

# 천해환경에서 전구음원을 이용한 지음향인자의 역추정

## Inverse Estimation of Geoacoustic Parameters in Shallow Water Using Light Bulb Sound Source

한 주 영\*, 이 성 옥\*, 나 정 열\*, 김 성 일\*\*  
(Jooyoung Hahn\*, Seongwook Lee\*, Jungyul Na\*, Seongil Kim\*\*)

\* 한양대학교 지구해양학과 해양음향연구실, \*\* 국방과학연구소

(접수일자: 2003년 11월 11일; 수정일자: 2003년 12월 4일; 채택일자: 2004년 1월 7일)

천해환경에서 저주파 광대역신호와 수직선배열을 이용하여, 퇴적층의 지음향인자 (층두께, 종파속도, 종파감쇠계수, 밀도)를 역추정하였다. 역산 방법은 모델 기반의 역산으로 유전알고리즘 (Genetic Algorithm)을 이용한 일관적 광대역 정합장처리 (Coherent Broadband Matched Field Processing) 기법을 사용하였다. 저주파 광대역음원으로 사용된 상업용 전구의 내폭신호는 짧은 시간 동안 많은 변화를 포함하는 천이신호이기 때문에, 분석시 시간과 주파수에 따른 차함수의 조절이 요구되는데, 주기신호분석에 주로 사용되는 푸리에 기반의 분석방법은 이러한 점에서 많은 어려움이 있다. 본 논문에서는 해양도파관에서 근거리 음파전달 시 계측된 시계열신호로부터 다중경로성분을 구분하고 추출하기 위하여 시간-주파수영역에서 차함수의 크기조절이 가능한 웨이블릿 변환을 통한 신호 분석을 수행하였고, 분석된 실측음장과 계산된 복제음장의 연속웨이블릿 계수를 상호상관 시킴으로써 비용함수를 정의하였다. 비용함수의 전역최고점을 찾는 최적화 과정을 통하여 각 퇴적층의 지음향인자들을 역추정하였다. 특히 역산인자의 민감도에 따른 퇴적층별, 인자별, 분리연산을 수행함으로써 최적화 과정에서 참값으로의 수렴효율을 높였다. 역산의 결과 실험해역 퇴적물 상층부에는 두께 44.43 m, 음속 1549 m/s의 모래-실트-점토질 (sand-silt-clay) 층이 존재하고, 그 하부에는 12.28 m, 음속 1993 m/s의 거친모래질 (Coarse sand) 층의 존재를 추정해 내었다. 또한 역산 결과를 시추자료 및 탄성파 자료와 비교함으로써 본 논문에서 제안한 역산 방법의 유효성을 확인하였다.

**핵심용어:** 지음향인자 역산, 웨이블릿 변환, 내폭신호, 유전알고리즘

**투고분야:** 수중음향 분야 (5.5)

An inversion method is presented for the determination of the compressional wave speed, compressional wave attenuation, thickness of the sediment layer and density as a function of depth for a horizontally stratified ocean bottom. An experiment for estimating those properties was conducted in the shallow water of South Sea in Korea. In the experiment, a light bulb implosion and the propagating sound were measured using a VLA (vertical line array). As a method for estimating the geoacoustic properties, a coherent broadband matched field processing combined with Genetic Algorithm was employed. When a time-dependent signal is very short, the Fourier transform results are not accurate, since the frequency components are not locatable in time and the windowed Fourier transform is limited by the length of the window. However, it is possible to do this using the wavelet transform, a transform that yields a time-frequency representation of a signal. In this study, this transform is used to identify and extract the acoustic components from multipath time series. The inversion is formulated as an optimization problem, which maximizes the cost function defined as a normalized correlation between the measured and modeled signals in the wavelet transform coefficient vector. The experiments and procedures for deploying the light bulbs and the coherent broadband inversion method are described, and the estimated geoacoustic profile in the vicinity of the VLA site is presented.

**Keywords:** *Geoacoustic inversion, Coherent broadband matched field processing, Wavelet transform, Implosive signal, Genetic algorithm*

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

## I. 서론

도파관현상으로 특징 지을 수 있는 천해에서의 음파 전달은 심해와는 달리 해저면을 비롯한 경계면과의 빈번한 상호 작용을 통해서 이루어지기 때문에, 수층의 음속 분포보다는 퇴적층의 음향학적 특성들(층두께, 종파속도, 종파감쇠계수, 밀도)등이 더 중요한 요인으로 작용하게 된다. 따라서 천해에서 올바른 음원위치추정을 위해서는 퇴적층의 물성을 정확히 파악하는 것이 필수요소라 할 수 있다. 직접적인 방법으로서 현장에서의 코어 샘플링이나 탄성파탐사는 비용, 시간면에서 환경요인들을 결정짓기에는 어려움이 많기 때문에 간접적인 방법으로써 음전달의 물리적 현상과 수치연산을 기반으로 한 역추정 방법이 활발히 연구되고 있다. 최근 환경인자의 오정합에 의한 위치추정오차를 줄이기 위한 방법으로서 정합장치(Matched Filed Processing)를 기반으로 한 역산방법이 활발히 연구되고 있다[1,2].

역산이란 환경모델링, 음전달모델링, 신호처리 그리고 최적화 과정 등을 포괄하는 개념으로, 음원의 성격, 청음기의 배열형태, 음원과 청음기간의 거리 등 수행한 실험 환경이 역산의 성격을 규정하게 되고, 이에 따라 가장 효율적인 기법들이 선택된다. 본 연구에서 수행된 실험은 저주파 광대역신호와 수직선배열을 이용한 전형적인 음원위치추정을 위한 실험 형태로서, 수직으로 배열된 청음기들은 수층에서 전파되는 음향에너지를 모든 각도에서 포착할 수 있고, 도파관에 형성되는 모드의 구조를 거의 완벽하게 예측하는데 적합한 구조라는 장점을 가지고 있으나, 거리종속에 따른 지음향인자들의 변화량과 근거리 음파전달 시 감쇠계수의 역산에 어려움이 있는 단점이 있다[3].

역산을 위한 음원으로서 약 15 ms의 짧은 길이를 갖는 전구의 내폭신호를 이용하였고 연속 웨이블릿변환을 통하여 시간-주파수영역에서의 2차원적 분석을 수행하였다. 전구의 내폭신호는 폭파수심과 전구의 반경, 진공상태에 따라 음원의 성격이 변하는 특징을 가지고 있으며 환경친화적 음원으로서 그 유용성에 대한 많은 연구가 있었고 해양탐사에 널리 이용되고 있다[4]. 연속웨이블릿 변환은 푸리에변환에 기반한 STFT (Short Time Fourier Transform)와는 달리 창함수의 시간과 주파수에 따른 조절이 가능하므로 천해 다중경로 음파전달시 고유음선(Eigenray)의 식별을 용이하게 할 수 있다는 장점이 있다[5]. 이러한 장점을 이용하여 해양 산란신호의 웨이

블릿변환을 통한 2차원 해석으로 해양에서의 산란성분을 식별, 합성하는 연구가 수행된 바 있으며[6], 천해에서 수중 폭발성 신호(SUS-Signal, Underwater Sound)와 같은 광대역신호의 음파전달 분석에 웨이블릿변환을 이용하여 음파분산에 의한 군속도 등을 추정해 내어 지음향 인자를 역추정 하는 사례[7]가 점차 증가하고 있다.

최적화 과정에서 해의 품질은 검색 공간의 크기에 영향을 받으며 일반적으로 검색 공간의 크기가 작을수록 최적해를 찾을 수 있는 확률은 증가한다. 따라서 검색 공간의 크기를 줄이는 한편 동시에 민감도가 큰 인자가 최적화 알고리즘의 탐색 과정을 지배하는 것을 방지하기 위해 충분히 역산기법과 민감도에 따라 인자를 분리하여 서로 다른 민감도의 인자들에 대해 독립적인 역산을 수행하는 기법[8]을 적용하였다.

본 연구에서는 천해에서 퇴적물층의 지음향 인자를 역추정 하기 위하여 측정된 음장과 복제음장과의 연속웨이블릿 변환을 통한 웨이블릿계수를 상호상관시키는 것으로 비용함수를 정의하고, 최적화 과정에서 검색효율을 높이기 위해 퇴적층을 분리하여, 민감도에 따른 정합장치를 하였다. 2장에서는 해상실험과 전구 내폭신호의 시간-주파수 영역에서의 특성을 설명하였으며, 3장에서는 지음향 인자의 역추정 방법에 대한 고찰을 그리고, 4장에서는 실험시 수집된 자료와 역산 결과에 대해서 살펴보았다.

## II. 실험

실험은 2003년 5월에 남해 거제도부근 해역에서 내폭성(Implosive) 음원인 가정용 전구를 이용하여 수행하였다(그림 1). 실험해역의 수심은 96 m였고, 주변수심과 음속의 변화가 적어 수층환경에 대한 거리독립을 가정할 수 있었다. 또한 음장측정과 동시에 XBT (eXpendable Bathy Thermograph)를 이용하여 수온분포 자료를 획득하였다(그림 2). 실험해역의 수직 수온분포는 수심 71 m까지 음의 기울기를 가지며 감소하다가 그 이상의 수심에서는 수온의 변화가 거의 보이지 않는 구조를 갖고 있다. 따라서 수심 61 m에서 방사된 에너지는 해저 방향으로의 굴절로 퇴적층과 상대적으로 강한 상호작용이 있을 미루어 짐작할 수 있다.

수중신호를 위한 음원으로서 전구는 SUS에 비해 음원 준위는 낮지만, 광대역 천이신호를 비교적 쉽고 안전하

계 발생시킬 수 있고, 매우 짧은 펄스의 길이로 근거리 도파관에서 다중 경로를 쉽게 분해할 수 있는 이점이 있다[4]. 일반적으로 전구는 수심 270 m에서 주위의 압력에 의해 자폭하게 되지만, 본 실험에서는 수심 61 m에서 인위적으로 강제내폭을 시켰다. 신호는 진공상태인 전구가 안쪽으로 폭발하면서 발생하는 수많은 공기방울들의 공진에 의해 발진된다. 그림 3a는 내폭한 전구의 단위파형 신호이다. 음압이 최고값이 될 때가 공진하는 공기방울들의 반경이 최고로 수축했을 때이므로, 내폭 직후 신호는 음의 위상을 보였고, 공진에너지가 완전히 소멸하기 까지 다섯 번의 진동이 있었다. 그림 3b는 수신한 단위파형에 대한 주파수특성을 나타낸 것이다. 펄스상호간의 보강, 상쇄간섭 (constructive, destructive interference)으로 인한 기복이 나타남을 볼 수 있으며, 중심주파수 약 500 Hz에서 강한 에너지 준위가 나타남을 알 수 있다. 3 dB 대역폭은 약 150 Hz이었고, 15 ms 동안의 에너지

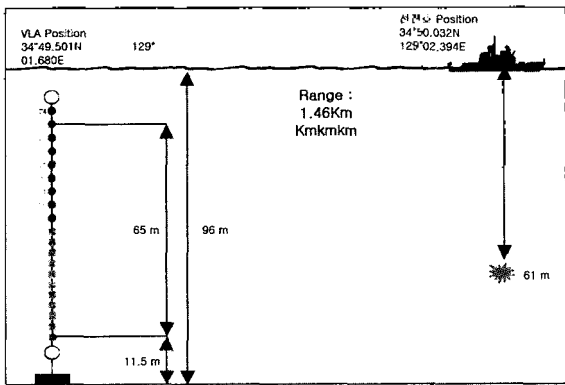


그림 1. 지음향인자 역산을 위한 실험환경  
Fig. 1. Experiment geometry used for geoacoustic parameter inversion.

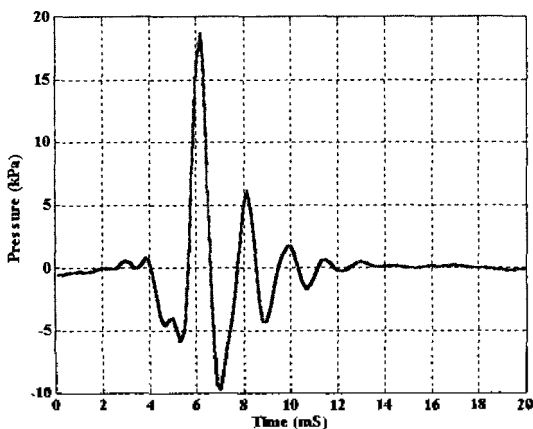


그림 3a. 수심 61 m에서의 전구내폭신호 단위파형  
Fig. 3a. Light bulb implosion at 61 m depth.

준위 (Energy Source Level)는 174.65 dB re  $\mu\text{Pa}^2\text{-s @1m}$  이었고, Peak Pressure Level은 184.52 dB re  $\mu\text{Pa @1m}$  이었다.

수신기는 음원으로부터 수평거리 1.46 Km, 수심 19~84 m 깊이에 19개의 청음기를 수직선 형태로 배열하였다. 수심 50 m를 기준으로, 그 위쪽으로는 5 m 간격으로, 아래쪽으로는 2.5 m 간격으로 설치하여 수층 하부로 전파되는 에너지의 수직거리 해상도를 높여 수신할 수 있게 하였다 (그림 1). 수신신호는 6 KHz로 샘플링 하였으며, 20-1000 Hz 대역통과 필터를 사용하여 리코딩하였다. 음원특성을 자세히 분석하기 위하여 선미 수심 30 m, 음원으로부터 수평거리 31 m 부근에 보조 청음기를 설치하였다.

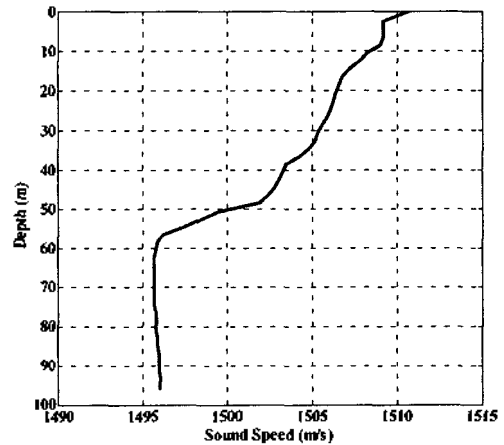


그림 2. 실험해역의 수직수온 분포  
Fig. 2. Sound speed profile from AXBT cast at the experiment site.

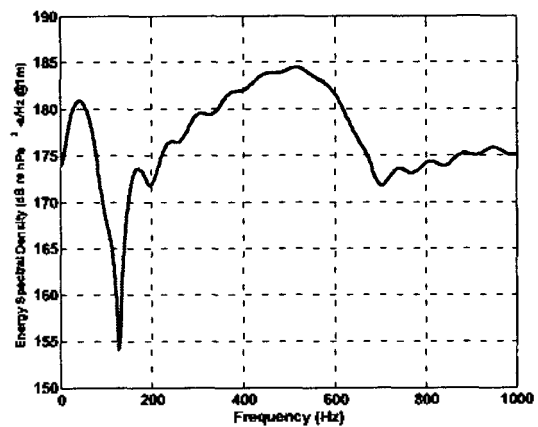


그림 3b. 단위파형에 대한 주파수특성  
Fig. 3b. Source level (energy spectral density) for implosion at 61 m.

### III. 역산방법

일반적으로 해저면 특성을 역추정하기 위한 정합장처리라는 청음기로부터 수신한 실측음장과 모델에 의해 합성된 복제음장 (replica)의 최고상관을 찾기 위한 비용함수의 최적화 기법이다[1]. 본 연구에서는 모델 기반의 역산으로 유전알고리즘 (Genetic Algorithm)을 이용한 일관적 광대역 정합장처리 (Coherent Broadband Matched Field Processing)기법을 사용하였다. 측정된 음장과 복제음장과의 연속웨이블릿 변환을 통한 웨이블릿계수를 상호상관 시키는 것으로 비용함수를 정의하고, 유전알고리즘을 이용하여 비용함수의 전역 최고값을 검색해 나가는 과정의 최적화를 수행 하였다. 최적화 과정에서 검색 효율을 높이기 위해 퇴적층을 분리하여, 민감도에 따른 정합장처리를 하였다. 본 연구에서 수행된 역산의 절차는 그림 4에 나타내었다.

#### 3.1. 비용함수

해양도파관에서 근거리 음파전달시 계측된 시계열 신호로부터 다중경로성분을 구분하고 추출하기 위하여 시간-주파수영역에서 창함수의 크기조절이 가능한 웨이블릿 변환을 통해 신호의 다중경로 분리를 수행하였고, 19개의 청음기로부터 수집된 실측음장과 계산된 복제음장의 연속웨이블릿 계수를 상호상관시킴으로써 비용함수를 정의하였다. 그 비용함수 (Cost Function)  $E(m)$ 은 다음과 같다.

$$E(m) = \sum_{i=1}^N \left( \frac{\sum_{i=1}^N \max_{\tau_{ij}} \int Cq_{ii}(t) Cp_{ij}(t + \tau_{ij}) dt}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \int Cq_{ii}^2(t) dt} \sqrt{\sum_{i=1}^N \int Cp_{ij}^2(t) dt}} \right) \quad (1)$$

- $m$ : 역산 모델인자 (set of model parameter)
- $a$ : 비례지수 (scale factor)
- $\tau$ : 시간지연 (time delay)
- $N$ : 수직선배열 청음기 수 (number of array elements)

실측음장과 합성음장의 상관계수가 최고가 되는 모델인자  $m$ 은 그 환경에 대한 최적의 추정값으로 취해지게 된다.

여기에서  $Cp(t)$ ,  $Cq(t)$ 는 웨이블릿 계수벡터 (wavelet coefficient vector)이고, 웨이블릿 함수  $\Psi(t)$ 는 음원 파형의 형태와 의사중심 주파수 (pseudo center frequency)가 가장 유사한 형태인 5차 Daubechies wavelet을 이용하여 구하였다. 실측음장과 합성음장은 연속 웨이블릿 변환식 (2)를 통해서 각각의 웨이블릿 계수벡터로 변환되어진다. 그림 5는 보조청음기에서 수신된 실측음장과 사용된 웨이블릿 함수, 그리고 변환된 웨이블릿 계수벡터를 나타내었다.

$$C_{a,b} = \int_{-\infty}^{\infty} S(t) \psi_{a,b}(t) dt \quad (2)$$

- $C$ : 웨이블릿 계수행렬 (wavelet coefficient matrix)
- $S(t)$ : 시계열 신호 (time series)
- $a$ : 비례지수 (scale factor)
- $b$ : time of the wavelet localization parameter

위 식에서의 복제음장  $q_i(t)$ 는 음원파형  $s(t)$  (그림 3a)와 음전달모델링에 의한 임펄스응답  $g_i(t)$ 와의 시간영역 콘볼루션으로 구하여진다 (식 3).

$$q_i(t) = s(t) * g_i(t) \quad (3)$$

그림 6은 9번째 청음기에서 수신모의한 시계열 복제음장  $q_9(t)$ , 음원파형  $s(t)$  그리고 임펄스응답  $g_9(t)$ 이다.

해저면의 임펄스응답은 음선이론을 통하여 모델링하였고, 광대역 천이신호인 수중 폭발성음원을 음선이론으로 시계열모의를 수행한 바 있다[9].

#### 3.2. 비용함수 최적화

본 논문에서 제안된 비용함수 (식 1)은 비선형 함수이

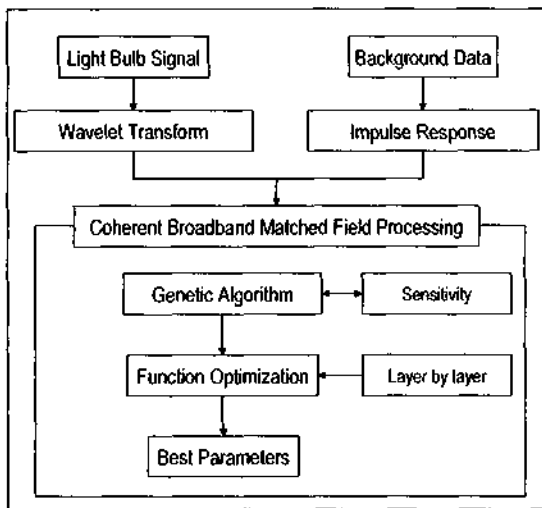


그림 4. 역산 절차도  
Fig. 4. Inversion flow chart.

므로 일반적인 선형검색에 기반한 최적화방법은 사용하기에 많은 어려움이 따른다. 역산의 문제에서 비용함수 최적화를 위해 다양한 검색 알고리즘이 사용되고 있지만, 본 연구에서는 비선형 전역 검색법이며, 통계적 탐색 방법인 유전자검색 방법을 사용하였다.

유전자 알고리즘은 자연선택과 변이라는 다윈의 진화

론에 바탕을 둔 최적화 방법이다. 임의로 선택된 해는 선택 (Selection), 교배 (Crossover), 돌연변이 (Mutation) 과정을 거쳐 최적의 값으로 진화하여 수렴하게 된다 (그림 7). 본 연구에서는 유전자 알고리즘을 이용한 최적화 과정에서 해가 지역해 (Local Optima)에 빠질 위험을 줄여 주고 다른 범위에서도 최적해를 찾을 수 있는 자유도

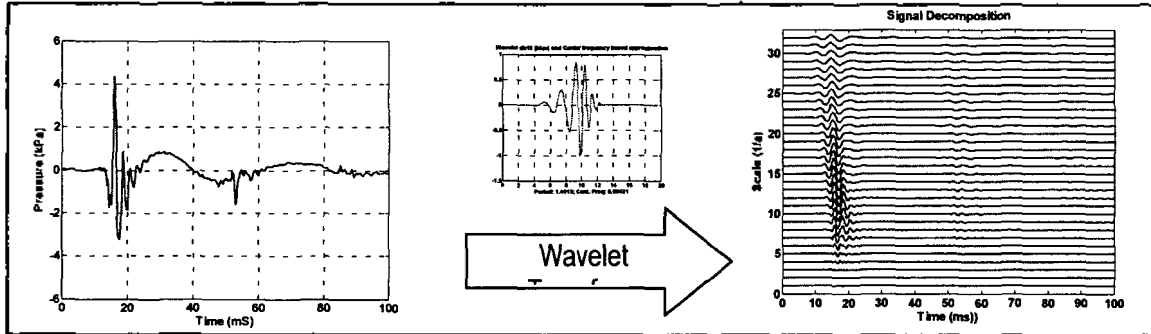


그림 5. Daubechies 5차 웨이블릿 함수를 이용한 시간-주파수분석  
Fig. 5. Time-frequency analysis using Daubechies wavelet function.

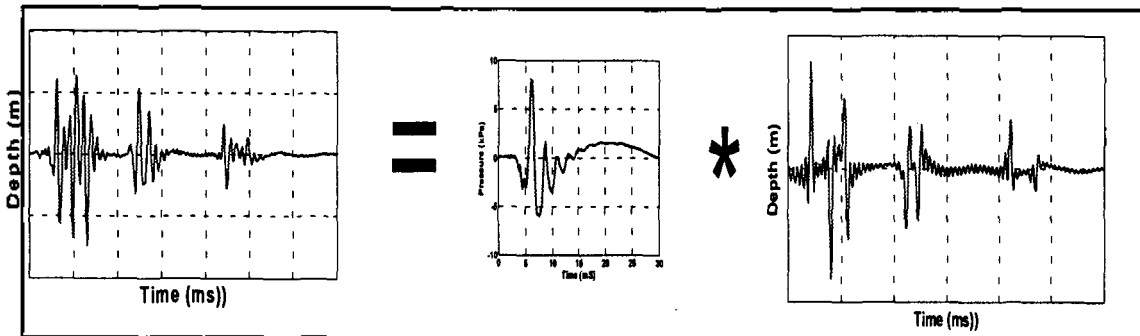


그림 6. 음선이론을 이용한 시계열 신호모의  
Fig. 6. time series simulation using ray theory.

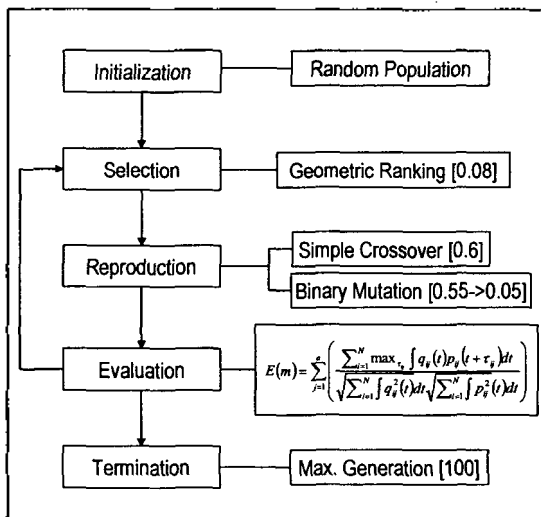


그림 7. 유전알고리즘 흐름도  
Fig. 7. A flowchart of a genetic algorithm.

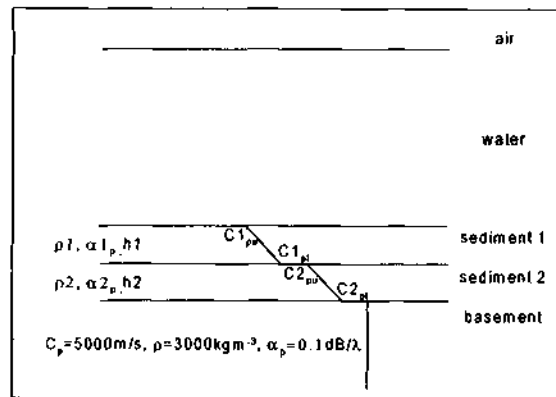


그림 8. 대상해역의 지음향 모형 ( $\rho$ : 밀도,  $\alpha$ : 종파감쇠계수, h: 층두께, C: 종파속도)  
Fig. 8. Geoacoustic Model ( $\rho$ : density,  $\alpha$ : compressional wave attenuation, h: sediment thickness, C: compressional wave speed).

를 증가시키기 위해서, 처음 돌연변이확률(Binary Mutation Probability)을 0.55로 크게 설정하여 세대를 거듭함에 따라 점차적으로 줄어들어 0.05가 되도록 하였다. 초기 돌연변이확률을 크게 하는 것은 작게 설정하는 것보다 수렴 속도면에서 더 우수하기 때문이다. 그림 7에 본 연구에서 적용된 유전자 알고리즘의 흐름도와 각 과정에서 적용한 확률 및 수치를 나타내었다.

정의된 비용함수를 최적화하는 과정에서 민감도에 따라 역산인자를 두 종류로 나눈 후 두 단계에 걸쳐 최적화

를 수행하는 방법을 적용하였다. 민감도가 서로 다른 두 종류의 인자를 동시에 역산하게 되면 민감도가 큰 인자가 최적화에서 주도적인 역할을 함으로써 비록 주요한 역산 대상일지라도 민감도가 작은 인자의 추정에는 어려움이 따르게 된다. 모든 역산인자에 대해 최적화를 진행한 후 민감도가 큰 인자의 해를 중심으로 최적화 과정이 수렴되었을 때 다음 단계의 역산으로 넘어간다. 다음 단계에서는 추정한 민감한 인자를 역산대상에서 제외한 후 나머지 인자들에 대한 역산을 수행하였다. 이러한 역산방법을

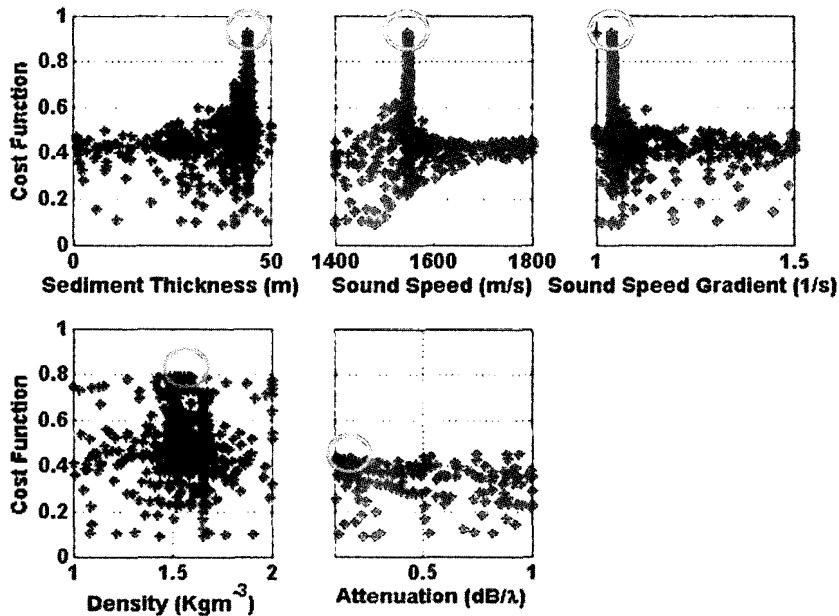


그림 9a. 첫번째층에서 각 역산인자에 대한 비용함수 분포도  
Fig. 9a. Cost function distributions for selected parameters of first sediment layer.

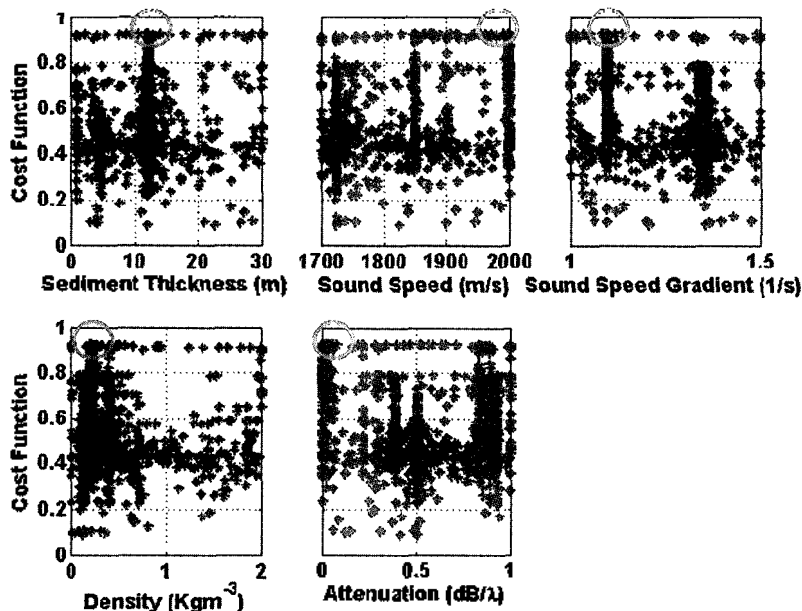


그림 9b. 두번째층에서 각 역산인자에 대한 비용함수 분포도  
Fig. 9b. Cost function distributions for selected parameters of second sediment layer.

통하여 보다 안정적인 지음향학적 인자의 역산을 기대할 수 있다.

**3.3. 지음향 모델**

역산을 위해서는 퇴적환경의 모델링이 요구되는데, 실제환경을 완벽하게 구현하기는 현실적으로 불가능하므로 역산의 목적에 맞는 단순화가 필요하다. 본 실험해역은 거제도 동쪽 (34° 49.501N, 129° 01.680E) 수심 96 m의 해역으로서, 12,000-8,000년 전 해수면 상승의 정체시기 해안선이 현 수심 70-80 m에 위치하였으며, 거제도와 남해도 외해에서 많은 수로가 발달한 깔대기형 하구역 환경이 분포하고 섬진강, 낙동강으로부터 다량의 쇄설성 퇴적물의 유입으로 다수의 사퇴를 형성시켰으며, 다량의 패각유해들이 산출되는 것으로 보고되고 있다[10]. 또한 그 하부에는 제3기 또는 그보다 오래된 여러 단위층들이 복잡한 변형을 받은 상태로 분포한다고 알려져 있다 [11,12]. 이러한 정보로부터 역산에 사용하기 위한 지음향 모델은 그림 9에서 보는 바와 같이 유체로 가정한 2개의 퇴적층과 그 하부에는 음향학적 기반암으로 단순화하였고, 각 퇴적층의 지음향 인자들은 퇴적수심에 따라 일정한 변화율을 갖도록 가정하였으며, 대상해역의 거리에 따른 퇴적층의 두께의 변화를 무시함으로써 역산하는 거리에 따른 평균화가 되도록 하였다. 또한 위 정보를 바탕으로 검색 공간을 정의하였다 (그림 8), (표 1-경계값). 본 역산에서 음원은 제주과 광대역 신호로서 얇은 퇴적층을 구분하는 것은 의미가 없기 때문에 얇은 박층으로 분포하는 표층은 역산에서 제외하였다.

표 1. 인자별 검색경계값과 역산해  
Table 1. Search bounds and estimated values for the geoacoustic model parameters.

역산인자	검색경계값	역산해
<b>1번 층</b>		
층두께	[1-50]	44.43 m
종파속도	[1400-1800]	1549 m/s
음속기울기	[1-1.5]	1.04/s
밀도	[0-2]	1.62 Kg <sup>m</sup> -3
종파감쇠계수	[0-1]	0.1 dB/λ
<b>2번 층</b>		
층두께	[1-30]	12.18 m
종파속도	[1700-2000]	1993 m/s
음속기울기	[1-1.5]	1.1/s
밀도	[0-2]	0.19 Kg <sup>m</sup> -3
종파감쇠계수	[0-1]	0.1 dB/λ

**IV. 역산 결과**

모델인자들의 초기입력 경계값들과 역산된 결과값들은 (표 1)에 나타내었다. 복제음장과 실측음장의 최대상관을 찾기 위해 약 5000번의 모델수행이 있었으며, 최적화 결과 대부분의 인자들은 하나의 안정된 값을 찾아 수렴하였다 (그림 9a,9b). 첫번째 퇴적층의 음속은 경계면에서 1549 m/s, 두께는 44.43 m, 음속의 기울기는 1.04/s였으며 두번째 층과의 경계면에서 음속은 1610 m/s로 나타났다.

두번째 층의 경계에서의 음속은 1993 m/s로 첫번째 퇴적층보다 빠른 음속을 가지고 있었으며, 음속의 기울기는 1.1/s로 기반암 경계에서의 음속은 2192 m/s로 나타났다. 두 층에서의 밀도와 감쇠계수는 비슷한 양상을 보였다. 표 1은 역산결과를 나타낸 것이다.

역산결과 첫번째층에서의 음속과 층두께가 가장 민감한 인자로 작용하였는데, 그 이유는 해저면 반사계수의 크기와 도달시간의 차이를 통해서 쉽게 역산해 낼 수 있었기 때문이다. 반면 가장 둔감한 인자는 감쇠계수로 나타났다는데, 근거리 음파전달시 음원과 수신기 사이에 해저 면과 상호작용을 하는 고유음선의 수평거리가 짧기 때문에 감쇠계수 역산에 충분한 기여를 못했기 때문이라 판단된다. 또한 두번째 퇴적층에서는 비용합수의 분포를 보면 알 수 있듯이 대부분의 인자가 둔감한 것으로 나타났다는데, 이는 두번째층은 실험해역의 음파전달특성에 비교적 적은 영향을 끼친다고 볼 수 있다.

Hamilton의 지음향모델[13]을 이용하여, 역산된 음향

표 2. 퇴적물 유형에 따른 지음향인자 특성값 (ρ: 밀도, Cp: 종파속도, α: 종파감쇠계수)  
Table 2. Typical geoacoustic parameters for sediments (ρ: density, Cp: compressional wave speed, α: compressional wave attenuation.

Sediment Type	ρ (kg <sup>m</sup> -3)	C <sub>r</sub>	C <sub>p</sub> (m/s)	α (dB/λ)
Clay	1,200	0.98	1,470	0.08
Silty clay	1,300	0.99	1,485	0.10
Clayey silt	1,500	1.01	1,515	0.15
Sand-silt-clay	1,600	1.04	1,560	0.20
Sand-silt	1,700	1.07	1,605	1.00
Silty sand	1,800	1.10	1,650	1.10
Very fine sand	1,900	1.12	1,680	1.00
Fine sand	1,950	1.15	1,725	0.80
Coarse sand	2,000	1.20	1,800	0.90

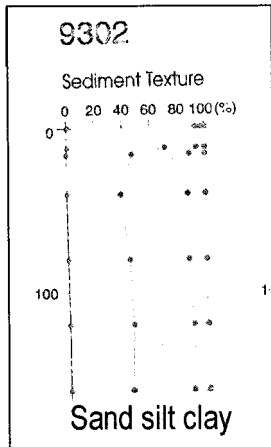


그림 10. 실험해역부근의 시추자료 구성성분분포  
Fig. 10. Core data near the experiment area.

학적 특성치로부터 퇴적층의 구성을 역추정할 수 있는데, 퇴적물의 유형과 음향학적 특성치들을 비교하여 보면 (표 2), 첫번째 퇴적층의 구성은 점토질과 모래질이 섞인 형태의 퇴적층인 것을 알 수 있고, 두번째층은 첫번째층보다 종파의 음속과, 밀도가 큰 모래질로 구성되어 있는 것을 알 수 있었다. 그림 10의 거제도 부근 시추자료의 수직 분포[10]를 보면, 해저면 경계로부터 수 cm까지는 모래질 (sand)이 우세하게 분포하고 있었으며, 그 아래로는 모래질 (sand), 실트질 (silt), 점토질 (clay)이 각각 45%, 45%, 10% 가량의 분포를 보이고 있다. 또한 스파크 탄성과 탐사로 퇴적층이 최소한 두개층 이상으로 구성되어 있으며 퇴적층 두께는 기반암으로부터 퇴적 표층까지 약 50 m로 알려져 있다 (그림 11)[11]. 역산결과는 실측 조사 자료와 잘 부합하고 있다.

### V. 결론

천해환경에서 전구음원과 수직선배열을 이용하여 해양퇴적층의 음향학적 특성을 연속 웨이블릿 변환을 통하여 시간과 주파수영역에서 분석을 하였고, 기본 환경자료를 통하여 음파전달과 퇴적층과의 상호작용을 음선이론으로서 복제음장을 생성, 역산하였다. 결과적으로 실험해역 퇴적물 상층부에는 두께 44.43 m, 음속 1549 m/s의 모래-실트-점토질 (sand-silt-clay) 층이 존재하고, 그 하부에는 12.28 m, 음속 1993 m/s의 거친 모래질 (Coarse sand)층이 존재한다는 사실을 알 수 있었다. 본 실험에서와 같이 근거리, 수평선배열을 이용한 전형적인 지음향

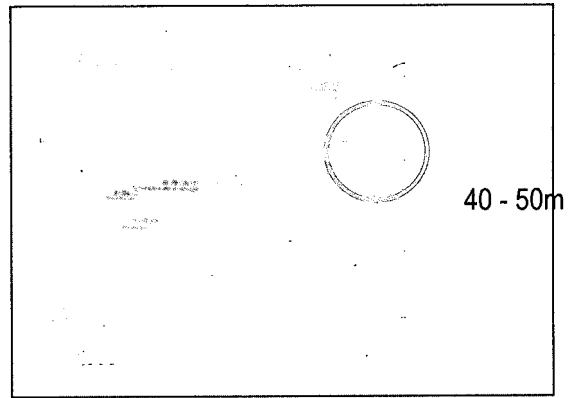


그림 11. 실험해역 부근의 현생퇴적물 등추후도  
Fig. 11. Isopach map of recent sediments in the experiment area.

역산기법은 감쇠계수를 역산하는데 둔감한 방법임을 알 수 있다.

### 참고 문헌

- Alexandra Tolstoy, "Matched field processing for underwater acoustics (World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore, 1993)."
- A. Caiti, "Experimental acoustic inversion methods for exploration of the shallow water environment (Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 2000)."
- A. Tolstoy and N. R. Chapman, "Benchmarking geoacoustical inversion methods," *J. Comp. Acoust.* 6 (182), 1998.
- Carry J. Heard, M. McDonald, N. R. Chapman, and L. Jachke, "Underwater light bulb implosions: a useful acoustic source," *Proc. OCEANS'97 MTS/IEEE conf.*, 2, 755-762, Oct, 1997.
- Pascal M. David, "Underwater acoustic signal analysis with wavelet process," *J. Acoust. Soc. Am.* 87 (5), 2118-2121, 1990.
- D. M. Drumheller, D. H. Hughes, B. T. O'Connor, C. F. Gaumont, "Identification and synthesis of acoustic scattering components via the wavelet transform," *J. Acoust. Soc. Am.* 97 (6), 3649-3656, 1995.
- Gopu R. Polty, James H. Miller, James F. Lynch, "Inversion for sediment geoacoustic properties at the new england bight," *J. Acoust. Soc. Am.* 114, 1874-1888, 2003.
- C. Park, W. Seong, P. Gerstolt, and D. J. Battle, "Time domain geoacoustic inversion using own ship noise" *IEEE Oceans conference*, San Diego, 2003.
- Jooyoung Hahn, Seongwook Lee, and Jungyul Na, "Time series simulation of explosive charges in shallow water using ray approach," *J. Acoust. Soc. Kr.* 22 (3E), 133-140, 2003.
- Yoo, D. G., S. C. Park, D. C. Kim and J. H. Choi, "Differential preservation of sea-level-related sedimentary facies: late pleistocene-holocene deposits on the Korea strait shelf," *Proceedings of the third international Conference on*



Asian Marine Geology, 49-61, 1996.

11. 한국해양연구원, "Oceanographic atlas of Korean waters, volume 3," 169, 1996.
12. 한국지질자원연구원, "현생퇴적물 등추후도," Vi-4, 1989.
13. Hamilton, E. EL, "Geoacoustic modeling of the sea floor," *J. Acoust. Soc. Am*, 68, 1313-1340, 1980.

● 이 성 욱 (Seongwook Lee)

한국음향학회지 제22권 제7호 참조

● 나 정 열 (Jungyul Na)

한국음향학회지 제22권 제2E호 참조

● 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

※ 주관심분야: 수중음향



---

저자 약력

---

● 한 주 영 (Jooyoung Hahn)

1997년 2월: 한양대학교 지구해양학과 (이화사)

2000년 2월: 한양대학교 지구해양학과 (이화석사)

2000년 2월~현재: 한양대학교 지구해양학과 박사과정

※ 주관심분야: 수중정합장처리, 수중음향모델링, 수중음향신호처리, 최적화이론