 온도에서는 분자의 운동이 활발해지고 온도를 서서히 낮추는 과정에서 점점 더 안정된 상태, 즉 에너지가 낮은 상태로 굳어지게 된다. 이러한 개념을 최적화에 적용하면 온도가 높은 상태에서는 탐색이 자유로워서 품질이 나쁘더라도 그 해로의 이동이 허용될 수 있는 확률이 높다. 이는 지역 최적점으로부터의 탈출을 돕는 역할을 한다. 그러나 온도가 낮아지면 해의 이동은 점점 품질이 좋아지는 방향으로 집중되고 극도로 낮은 온도에서는 지역최적화 알고리즘과 동일하게 된다. SA에서 가장 중요한 요소는 온도를 낮추는 냉각 스케줄이다. 만약 온도를 급속히 낮추게 되면 최저 에너지 상태에 도달하기 전에 지역 최적점에 해당하는 다른 상태로 굳어지게 되므로 소기의 목적을 달성할 수 없다. 따라서 한 온도에서 충분히 열적 평형상태에 도달한 다음 온도를 서서히 낮추어 다음 상태의 평형상태에 도달하도록 되어야 하는데 이는 최적화 과정에서 많은 수의 함수평가를 요구한다. SA의 개념을 처음으로 도입한 Metropolis SA의 냉각 과정은  $T(k) = T_0 / \ln(k)$ 에 의해 이루어진다. 식에서  $T_0$ 는 초기 온도이고  $k$ 는 냉각 단계를 나타내는 인덱스이다. 이 때 탐색과정에서 인자의 탐색범위 내에서 특정값이 선택될 확률은 균일분포를 따른다. Metropolis 알고리즘의 단점은 냉각 스케줄에서 볼 수 있듯이 냉각 속도가 느리므로 탐색의 수렴 또한 느리다는 데 있다. 이러한 단점을 개선하기 위해 VFSA는 식 (2)에 의해 인자의 값을 선택하고 식 (3)의 냉각 스케줄을 따르도록 구성되었다. 식 (2)과 (3)에서  $c$ 는 임의의 튜닝인자이고  $M$ 은 인자의 개수를 의미한다. 또한  $y_i$ 는 확률변수로서 다음인자를 선택할 때 이전 인자와의 거리를 의미하며  $u_i$ 는 0과 1사이에서 임의로 추출되는 수이고,  $\text{sgn}(c)$ 은 부호를 나타낸다.

$$y_i = \text{sgn}\left(u_i - \frac{1}{2}\right) T_i \left[ \left(1 + \frac{1}{T_i}\right)^{2u_i - 1} - 1 \right] \quad (2)$$

$$T(k) = T_0 \exp(-ck^M) \quad (3)$$

본 연구에서는 각 단계에서 함수의 평가 회수는 100회로 제한하였고 이 때 파라미터  $T_0$ 와  $c$ 는 각각 1.0 및 4.0으로 설정하였다.

### 3.2. MAPLE 데이터 역산

역산은 다음의 두 가지 경우에 대해 각각 수행되었다. 첫 번째는 수직선배열로부터 약 2.5 km까지의 전달손실을 이용하여 역산을 수행하였는데, 저주파일수록 모드 간섭 패턴이 단순해서 비교가 용이할 것이라는 판단아래 배경소음 영향이 없는 토널 성분 중 제일 낮은 주파수인 100 Hz에 대한 전달손실을 사용하였다. 두 번째는 추후에 수행될 지구음원 신호를 이용한 역산 결과와 비교하기 위해 100 Hz에 비해 상대적으로 고주파 성분인 250 Hz 이상의 토널 성분에 대한 역산을 수행하였다. 이 때 300 Hz 이상의 토널 성분들은 음원의 하모닉 성분임에 유의한다. 또한 고주파 역산에서 전달손실은 상대적으로 짧은 거리인 1.6 km까지의 값만을 사용하였다.

역산의 환경 모델은 기존 지질자료를 바탕으로 그림 4와 같이 하부층 위에 하나의 퇴적층이 존재하는 것으로 가정하였고, 모든 층에서 전단파 (shear wave)의 영향은 무시하였다. 100 Hz 전달손실을 이용한 역산의 경우 역산 인자는 음원의 깊이 및 선배열로부터의 거리, 수심, 퇴적층 두께  $H_{sed}$ , 퇴적층 상부 음속  $C_{PU}$ , 하부 음속  $C_{PL}$ , 퇴적층 밀도  $\rho_{sed}$ , 퇴적층 감쇠계수  $\alpha_{sed}$ , 하부층 음속  $C_{Pflou}$  등 총 9개로 설정하였다. 하부층의 밀도와 감쇠계수는 민감도가 작으므로 최적화 과정의 효율성을 위해 퇴적층과 동일하다고 가정하였다. 반면에 고주파 역산의 경우에는 하부층의 밀도와 감쇠계수 또한 역산 인자로 추가하였다.

먼저 100 Hz 전달손실에 대한 역산을 수행하였다. 본 초기 역산은 역산해를 구하는 것과 더불어 식 (1)의 목적 함수에 대한 각 인자의 민감도를 검토하고, 다른 주파수의 효율적인 역산을 위해 각 인자 별 최적화 과정의 탐색구간을 결정하고자 하는 또 다른 목적이 있다. 그림 5는 100 Hz 역산에서 최적화 과정을 통해 평가된 인자 별 목적함수 값을 보여준다. 그림에서 음원의 위치 및 수심 등 기하학적 인자의 민감도가 가장 높고 밀도와 감쇠계수의 민감도가 상대적으로 낮음을 확인할 수 있다. 이로부터 각 인자들의 민감도 혹은 수렴성은 대부분 일반적으로 알려진 경향에서 크게 벗어나지 않음을 알 수 있다.

표 2. 전달손실 비교를 통해 역산된 지음향 인자들의 값.

Table 2. Geoacoustic inversion results using the transmission loss comparison.

Parameters	search bound	100 Hz	250 Hz	310 Hz	350 Hz	400 Hz	geology
$H_{sed}$ (m)	[5 30]	10.8	28.3	14.8	13.8	13.2	5~10
$C_{p0}$ (m/s)	[1400 1600]	1491	1453	1458	1445	1450	1520
$C_{p1}$ (m/s)	[1450 1700]	1568	1590	1492	1508	1493	1530
$\rho_{sed}$ (g/cm <sup>3</sup> )	[1.0 2.0]	1.7	1.3	1.24	1.52	1.22	1.6
$\alpha_{sed}$ (dB/ $\lambda$ )	[0.0 0.5]	0.28	0.13	0.01	0.14	0.03	0.35
$C_{pbm}$ (m/s)	$C_{p1} + [0 500]$	1767	1702	1711	1669	1655	1950
$\rho_{bom}$ (g/cm <sup>3</sup> )	[1.0 2.5]	1.7	1.8	1.66	1.48	1.36	2.4
$\alpha_{bom}$ (dB/ $\lambda$ )	[0.0 1.0]	0.28	0.19	0.29	0.38	0.06	0.45

[1]. 그런데 특이하게도 퇴적층의 음속의 민감도가 낮게 나타났다. 이는 본 해역의 퇴적층이 100Hz의 저주파 신호로 파악하기에는 상대적으로 얇기 때문인 것으로 판단되며 주파수가 높아질수록 향상된 공간 분해능으로 인해 민감도는 증가될 것으로 기대된다.

그림 5의 초기 역산 결과로부터 표 2와 같이 각 인자의 탐색구간을 설정한 후 저주파 및 고주파 토널 성분들에 대한 독립적인 역산을 각각 수행하였다. 이 때 각 경우에 대해 다수의 역산을 수행한 후 전달손실 정합 결과가 가장 우수한 인자들을 역산의 해로 정의하였다. 각 주파수 별 역산 결과는 표 2와 같으며 참고로 지질자료 결과를 함께 나타내었다.

250Hz 역산을 제외한 모든 역산에서 퇴적층 두께는 10~15 m 정도로 추정되었다. 또한 퇴적층 음속의 경우 주파수에 따른 편차는 존재하지만 상부 음속은 주로

1400 m/s 대 중반에서 후반까지, 하부 음속은 1400 m/s 대 후반부터 1500 m/s 대 후반에 걸쳐 존재하는 것으로 추정되었다. 이상의 결과로부터 본 실험 해역은 부드러운 퇴적층이 얇게 분포하고 있는 것으로 판단되며 이는 참고로 제시한 지질자료와 일치한다. 반면에 하부층의 경우 비록 음속이 빠른 단단한 기층이 존재함을 추정할 있지만 그 크기는 지질자료에 비해 작다. 아울러 퇴적층 및 하부층의 밀도 및 감쇠계수 또한 대부분의 주파수에서 지질 자료에서의 값보다 낮게 평가되었다.

역산결과를 검토하기 위해 100 Hz 실측 전달손실과 추정된 지음향 인자들을 사용해 모의한 전달손실을 그림 6에서 비교하였다. 그림에서 실선과 점선은 각각 모의 전달손실과 실측 전달손실을 나타낸다. 비록 역산 과정에는 2.5 km까지의 부분적인 전달손실 값을 사용했지만 그 이후의 거리에 대해서도 패턴이 상당히 잘 일치하고

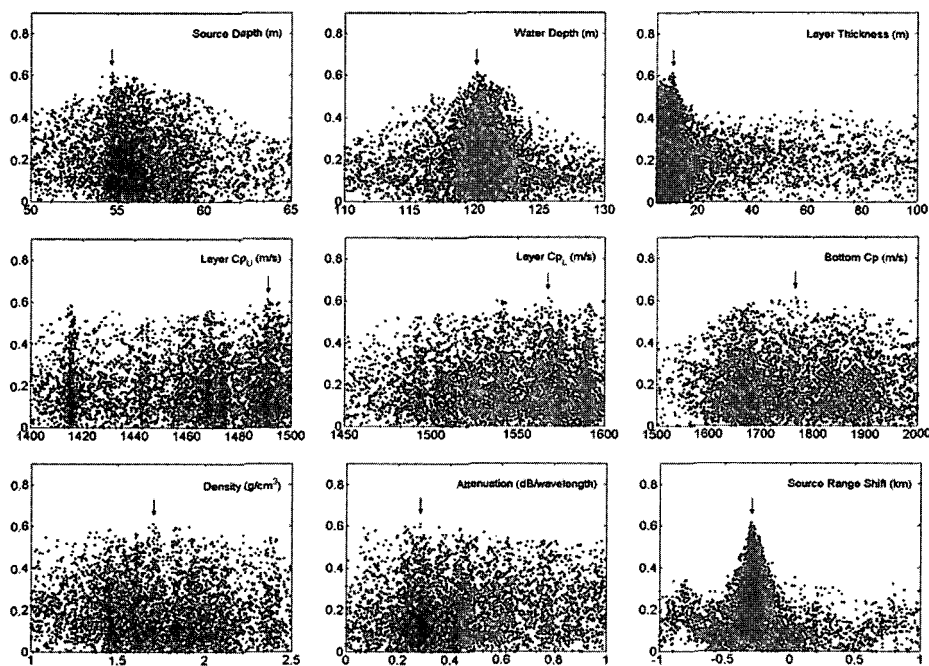


그림 5. 100 Hz 역산의 최적화 과정 중 탐색된 역산인자의 목적함수 값  
Fig. 5. The scattered plots for the parameters of 100Hz inversion test.

있는 것을 볼 수 있다. 그림 7은 400 Hz 전달손실 비교 결과이며 이 경우는 앞서 언급했듯 1.6 km까지의 데이터만 역산에 이용했다. 고주파의 경우 모드 간섭 패턴이 복잡하고 따라서 일치도가 저주파에 비해 상대적으로 낮지만 본 역산결과가 주요한 모드는 잘 표현하고 있는 것으로 판단된다.

이상의 결과로부터 역산에 의해 설정된 지음향 모델은 지질자료와는 상이함 (특히 하부층)에도 불구하고 실제 음전달 현상을 잘 반영함을 알 수 있다. 이는 역산에서 설정된 환경모델이 실제 환경에 비해 단순화 되었음에 기인한다. 실제 해양은 시공간적인 변화가 항시 존재하는 복잡한 환경임에 반해 역산에서는 이를 반영하기가 쉽지 않다. 따라서 본 역산은 음원의 위치추정에 적합한 실험해역의 지음향 모델 설정에 초점을 맞춰 수행되었

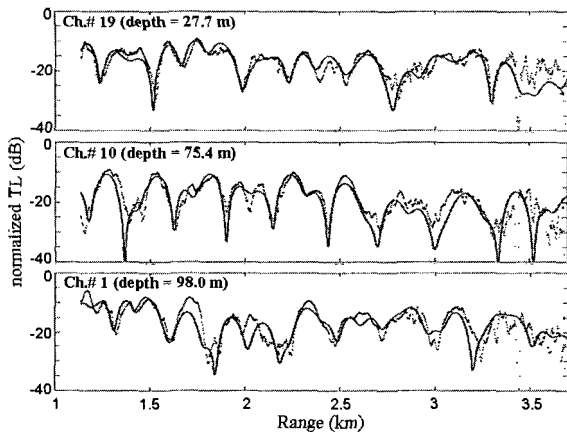


그림 6. 100 Hz 실측 전달손실(점선)과 역산된 지음향 인자를 이용한 모의 전달손실(실선)의 비교  
 Fig. 6. The comparison of the measured(dotted) and the simulated(lined) TL for the 100Hz signals.

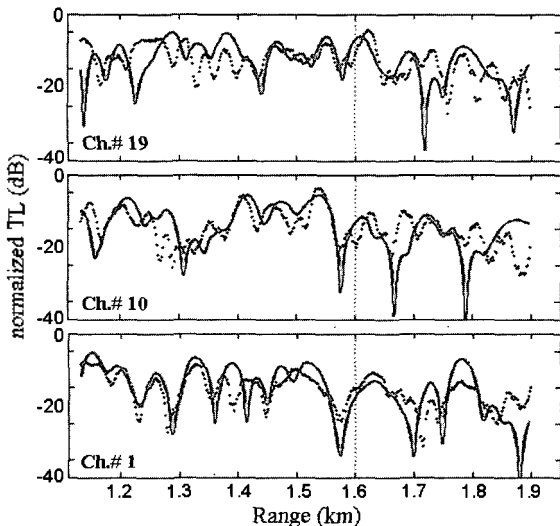


그림 7. 400 Hz 실측 전달손실(점선)과 역산된 지음향 인자를 이용한 모의 전달손실(실선)의 비교  
 Fig. 7. The comparison of the measured(dotted) and the simulated(lined) TL for the 400Hz signals.

고, 역산결과의 타당성 검토를 위해 수행된 음원의 위치 추적 테스트를 제 4장에서 기술한다.

#### IV. 정합장처리를 이용한 음원 위치 추적

100 Hz 전달손실 역산을 통해 추정된 지음향 인자들을 사용하여 정합장처리 및 음원 위치추적을 수행하였다. 이 때 적용된 위치추정 방법은 Bartlett 프로세서와 MVDR with White Noise Constraint (WNC) 프로세서 [25]이다. WNC 프로세서는 환경 오정합에 강인하나 부엽이 많이 생기는 Bartlett 프로세서와 부엽 억제력이 좋지만 환경 오정합에 민감한 MVDR 프로세서의 특성을 적절히 조절할 수 있는 정합장 프로세서이다.

그림 8은 각 시간 프레임마다 정합장처리를 통해 얻은 AMS (ambiguity surface)에서 제일 높은 파워를 갖는 위치의 거리 또는 깊이 단면을 시간 축에 따라 연결한 것이다 (Peak to Peak). AMS 범위는 거리 1~5 km, 깊이 2~100 m이며, 위치 추적 결과에서 시간 프레임 간격은 10초이고 총 168 프레임에 대한 AMS 결과를 연결하였다. 그림에서 명암으로 표시된 값의 동적범위 (Dynamic range)는 공히 10 dB이다. 패널 (a)-(b)와 (c)-(d)는 각각 4개 및 12개 주파수의 비일관성 평균을 통해 구한 Bartlett 결과인데, 전반적으로 좋은 위치 추적 성능을 보여주고 있다. 반면에 패널 (e)는 4개 주파수에 대해 평균한 WNC 결과인데 음원의 자취가 자주 끊기는 것을 볼 수 있다. 즉, 많은 프레임에서 환경 인자들의 오정합이 발생하였음을 의미하며, 다른 주파수에 대한 정합장처리 시에도 100 Hz 역산 인자 값을 사용했기 때문에 Bartlett에 비해 상대적으로 민감한 WNC 프로세서의 성능이 떨어진 것으로 보인다. 물론 해당 주파수 별로 역산된 인자들의 값을 각각 사용한다면 결과의 향상을 기대할 수 있지만 본 위치추적 테스트에서는 이를 적용하지 않았고, 추후 역산 결과의 주파수 의존성에 대한 추가 연구가 필요할 것이다.

#### V. 결론

다중 주파수 토널을 갖는 협대역 CW 신호를 이용해 전달손실 비교를 통한 지음향학적 인자 역산을 수행하였

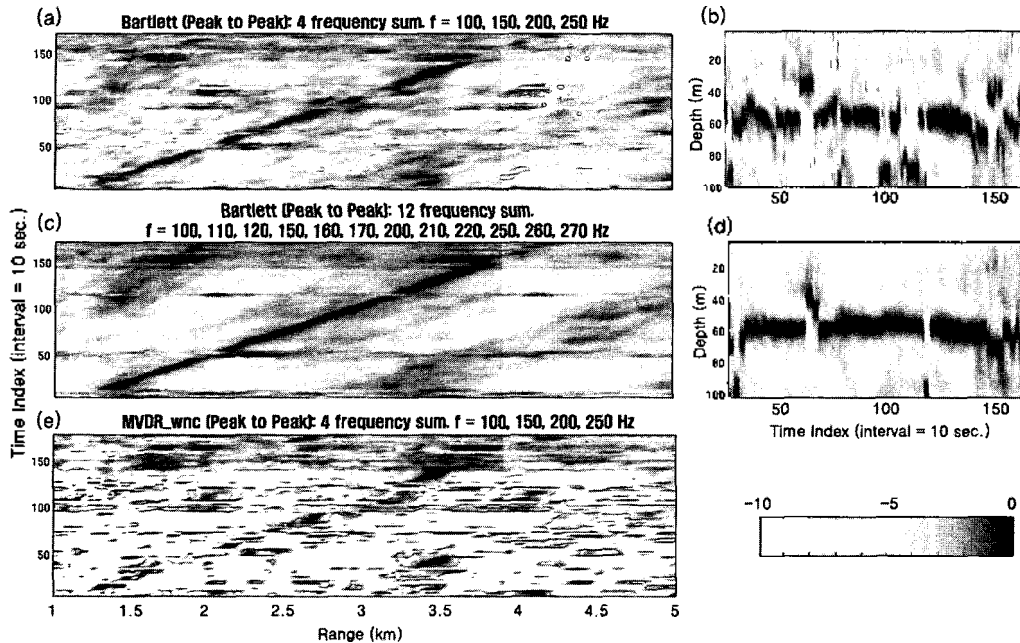


그림 8. 정합장처리를 이용한 음원 위치 추적 결과 (Peak to Peak tracking) (a)와 (b)는 각각 '시간-거리' 및 '시간-깊이' 그림으로서, Bartlett 프로세서를 사용하여 4개 주파수에 대해 비일관성 평균하였다 (c)와 (d)는 12개 주파수를 사용한 마찬가지로 결과 (e)는 WNC 프로세서를 사용하고 4개 주파수 평균을 낸 '시간-거리' 결과 그림이다

Fig. 8. Tracked peak to peak results using MFP. Subplots (a) and (b) represent time-range and time-depth results, respectively. They were obtained by frequency incoherent Bartlett sums of the 4 frequency data. Subplots (c) and (d) represent the same results as the subplots (a) and (b). They were obtained by frequency incoherent Bartlett sums of the 12 frequency data. Subplot (e) represents time-range result which was obtained by frequency incoherent WNC sums of the 4 frequency data.

다. 실측 신호에서 거리에 따른 전달손실 패턴을 구하였고, 이를 모의 전달손실 패턴과 직접 비교하는 목적함수를 구성하였다. 이를 통해 예인 음원 경로에 대한 평균적인 지음향 인자 값들을 추정할 수 있었다. 100 Hz에서 400 Hz까지 총 5개의 주파수 토널에 대한 역산 결과, 전반적으로 유사한 결과를 보였으며 각 인자들의 민감도 및 수렴성도 일반적인 경향에서 크게 벗어나지 않았다. 역산된 인자 중 퇴적층과 하부층의 음속, 밀도, 감쇠계수 등은 모두 기존 지질자료의 값보다 낮게 추정되었다. 특히 퇴적층 음속의 경우 1400 m/s 대의 낮은 값으로 추정되었으며 단일 주파수에 대한 수렴 과정에서도 가장 모호성이 컸다. 그러나 지음향 모델의 전반적인 음전달 현상(전달손실)은 실측 결과와 유사함을 보였다. 역산된 지음향 모델에 대한 타당성 검토를 위해 추정된 지음향 인자들을 이용한 음원의 위치추적을 수행하였다. 이로부터 Bartlett 프로세서를 이용한 경우에는 양호한 위치 추적 성능을 보였지만, 상대적으로 오정합에 민감한 WNC 프로세서를 사용한 경우 위치추적 성능이 저하됨을 확인했다. 따라서 실험과정에서 발생 가능한 환경의 변화와 수신기 및 음원위치 오차 등 다양한 오정합 원인에 대한 추가적인 분석이 필요할 것으로 판단된다.

본 논문에서 제안된 전달손실 비교를 이용한 역산 기법에 의해 실험 해역에 대한 지음향 인자들의 역산이 가능함을 살펴보았다. 그러나 전달손실의 '유사도'를 측정하는데 있어 목적함수의 계산 수치가 탐색 인자들의 값을 세밀하게 결정할 수 있을 정도로 결정적인 역할을 하지 못하며, 어느 정도 경험적인 방법이 필요하다는 점은 본 역산 기법의 한계점으로 지적될 수 있을 것이다. 즉, 강한 상호 관련성을 가지는 인자들 (예를 들어, 음원 깊이와 수심 또는 퇴적층 두께와 음속 등)의 다양한 조합에 의해 전달손실 매칭이 유사한 정도 (목적함수의 수치 상으로는 별 차이가 없는)로 이루어질 수 있다는 것이다. 이러한 점은 지음향학적 역산문제에서 유일해가 존재하지 않는다는 관점에서 기존 대부분의 역산 기법에서도 해당되는 현상이지만, 역산 결과의 모호성과 관련하여 인자의 추정에 영향을 줄 수 있는 또 다른 환경 요인이 있는지를 판단하기 위해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

후속 작업에서는 동일한 실험에서 획득한 전구 음원 신호 측정자료를 사용하여 시간영역 역산을 수행하고 본 논문에서 제시한 고주파 토널 성분에 대한 역산결과와 비교할 예정이다.



## 감사의 글

이 연구는 국방과학연구소의 적응 정합장처리를 이용한 해양환경 역산기술 연구 과제의 지원으로 이루어졌습니다.

## 참고 문헌

1. 박철수, *예민 수평선배열을 이용한 시간영역에서의 지음향학적 인자 역산* (서울대학교 박사 학위 논문, 2003.)
2. A. Tolstoy, *Matched Field Processing for Underwater Acoustics* (World Scientific, Singapore, 1993).
3. O. Diachock, A. Caiti, P. Gerstoft, and H. Schmidt, eds. *Full Field Inversion Methods in Ocean and Seism-Acoustics* (Kluwer, Dordrecht, 1995).
4. A. Tolstoy and N. R. Chapman (eds.), "Benchmarking geoacoustical inversion methods," *J. Comp. Acoust.* **6** (1&2), 1998.
5. N. R. Chapman and M. Taroudakis (eds.), "Geoacoustic inversion in shallow water," *J. Comp. Acoust.* **8** (2), 2000.
6. C. Park, W. Seong, P. Gerstoft, and M. Siderius, "Time domain geoacoustic inversion of high-frequency chirp signal from a simple towed system," *IEEE J. Oceanic Eng.* **28**, 468-478, 2003.
7. 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.
8. 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** (1), 205-222, 2003.
9. M. Siderius, P. L. Nielsen, J. Sellschopp, M. Snellen and D. Simons, "Experimental study of geo-acoustic inversion uncertainty due to ocean sound-speed fluctuations," *J. Acoust. Soc. Am.* **110** (2), 769-781, 2001.
10. M. Siderius and J. P. Hermand, "Yellow Shark Spring 1995: Inversion results from sparse broadband acoustic measurements over a highly range-dependent soft clay layer," *J. Acoust. Soc. Am.* **106** (2), 637-651, 1999.
11. 김성일, 김영규, 박정수, 도경철, 나정열, 오택환, 성우제, 박철수 외 19 명, "MAPLE(Matched Acoustic Properties and Localization Experiment)." *한국음향학회 학술대회 논문집*, **23** (2), 377-380, 2004.
12. 오택환, 김형신, 나정열, 오신택, 전호경, 이창원, 김성일, 박정수, "전구 음원 특성 분석과 지음향 파라미터 역산," *한국음향학회 학술대회 논문집*, **23** (2), 381-384, 2004.
13. 김경섭, 박철수, 성우제, "협대역 신호를 이용한 천해환경 지음향 역산 및 정합장처리," *한국음향학회 학술대회 논문집*, **23** (2), 385-388, 2004.
14. E. K. Westwood, *ORCA version 1.0 user's guide*, Applied Research Laboratory (Univ. of Texas, 1998).
15. M. K. Sen and P. L. Stoffa, *Global optimization methods in geophysical inversion* (Elsevier, Amsterdam, 1995).
16. P. Gerstoft, "Inversion of seismoacoustic data using genetic algorithms and a posteriori probability distribution," *J. Acoust. Soc. Am.* **95**, 770-782, 1994.
17. P. Gerstoft and C.F. Mecklenbrauker, "Ocean acoustic inversion with estimation of a posteriori probability distributions," *J. Acoust. Soc. Am.* **104**, 808-819, 1998.
18. M. D. Collins, W. A. Kuperman, and H. Schmidt, "Nonlinear inversion for ocean-bottom properties," *J. Acoust. Soc. Am.* **92**, 2770-2783, 1992.
19. C. E. Lindsay and N. R. Chapman, "Matched field inversion for geoacoustic model parameters using adaptive simulated annealing," *IEEE J. Ocean Eng.* **18**, 224-231, 1993.
20. S. E. Dosso, M. L. Jeremy, J. M. Ozard, and N. R. Chapman, "Estimation of ocean bottom properties by matched-field inversion of acoustic field data," *IEEE J. Ocean Eng.* **18**, 232-239, 1993.
21. M. Musil, N. R. Chapman, and M. J. Wilmut, "Range-dependent matched-field inversion of SWellEX-96 data using the downhill simplex algorithm," *J. Acoust. Soc. Am.* **106**, 3270-3281, 1999.
22. P. Gerstoft, "Inversion of acoustic data using a combination of genetic algorithms and the Gauss-Newton approach," *J. Acoust. Soc. Am.* **97**, 2181-2191, 1995.
23. M. R. Fallat and S. E. Dosso, "Geoacoustic inversion via local, global, and hybrid algorithms," *J. Acoust. Soc. Am.*, **105**, 3219-3230, 1999.
24. L. Ingber, "Very fast simulated reannealing," *Math. Comput. Modeling*, **12** (8), 967-993, 1989.
25. H. Cox, R. M. Zeskind and M. M. Owen, "Robust adaptive beamforming," *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Process.*, **ASSP-35** (10), 1365-1376, 1987.

---

## 저자 약력

---

- 김 경 섭 (Kyungseop Kim)

한국음향학회지 제24권 제1E 참조

- 성 우 제 (Woojae Seong)

한국음향학회지 제23권 제8호 참조

- 박 철 수 (Cheolsoo Park)

현재: 한국해양연구원 해양시스템 안전연구소 연구원

한국음향학회지 제20권 제1E 참조

- 김 성 일 (Seongil Kim)

한국음향학회지 제23권 제4호 참조