

# 선박의 소음을 이용한 선박의 위치추적 및 지음향학적 인자 역산

박철수\*, 김진\*\*, 성우제\*\*

(\*) 한국해양연구원/해양시스템 안전연구소, (\*\*) 서울대학교 조선해양공학과

## The source localization and geoacoustic inversion using ship noise

Cheolsoo Park\*, Jin Kim\*\*, Woojae Seong\*\*\*

(\*, \*\*) Korea Ocean Research & Development Institute, (\*\*\*) Seoul National University

e-mail : (\*) parkcs@kriso.re.kr, (\*\*) jkim@kriso.re.kr, (\*\*\*) wseong@snu.ac.kr

### 요약

본 논문에서는 선박의 소음을 이용한 선박의 위치추적 및 지음향학적 인자의 역산 기법을 제안하였다. 예인수평선배열에 의해 계측된 선박의 소음을 시간역전시켜(time reversed) 역전파(back propagation)시킨 음파는 해당 해양환경과 동일한 경우 원래의 음원 즉 선박의 위치에 가장 큰 에너지가 집중된다. 이러한 역전파된 신호의 집중 정도를 이용하여 음원의 위치 및 해양환경(특히 지음향학적 환경) 정보를 추정하였다. 본 역산에서 사용된 목적함수는 정합임펄스응답필터를 사용하여 음원의 위치에 집중된 정규화된 파워로 정의되었다. 최적화 알고리즘으로 유전알고리즘과 Powell 방법이 함께 사용되었다. 제안된 기법을 Elba섬 근해에서 실시된 MAPEX 2000 실험 데이터에 적용한 후 그 결과를 본 논문에서 제시하였으며 그 효용성을 확인하였다.

### 1. 서론

최근 천해지역에서의 수중음향 장비의 활용이 빈번해짐에 따라 천해환경에서의 음전달에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 알려진 해저퇴적층의 특성을 예측하는 것

이 중요한 문제로 대두되었다. 따라서 비용 및 시간 측면에서 효율적인 수중음향의 전파를 활용한 해저퇴적층 특성의 간접적인 예측기법, 즉 지음향학적 인자의 역산 기법 개발연구가 활발하게 수행되어지고 있다.

일반적인 해양환경에서 해저퇴적층은 그 구성 및 특성이 공간적으로 균일하지 않다. 이러한 비균질성을 고려한 완전한 거리중속 역산은 막대한 계산량으로 인해 아직까지는 구현에 한계가 있으며, 그 대안으로써 원거리 수직선배열(VLA)을 이용한 거리독립 역산법이 주로 활용되고 있다[1]. 거리독립 역산의 단점인 평균적인 예측값의 한계는 단거리 예인수평선배열(towed HLA) [2~5]을 이용함으로써 완화될 수 있다. 예인수평선배열은 원거리 VLA에 비해 거리독립 가정을 보다 유효하게 할 뿐만 아니라 그 운용 및 이동의 용이함으로 인해 넓은 지역의 데이터 획득을 가능하게 하고 반복적인 거리독립 역산을 통한 거리 중속 역산을 가능하게 한다 [4]. 예인선배열을 운용할 시 인위적으로 고안된 음원의 사용은 실험의 부담을 가중시킬 수 있는 반면, 예인선 혹은 주변 선박의 소음은 광대역 주파수 음원으로 손쉽게 활용될 수 있다. 이러한 광대역 소음원의 장점은 협대역 주파수 영역 역산에 비해 시간영역 역산에서

충분히 살릴 수 있다.

본 논문에서는 예인수평선배열에서 획득된 선박의 소음을 이용한 시간영역에서의 선박의 위치추적 및 지음향학적 인자 역산 기법을 제안하였다.

## 2. 지음향학적 인자 역산기법

음원에 의해 발생된 음파는 전파경로에 해당하는 매질의 특성을 포함하고 있다. 예인선배열을 운용할 때 예인선 혹은 주변 선박의 소음은 손쉽게 활용할 수 있는 음원이 된다. 대부분의 경우 선박의 소음 파형은 사전에 획득하기 어려우므로 주어진 환경에서의 임펄스응답만을 모의할 수 있다.

역산인자는 벡터  $\bar{m} = [\bar{m}_1, \bar{m}_2, \dots, \bar{m}_N]^T$  으로 표현될 수 있다. 이 때 각 선배열 채널의 정규화된 필터응답은 다음과 같이 정의된다.

$$f_i(t, \bar{m}) = \frac{d_i(T-t)}{\sqrt{\int_0^T |d_i(T-t)|^2 dt}} * \frac{\bar{h}_i(t, \bar{m})}{\sqrt{\int_0^T |\bar{h}_i(t, \bar{m})|^2 dt}} \quad (1)$$

식 (1)에서  $\bar{h}_i(t, \bar{m})$ 는 임의의 채널에 대해 추정된 환경에서의 임펄스응답이며, 본 필터응답은 계측된 신호를 시간역전(time reversed) 시킨 후 역전파(back propagation) 함으로써 구현된다[6,7]. 이 때 전체 채널응답은 N개의 채널에서의 필터응답의 상관함,

$$B(t, \bar{m}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f_i(t, \bar{m}) \quad (2)$$

이 된다. 역산의 목적 함수는 전체 필터응답의 최대 평균에너지로서 다음의 식(3)과 같이 정의된다.

$$\phi(\bar{m}) = \max \left( \frac{1}{\Delta T} \int_{T_1}^{T_1+\Delta T} |B(t, \bar{m})|^2 dt \right), \quad 0 \leq T_1 \leq T - \Delta T \quad (3)$$

이 때 시간구간  $\Delta T$ 는 모든 채널에서의 역전파된 신호의 에너지가 포함될 수 있도록 결정된다. 계측된 선박의 소음을 시간역전시켜 역전파시킨 음파는 추정된 환경이 실제 환경과 일치할 때 원래의 음원 즉 선박의 위치에 가장 큰 에너지가 집중된다. 이 때 식(3)의 목적 함수는 최대값이 될 것이다.

정의된 목적함수에 대해 역산해를 구하기 위해서는 최적화 과정을 거쳐야 한다. 본 역산에서는 광역최적화

알고리즘과 지역최적화 알고리즘을 반복적으로 적용하였다. 광역최적화 기법인 유전알고리즘의 탐색은 세대별로 진화하는 과정으로 구성된다. 한 세대의 해집합은 선택과 교배 그리고 변이의 과정을 거쳐 다음세대의 구성원으로 진화해 간다. 이 때 품질이 좋은 해의 형질이 다음세대까지 이어질 확률이 커지게 된다. 본 역산에서는 한 세대의 해집합을 구성하는 과정에서는 민감도가 큰 인자, 즉 HLA의 정보와 음원의 위치 그리고 수심등을 역산인자로 정의하고 민감도가 작은 해저퇴적층의 음속과 밀도는 포함하지 않는다. 민감도가 큰 인자와 작은 인자가 동시에 최적화 과정에 포함된다면 최적화는 민감도가 큰 인자를 중심으로 진행되기 때문이다. 한 세대의 구성이 끝나고 나면 민감도가 큰 인자는 그 세대에서 가장 품질이 좋은 해로 고정되고 나머지 민감도가 작은 인자를 지역최적화 기법인 Powell법[8]을 적용하여 재추정한다. Powell 법은 탐색의 방향을 결정하는데 있어서 함수공간의 구배정보를 미분을 통하여 계산하지 않고 함수값에 의해서만 추정을 한다. 이 때 각 탐색축의 1차원 탐색은 황금분할에 의해 해의 범위를 줄여 가면서 수행된다. 재추정된 민감도가 작은 인자는 다시 유전알고리즘에서 다음세대의 최적화 과정 중에는 고정된 값이 되는 과정이 반복된다.

## 3. 지음향학적 인자 역산결과

### 3.1 MAPEX2000 역산실험 및 역산인자 정의

MAPEX2000은 NATO의 SACLANT Undersea Research Centre에 의해 Elba섬 근해에서 2000년에 수행된 실험이다. 본 실험의 목적은 선박소음을 이용한 HLA역산의 가능성을 확인하는 것이었다. HLA는 R/V Alliance에 의해 예정된 경로로 예인 되었으며, 이 때 또 다른 R/V Manning이 약 900m 후방에서 뒤따르고 있었다. 이 때 선박의 소음은 2m 간격으로 배치된 128개의 청음기로 구성된 254m 길이의 HLA에 의해 매 30초 간격으로 10초간 계측되었다.

실험 중 계측된 수심은 Alliance가 진행함에 따라 약 116m에서부터 124m까지 증가 하였으며, 수층의 음속은 약 1520m/s로 일정하였다. 실험해역에 대한 기존의

연구결과에 따르면 본 해역의 해저퇴적층은 얇은 진흙과 모래로 구성된 하나의 평평한 퇴적층과 기층으로 구성되어 있으며, 퇴적층의 두께는 2.5m, 기층의 종파음속은 약 1580 m/s, 밀도는 약 1.8 g/cm<sup>3</sup> 이고[5] 횡파의 영향은 미미한 것으로 알려져 있다. 이러한 정보들로부터 본 환경은 거리독립 음향매질 환경모델로 정의될 수 있다. 또한 선박소음의 주파수 대역을 고려할 때, 얇은 퇴적층을 구분하는 것은 의미가 없기 때문에 해저퇴적층은 하나의 기층으로 구성되었다고 가정한다.

한편 청음기배열의 기울기와 형상이 역산결과에 큰 영향을 미칠 수 있다. HLA 형상은 다음과 같이 포물선으로 정의된다.

$$z_i = \alpha \left( 1 - \left( \frac{2x_i}{L} \right)^2 \right) - x_i \sin \theta \quad (4)$$

식 (4)에서  $\alpha$  와  $\theta$  는 역산인자로서 포물선의 형상(array bow)과 기울기를 나타내는 안자이고  $L$  은 HLA의 길이이다. 한편  $x_i$  와  $z_i$  는 직선형상을 가정했을 때 HLA의 중심을 기준 좌표로 한 개별 청음기의 위치를 의미한다. 따라서 본 역산의 역산인자는 음원의 깊이, HLA의 위치정보(거리와 깊이), 형상인자( $\alpha$ ), 기울기( $\theta$ ), 수심, 그리고 해저퇴적층의 종파음속, 밀도로 구성된다. HLA의 거리는 음원에서 가장 가까운 청음기의 거리이고 깊이와 기울기는 식 (4)의 정의와 같이 직선 HLA의 중심을 기준으로 한다. 한편 본 역산에서는 민감도가 낮은 감쇠계수는 고려하지 않았다.

### 3.2 MAPEX2000 역산결과

본 역산에서는 Manning의 소음을 음원으로 사용하였다. 예인선을 포함한 다른 선박의 소음의 간섭에 의한 영향을 줄이기 위해 각 데이터를 1초 동안의 신호로 나누어 파수필터를 적용하였다. 파수필터는 2차원 FFT 알고리즘을 이용하여 구현되었으며, 이 때 HLA의 위치를 고려하여 해저면으로부터의 의미 있는 반사성분을 모두 포함할 수 있도록 유효한 파수는 전파각 50도 이내가 되도록 결정하였다. 한편, 본 역산에서는 근거리 시간영역 모델링에 적합한 음선기반 음전달 모델링 기

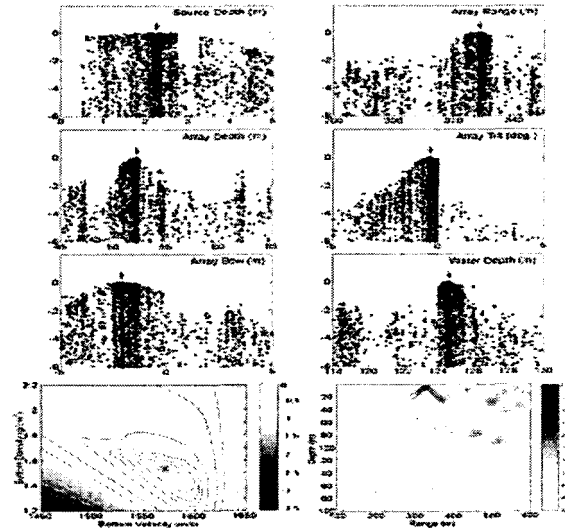


그림 1. 실험데이터(08:07:30 UTC) 역산 결과(dB)법을 사용하였으며, 유효음선의 전파각 또한 50도 이내로 한정하였다.

그림 1은 08:07:30 UTC 데이터에 대한 역산결과를 보여준다. 그림 중 상단 6개는 역산과정에서 탐색된 민감도가 큰 인자들에 대한 목적함수값을 나타내는 1차원 산포도이고, 좌측 하단은 민감도가 작은 퇴적층의 인자에 대한 목적함수를 나타내는 2차원 등고선 그래프이다. 이 때, 민감도가 높은 것으로 나타난 인자들은 공통적으로 역전파된 신호의 위상과 관련된 인자라는 공통점이 있음을 알 수 있다. 우측 하단의 그림은 역산 결과의 검증을 위해 음원의 위치를 제외한 나머지 역산된 인자를 이용하여 음원의 위치를 추정한 결과를 보여주는 모호도 평면(ambiguity surface)이다. 본 음원의 위치추정 결과는 실제 Manning의 위치로 에너지의 강한 집중을 보이므로 역산인자의 추정이 잘 되었다고 판단된다.

그림 2는 각각의 데이터에 대해 10회의 역산을 수행한 결과의 평균값과 표준편차이며, 동일한 데이터에 대한 Battle 등[5]의 역산 결과 또한 비교하여 보여준다. 그림 2의 전반적인 결과는, 특히 민감한 역산인자에 대한 추정값은 전체 데이터에 걸쳐 높은 일관성을 보이고 있다. 반면에 퇴적층의 물성은 데이터에 따른 추정값의 분산이 다른 인자들에 비해 크게 나타났는데, 그 원인은 이들이 역전파된 신호의 크기와 관련된 인자이

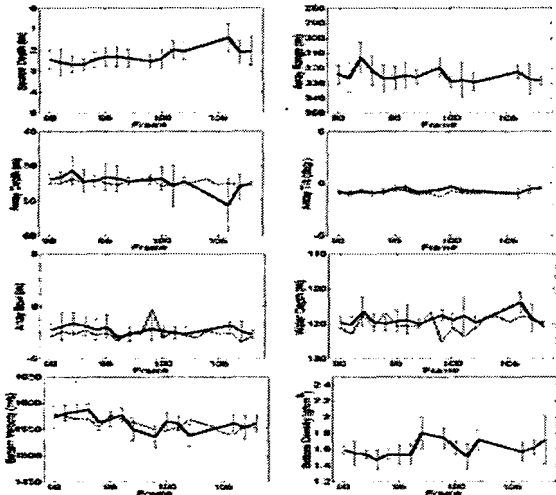


그림 2. 전체 실험데이터에 대한 역산 결과  
 므로 상대적으로 민감도가 낮기 때문이다.

끝으로 그림 3(a)는 계속된 신호의 선박 위치에 대한 빔형성한 후 그 에너지를 주파수영역에서 보여주는 스펙트로그램이다. 한편 그림 3(b)는 추정된 역산인자들 바탕으로 각 주파수에 대한 복제음장을 구성 한후 계속된 음장과의 상관관계(Bartlett power)를 계산한 결과이다. 두 그림의 유사성으로부터 본 시간영역 역산기법은 계속된 음장의 지배적인 토널성분을 자동적으로 반영하고 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결론

예인 HLA와 선박의 소음을 이용하여 역산을 수행하였다. 선박의 소음은 신호파형을 알 수 없으므로 시간 역전 된 계속신호를 새로운 음원으로 하여 음선기반 음 전달 모델에 의해 역전과 시킴으로써 구현되는 정합 임펄스응답필터를 사용하여 복제함수를 정의하였다. 최적화 효율을 높이기 위해 유전알고리즘과 지역최적화 알고리즘을 반복적으로 수행하는 최적화 기법을 사용하였다. 끝으로, 본 역산기법을 MAPEX2000실험에서 계속된 Manning 데이터에 적용하였고, 그 결과로부터 예인 HLA와 선박의 소음을 이용한 시간영역 역산이 신뢰성 있는 해를 주는 것으로 판단되었다.

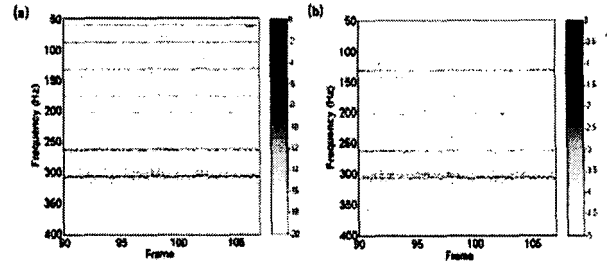


그림 3. 빔형성 스펙트로그램(a)과 Bartlett 파워(b)

#### 참고문헌

- [1] N. R. Chapman and M. Taroudakis, "Special issue: Geoacoustic inversion in shallow water," *J. Comp. Acoust.* 8, 259-388 (2000).
- [2] W. A. Kuperman, M. F. Werby, K. E. Gilbert, and G. J. Tango, "Beam forming on bottom-interacting tow-ship noise," *IEEE J. Oceanic Eng.* 10, 290-298 (1985).
- [3] M. Siderius, P. 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).
- [4] 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).
- [5] 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).
- [6] C. S. Clay, "Optimum time domain signal transmission and source location in a waveguide," *J. Acoust. Soc. Am.* 81, 660-664 (1987).
- [7] R. K. Brienzo and W. S. Hodgkiss, "Broadband matched-field processing," *J. Acoust. Soc. Am.* 94, 2821-2831 (1993).
- [8] W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, and B. P. Flannery, *Numerical recipes in C*, 2<sup>nd</sup> ed. (Cambridge, University Press, 1992).

후기 : 본 연구는 한국해양연구원/해양시스템 안전연구소의 기본연구사업의 지원으로 수행되었음.