

유전자 알고리즘을 사용한 광대역 신호로부터 직접적인 해저 지질 특성치 역산

Direct Inversion of Seabed Properties from a Wideband Signal using Genetic Algorithms

박 철 수*, 성 우 제**
(Cheol Soo Park*, Woo Jae Seong**)

요 약

본 논문에서는 부분파수적분법과 유전자알고리즘기법의 조합을 통한 광대역 신호로부터 직접적인 해저지질 특성치의 역산기법을 제시하였다. 광대역주파수신호의 시간영역 모의는 부분파수적분법을 사용하여 계산시간을 단축하였고, 다수의 국부최소점이 존재하는 역산문제에 유전자알고리즘기법을 적용한 전역최적점에 대한 탐색을 수행하였다. 본 방법을 사용하여 해저퇴적층의 지질특성 요소에 대한 역산을 수행하였다.

ABSTRACT

A combined partial wavenumber integration method and genetic algorithm is proposed for inverting the seabed properties directly from an unprocessed wideband signal. Drastic reduction in numerical simulation time for the wideband signals using partial spectrum for the depth-dependent Green's function can be achieved whereas genetic algorithm suits global optimization problems where multiple minimax points exist. The proposed method is applied to several stratified Ocean seabed inversion problems.

I. 서 론

해저퇴적층은 그것을 구성하는 물질에 따라 음속, 밀도, 감쇠계수 등의 음향학적 변수가 달라지고 매질의 종류에 따라 서로 다른 반사/투과 특성을 보인다. 이러한 특성을 이용하면 직접적인 채취, 분석없이 반사된 음파를 이용하여 간접적으로 해저퇴적층의 물성을 역추정할 수 있다. 그 기법으로는 지질학에서 전통적으로 사용되어온 왕복시간법과 반사신호법⁽¹⁾ 등이 있으나 최근들어 광역 최적화기법과 음파 및 지진파의 모의를 이용한 해양환경 역산문제가 여러 분야에서 새롭게 연구되어왔다.^(2,3,4,5)

역산과정의 단계는 다음과 같다. 첫째, 필요한 환경변수를 적절히 인자화하고, 실측데이터를 역산에 적합하도록 변환을 한다. 둘째, 결정된 환경변수에 따라 수치모델링을 한다. 셋째, 최적화기법을 이용하여 실측데이터와 모델링결과로부터 주어진 문제의 역산값을 구한다. 마지막으로 위의 과정을 통해 도출해 낸 결과를 통계적으로 해석하여 그로부터 필요한 정보를 추출해낸다. 이 중 핵심이 되는 과정은 수치모델링과 최적화기법으로서, 각각의 기법에 따라 다양한 방법상의 조합이 존재할 수 있다.

해저 지층의 분석에는 투과력과 분해능을 겸비한 주파수 변조된 음파신호가 사용될 수 있다⁽⁶⁾. 이러한 신호는 주파수대역이 넓으므로 정확한 수치모델링에는 많은 계산 시간이 소요된다. 다행히 해저지층의 탐사에 사용되는 신호들은 음파진행경로가 거의 수직인 점에 착안하여 가장 정확한 결과를 제공하는 것으로 알려진 파수적분법을 변

* 서울대학교 대학원
** 서울대학교 조선해양공학과
접수일자: 1998년 6월 25일

형하여 수치모델링에 소요되는 시간을 단축할 수 있다. 한편, 최적화기법을 이용한 역산문제는 다수의 극소점과 극대점이 존재하는 비선형문제이므로 국부 극소점 및 극대점에 갇히기 쉬운 기존의 구배기반최적화기법으로는 전역 최적점을 찾기가 쉽지 않다. 따라서 Simulated Annealing (SA)법¹⁾, Genetic Algorithm(GA)법²⁾ 등의 방향성 있는 Monte Carlo탐색을 전역최적화문제에 적용하는데, SA는 하나의 탐색점만이 탐색공간에 존재하는 반면 GA는 다수의 탐색점을 중심으로 탐색이 수행되므로 보다 향상된 전역적 탐색능력을 기대할 수 있다.

본 연구에서는 부분파수적분을 이용한 광대역주파수 신호의 빠른 수치모델링기법과 GA법을 이용하여 몇 가지 해저퇴적층에 대하여 역산을 수행하였고 실제 해양환경에서의 적용가능성에 대하여 알아보았다.

II. 이론적 고찰

2.1 역산문제의 정식화

역산은 주어진 데이터로부터 그 데이터를 가장 정확히 모의할 수 있는 모델과 인자를 찾는 것을 의미한다. 역산 문제를 정식화하는데 있어 데이터와 환경인자를 다음과 같이 각각 데이터벡터 y 와 환경변수 m 으로 나타낼 수 있다.

$$y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\} \quad (2.1)$$

$$m = \{m_1, m_2, \dots, m_w\} \quad (2.2)$$

수치 모델을 g 라 할 때, 확정론적 모델은 다음과 같다.

$$y = g(m) \quad (2.3)$$

이 경우 수치모델의 오차는 없다고 가정한다. 실제 해양에서의 실측데이터가 d 일 때, 실측데이터의 오차 또한 없다고 가정하면 역산문제는 d 와 $g(m)$ 의 차이를 최소화 하는 인자의 추정값 m^m 을 찾는 최적화문제로 귀결된다.

그러나 이러한 이상적인 경우는 기대하기 힘들다. 따라서 수치모델과 실측데이터의 오차가 고려되어야 하며 이와 같은 오차는 보통 확률분포로 표현되고, 이러한 확률론적 모델은 다음과 같다.³⁾

$$y = g(m) + n \quad (2.4)$$

이때 벡터 n 은 수치모델링과 실측데이터의 오차 또는 잡음을 의미하고 $p(n)$ 의 확률분포를 갖는다.

베이즈 정리(Bayes' rule)에 따른 역산문제의 해는 다음과 같이 확률밀도함수로 주어진다.⁴⁾

$$p(m|y) = \frac{p(y|m) * p(m)}{p(y)} \quad (2.5)$$

$p(m|y)$ 는 사후확률밀도함수이고, $p(m)$ 은 환경인자의 분포를 나타내는 사전확률밀도함수이다. 그리고, 수치모델링결과와 실측데이터와의 관계는 $p(y|m)$ 으로서, 오차가 $g(m)$ 과 독립적이면 $p(y|m)$ 은 오차의 확률분포 $p(n)$ 을 따른다. 한편, 실측데이터 d 와 임의의 인자 m 에서의 수치모델 $g(m)$ 과의 차이를 함수 $n(m)$ 이라 할 때, 다음과 같은 유사도 함수 $L(m)$ 을 얻을 수 있다.

$$L(m) \equiv p(n|m) = p(d - g(m)) = p(y = d|m) \quad (2.6)$$

따라서 식(2.5)와 (2.6) 으로부터 다음과 같이 사후확률 밀도함수를 표현 할 수 있다.

$$p(m|y=d) = \frac{L(m) * p(m)}{p(y)} \quad (2.7)$$

본 연구는 확률론적 모델의 전단계인 확정론적 모델을 바탕으로 추정값 m^m 를 찾는 것으로 국한하였다.

2.2 유전자알고리즘을 이용한 최적화

자연계에서 개체가 환경에 적합한 형태로 진화하는 과정을 모사한 유전자알고리즘은 무작위 초기개체의 추출, 목적함수로 표현되는 적합성 부여, 도태, 교배 및 돌연변이과정을 통해 최적점을 찾는 광역최적화기법이다.

본 연구에서는 에너지의 개념인 2차원 norm을 이용하여 목적함수 Φ 를 다음과 같이 정의한다.

$$\Phi(m) = \|d - g(m)\| \quad (2.8)$$

한편 적합성을 선택 확률 p_k 의 형태로 다음과 같이 정의한다.

$$p_k = \frac{\Phi_{max} - \Phi(m_k)}{\sum_{i=1}^q [\Phi_{max} - \Phi(m_i)]} \quad k=1,2,\dots,q \quad (2.9)$$

여기서, Φ_{max} 는 각 세대에서 목적함수의 최대값을 나타내고 q 는 개체수를 의미한다.

그러나 식 (2.8)의 정의는 초기탐색이 비정상적으로 좋은 적합성을 가지는 소수의 탐색점을 중심으로 탐색이 진행되므로 초기에 극소값으로 조기수렴하는 문제와 탐색종반에는 모든 탐색점의 적합성이 균일해져 더 좋은 탐색점으로서의 발전이 어려워지는 문제점이 발생할 수 있다.

이러한 경우에는 선형조정¹¹⁾을 사용하여 적합성을 조정하였다.

유전자알고리즘에서 사용되는 연산자 중 가장 핵심이 되는 교배를 통하여 보다 적합성이 좋은 탐색점을 향해 탐색이 진행되나 탐색점이 극소점에 갇혀버리는 경우가 생기므로, 돌연변이의 연산자를 사용하여 탐색점이 극소점을 벗어날 수 있도록 한다. 이때 교배와 돌연변이는 주어진 발생확률에 의해 발생빈도가 결정된다. 너무 잦은 돌연변이는 탐색의 수렴을 방해하게 되고 반대의 경우는 다양한 탐색점에 대한 탐색이 어려울 수 있다. 한편 교배 확률은 독립변수인 경우 확률 1이 좋고 종속변수인 경우 약 0.8의 확률이 좋은 것으로 알려져 있다. 본 연구에서 변수는 종속적이므로 교배확률은 0.8을 사용하였고, 다양한 탐색을 위해 약간 높은 돌연변이확률인 0.05를 사용하였다.

2.3 광대역신호의 수치모델링

음향탐사방법은 조사목적에 따라 특정한 주파수대역을 갖는 음파를 사용하여 해저정밀지형, 해저면의 형태 그리고 해저지층구조 등을 파악할 수 있다. 최근 들어 천부지층탐사분야에서 수 KHz대의 대역폭을 가진 다중주파수음원을 사용한 Chirp sonar system과 같은 해저지층 탐사장비가 많이 사용되고 있다. Chirp sonar는 시간에 따라 주파수가 증가하는 swept signal을 음원으로 사용하는데, 적은 에너지로 투과심도를 깊게 할 수 있고 퇴적층의 심도에 관계없이 일정한 분해능을 유지할 수 있다. 또한 수신신호의 자료처리 과정을 통하여 신호대 잡음비의 향상과 더불어 인접한 반사이벤트들을 압축시켜 더욱 정밀한 퇴적층간 구별이 가능하다.¹¹⁾

식(2.3)의 모델에서 데이터변수로서의 실측신호는 시간영역에서 음압의 변동으로 주어지는 Chirp신호를 실측 데이터로 사용하였으며 이의 수치모델은 층매질에서 적용이 용이한 파수적분법을 사용하였다.¹¹⁾

수직방향의 z축이 음원을 지나고 방위각에 독립적인 원통좌표계 {r, θ, z}를 도입하면 음장은 다음의 선형 파동방정식을 만족하는 스칼라함수, ϕ(r, z, t)로 표현된다.

$$\left(\nabla^2 - \frac{1}{c(z)^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2}\right)\phi(r, z, t) = F_s(r, z, t) \tag{2.10}$$

여기서 c(z)는 음속이고 우변은 음원에 의한 교란을 나타낸다.

식 (2.10)에 Fourier 변환을 적용하면 다음의 주파수영역파동방정식이 얻어진다.

$$(\nabla^2 + k_m^2(z))G(r, z, \omega) = f_s(r, z, \omega) \tag{2.11}$$

여기서 ϕ는 각주파수이고, k_m(z)는 매질의 파수이다.

$$k_m(z) = \frac{\omega}{c(z)} \tag{2.12}$$

음원의 위치를 r=0로 취하면 식(2.11)의 음원에 의한 교란항은 다음의 우변과 같이 표현된다.

$$(\nabla^2 + k_m^2(z))G(r, z, \omega) = \frac{f_s(z, \omega)\delta(r)}{2\pi r} \tag{2.13}$$

식 (2.13)에 수평파수 k로 Hankel 변환을 적용하면, 깊이종속파동방정식인 다음의 상미분방정식을 얻는다.

$$\left(\frac{d^2}{dz^2} - (k^2 - k_m^2(z))\right)g(k, z) = \frac{f_s(z)}{2\pi} \tag{2.14}$$

깊이종속그린함수 g(k, z)의 해를 경계조건을 이용하여 구한 후 역 Hankel 변환에 의하여 주파수영역의 해 G(r, z)를 구할 수 있다.

$$G(r, z) = \int_0^\infty g(k, z)J_m(kr)kdk \tag{2.15}$$

마지막 단계로 시간영역에서의 해를 구하기 위하여 Fourier 역변환적분을 수행한다.

$$\Phi(r, z, t) = \int_{-\infty}^{\infty} G(r, z, \omega)e^{i\omega t}d\omega \tag{2.16}$$

위의 적분은 다음과 같이 수치적으로 FFT로 구한다.

$$\Phi(r, z, t) \approx \Delta\omega e^{i\omega_{min}t} \sum_{m=0}^{N-1} [G(r, z, \omega_m) e^{i\omega_{min}m\Delta\omega}] e^{i(2\pi m t / N)} \tag{2.17}$$

$$t_j = t_{min} + j\Delta t, \quad j = 0, 1, \dots, (N-1) \tag{2.18}$$

$$\omega_m = \omega_{min} + m\Delta\omega, \quad m = 0, 1, \dots, (N-1) \tag{2.19}$$

$$\Delta\omega\Delta t = 2\pi / N \tag{2.20}$$

광대역주파수의 신호인 경우 시간영역 해석은 식 (2.15)와 (2.16)의 적분을 수행해야 하므로 유전자알고리즘과 같이 반복계산을 통한 전역최적화방법과의 결합은 많은 계산량으로 인하여 실행가능하지 않다. 그러나 식 (2.15)의 적분구간 중 유용한 구간만을 이용하여 적분을 수행하면 적분에 사용되는 시간을 크게 단축시킬 수 있다.

Chirp sonar system을 이용한 데이터 실측시 음원으로부터 신호는 거의 수직적으로 입사되고 반사된 신호 또한 수평전파거리가 깊이에 비해 상당히 짧은 신호만이 계속

된다. 이러한 경우 유효한 수평파수 δk 까지만 포함하면 실제 포착된 신호결과와 같은 신호를 얻을 수 있다. 이는 근거리장에서 연속스펙트럼성분이 우세하므로 그 성분이 전체구간을 대신할 수 있는 것과 같다.

따라서 식 (2.15)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G(r, z) \cong \int_0^{\delta k} g(k, z) J_m(kr) k dk \quad (2.21)$$

이때 δk 값은 충분히 작은 값으로서 모델링에 소요되는 CPU시간은 수초이내가 되므로 반복계산이 가능하게 된다.

III. 모의 결과

본 연구에서는 광대역의 직접적인 시간영역신호를 이용한 매질의 역산방법으로 부분파수적분법을 이용한 수치모델링과 유전자알고리즘을 이용한 광역최적화기법의 결합을 시도하였다. 제시된 방법의 타당성을 검증하기 위하여 우선 부분파수적분법을 통한 Chirp신호를 재현하여 그 결과를 분석하고, Chirp신호의 직접적인 역산결과를 검토하였다.

3.1 부분파수적분법을 이용한 모델링

음원은 2KHz부터 10KHz까지의 주파수대역을 갖는 광대역 Chirp신호로서 해수면으로부터 반사된 신호는 포착되지 않으므로 물의 매질을 무한반경으로 모델링하여 제거하였다. 한편 실제 Chirp sonar system에서 반사신호 획득시 음원과 청음기는 같은 깊이에 위치하나 본 모델링에서는 음파의 전달속도와 해저지층의 반사계수를 이용한 간단한 계산을 통하여 음파의 도달시간과 음압의 크기를 예상하고 이를 모델링 결과와 비교하기 위해 편의상 음원의 위치는 해저면으로부터 100m위에 위치하고 청음기는 50m위에 위치하도록 배치하였다. 모델링에 사용된 환경 모델은 표 3.1과 같다.

표 3.1 환경모델

Medium	Lower interface (m)	Speed (c_p) (m/s)	Attenuation (α_p) (dB/λ)	Density (ρ) (kg/m^3)
Water	0	1500	0	1000
Sediment I	50	1600	0.1	1600
Basement	x	1800	0.1	2000

위의 환경에 따라 모의된 음파를 이론적으로 살펴보면 신호는 크게 세 부분으로 나눌 수 있다. 첫째는 음원으로부터 직접 전달된 신호, 둘째는 첫번째 지층으로부터 반사된 신호이며 마지막은 최하부층으로부터 반사된 신호

가 된다. 이 외에도 다중반사파가 존재하나 신호가 크게 감쇠되어 고려의 대상이 안 된다.

그림 3.1(a)는 해저지층에서의 감쇠를 고려하지 않은 모델링을 통해 획득한 반사신호이고 3.1(b)는 해저지층에서의 감쇠를 포함한 모델링의 반사 신호이다. 감쇠의 존재 유무에 따른 결과를 비교해 보면 최하부층에서 반사된 신호는 첫번째 지층을 통과 하면서 많이 감쇠되었음을 알 수 있다.

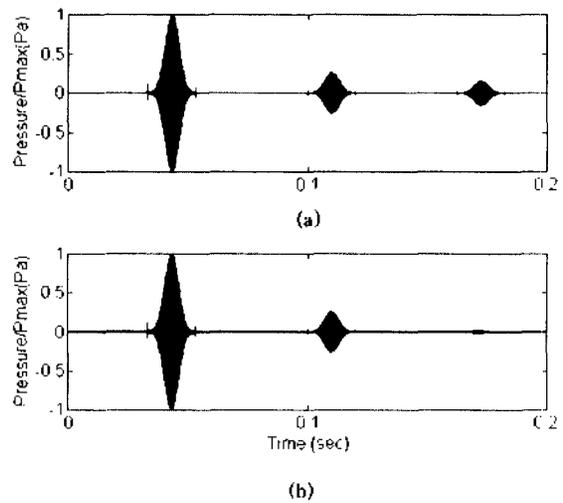


그림 3.1 반사 신호

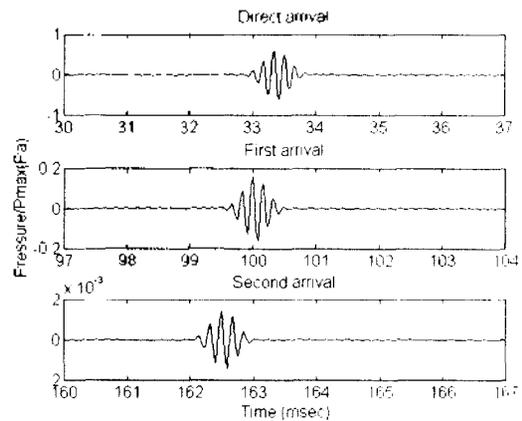


그림 3.2 신호 처리 후 신호

실제 Chirp sonar system에서 획득된 그림 3.1과 같은 유형의 반사신호는 correlation을 이용한 신호처리로 신호대 잡음비와 해상도를 동시에 높인다. 감쇠가 있는 경우 그림 3.1(b)의 반사신호를 신호처리 한 후의 결과를 그림 3.2에 나타냈다. 신호처리전의 반사신호는 펄스의 대역폭이 20ms인 것에 비해 그림 3.2의 신호는 대역폭이 1ms로 압축되어 신호처리후의 분해능이 향상되었음을 확인할 수 있다.

표 3.2에는 가파학적인 고려와 평면파에 대한 반사계수 계산을 통한 신호의 도달시간 및 정규화된 압력을 모델링

결과와 비교하였다. 표 3.2로부터 이론결과와 모델링결과가 일치하는 것을 확인할 수 있다.

이상의 결과로부터 본 연구에서 제시한 부분파수적분법을 이용한 방법이 거의 수직적으로 진행되는 광대역의 신호를 수치적으로 모델링하는데 적합하다는 결론을 얻을 수 있다.

표 3.2 계산 결과와 모델링 결과의 비교

			Direct arrival	First reflection	Second reflection
$\alpha_p = 0$ (dB/λ)	Arrival time (sec)	Theory	0.0333	0.1	0.1625
		Modeling	0.0333	0.1	0.1625
	Normalized max pressure	Theory	1	0.261	0.157
		Modeling	1	0.262	0.157
$\alpha_p = 0.1$ (dB/λ)	Arrival time (sec)	Theory	0.0333	0.1	0.1625
		Modeling	0.0333	0.1	0.1625
	Normalized max pressure	Theory	1	0.261	0.001*
		Modeling	1	0.262	0.001

* 값은 중심 주파수 6KHz에 대한 계산 결과임

3.2 유전자알고리즘을 이용한 역산결과

유전자알고리즘과 부분파수적분법을 사용하여 다음의 세가지 경우에 대하여 역산을 실시하였다.

(실험A) 3층 c_p 역산

이 실험은 가장 간단한 실험으로 감쇠계수 및 전단파 속도(c_s)는 없다는 가정하에 압축파 속도(c_p)를 제외한 모든 특성치는 알려져 있는 것으로 하여 각 층의 c_p 를 추정해 내는 실험이다. 이때 변수 c_p 는 1500(m/sec)부터 3100(m/sec)까지 모두 256등분의 값을 가질 수 있다. 물 밑으로 세 개의 지층이 있는 표 3.3과 같은 환경에서 부분파수적분법을 이용해 반사신호를 모의한 후 이를 계속신호로 하였다. 이때 음원과 청음기의 위치는 모두 첫번째 해저면으로 하였다. 실제 Chirp sonar system의 경우 해수면에서 반사된 반사파는 차단막에 의해 차단이 되므로 모델링시에는 물을 무한반경으로 처리하였다. 따라서 실측 신호는 해저면에서 반사된 신호만을 포함하게 된다.

표 3.3. 실험 A의 환경

Medium	Lower interface (m)	Speed (m/s)	Attenuation (dB/λ)	Density (kg·m ⁻³)
Water	0	1500	0	1000
Sediment 1	20	1600	0	1600
Sediment 2	40	1800	0	2000
Basement	∞	2800	0	2200

본 실험에서의 유전자알고리즘의 교배 확률과 돌연변이 확률은 각각 0.8과 0.05이다. 한편 개체수는 100이고 반복횟수는 100회로 하였다. 역산결과인 m^m 은 표 3.4에 나타내었으며 그 결과는 실제환경과 거의 일치한다.

표 3.4. 실험 A의 m^m

Medium	Estimated speed (m/s)
Sediment 1	1594
Sediment 2	1806
Basement	2801

(실험B) 5층 c_p 역산

실험 A와 같은 환경에서 데이터를 실측하고 역추정시 지층1과 지층2를 4개의 층으로 가정하여 실제 퇴적층의 개수를 모르는 경우의 역산결과를 알아보았다.

본 실험에서의 교배 확률과 돌연변이 확률 그리고 개체수는 실험 A와 동일하다. 실험 결과는 표 3.5에 나타내었고 변수 c_p 는 1500(m/sec)에서 3100(m/sec)까지 모두 256가지의 값을 가질 수 있다.

표 3.5. 실험 B의 m^m

Medium	Lower interface (m)	Estimated speed (m/s)
Sediment 1	10	1602
	20	1609
Sediment 2	30	1832
	40	1757
Basement	∞	2530

역산결과는 첫째 층의 역산이 가장 정확하고 아래로 진행하며 역산결과가 나빠졌다. 이는 계속신호에 첫째 층에 대한 정보가 가장 많이 내포되어 있고 깊이 내려갈수록 층에 대한 정보가 상실되기 때문인 것으로 판단된다.

(실험C) 3층 c_p 와 d_p 역산

이 실험에서는 압축파에 대한 감쇠계수 d_p 까지 포함해서 계속신호를 모델링하였고, 각 층의 깊이와 압축파 속도, 감쇠계수를 역추정하였다.

한편 Chirp sonar에서 발생된 음파는 음파의 전파경로가 거의 수직이므로 전단파로의 연성이 일어나지 않아 이에 대한 정보를 추출하기는 힘들다. 실제로 전단파 성분을 포함하여 모델링을 한 결과와 포함하지 않은 결과와의 차이가 거의 없음을 알 수 있었다.

실험 환경은 표 3.6과 같으며 사용된 유전자알고리즘의 인자는 실험 B와 동일하다.

표 3.6. 실험 C의 환경

Medium	Lower interface (m)	Speed (m/s)	Attenuation (dB/λ)	Density (kg·m ⁻³)
Water	0	1500	0.0	1000
Sediment 1	20	1600	0.1	1600
Sediment 2	40	1800	0.1	2000
Basement	∞	2800	0.1	2200

역산결과는 표 3.7과 같다. 실험 B에서 나타난 계측 신호에 하부지층에 대한 정보가 현격히 감소하여 하부지층의 역산결과가 나빠지는 현상을 개선하기 위해 하부지층의 반사신호를 상부지층의 반사신호와 같은 크기로 정규화하였다. 결과를 보면 둘째 층의 역산결과가 향상되었음을 확인할 수 있다.

표 3.7. 실험 C의 m^m

Medium	Estimated lower interface (m)	Estimated speed (m/s)	Estimated attenuation (dB/λ)
Sediment 1	19.6	1570	0.11
Sediment 2	39.5	1789	0.10
Basement	∞	3050	

이상의 모의결과로 미루어 볼 때 본 역산기법에서 중요한 요소는 최적화 과정에 있다는 것을 알 수 있으며 최적화 과정에서 찾아낸 최적점이 얼마나 신뢰성이 있는냐에 따라 전체 결과의 신뢰성이 달라진다. 유전자알고리즘을 이용한 최적화 기법은 최적점을 임의 탐색과정을 거쳐 찾아내게 되므로 최적점을 찾을 수 있는 확률이 반드시 1이 되는 것은 아니다. 이러한 문제는 확률론적인 해를 구하므로 해결될 수 있다. 또한 현실적인 문제로 계측오차와 모델의 오차를 고려해야 하므로 확률론적 모델의 도입은 필수적이다.

IV. 결 론

본 연구에서는 다수의 극소점이 존재하는 해저퇴적층 역산문제에 파수적분법을 응용하여 광대역주파수신호의 시간영역모의에 소요되는 시간을 단축시킨 수치모델링과 광역최적화기법인 유전자알고리즘을 적용하여 퇴적층의 깊이, 음속, 감쇠계수 등에 대한 역산을 수행하여 역산값을 구하고 실제값과 비교하였다. 본 연구에서 사용된 모델은 데이터실측시의 잡음이나 오차 그리고 수치 모델링의 오차는 고려하지 않은 확정론적 모델이므로 실제의 경우에 적용하기 위해서는 확정론적 모델을 확장한 확률론적 역산이 이루어져야 한다.

참 고 문 헌

1. K. Aki and P. Richards, *Quantitative Seismology Vol.2, Chap.12* (Freeman and Company, S.F.,1980).
 2. P. Gerstoft, "Inversion of seismoacoustic data using genetic algorithms and a posteriori probability distributions," *J. Acoust. Soc. Am.* 95, 770-782 (1994).
 3. M. D. Collins, W. A. Kupperman, and H. Schmidt,

"Nonlinear inversion for ocean-bottom properties," *J. Acoust. Soc. Am.* 92, 2770-2783 (1992).
 4. J. A. Scales, M. L. Smith, and T. L. Fisher, "Global optimization methods for multimodal inverse problems," *J. Comput. Phys.* 103, 258-268 (1992).
 5. P. L. Stoffa and M. K. Sen, "Nonlinear multiparameter optimization using genetic algorithms : Inversion of plane-wave seismograms," *Geophysics* 56, 1794-1810 (1991).
 6. S. G. Shock, L. LeBlanc, and L. Mayer, "Chirp subbottom profiler for quantitative sediment analysis," *Geophysics* 54(4), 445-450 (1989).
 7. N. Metropolis, A. W. Rosenbluth, M. N. Rosenbluth, A. H. Teller, and E. Teller, "Equation of states done by fast computing machines," *J. Chem. Phys.* 1,1087-1092 (1953).
 8. D. E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning* (Addison-Wesley, Reading, MA, 1987).
 9. Y. Bard, *Nonlinear Parameter Estimation*, (Academic Press, San Diego, 1974).
 10. A. J. W. Duijndam, "Bayesian estimation in seismic inversion. Part 1: Principles," *Geophy. Prospect.* 36, 878-898 (1988).
 11. 주형태 등, "퇴적분지 및 해저지형 해석을 위한 탄성파 및 음향자료의 분석기법 연구," 한국해양연구소 과제 보고서, BSPE 97621-00-1046-5 (1997).
 12. H. Schmidt, "SAFARI: Seismo-acoustic fast field algorithm for range independent environment. User's guide," SR-113, SAACLANT Undersea Research Centre, La Spezia, Italy (1987).

▲박철수(Cheol Soo Park)



1997년 2월 : 서울대학교 조선해양공학과 졸업(공학사)
 현재 : 서울대학교 대학원 조선해양공학과 재학중
 주관심분야 : 수중음향 모델링, 수중음향 원격 탐사

▲성우제(Woo Jae Seong)

현재:서울대학교 조선해양공학과 조교수
 1994년 제 13권 2E호 참조