

전구음원 신호를 이용한 시간영역

지음향학적 인자 역산

Time-Domain Geoacoustic Inversion via Light Bulb Source Signal Matching

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 8월 4일; 수정일자: 2005년 8월 16일; 채택일자: 2005년 8월 20일)

본 논문에서는 지난 2004년 동해에서 수행된 MAPLE 04 실험에서 수집된 일련의 전구음원 신호 중 일부를 이용하여 시간 영역에서 지음향 인자 역산을 수행하였다. 이를 위해 수직선배열을 통해 수집된 채널 별 신호 파형과 모의 신호 파형을 직접 비교하는 형태의 목적함수를 구성하였다. 모의 신호는 음선 이론을 사용하여 모델링하였고, 광역 최적화 알고리즘인 VFSA (very fast simulated annealing)를 사용하여 목적함수를 최적화하였다. 기존의 전달손실 비교를 통한 역산 결과(음향학회지 본 호 게재)들과 비교하여 지음향 인자들이 일관성 있게 추정되었음을 확인하였으며, 이 역산 결과를 이용하여 얻은 모의 신호와 계측 신호 간 비교 그림을 제시하였다.

핵심용어: 지음향학적 인자 역산, 시간영역, 전구음원, 음선모델, VFSA

투고분야: 수중음향 분야 (5.5)

In this paper, a time-domain geoacoustic inversion was performed using the bulb signals measured during MAPLE 04 experiment conducted in the East Sea of Korea in 2004. An objective function was defined as a direct cross-correlation between the measured and the simulated signals in time domain. The ray theory was used to model the wave propagation in time domain and optimizations were performed using VFSA (very fast simulated annealing) algorithm. Comparison of inversion results with those from transmission loss matching (an accompanying paper in this issue of the Journal of the Acoustical Society of Korea) shows that parameters are consistently inverted. Direct time series comparisons between the measured signals and the simulated signals are presented based on inversion results.

Keywords: Time domain geoacoustic inversion, bulb source signal, ray model, VFSA

ASK subject classification: Underwater Acoustic (5.5)

I. 서론

천해에서의 지음향 환경인자 역산을 위한 실험에서는 높은 배경소음을 고려하여 양호한 신호대잡음비 (Signal to Noise Ratio, SNR)를 확보하고, 음원으로부터 수신기까지의 원거리 음전달 경로에서 안정된 음향신호를 획득하고자 고효율 음원 출력장치를 활용하는 것이 일반적이다. 이러한 고효율 대형음원 장치를 사용할 경우 사용

하고자 하는 신호에 대한 정교한 조절이 가능하고 안정된 실험 반복성 (repeatability)을 확보할 수 있는 장점이 있는 반면, 설치 및 운용이 번거롭고 활용하는데 소요되는 비용이 크다는 단점이 있다. 최근에는 이러한 부분을 고려하여 전구와 같이 손쉽게 활용 가능한 음원 [1-3]을 사용하거나 실험선 자체 및 주변 선박의 소음 [4,5]을 음원으로 이용한 역산 기법들이 제안되고 있다. 그 중 전구음원은 상대적으로 설치 및 운용이 간단하고 저비용으로 안정적인 광대역 펄스 신호를 반복적으로 얻을 수 있으므로 근거리 지음향 역산을 위한 실험에서 유용하게 사용될 수 있다.

천해환경에서 수중 표적의 위치를 추적하는 기술 개발을 목적으로 2004년 5월 동해에서 실시한 MAPLE (Matched Acoustic Properties and Localization Experiment) 실험[6]에서는 예인음원 및 전구음원을 활용한 신호계측 실험이 공히 수행되었다. 그 중 전구음원 실험에서는 수직선배열 (Vertical Line Array, VLA)로부터 일정거리 떨어진 음원 예인경로 상의 다수 자점에서 수심 별로 발파된 전구 신호들이 계측되었다[7]. 본 논문에서는 광대역 전구음원으로부터 약 1.6km 떨어진 지점에서 계측된 자료를 사용하여 지음향 역산을 수행한 후, 예인음원 실험으로부터 획득된 CW전달손실 자료를 이용한 지음향 역산 결과[8]와 비교함으로써 전구음원을 이용한 역산의 유용함을 확인하는데 목적을 두었다.

본 지음향학적 인자 역산에서는 전구음원으로부터 발생된 신호가 광대역 주파수성분의 펄스신호이고 음원과 수신기 사이의 거리가 비교적 근거리인 점에 착안하여 시간영역 역산기법을 적용하였다. 시간영역 역산은 모드의 공간적 분포를 이용하는 주파수영역 역산과 달리 음전달 경로 별 도달시간 (위상정보 포함)과 크기정보를 동시에 이용하여 역산을 수행함으로써, 단 하나의 청음기를 이용한 실험결과로부터 역산을 수행할 수 있으므로 향후 역산실험을 간소화 할 수 있다는 장점이 있다[9]. 시간영역 역산을 위한 목적함수는 계측신호와 모의신호 간의 파형 비교 (waveform matching) 형태로 구성하였으며, 신호를 모의하기 위한 음전달 모델은 음선 (ray) 이론을 사용하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2장에서 MAPLE 04에서의 전구음원 실험과 획득 자료에 대한 설명을 하고, 제 3장에서는 역산 목적함수 및 환경 모델링에 대해 기술하였다. 제 4장에서는 역산 결과를 제시하고 이미

수행된 전달손실 역산 결과와 비교하였다. 끝으로 제 5장에서 요약 및 결론을 맺는다.

II. 전구음원 실험 (MAPLE 04)

MAPLE 04 해상실험에서는 예인음원을 이용한 광대역 및 협대역 연속신호 (Continuous Wave, CW)와 전구 발파에 의한 광대역 펄스신호가 획득되었다. 그 중 전구음원 신호의 경우 그림 1에서와 같이 예정된 경로를 따라 CW 음원 예인이 끝난 후, VLA 근처의 예인 음원 경로 상 여러 위치에서 전구를 발파하여 VLA에서 신호를 계측하였다. VLA는 수심 98.0 m (채널1)에서 27.7 m (채널19) 사이에 총 19개의 수신기로 구성되었으며, 전구음원의 수심 및 거리 별로 총 35세트의 VLA 수신 자료가 획득되었다. 그 중 본 논문에서는 거리 약 1.6 km, 수심 55 m에서 발파한 (그림 1에서 삼각형 위치) 신호 자료를 분석 대상으로 하였다.

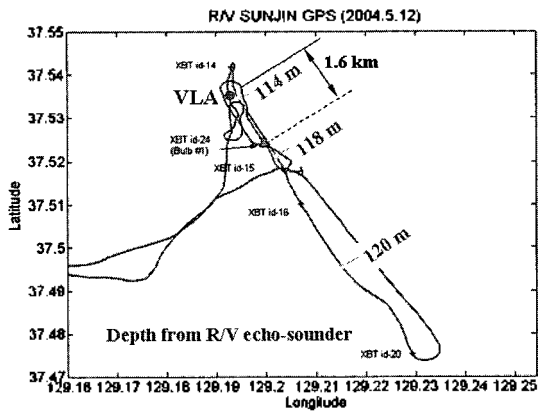


그림 1. 예인음원 이동 GPS 경로 및 전구음원 위치
Fig. 1. GPS tracks of the towed source and the position of the bulb impositions.

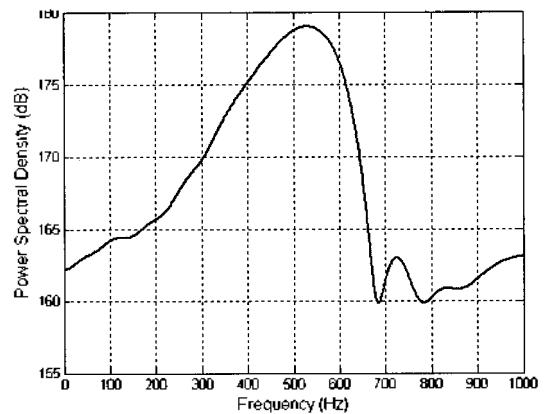
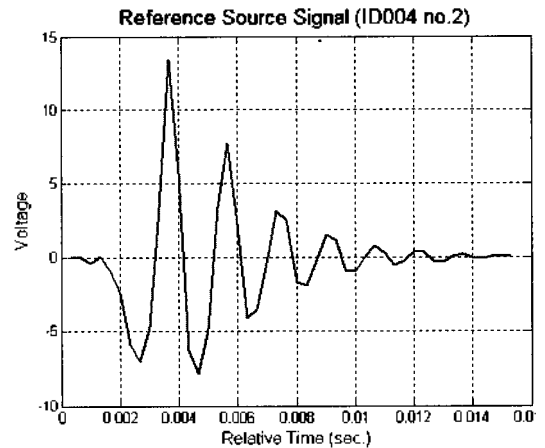


그림 2. 전구음원의 신호 파형과 주파수 스펙트럼 (음원 깊이 55 m)
Fig. 2. Bulb source waveform and frequency spectrum (for a 55-m depth source).

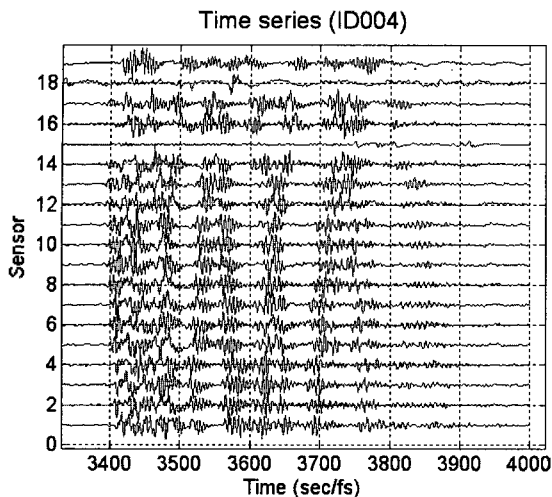


그림 3. VLA에 계측된 전구 발파 펄스 신호
Fig. 3. Raw bulb pulse signal received at the VLA.

전구의 발파는 실험선에서 전구음원 장치를 원하는 수심까지 내린 다음 케이블을 통해 전기적인 신호를 주어 발파하였으며, 실험선 현측에 설치된 청음기로부터 전구음원의 파형과 음원준위를 측정하였다. 그림 2는 측정된 음원의 파형과 그의 주파수 스펙트럼을 나타낸다. 전구음원의 최대 음압과 공진 주파수는 수심이 깊어질수록 값이 커지는 양상을 보이는데[1,7], 수심 55m에서 발파된 음원의 최대 음압은 약 201 dB이고 주 공진 주파수가 약 530 Hz인 비대칭 스펙트럼 특성을 보였다.

그림 3은 VLA에서 수신한 채널 별 전구음원 펄스 신호이다. 가로축에 나타나있는 fs는 VLA의 샘플링 주파수를 나타내며 3000 Hz이다. 그림으로부터 전반적인 수심 방향의 음 도달 구조를 살펴 볼 수 있는데, 천해환경에서 1.6km의 거리를 전파하는 동안 발생한 다중반사 현상에 의해 각 전달 경로 별 음선의 겹침현상이 발생하였고 이로부터 고유 모드가 형성되었음을 알 수 있다. 역산에는 본 수신신호를 200-600 Hz 대역에서 대역통과 (band-pass) 필터링하여 사용하였으며 (RF를 이용한 데이터 전송 문제로 인해 600 Hz이상은 VLA 자체에서 필터링 되었음.), 채널 15, 18, 19는 신호 상태가 좋지 않아 분석에서 제외하였다.

III. 시간영역 지음향 역산

3.1. 역산 목적함수

전구음원과 같은 광대역 펄스신호를 사용한 실험에서는 수신된 음파의 고유 음선 별 크기와 위상정보를 직접

추출하여 이로부터 역산을 수행할 수 있지만, 이는 도파관에서 각 음선의 도달 경로가 충분히 분리될 수 있는 경우에만 가능하다. 그림 3에서 볼 수 있듯이 본 실험의 수신 신호의 경우 수많은 다중 경로에 의한 신호들의 겹침현상에 의해 고유음선의 분리가 어려운 것을 알 수 있다. 따라서 본 시간영역 역산에서는 식 (1)과 같이 계측 신호와 모의신호 사이의 전반적인 음선 도달 구조의 유사도를 평가할 수 있도록 파형간의 상관함수 (correlation)로 목적함수를 정의하였다.

$$I(\Phi) = 1 - \frac{1}{N} \sum_{ch} \left[\frac{\sum_{i=1}^R s_{ch,data}(i) \times s_{ch,model}(i + \tau, \Phi)}{\sqrt{\sum_{i=1}^R |s_{ch,data}(i)|^2} \sqrt{\sum_{i=1}^R |s_{ch,model}(i + \tau, \Phi)|^2}} \right] \quad (1)$$

식에서 $s(i)$ 는 이산화 된 계측 및 모의신호의 시계열 (time series)을 나타내며 i 는 시간 지표, 하위첨자 ch 는 수신채널을 나타낸다. 또한 R 은 목적함수에 사용될 신호의 최대 길이, N 은 목적함수에 사용할 청음기 채널 개수이며 Φ 는 역산 인자로 구성된 벡터이다. 따라서 본 역산의 해는 식 (1)의 목적함수를 최소로 하는 Φ 가 된다.

본 전구음원 실험에서는 전구 발파장치와 계측장치와의 연동장치가 마련되어 있지 않았기 때문에 발파 후 도달 신호의 정확한 시간을 계측하는 것이 불가능했다. 또한 선배열의 기울어짐 (tilt)이나 음원의 위치 정보 오차 등으로 인하여 도달신호의 상대적인 시간 (위상) 정보만이 의미가 있다고 판단된다. 따라서 본 역산에서는 계측 신호의 시간정보 오차를 보정하기 위해 역산인자에 지연 시간 τ 를 포함하였다. 즉, 식 (1)의 τ 는 실측신호와 모의신호간의 상관함수를 구할 때 계측신호의 도달시간 오차를 고려한 모의신호의 시간지연 항이며, 채널 별로 이 값을 조절하여 상관함수의 값이 최대가 될 때, 즉 식 (1)의 목적함수 값을 최소로 하는 τ 값을 계측신호의 시간오차로 추정하였다. 이 때 목적함수의 최적화는 광역 최적화 기법의 일종인 VFSA (very fast simulated annealing)[10]를 사용하여 수행되었다.

역산에서 신호의 모의에는 음선 이론에 기반한 음전달 모델을 사용하였다. 본 음선기반 음전달 모델은 삼해환경에 적합한 일반적인 음선 이론에서는 무시하는 해저지층에서의 음파의 다중경로 전파를 모의하기 위해서, 하나의 음선으로부터 분기되는 모든 음선들의 전파경로를 추적한 후 그 과정에서 발생한 위상과 크기의 변화를 계

산하는 방식을 사용하였다[9]. 따라서 본 음전기반 음전달 모델은 천해 근거리 환경에서 고주파 광대역 펄스 신호의 시간영역 전파를 모의하는데 적합하다.

3.2. 환경 모델

본 역산에서 환경 모델은 이미 수행된 전달손실을 이용한 역산[8] 결과와 직접적인 비교를 위해 그림 4와 같이 하부기층 위에 하나의 퇴적층이 덮여 있는 구조로 가정하였으며, 이 때 퇴적층의 음속은 일정하게 설정하였다. 전달손실 역산에서는 퇴적층의 음속구배를 역산인자에 포함한 것에 반해 본 역산에서 퇴적층의 음속을 일정하게 설정한 이유는 전달손실 역산 과정을 통하여 퇴적층의 두께가 얇은 것으로 추정되었고, 그 정도의 두께에서는 퇴적층 음속구배가 전반적인 음전달에 미치는 영향이 그다지 크지 않을 것이라고 판단되었기 때문이다. 실제로 전달손실을 이용한 역산 시 퇴적층 음속을 일정하게 두고 테스트해 본 결과, 퇴적층의 음속이 기 추정된 퇴적층 상부 음속과 하부 음속의 평균값 정도로 추정되는 것을 확인하였으며, 두 경우의 역산 결과를 이용하여 모의된 전달손실 비교 결과도 큰 차이가 없음을 알 수 있었다. 또한 퇴적층의 음속을 일정하게 함으로써 역산인자 개수의 감소로 인한 최적화 탐색효율 향상을 기대할 수 있을 것이다. 따라서 본 역산에서는 그림 4에 나타낸 바와 같이 음원거리 (R_{src}), 수심 (H_w), 퇴적층인자 (두께 H_{Sed} , 음속 Cp_{Sed} , 밀도 ρ_{Sed} , 감쇠계수 α_{Sed}), 하부층 인자 (음속 Cp_{Bot} , 밀도 ρ_{Bot} , 감쇠계수 α_{Bot}) 등 총 9개의 역산인자를 설정하였고, 그 외의 환경인자는 제측값을 사용하였다.

그림 5에는 실험 해역의 수층 음속구조를 나타내었는

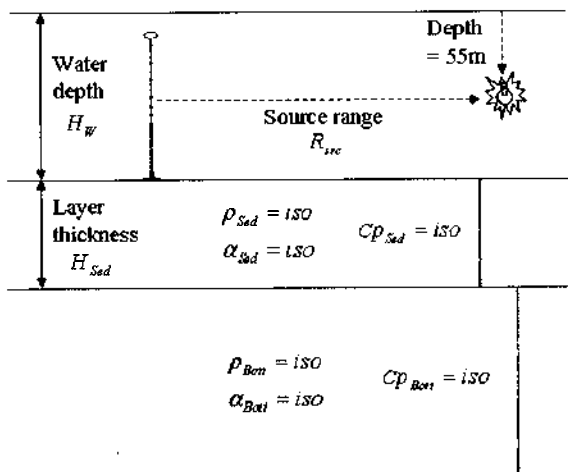


그림 4. 역산을 위한 환경 모델링 및 9개의 탐색 인자
Fig. 4. Environmental model and search parameters.

데, 음원 예인 동안 측정된 평균 음속 (solid-line)과 음원 예인이 끝난 후 전구 음원 실험 시작 시 측정된 음속 (dash-line)이 수온 약층 부근에서 깊이 별로 최대 8~9 m/s까지 차이가 남을 확인 할 수 있다. 이는 내부파 등과 같은 동해 수층의 단주기 변화에 의한 것으로 보이며, 일반적으로 이와 같은 수층 음속변동은 역산 결과에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다[3,11,12]. 본 논문에서는 수층 음속 오정합에 의한 영향을 최소화하기 위해 본 분석에서 사용할 전구 신호 제측시험 전후의 시간적으로 가장 가까운 XBT 자료를 평균하여 사용하였다.

IV. 역산 결과

역산은 두 부분으로 나누어 진행하였다. 먼저 여러 개의 VLA 채널 중 하나의 채널 신호만을 이용하여 역산을 수행하였는데 (식 1에서 $N=1$), 이는 사용되는 채널 신호 숫자가 많아질수록 상관함수 값은 낮아질 것이므로 실측 신호와 모의 신호간의 상관함수 값의 최대치를 확인하고 신호의 정합 정도를 살펴보기 위해서이다. 이후에는 여러 개의 채널을 사용하여 각 채널의 상관함수 값을 비 상관 평균하는 방식을 사용하였다.

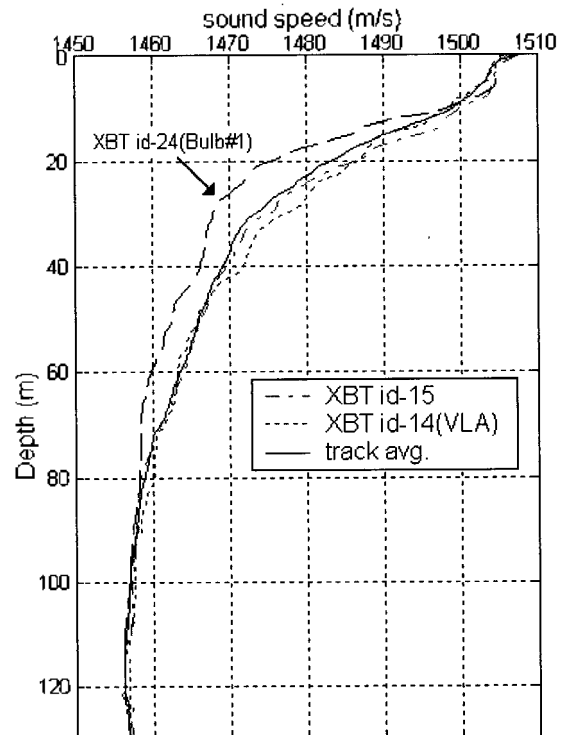


그림 5. 예인음원 경로를 따라 측정된 실험 해역의 음속 구조
Fig. 5. The sound speed profile measured along the towed source track.

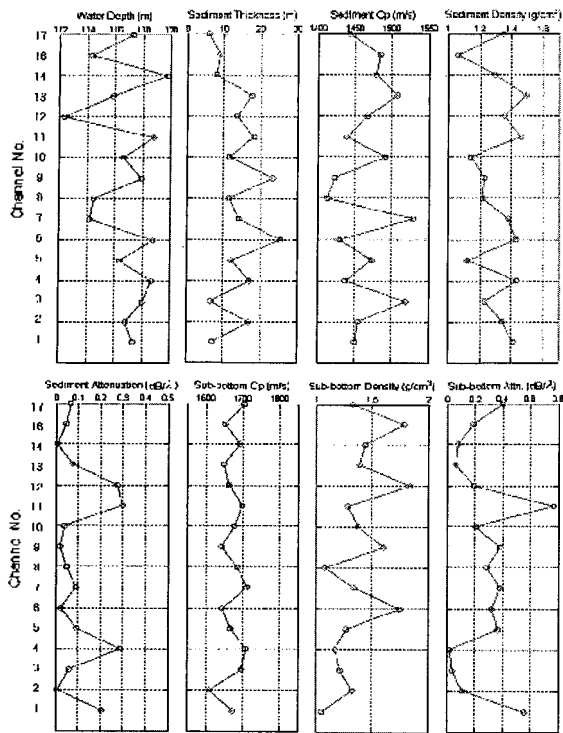


그림 6. 하나의 채널 신호를 이용한 지음향 인자 역산 결과의 채널 별 분포
 Fig. 6. Inversion results distribution for each channel using single channel signal.

4.1. 하나의 채널 신호를 이용한 역산 결과

그림 6은 하나의 채널 신호를 이용하여 역산한 역산 결과들을 각 탐색 인자 별로 채널에 따라 나타내었다. 그림에서 세로축은 채널을, 가로축은 각 탐색 인자의 추정된 값을 나타낸다. 하나의 채널 신호만을 이용할 경우 그 채널 신호에 맞는 최적 인자 값이 구해지기 때문에 지음향 역산문제와 같이 다수의 지역 최적해 (local optimum)가 존재하는 경우에 그림과 같이 채널 별로 변동성이 있는 해 집합들이 구해지게 된다. 그러나 채널 각각의 역산 결과들을 이용한 모의 신호와 실측 신호의 비교 그림 (그림 7)들을 살펴보면 상당히 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 즉, 채널 하나를 이용한 역산 결과의 경우 각 채널 신호에 대한 지역 최적해라고 볼 수 있다. 이들 결과들에서 두 신호 사이의 상관함수의 값은 정규화된 값을 기준으로 0.6~0.65 사이의 분포를 보였다. 그림 7에서 각 그림의 위쪽 패널은 모의 신호와 실측 신호의 시계열 비교 그림이며 실선이 모의 신호 (ray signal), 점선이 실측 전구음원 신호를 나타낸다. 두 신호 패턴의 정합 정도를 좀 더 쉽게 확인하기 위하여 아래쪽 패널에는 이 신호들을 Hilbert 변환하여 구한 envelope를 나타내었다.

4.2. 다수의 채널 신호들을 이용한 역산 결과

4.1절에서와 같이 하나의 채널 신호를 이용한 역산 결과의 경우 지역 최적해일 확률이 높으므로 최적 지음향 인자 값이라고 보기에는 무리가 따를 수 있다. 따라서 다수의 채널 신호들을 이용한 역산결과를 함께 살펴보는 것이 의미가 있을 것이다. 이렇게 할 경우 각 채널 별 신호 자체의 시간 정보 (시간에 따른 크기 및 위상 변화)뿐만 아니라 채널의 위치 분포에 따른 공간적 정보 (각 채널에 들어오는 신호의 도달 구조 차이)도 활용할 수 있게 된다. 역산 값의 대표성을 위해서는 전체 채널을 모두 사용해야 하나, 본 역산 방법의 경우 하나의 채널만 이용해서도 역산이 가능하다는 장점이 있으므로 일부 채널만을 사용하여 시간비용을 줄일 수 있다. 따라서 목적 함수에 포함될 채널은 그림8과 같이 각 수신기의 수심 분포를 고려하여 수신된 신호의 파형이 다른 형태를 보이는 4개의 채널들을 선택했다. 각 채널에서 수신된 신호의 파형을 살펴보면 비슷한 깊이에 위치한 채널의 경우 도달 경로가 유사하기 때문에 역시 유사한 구조 (도달 경로 별 신호의 중첩 등으로 인한)를 가진다. 따라서 수신기의 깊이 별로 다른 구조를 가진 몇 개의 채널만을 고려하더라도 VLA의 공간 정보를 충분히 이용할 수 있다고 생각된다.

표 1에는 4채널 역산을 통해 얻어진 역산 결과들을 나타내었는데, 여러 번의 테스트를 통해 얻은 역산 결과들 중 가장 높은 상관함수 값을 주었던 두 경우이다. 이 때 상관함수 값은 두 경우 모두 0.48 정도로서 앞서 구했던 채널 하나만을 이용한 결과에 비해 상관도가 다소 떨어졌다. 이는 다수의 채널을 이용할 경우 목적함수에서 각 신호 파형을 동시에 정합시켜야 하므로 해 탐색 영역이 그만큼 복잡해지고 최적해를 찾을 확률이 줄어들기 때문이다. 결과1과 결과2를 살펴보면, 퇴적층 음속에서 약간의 차이가 날 뿐 다른 인자들의 값은 아주 유사하게 추정되었음을 알 수 있다. 퇴적층 음속의 경우에도 여러 번의 테스트 결과 대부분 1490 m/s에서 1530 m/s 사이에 수렴하였다. 한편 밀도의 경우 상당히 작은 값이 나타났음을 알 수 있는데, 퇴적층 밀도와 감쇠계수의 경우 각 역산결과들의 편차가 크게 나타남으로써 인자의 민감도가 작음을 확인하였다. 그림 9는 4채널 역산 결과 중 결과1을 이용한 모의 신호와 실측 신호를 비교한 그림이며 역산에 사용된 4개의 채널에 대해 나타내었다. 결과를 살펴보면 앞서 구했던 채널 하나만을 이용한 결과에 비해 각각의 상관도는 낮으나 전체적으로 비교적 좋은 신

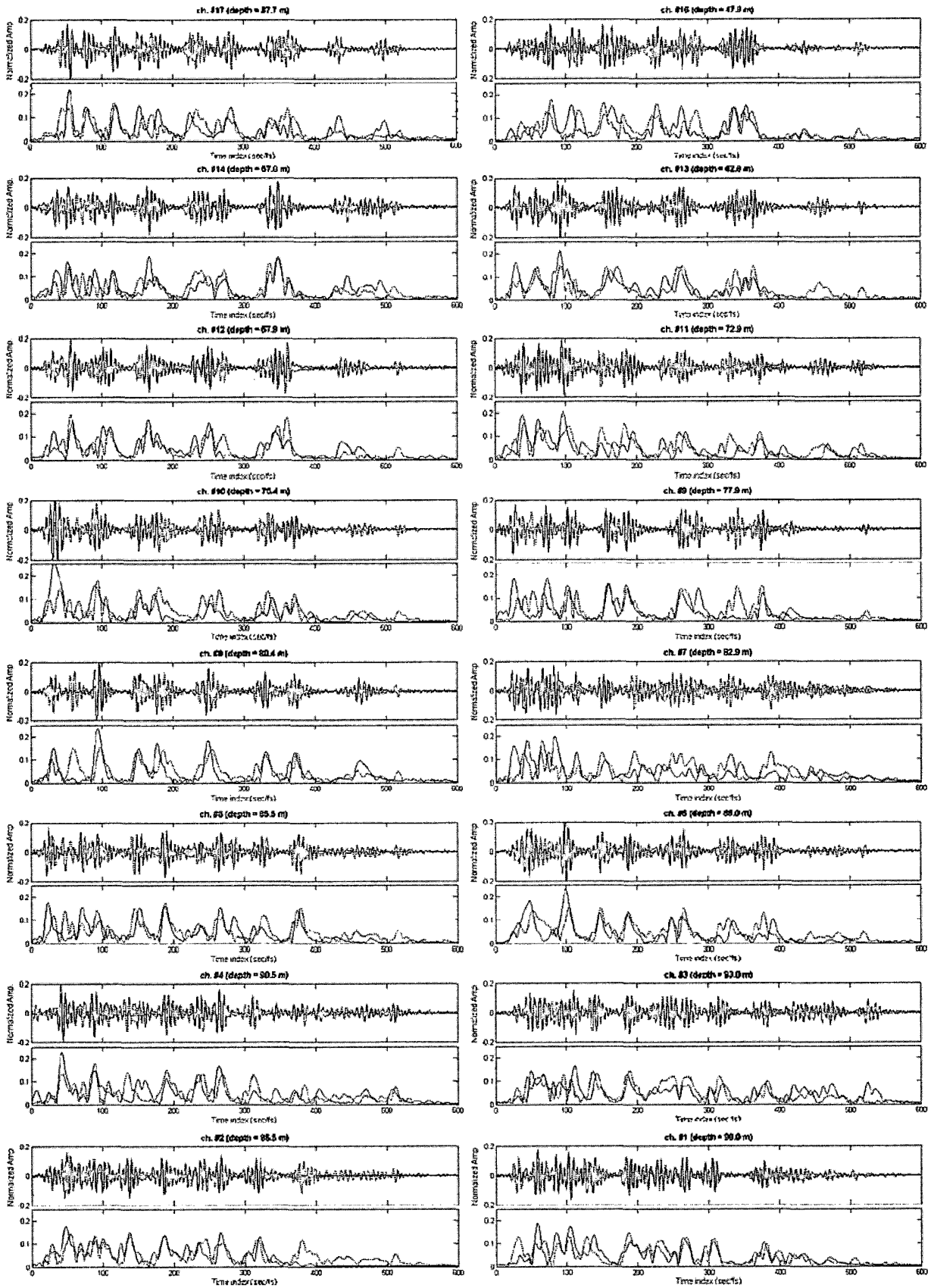


그림 7. 하나의 채널 신호를 이용한 경우, 역산 결과를 사용한 모의 신호(실선)와 전구음원 계속 신호(점선)와의 비교
 Fig. 7. The comparison of the simulated(solid-line) and the measured(dotted-line) time series for single channel inversion results.

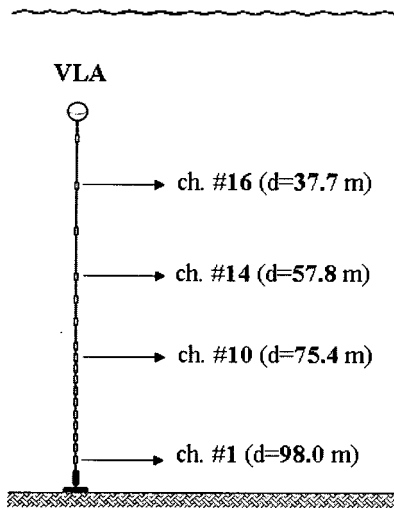


그림 8. 다수의 채널 신호를 이용한 역산 시 사용된 4개 채널의 깊이 분포
Fig. 8. The depth of channels used for 4 channel inversion.

호 정합 정도를 보여주고 있으며, 나머지 채널들에 대해서도 같은 역산 인자들을 이용해 비교해 본 결과 이와 유사한 결과를 확인할 수 있었다.

4.3. 전달손실을 이용한 역산 결과와의 비교

표 2에는 본 논문에 앞서 수행했던 전달손실 비교를 이용한 주파수영역 역산 결과와 전구음원 신호를 이용한

표 1. 네 개의 채널 신호를 이용한 역산 결과
Table 1. Inversion results using 4-channel signals.

탐색 인자	탐색 범위	결과 1	결과 2
수심 H_w (m)	[112 120]	116.5	116.9
퇴적층 두께 H_{sed} (m/s)	[3 25]	7.7	8.8
퇴적층 음속 $C_{P_{sed}}$ (m/s)	[1400 1550]	1495.0	1524.4
퇴적층 밀도 ρ_{sed} (g/cm ³)	[1.0 1.5]	1.07	1.09
퇴적층 감쇠계수 α_{sed} (dB/ λ)	[0.0 0.3]	0.01	0.01
하부층 음속 $C_{P_{Bot}}$ (m/s)	$C_{P_{sed}} + [0 300]$	1690.3	1667.9
하부층 밀도 ρ_{Bot} (g/cm ³)	[1.0 1.8]	1.32	1.33
하부층 감쇠계수 α_{Bot} (dB/ λ)	[0.0 0.5]	0.16	0.16

표 2. 전달손실을 이용한 주파수영역 역산 및 전구음원을 이용한 시간영역 역산의 결과 비교
Table 2. Geoacoustic inversion results using the transmission loss comparison and bulb time series matching.

탐색 인자	TL 100 Hz	TL 250 Hz	TL 310 Hz	TL 350 Hz	TL 400 Hz	전구 결과 1	전구 결과 2	지질 자료
H_{sed} (m)	10.8	28.3	14.8	13.8	13.2	7.7	8.8	5-10
$C_{P_{sed, upper}}$ (m/s)	1491	1453	1458	1445	1450	1495	1524	1520
$C_{P_{sed, lower}}$ (m/s)	1568	1590	1492	1508	1493			
ρ_{sed} (g/cm ³)	1.7	1.3	1.24	1.52	1.22			
α_{sed} (dB/ λ)	0.28	0.13	0.01	0.14	0.03	0.01	0.01	0.35
$C_{P_{Bot}}$ (m/s)	1767	1702	1711	1669	1655	1690	1668	1950
ρ_{Bot} (g/cm ³)	1.7	1.8	1.66	1.48	1.36	1.32	1.33	2.4
α_{Bot} (dB/ λ)	0.28	0.19	0.29	0.38	0.06	0.16	0.16	0.45

시간영역 역산 결과를 비교하였다. 두 역산에 사용되었던 신호가 음원으로부터 수신기까지 같은 도파관 환경을 통해 수신되었으며, 일부 비슷한 주파수 대역을 공유하고 있기 때문에 각각 수행된 두 역산 결과를 직접 비교하는 것이 의미가 있다고 생각된다. 역산 결과를 살펴보면, 일부 인자들의 경우 모호성이 있으나 전체적으로 일관성 있는 결과들이 얻어졌다. 퇴적층 두께의 경우 전구음원 역산 결과가 전달손실 역산 결과보다 조금 더 낮게 추정되었으며, 퇴적층 음속의 경우는 전달손실 역산 결과나 지질 자료와의 비교에서도 어느 정도 유사한 값이 구해졌음을 알 수 있다. 퇴적층 밀도의 경우 감쇠계수와 더불어 탐색 민감도가 낮았던 인자인데 다른 결과들에 비해 전구음원 역산 결과에서 상당히 낮게 추정되었다. 하부기층 인자들을 살펴보면, 음속 및 밀도의 경우 전구음원 역산 결과와 전달손실 역산에서의 400 Hz 결과가 아주 유사한 것을 확인할 수 있으며, 전체적으로 주파수가 높아질수록 이들 값이 낮게 추정되는 경향을 보이고 있다. 전구음원의 주요 주파수 대역이 200~600 Hz인 것을 고려하면 이를 통해 인자 별 역산 결과에 주파수 영향이 있음을 간접적으로 추측해 볼 수 있을 것이다. 한편 하부기층 인자의 지질자료에 대한 비교는 전달손실 역산 결과와 마찬가지로 큰 차이를 보이고 있다.

V. 요약 및 결론

본 논문에서는 MAPLE 04 실험에서 예인음원과 같은 경로 상에서 수행되었던 전구음원 신호 자료를 이용해 시간 영역에서의 역산을 수행하였다. VLA에서 계측된 전구음원 신호와 음선이론을 이용한 모의신호 간 상관함수를 통해 파형을 비교하는 목적함수를 사용하였고, VFSA를 이용하여 이를 최적화하는 지음향 인자를 탐색

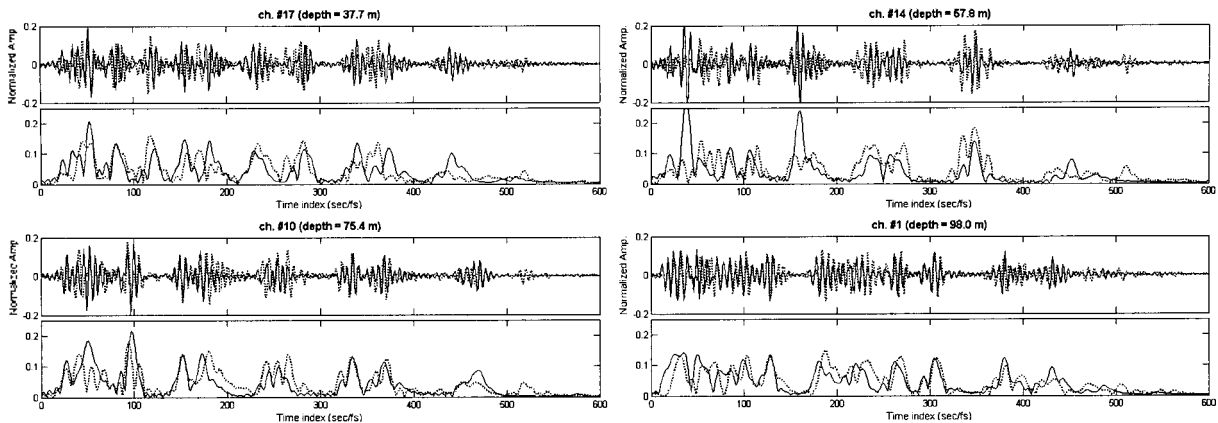


그림 9. 네 개의 채널 신호를 이용한 경우, 역산 결과를 사용한 모의 신호(실선)와 전구음원 계속 신호(점선)와의 비교
 Fig. 9. The comparison of the simulated(solid-line) and the measured (dotted-line) time series for 4 channel inversion results.

하였다. 최종 역산된 인자들을 사용하여 구한 모의신호가 실측신호와 비교적 잘 일치함을 확인하였으며, 본 논문 이전에 수행했던 전달손실을 이용한 역산 결과와 비교함으로써 특히 동일한 주파수 대역에서 일관성 있는 결과들이 얻어졌음을 확인하였다. 역산 결과를 살펴보면 퇴적층의 경우 얇은 두께를 가지고 있으며 음속이 1500 m/s 안팎으로 추정되었으나, 하나의 채널 신호를 이용한 역산 결과에서는 기존의 전달손실을 이용한 역산에서와 마찬가지로 1400 m/s 중반의 낮은 값으로 수렴하는 경향이 강하게 나타났다. 밀도와 감쇠계수의 경우 통상적인 경향처럼 인자의 민감도가 떨어졌지만 역시 낮은 값으로 추정되어 퇴적층이 아주 부드러운 (soft) 특성을 가지는 것으로 파악되었다. 이러한 결과의 원인으로 퇴적층이 나공성 (porosity)이 큰 매질이거나 혼탁층이 존재할 가능성을 생각해 볼 수 있으나, 이 부분에 관해서는 별도의 추가적인 분석이 필요할 것으로 생각된다. 하부기층의 경우 음속이 1650~1700 m/s 정도로 추정되었으며 퇴적층에 비해 비교적 안정적인 (모호성이 적은) 수렴 정도를 보였다.

추후에는 본 역산에서와 같이 얇은 층에 대한 역산 시 나타나는 층 두께 및 음속 등의 모호성을 어떻게 해석할지에 대한 추가적인 연구와 논의가 필요할 것으로 생각되며 그밖에 역산 결과의 주파수 의존성에 대한 연구도 필요할 것으로 보인다.

감사의 글

이 연구는 국방과학연구소의 적응 정합장치리를 이용한 해양환경 역산기술 연구 과제에의 지원으로 이루어졌습니다.

참고 문헌

1. Garry J. Heard, M. McDonald, N. R. Chapman, and L. Jaschke, "Underwater light bulb implosion-a useful acoustic source," IEEE Oceans '97 Proceedings, 755-762, 1997.
2. N. R. Chapman, L. Jaschke, M. A. McDonald, H. Schmidt, and M. Johnson, "Matched field geoacoustic tomography experiments using light bulb sound sources in the HARO strait sea trial," IEEE Oceans '97 Proceedings, 763-768, 1997.
3. 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.
4. D. Battle, P. Gerstoft, W. A. Kuperman, W. S. Hodgkiss, and M. Siderius, "Geoacoustic inversion of tow-ship noise using matched-field processing," IEEE J. Oceanic Eng. **28**, 454-467, 2003.
5. 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.
6. 김상일, 김영규, 박정수, 도경철, 나정열, 오택환, 성우제, 박철수와 19 명, "MAPLE(Matched Acoustic Properties and Localization Experiment)," 한국음향학회 학술대회 논문집, **23** (2), 377-380, 2004.
7. 오택환, 김영신, 나정열, 오선택, 전호경, 이창원, 김성일, 박정수, "전구 음원 특성 분석과 지음향 파라미터 역산," 한국음향학회 학술대회 논문집, 제 23권, 제 2호, 381-384, 2004.
8. 김경섭, 박철수, 성우제, "함대역 신호를 이용한 전해환경 지음향 역산 및 정합장치리," 한국음향학회 학술대회 논문집, **23** (2), 385-388, 2004.
9. 박철수, 예인 수평선배열을 이용한 시간영역에서의 지음향학적 인자 역산 (서울대학교 박사 학위 논문, 2003.)
10. L. Ingber, "Very fast simulated reannealing," Math. Comput. Modeling, **12** (8), 967-993, 1989.
11. M. Snellen, D. Simons, M. Siderius, J. Sellschopp, and P. L. Nielsen, "An evaluation of the accuracy of shallow water matched field inversion results," J. Acoust. Soc. Am. **109**, 514-527, 2001.
12. 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.
13. 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.
14. 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.

저자 약력

• **김 경 섭 (Kyungseop Kim)**



2002년: 서울대학교 조선해양공학과 (학사)
 2002년~현재: 서울대학교 조선해양공학과 석.박사
 통합과정
 ※주관심 분야: 정합장처리, 배열 신호처리

• **성 우 재 (Woojae Seong)**



1982년: 서울대학교 조선공학과 (학사)
 1990년: M.I.T., 해양공학과 (Ph. D.)
 1991년: M.I.T., Post-doctoral Associate
 1992년~1996년: 연세대학교 선박해양공학과 부교수
 1996년~현재: 서울대학교 조선해양공학과 부교수
 ※주관심 분야: 음전달 모델링, 지음향역산, 정합장처리, AUV

• **박 철 수 (Cheolsoo Park)**



1997년: 서울대학교 조선해양공학과 (학사)
 1999년: 서울대학교 조선해양공학과 (석사)
 2003년: 서울대학교 조선해양공학과 (박사)
 2003년~2004년: 서울대학교 조선해양공학과 박사 후
 과정
 2004년~현재: 한국해양연구원/해양시스템안전연구소
 연구원
 ※주관심 분야: 지음향역산, 정합장처리, 소음해석

• **김 성 일 (Seongil Kim)**



1986년: 서울대학교 해양학과 (학사)
 1988년: 서울대학교 해양학과 (석사)
 2002년: University of California, San Diego (Ph. D.)
 1990년~현재: 국방과학연구소 연구원
 ※주관심 분야: 수중음향