

파형역산 기법을 이용한 수중표적 탐지 연구

A Study on the Underwater Target Detection Using the Waveform Inversion Technique

배호석,[†] 김원기, 김우식, 최상문

(Ho Seuk Bae,[†] Won-Ki Kim, Woo Shik Kim, and Sang Moon Choi)

국방과학연구소

(Received September 23, 2015; accepted October 1, 2015)

초 록: 중주파수 및 고주파수 대역을 이용한 근거리 수중표적 탐지와 식별 기술은 이미 성숙단계에 있으나, 수중 위협세력의 은닉화 및 고속화에 따른 저주파수 대역을 이용한 원거리 탐지 요구가 새롭게 대두되고 있다. 본 논문에서 소개할 파형역산 기술은 최근 국내외 석유탐사 관련 학계 및 업계에서 매우 각광받는 최신 기술로, 저주파수 대역을 이용하여 해저 수 킬로미터 이상의 해저 지층을 고해상도로 구축하는 수치해석 기법이다. 이러한 파형역산 기술을 응용하여 작전 해역에서의 해저지층을 영상화하는 동시에, 수중에 위치하는 인공표적의 탐지 가능성을 확인하였다. 본 제안 기술은 인공표적의 형상뿐만 아니라 음파속도 등의 물성정보를 정확하게 추정할 수 있기 때문에 오탐지 확률을 획기적으로 줄일 수 있으리라 기대된다.

핵심용어: 파형역산, 표적탐지, 저주파 탐지, 모델변수 추정

ABSTRACT: A short-range underwater target detection and identification techniques using mid- and high-frequency bands have been highly developed. However, nowadays the long-range detection using the low-frequency band is requested and one of the most challengeable issues. The waveform inversion technique is widely used and the hottest technology in both academia and industry of the seismic exploration. It is based on the numerical analysis tool, and could construct more than a few kilometers of the subsurface structures and model-parameters such as P-wave velocity using a low-frequency band. By applying this technique to the underwater acoustic circumstance, firstly application of underwater target detection is verified. Furthermore, subsurface structures and its parameters of the war-field are well reconstructed. We can confirm that this technique greatly reduces the false-alarm rate for the underwater targets because it could accurately reproduce both the shape and the model-parameters at the same time.

Keywords: Waveform inversion, Target detection, Low-frequency detection, Model-parameter estimation

PACS numbers: 43.30.Pc, 43.30.Vh

1. 서 론

한국 해군 및 관련 기관에서는 수중에서 운용되는 잠수함, 기뢰 등 위협 세력을 사전에 탐지하기 위하여 수중표적탐지 기술 개발을 활발히 수행하였다. 특히, 수 킬로미터 이하의 중거리에서는 인공표적을 명확히 탐지할 수 있을 뿐만 아니라 수백 미터 이하

의 근거리에서는 인공표적을 식별할 수 있을 정도로 수중표적 탐지 기술은 이미 성숙단계로 발전하였다. 그러나 수중표적탐지기술 발전과 동시에, 위협 세력의 은닉기술 또한 심화되고 있으며,^[1-2] 초공동 기술을 이용한 고속화 개발에 박차를 가하고 있어,^[3-4] 순식간에 아군 세력에 치명적인 위협을 가하는 것이 현실이다. 따라서 광역탐지 및 수 킬로미터 이상의 원거리 수중표적 탐지에 대한 기술 요구가 대두되고 있다.

미국 등 선진국에서는 저주파수의 소음원을 이용

[†]Corresponding author: Ho Seuk Bae (belfre@add.re.kr)
Jinhae P.O.Box 18, Jinhae-gu, Changwon 51678, Republic of Korea

(Tel: 82-55-540-6137, Fax: 82-55-542-3737)

“이 논문은 2015년 한국음향학회 수중음향학 학술발표회에서 발표하였던 논문임.”

하여 수백 킬로미터 이상의 원거리에서의 수중표적을 탐지, 식별한 사례도 있으며, 저주파수 대역을 이용한 다양한 탐지기술을 연구하고 있다.^[5] 그러나 국내에서는 아직 연구개발 초기단계에 불과한 실정이다.

본 논문에서 소개할 파형역산 기법은 저주파수 대역을 이용한 탐지 기법 중 하나로써, 석유탐사 분야에서 시추위치를 선정하기 위해 고해상도로 지층구조를 구축하는 최신 기술이다.^[6-7] 파형역산 기법은 수학적 최적화 기법에 기반을 둔 완전자동화공정이 가능한 수치해석 기법으로, 해저 수 킬로미터 이상의 해저지층구조의 형상뿐만 아니라 음파 전달속도, 밀도, 라메상수(Lame's parameters) 등 지층의 물성정보를 동시에 추정할 수 있는 장점이 있다. 이러한 파형역산 기법은 1980년대부터 많은 지구물리학자 및 응용물리학자들에 의하여 다양한 알고리즘으로 개

발되었으며,^[6] 최근 컴퓨팅 환경의 발달에 힘입어 지금까지의 치명적인 단점이었던 계산비용의 한계 또한 극복하고 있는 상황이다.

본 논문에서는 인공표적의 형상뿐만 아니라 표적의 물성정보 추정이 가능한 파형역산 기법을 이용하여, Fig. 1과 같이 수중에 위치하는 인공표적 탐지 가능성을 판단하고자 한다. 먼저 해저 층의 형상을 알고 있는 단순 2층 모델을 이용하여 인공표적의 탐지 가능성을 판단하고, 해저 층의 형상을 사전에 모르는 복잡한 대륙붕 모델을 이용하여 실제와 유사한 전장 환경에서의 수중표적 탐지가능성을 분석하고자 한다.

II. 파형역산 기법

파형역산 기법은 최근 탄성과 탐사 분야 중 가장 활발한 연구가 진행되는 연구주제 중 하나로서, 수학적 최소화 기법을 바탕으로 완전 자동화 공정으로 지하의 지층구조를 구축할 수 있는 방법이다. 파형역산 기법은 1984년 Tarantola^[7]에 의해 역전파 기법이 제안되고, 대규모 컴퓨팅 환경의 비약적인 발전으로 인해 최근 탄성과 탐사분야뿐만 아니라 공학 분야에도 적용되고 있다.^[8] Fig. 2는 영국의 세계적 석유화학기업인 BP사에서 제안한 벤치마크 모델을 기반으로 Shin과 Cha^[9]가 파형역산을 수행한 결과로, 매우 복잡하고 어려운 해저지형에서도 우수한 역산 결과를 도출할 수 있음을 알 수 있다.

파형역산 기법은 Fig. 3에서와 같이 몇 단계의 공

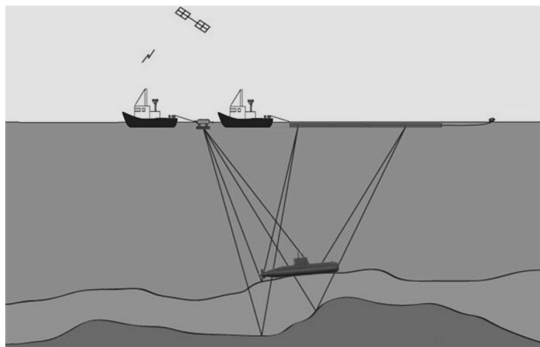


Fig. 1. The concept of the detection technique using the waveform inversion.

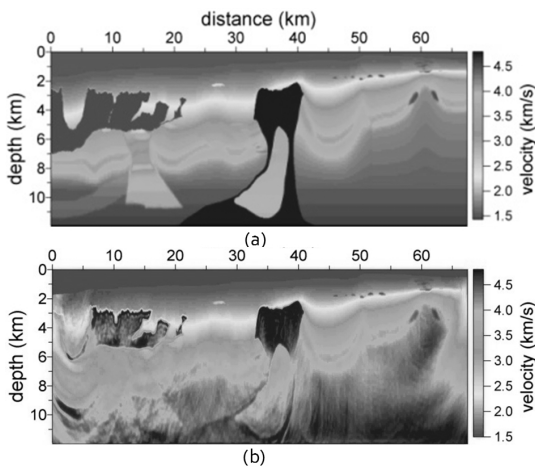


Fig. 2. Waveform inversion examples: (a) true velocity model and (b) inverted result (image courtesy Shin and Cha^[9]).

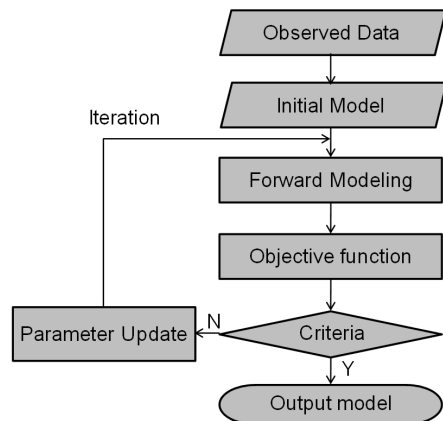


Fig. 3. Work flow of the waveform inversion.

정으로 분리하여 진행할 수 있다. 첫 단계는 관측자료 획득 단계로, 관심지역에서 저주파 송신원을 이용하여 신호를 인가하고, 선배열 수신기를 이용하여 탄성과 파동장을 반복하여 측정하는 단계이다. 다음 단계는 모델자료 생성 단계로, 관측지역과 동일한 크기의 임의 초기물성정보를 가정하고, 탄성과 거동을 모델링하여 관측자료와 동일한 수신위치에서의 파동장을 모의하는 단계이다. 파동장 모델링은 매우 중요한 부분 중 하나로, 음파의 물리적인 전달 거동을 정밀하게 모사하기 위하여 탄성과 파동방정식에 기반한 수치해석기법을 사용하는데, 본 연구에서는 Graves^[10]에 의해 제안된 엇격자 유한차분법(staggered-grid finite difference method)을 사용하였다. 모델자료를 생성한 후에는 목적함수를 정의하고 모델자료와 관측자료의 차이를 측정한다. 일반적으로 최소자승법에 기반한 *l2-norm*을 이용하지만, 현장자료의 특성 및 잡음의 영향을 고려하여, *l1-norm*, *Hybrid-norm*, *log-norm* 등 다양한 목적함수를 사용할 수 있다.^[11] 목적함수를 정의한 이후에는 목적함수가 최소가 될 수 있도록 경사방향을 계산하고 그 경사 방향의 정확성을 향상시킬 수 있도록 헤시안 행렬을 이용하여 정규화를 수행한다. 본 연구에서는 계산의 효율성을 높이기 위해서 일반적으로 널리 사용되는 방법 중 하나인 유사 헤시안 방법을 적용하였다.^[12] 이렇게 계산된 경사방향을 이용하여 앞에서 가정한 속도모델을 반복적으로 갱신하는데, 목적함수가 특정 임계값보다 작아지면 프로세스를 종료하고 그때 갱신된 지하물성정보를 최종 역산결과로 결정하게 된다.

파형역산 기법은 수행자의 주관적 판단이 개입되지 않고 완전 자동화 공정이 될 수 있다는 장점이 있지만, 국소 최소값 문제로 인해 저주파수 대역에만 적합하며, 고비용 및 시간을 필요로 하는 등 한계점을 가진다. 이러한 어려운 문제에도 불구하고, 단점을 해결하기 위한 새로운 역산 기법들이 제시되고 있으며,^[9] 활용성 또한 증대되고 있다.

III. 표적탐지 시뮬레이션

파형역산 기법을 이용한 수중표적 탐지 가능성을 검증하기 위하여 Table 1과 같이 총 4개의 시험세트

Table 1. The simulation cases for detecting a target.

Test Set	Subsurface Model	Target
CASE 1	2-layer model	bottoming
CASE 2	2-layer model	floating
CASE 3	continental shelf model	bottoming
CASE 4	continental shelf model	floating

Table 2. The parameters of CASE 1 and CASE 2.

Parameters	Information
Field Size	600 m × 300 m (grid size of 2 m)
Target Size	20 m × 6 m (velocity of 4.5 km/s)
Projector	70 times (shifting interval of 8 m)
Receiver	Line array with 300 elements
Source Wavelet	< 150 Hz (First derivative of Gaussian)
Modeling Method	Staggered Grid Finite Differences
Domain	Time domain
Objective Function	<i>l2-norm</i>
Iteration	200 times

를 구성하였으며, 해저환경을 사전에 알고 있는 단순한 2층 모델 환경과 사전정보가 전무한 매우 복잡한 대륙붕 모델 환경으로 구분하여 표적탐지 시뮬레이션을 수행하였다.

먼저, CASE 1 및 CASE 2의 시뮬레이션은 해저면의 형상 및 물성정보를 사전에 알고 있다고 가정한 경우로, 단순한 2층 모델을 관심 전장환경으로 가정하였다. 전장의 크기는 600 m × 300 m의 2차원 모델로 가정하였으며, 인공표적은 20 m × 6 m의 크기인 음파 전달속도를 4.5 km/s로 정의하였다. 시뮬레이션을 위해 1개의 송신센서를 8m 씩 이동시켜가며 총 70회 송신시켰으며, 최대주파수가 150 Hz인 1차 미분 가우스 함수 신호를 인가하였다. 수신센서는 300개의 요소를 가지는 선배열을 가정하였으며 해수면에 위치시켰다.

파동전파 모델링 방법은 앞 절에서 설명한 엇격자 유한차분법을 이용하여 시간영역에서 수행하였으며, 측정신호와 모의신호와의 잔차를 최소화하기 위해 *l2-norm*에 대한 목적함수를 정의하여 시뮬레이션하였다. 시뮬레이션 세부조건은 Table 2에 정리하였다.

Fig. 4는 CASE 1과 CASE 2의 (a, b) 실제 속도모델, (c, d) 초기 속도모델 및 역산을 수행한 (e, f) 50번째와 (g, h) 200번째 속도모델을 각각 보여준다. 역산결과

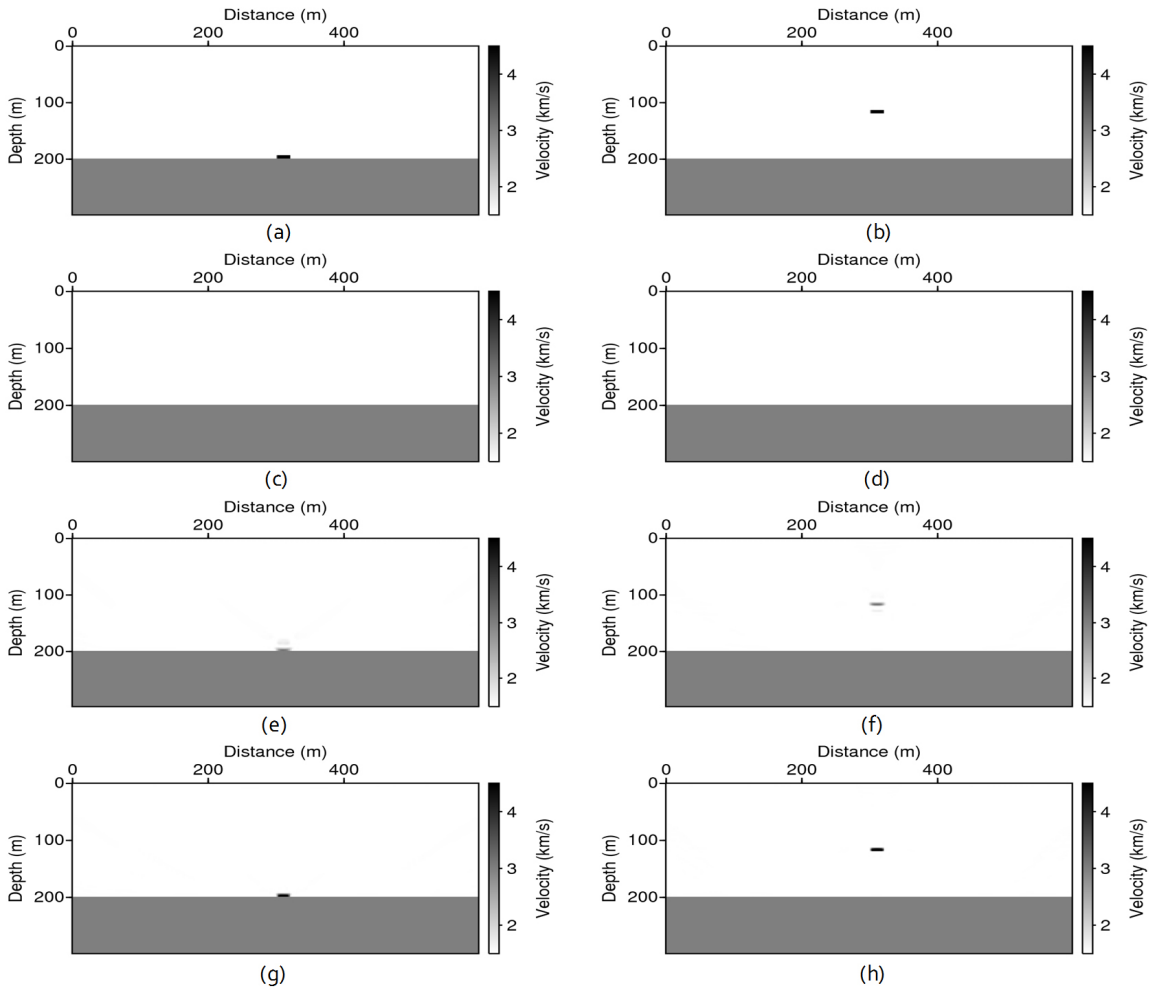


Fig. 4. The simulation results of CASE 1 and CASE 2 : (a, b) True, (c, d) initial, (e, f) 50th inverted and (g, h) 200th inverted models.

에서 알 수 있듯이, 인공표적의 형상뿐만 아니라 음파 전달 속도인 물성정보까지도 매우 정확하게 계산할 수 있었으며, 인공표적의 위치에 무관하게 매우 강인한 역산 결과를 나타내었다.

실제와 같은 전장 환경을 정밀하게 모사하기 위하여 복잡한 해저지층 형상을 가지는 대륙붕 모델을 가정하여 반복하여 시뮬레이션을 수행하였다. CASE 3과 CASE 4는 사전에 해저지층의 정보가 없는 조건을 가정하였으며, 실제 속도모델을 평활화 처리한 초기 속도모델을 이용하였다. 본 시뮬레이션의 세부 조건은 Table 3과 같다.

Fig. 5는 CASE 3과 CASE 4의 (a, b) 실제 속도모델, (c, d) 초기 속도모델 및 역산을 수행한 (e, f) 50번째와 (g, h) 200번째 속도모델을 각각 보여준다. 역산 반복

Table 3. The parameters of CASE 3 and CASE 4.

Parameters	Information
Field Size	1,100 m × 354 m (grid size of 2 m)
Target Size	20 m × 6 m (velocity of 4.5 km/s)
Projector	530 times (shifting interval of 2m)
Receiver	Line array with 550 elements
Source Wavelet	< 150 Hz (First derivative of Gaussian)
Modeling Method	Staggered Grid Finite Differences
Domain	Time domain
Objective Function	l2-norm
Iteration	200 times

회수가 증가될수록 해저지층 및 인공표적의 형상이 명확해지는 것을 관찰할 수 있으며, 음파 전달속도인 물성정보 역시 실제속도 모델 값에 근사해지는

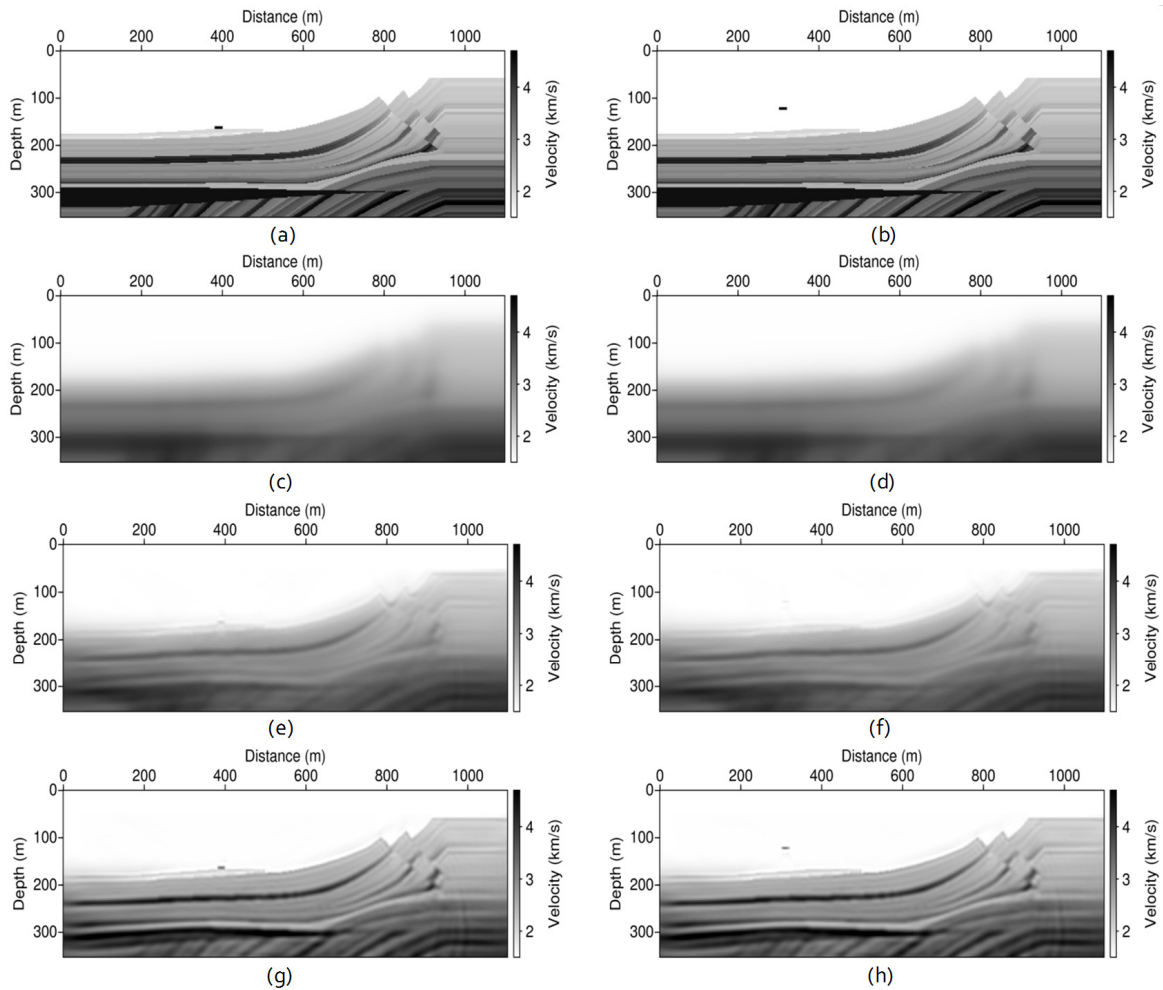


Fig. 5. The simulation results of CASE 3 and CASE 4: (a, b) True, (c, d) initial, (e, f) 50th inverted and (g, h) 200th inverted models.

것을 확인할 수 있다. 또한, 인공표적이 해저면이나 수중에 위치하는 것과 무관하게 항상 인공표적의 탐지가 가능한 것을 알 수 있다.

이와 같이 4가지 상황에 대한 예제를 통해, 저주파 수대역을 이용한 파형역산 기법은 해저지층 형상뿐만 아니라 인공표적을 탐지할 수 있으리라 추론할 수 있으며, 물성정보 또한 역산 가능하기에 주변 이상체와는 명확히 구분 가능할 것으로 기대된다.

IV. 결 론

최근 수중감시 및 탐지분야에서는 광역 및 원거리 탐지를 위해 저주파수대역을 이용한 탐지기술 개발이 요구되고 있으며, 본 연구에서는 저주파수를 사

용하는 탄성과 탐사의 최신 연구기법을 수중표적 탐지 기술에 적용하였다.

실제 전장 환경과 유사한 대륙붕 모델에서도 인공 표적의 형상뿐만 아니라 물성정보를 정확히 추정할 수 있었으며, 추가적으로 해저지층의 형상까지 정밀하게 구축하는 등 수중환경에 대한 정확한 분석이 가능해짐을 알 수 있었다. 그러나 제안 기술은 원거리 송신을 위한 큰 규모의 음원장치가 필요하며, 계산시간이 적지않게 소요되는 현실적인 문제점이 있지만, 저주파 센서 개발기술의 빠른 발전 속도, 그래픽 기반 라이브러리인 CUDA(Compute Unified Device Architecture) 프로그래밍 및 FPGA(Field-Programmable Gate Array)를 이용한 고속병렬 알고리즘 개발 속도를 가늠해본다면, 본 기법의 활용성은 더욱 증대되

리라 기대된다.

References

1. R. P. Haffa Jr and J. H. Patton Jr, "Analogues of Stealth," Northrop Grumman Corp., Analysis Center Papers, 2002.
2. Y. S. Seo, I. B. Ham, and W. J. Jung, "A Study on the Echo Reduction Performance of Underwater Acoustic Material" (in Korean), Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng. **24**, 868-875 (2014).
3. B. K. Ahn, S. W. Jung, J. H. Kim, Y. R. Jung, and S. B. Kim, "Experimental Study on Artificial Supercavitation of the High Speed Torpedo" (in Korean), J. KIMST **18**, 300-308 (2015).
4. K. W. Ng, "Overview of the ONR Supercavitating High-Speed Bodies Program," in Collection of Tech. Papers of AIAA GNC Conference and Exhibit, 3088-3091 (2006).
5. J. Y. Hwang and J. H. Kim, *Modern Navy Surface Ship* (Military Study, Seoul, 2007), pp.1-384.
6. J. Virieux and S. Operto, "An Overview of Full-Waveform Inversion in Exploration Geophysics" Geophys. **74**, WCC1-WCC26 (2009).
7. A. Tarantola, "Inversion of Seismic Reflection Data in the Acoustic Approximation," Geophys. **49**, 1259-1266 (1984).
8. Y. J. Choi, S. R. Shin, J. H. Ha, W. Chung, and W. S. Kim, "Velocity Model Building using Waveform Inversion from Single Channel Engineering Seismic Survey" (in Korean), Geophysics and Geophysical Exploration **17**, 231-241 (2014).
9. C. Shin and Y. H. Cha, "Waveform Inversion in the Laplace-Fourier Domain," Geophys. J. Int. **177**, 1067-1079 (2009).
10. R. W. Graves, "Simulating Seismic Wave Propagation in 3D Elastic Media Using Staggered-Grid Finite Differences," Bull. Seismol. Soc. Am. **86**, 1091-1106 (1996).
11. T. Ha, W. Chung, and C. Shin, "Waveform Inversion Using a Back-Propagation Algorithm and a Huber Function Norm," Geophys. **74**, R15-R24 (2009).
12. C. Shin, S. Jang, and D. J. Min, "Improved Amplitude Preservation for Prestack Depth Migration by Inverse Scattering Theory," Geophys. Prosp. **49**, 592-606 (2001).

저자 약력

▶ 배 호 석 (Ho Seuk Bae)



2007년 2월: 서울대학교 지구환경시스템
공학부 공학사
2011년 2월: 서울대학교 에너지시스템
공학부 공학박사
2011년 ~ 현재: 국방과학연구소 선임연구원
<관심분야> 수중음향, 탄성파 탐사

▶ 김 원 기 (Won-Ki Kim)



2007년 2월: 충북대학교 지구환경과학부
이학사
2009년 2월: 충북대학교 지질학과 이학
석사
2014년 8월: 서울대학교 에너지시스템공
학부 공학박사
2015년 ~ 현재: 국방과학연구소 선임연구원
<관심분야> 수중음향, 지구물리

▶ 김 우 식 (Woo Shik Kim)



1991년 2월: 한국외국어대학교 물리학과
이학사
1993년 2월: 한국외국어대학교 물리학과
이학석사
2005년 2월: 한국해양대학교 해양공학과
공학박사
1993년 ~ 현재: 국방과학연구소 책임연구원
<관심분야> 수중음향, 음향 신호처리,
소나시스템

▶ 최 상 문 (Sang Moon Choi)



1983년 2월: 한양대학교 자원공학과 공학사
1985년 2월: 한양대학교 자원공학과 공학
석사
1995년: Texas A&M 대학교 지구물리과
이학박사
1995년 ~ 현재: 국방과학연구소 책임연구원
<관심분야> 수중음향, 음향 신호처리,
소나시스템