

단상태 소나를 이용한 소형 수중표적 물성추정

Estimation of the property of small underwater target using the mono-static sonar

배호석,¹ 김완진,¹ 이다운,² 정우근^{2†}

(Ho Seuk Bae,¹ Wan-Jin Kim,¹ Da-Woon Lee,² and Wookeen Chung^{2†})

¹국방과학연구소, ²한국해양대학교

(Received July 3, 2017; revised July 31, 2017; accepted September 28, 2017)

초 록: 수중에서 기동하는 소형무인 플랫폼은 미래의 핵심적인 해군전력이지만, 이와 동시에 아군세력을 위협하는 비대칭 세력이기도 하다. 이러한 소형무인 플랫폼을 탐지, 식별하기 위한 하나의 방법으로 반복적 수치해석 기법에 기반한 물성추정 기법을 소개한다. 물성추정 기법은 표적의 위치정보뿐만 아니라 표적의 물리적인 물성치를 추정할 수 있기 때문에 정지한 표적을 탐지 및 식별할 수 있으며, 다수의 수중표적도 동시에 탐지 가능하며, 표적과 주변 자연물체와의 구분이 가능한 장점을 가진다. 본 연구에서는 기존에 제안한 기법을 보다 확장하여, 실제 호수시험 획득자료를 이용하여 실제 수중 소형표적을 대상으로 물성추정을 수행하였다. 그 결과 단 한 개의 채널신호만으로도 소형플랫폼에 대한 물성추정이 가능하였으며, 현장자료에도 강인한 결과를 획득할 수 있었다.

핵심용어: 물성 추정, 수중 표적탐지, 파형역산, 단상태 환경

ABSTRACT: Small unmanned platforms maneuvering underwater are the key naval future forces, utilized as the asymmetric power in war. As a method of detecting and identifying such platforms, we introduce a property estimation technique based on an iterative numerical analysis. The property estimation technique can estimate not only the position of a target but also its physical properties. Moreover, it will have a potential in detecting and classifying still target or multiple targets. In this study, we have conducted the property estimation of a small underwater target using the data acquired from the lake experiment. As a result, it shows that the properties of a small platform may be roughly estimated from the in site data even using one channel.

Keywords: Property estimation, Underwater target detection, Waveform inversion, Mono-static environment

PACS numbers: 43.30.Pc, 43.30.Vh

1. 서 론

수중에서 기동하는 ROV, UUV 등과 같은 소형무인 플랫폼은 수중감시·정찰 분야에서 미래의 핵심적인 해군전력 중 하나로 각광받고 있으며, 은닉 침투, 매복이 가능할 정도의 소형화된 플랫폼은 특수 임무 전에서도 우월한 지위를 가지는 전략무기가 될 수

있기 때문에 해군으로부터 지대한 관심을 받고 있다. 역설적으로 이러한 소형무인 플랫폼은 적군에서 운용할 경우, 아군 전력의 노출 및 정보 수집을 가능케 하는 등 해군의 안전을 위협하는 세력이기도 하다. 따라서 해군 및 관련 연구기관에서는 수중에 위치하는 소형 수중표적을 정밀하게 탐지하고 식별하기 위한 수중탐지 기술을 지속적으로 연구하고, 검증하기 위한 시험을 다각도로 수행하고 있다.^[1-3]

기존의 일반적인 수중표적 탐지기법은 소나시스템에 수신되는 음향신호로부터 표적의 거리, 속도 및 방위각 등의 표적정보를 추정하여 표적의 유무를

†Corresponding author: Wookeen Chung (wkchung@kmou.ac.kr)
Department of Energy Resources Engineering, Korea Maritime and Ocean University, 727 Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan 49112, Republic of Korea
(Tel: 82-51-410-4689, Fax: 82-51-403-4680)

“이 논문은 2017년도 공동 공동 학술대회(한국소음진동공학회, 한국음향학회, 대한기계학회 동역학및제어부문)에서 발표하였던 논문임”

판단하였으며, 획득된 신호의 주파수 성분 등을 이용하여 표적 특징점을 추출하여 표적을 식별하는 방법이 널리 활용되었다.^[4] 하지만 정지하거나 또는 매복한 수중표적의 경우에는 통상적인 탐지기술로는 표적 특징점을 추출하기 힘들며, 두 조 이상의 플랫폼이 존재할 경우 기존의 탐지기술로 분리·식별하는 것은 매우 도전적인 과제였다. 또한 주변의 해상생물체에 의해 관심 있는 수중표적의 특징성분이 왜곡될 수 있어 탐지확률을 저하시키는 한계를 가지고 있다.

최근, 이러한 문제를 해결하기 위한 하나의 방안으로 파형역산 기법에 근거한 수중표적 탐지기술이 제안되었다.^[7] 파형역산 기법은 전산환경의 발전과 더불어 각광받는 기법으로, 반복적인 수치계산을 통해 음향신호의 진폭과 위상을 이용하여 최적화 기법을 통해 수중표적의 음파전달속도, 임피던스 등의 표적 물성을 추정하는 기법이다. 제안된 방법은 표적의 위치정보뿐만 아니라 표적의 물리적인 물성을 추정할 수 있기 때문에 정지한 표적을 탐지, 식별할 수 있으며, 다수의 수중표적도 동시에 탐지 가능하며, 주변 인공물체와의 구분이 가능하다. 하지만, 제안된 기법은 비용과 운용성에 대한 문제를 고려하지 않고 이상적인 시뮬레이션 환경에서 알고리즘의 타당성을 검증하는 등 현장자료에 대한 강인성을 보여주지 못하는 문제가 있었다.

본 연구는 기존에 제안한 기법을 보다 확장하여, 현장자료를 이용하여 실제 수중 소형플랫폼을 대상으로 물성추정 가능성을 보여주고자 한다. 먼저, 비용 및 운용성 측면을 고려하기 위하여 수신 채널수를 다수 개 이용할 때와 한 개만을 이용할 때의 물성추정 결과를 비교 분석한다. 그리고 실제 호수시험을 통해 고주파 대역에서 획득한 단채널 시계열 자료를 이용하여 물성추정 기법을 수행한 후, 실환경에서의 물성추정 기법 적용 가능성을 타진하고자 한다.

II. 물성추정 기법

물성을 추정하는 연구는 석유·가스 개발을 위한 탄성파 탐사 자료처리 분야에서 해저 수십 킬로미터 범위에 위치하는 저류층을 확인하기 위한 용도로 매우 활발히 연구되었다.^[8-10] 특히, 파형역산기법을 이

용한 물성추정 기법은 수학적 최소화 기법에 기반을 둔 완전자동화 공정으로, 컴퓨터 환경이 지원된다면 저류층의 위치 및 물성을 고해상도로 탐지해 낼 수 있다.

이렇게 컴퓨터의 발전과 더불어 각광받고 있는 본 기법은 파동방정식을 직접 풀어 파동장을 정확하게 모의할 수 있는 음파전달 모델링을 수행하여야 한다. 음파전달 모델링 기법으로 일반적인 유한차분법, 유한요소법 등 다양한 방법이 제안되었는데,^[11] 본 연구에서는 기존 선행 연구의 수행방법과 동일하게 시간영역에서 엇격자 유한차분법을 사용하였다.^[12] 정확한 파동장을 계산하기 위해서는 분산해석 및 안정조건을 고려하여야 하는데, 일반적으로 송신 주파수가 높아질수록 격자간격과 시간간격이 조밀해야 하므로 고주파수 대역에서 음파전달 모델링을 수행하는 것은 매우 어렵다. 본 연구에서는 고주파수 대역을 저주파수 대역으로 변조하여 기존의 수치해석적인 한계를 넘어서고자 시도하였다.

물성추정 기법은 모델링 파동장과 음향센서를 통해 기록된 파동장의 차이를 목적함수를 도입하여 측정하게 된다. 측정된 목적함수가 최소가 되도록 수치 해석적 방법을 적용하여 물성정보를 반복적으로 갱신하는데, 목적함수가 일정한 값 이내로 수렴할 때까지 갱신된 물성치를 이용하여 파동장 모델링을 반복적으로 수행한다. 최종적으로 갱신된 물성값이 실제 관측환경에서의 물성치를 대변한다고 볼 수 있다.

기존의 소나시스템에서는 수신되는 음향신호로부터 표적의 위치정보만 파악할 수 있어, 표적의 존재 유무만을 판단할 수 있었지만, 본 기법을 적용할 경우 그 표적의 존재 유무뿐만 아니라 형상, 물성 도출이 동시에 가능하기 때문에 표적식별을 향상시킬 수 있으리라 기대된다. 또한, 본 기법은 수치해석에 기반을 둔 완전자동화공정으로 사용자의 판단이 개입되지 않기 때문에 최근 대두되고 있는 무인화 체계의 탐지 시스템에도 매우 활용성이 클 것으로 기대된다.

III. 수치해석모델 설계 및 분석

반복적 수치해석 계산에 기반한 물성추정 기법을 실전장 환경에 적용하기 위해서는 물리적인 비용 및

계산 비용을 줄이기 위한 방안이 필수적이다. 제안된 기법의 소요비용은 송신횟수, 수신채널수, 반복계산횟수 등에 지배적인 영향을 받는데, 세 가지 변수는 획득영상의 해상도와 비례관계를 가진다. 송신횟수와 수신채널수는 반향신호의 중첩으로 인한 신호대잡음비를 높이는데, 특히 수신채널수는 소나시스템의 물리적인 크기 및 운용 비용을 수반하기 때문에, 수신채널수에 대한 제한이 보다 현실적이다. 반복계산횟수는 최적화기법의 수렴성에 영향을 주는데, CGLS(Conjugate Gradient Least Squares) 알고리즘 등의 수렴성이 빠른 최적화 기법을 이용하면 반복계산횟수를 줄일 수 있다.^[13]

본 장에서는 운용비용의 감소가 가장 효과적인 수신채널수를 제한하여 물성추정을 수행하고자 한다. 채널수에 따른 물성추정 결과의 비교를 위하여 수신채널수를 180개와 1개로 구분하였으며, 다른 변수는 모두 동일하게 가정하였다. 시뮬레이션을 위한 수중표적으로 알루미늄 모형을 배치하였으며, 그 주변에 송수신 센서를 배치하여 반향신호를 획득하고자 하였다. 두 가지 시험군에 대한 구체적인 기하학적 배치는 Fig. 1(a)와 (b)에 도시한 바와 같다. 즉, 5 m 길이의 2차원 사각형태 알루미늄 모형 표적을 실험환경 중심에 위치시켰으며, 송신기는 표적의 정면방향에 1개를 가정하고, 수신기는 송신기로부터 (a) 1° 간격의 180개를, (b) 송신기 위치에 1개만을 각각 가정하였다. 그리고 신호의 중첩을 위하여 송수신 센서를 1°씩 이동시켜가며 수신신호를 획득하였다. 시뮬레이션을 위해 가정한 나머지 세부변수는 Table 1과 같다.

Fig. 1(c)와 (d)는 각 시험군에서의 초기 속도모형을 보여준다. 초기에는 수중표적의 존재 유무를 알 수 없기 때문에 해수의 음속과 동일한 1.5 km/s의 등속도 모형을 가정하였다. Fig. 1(e)와 (f)는 각 시험군에서의 100번째 반복연산 후의 물성추정 결과를 보여주며, Fig. 1(g)와 (h)는 200번째 반복연산 후의 물성추정 결과를 보여준다. 연산에 사용된 컴퓨터 제원은 Xeon E5-2640 2.50 GHz CPU의 45개 코어를 사용하였으며, Fig. 1(g)는 145분, Fig. 1(h)는 81분이 소요되었다. 두 시험군에서 모두 수중표적의 형상을 깨끗이 획득한 것을 볼 수 있으며, 형상뿐만 아니라 수중표적의 물성값도 동시에 획득 가능한 것을 확인할 수

있다. 수신채널수가 많을수록 보다 깨끗한 결과로도출할 수 있지만, 실제 수중환경에서 소형표적을 탐지하기 위해 많은 수의 수신 채널을 사용하는 것은 물리적 비용 면에서 바람직하지 못하며, 운용성

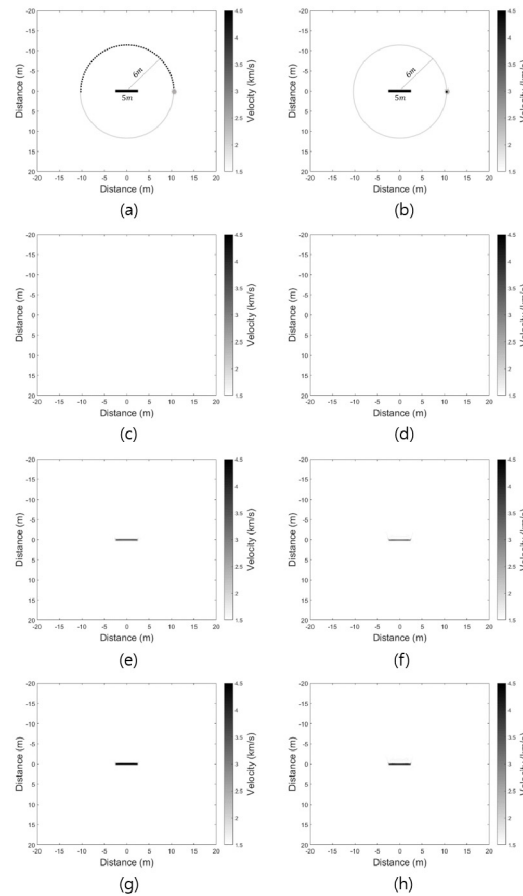


Fig. 1. The results of the property estimations for the synthetic examples.

Table 1. The parameters of synthetic experiments.

Parameters	Information
Field size	40 m × 40 m (grid size of 0.01 m)
Target size	5 m × 0.5 m (velocity of 4.5 km/s)
Projector	180 times (shifting interval of 1°)
Receiver	[CASE 1] 180 elements (interval of 1°) [CASE 2] 1 element
Source wavelet	< 3 kHz (First derivative of Gaussian)
Modeling method	Staggered grid finite differences
Domain	Time domain
Objective function	L2-norm
Iteration	200 times

측면에서도 비효율적이다. 본 시뮬레이션을 통해 단 한 개의 수신채널만을 사용하더라도 수중 표적에 대한 탐지 및 물성 추정 가능성이 있음을 볼 수 있었는데, 이는 본 제안 기법을 이용한 물리적 운용 비용과 운용의 편리성 관점에서 판단할 때 실해역에서의 적용 가능성에 상당히 긍정적인 요인이 될 것으로 판단된다.

IV. 호수시험을 통한 검증

수중표적에 대한 물성추정 기법의 실해역에서의 적용 가능성을 타진하기 위하여 호수시험을 설계하였으며, 호수시험에서 획득한 시험자료를 이용하여 실제 수중물체에 대한 존재 여부를 확인하였으며, 탐지와 동시에 물성치를 추정하여 예상된 표적소재에 대한 물성과 일치하는지를 확인하였다.

물성추정 시험을 위하여 수중표적 및 송수신 센서는 앞에서 수행한 시뮬레이션 배치와 유사하게 Fig. 2와 같이 구성하였다. 즉, 수중표적은 소형 수중운동체와 유사한 원통형의 알루미늄 소재로 제작 후 고정시켰으며, 송신기는 표적의 전면부에 1조를 위치시킨 후, 수신기는 10° 간격으로 총 6개를 동일 심도로 설치하였다. 신호의 중첩을 위하여 송수신 센서를 회전시키는 대안으로 수중표적을 1° 간격으로 회전시켜가며 동일한 효과를 구현하였다.

송신신호는 설치한 수중표적의 크기 및 음향센서의 특성을 고려하여 70 kHz의 정현파 신호를 송신하였으며, 1 M Samples/sec의 이산화율로 수신신호를 이산화하여 기록하였다. 자세한 실험변수는 Table 2와 같다.

Fig. 3은 시험환경을 설계한 후 수중표적을 대상으로 실제 획득되는 반향신호에 후처리를 수행한 결과를 도시하였다. 그림은 송신신호의 입사방향에 따른

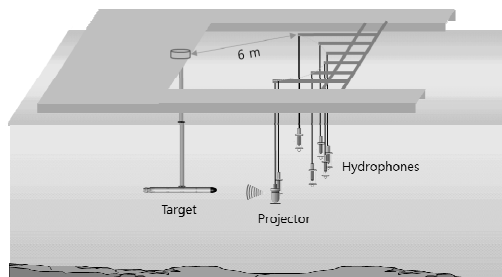


Fig. 2. The concept of the lake experiment.

시계열 신호를 연속적으로 보여주는 그림으로, 가로축은 시간을 나타내고, 세로축은 송신각도를 나타낸다. 여기서 Fig. 3(a)는 수신기가 송신기와 같은 위치인 단상태 환경에서의 획득신호를 의미하고, 나머지 Fig. 3(b)~(f)는 수신기가 송신기로부터 각각 10°, 20°, 30°, 40°, 50°씩 이격된 위치인 양상태 환경에서의 획득신호를 의미한다. Fig. 3(a)와 같은 단상태 환경인 경우 수중표적의 초동반향신호 및 후기반향신호가 모두 명확하게 기록된 것을 관찰할 수 있으나, Fig. 3(b)~(f)와 같이 송수신 센서가 이격된 양상태 환경인 경우는 표적 초동반향신호는 명확하게 기록되었으나, 후기반향신호가 매우 약하게 수신된 것을 관찰할 수 있다. 기록된 신호로부터 표적의 외형, 내부 구조체 형상 등에 대한 반향이벤트를 확인할 수 있는 반면에, 주변 센서 구조물 등에 의한 의도치 않는 반향 이벤트도 동시에 기록되어 있음을 알 수 있다.

물성추정 기법의 실해역 적용성을 확인하기 위하여, 본 연구에서는 물리적 비용 및 운용성 관점에서 가장 유리한 단상태 환경을 가정하였다. 즉, 획득된

Table 2. Setup for the signal acquisition.

Parameters	Information
Projector	180 times (shifting interval of 1°)
Receiver	6 elements (interval of 10°)
Source wavelet	70 kHz (Continuous wave)
Sampling interval	1 μs

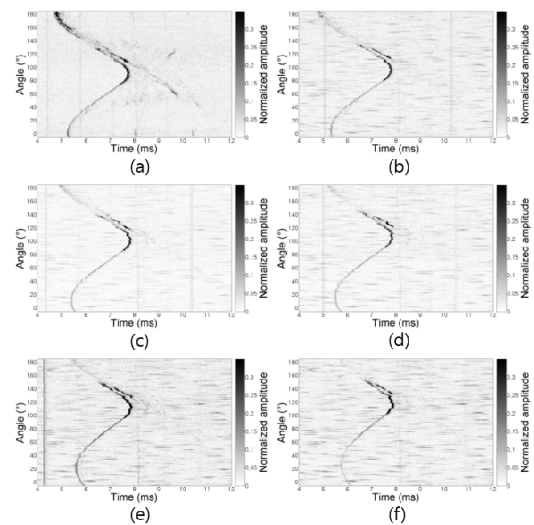


Fig. 3. Recorded signals from the lake experiment.

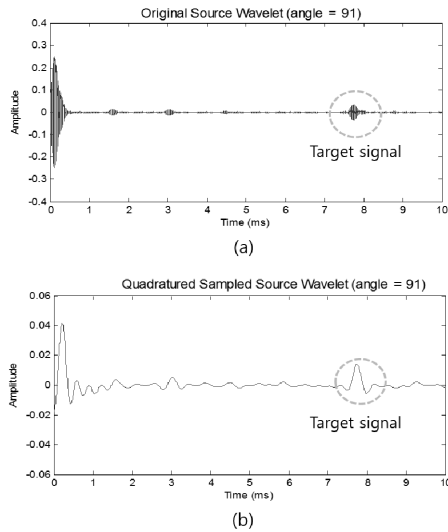


Fig. 4. Time-domain signals (a) before and (b) after the quadrature modulation.

Table 3. The parameters of the lake experiment.

Parameters	Information
Field size	20 m × 20 m (grid size of 0.1 m)
Target size	5 m × 0.5 m (velocity of 4.5 km/s)
Projector	180 times (shifting interval of 1°)
Receiver	1 element (mono-static)
Source wavelet	3.5 kHz (Modulated from 70 kHz)
Modeling method	Staggered grid finite differences
Domain	Time domain
Objective function	L_2 -norm
Iteration	100 times

반향신호 이벤트 중 단상태 환경인 Fig. 3(a) 신호만을 이용하였다. 그럼에도 불구하고, 기록신호의 주파수 대역이 높아 계산시간 및 계산비용을 무시할 수 없다. 이를 해결하기 위하여 본 시험에서는 70 kHz로 기록된 원 신호를 변조를 통해 3.5 kHz로 낮추어 물성추정 기법을 연속적으로 수행하였다. Fig. 4(a)와 (b)는 주파수 변조를 수행하기 전, 후의 기록신호를 각각 보여주고 있다.

한 개의 수신채널에 대한 원 신호를 저주파 대역으로의 변조를 통해 수배 또는 수십배 낮추어 연산비용을 절감하였고, 변조된 신호를 이용하여 물성추정 기법을 연속적으로 수행하였다. 물성추정 기법을 적용하기 위한 기본적인 실험 조건은 Table 3과 같다.

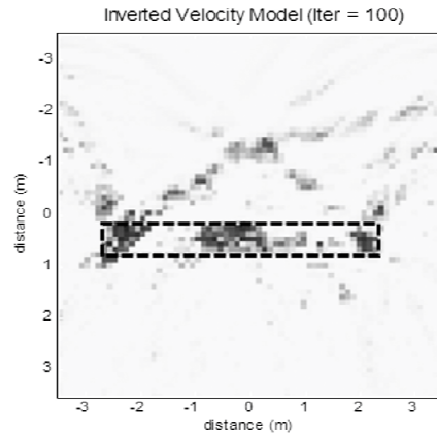


Fig. 5. The 100th inverted velocity model from the lake experiment.

제안 기법을 적용하기 위해 사용된 초기 속도모델은 실제 수중표적의 존재여부를 알 수 없기 때문에 음속과 유사한 1.5 km/s의 전파속도를 가정한 등속모델을 사용하였다.

Fig. 5는 최종적으로 설계한 실험환경에서 물성추정 기법을 적용한 결과를 보여준다. 그림에 삽입한 파선 영역은 예상되는 수중표적의 위치를 나타내는데, 물성추정 결과 대체적인 형상과 물성이 역산된 것을 확인할 수 있다. 하지만, 구현된 해상도에 있어서 개선의 여지가 많아 보이는데, 이는 단상태 환경을 가정하여 수신 채널수를 한 개만으로 제한하였고, 변조를 통해서 주파수 대역을 낮추어 정보량을 제한하였기 때문이라 예상되며, 또한 호수시험장의 환경적인 요인과 인위적인 주변 구조물로 인한 표적 신호의 왜곡도 그 이유가 된다. 그럼에도 불구하고, 본 기법은 단 한 개의 수신채널만 사용하여 정지, 매복중인 소형 수중표적에 대한 형상뿐만 아니라 물성을 제공할 수 있다는 점에서 표적 및 식별성을 향상시킬 수 있으며, 인공구조물 또는 바다생물체와의 구분능을 가능토록하기 때문에 실해역에서의 활용가능성이 매우 클 것으로 기대된다.

V. 결 론

본 연구에서 제시한 물성추정 기법은 소형 수중표적에 대해서 표적 형상뿐 아니라 물성정보 역시 성공적으로 추정할 수 있음을 확인할 수 있었다. 수신채널이

많은 경우에는 고해상도의 추정 결과를 획득할 수 있었으며, 단상태 환결과 같이 단 한 개의 수신채널을 사용한 경우에도 우수한 추정 결과를 획득할 수 있어 물리적 제약이 많은 실제 수중음향 환경에서도 적용성이 높을 것으로 판단된다. 또한, 고주파 대역에서 획득한 음향신호를 저주파 대역으로의 변조를 통해 계산비용을 감소시키면서 우수한 결과를 도출할 수 있었다.

제시한 기법은 물성값을 도출할 수 있으므로, 표적의 탐지 뿐 아니라 동시에 식별을 할 수 있는 장점이 있지만 아직 막대한 계산비용으로 인한 실시간 탐지가 불가능하다는 한계점을 직면하고 있다. 따라서, 본 논문에서는 실제 수중환경 및 수중표적을 단순 음향매질로 가정하여 음향 파동방정식 기반 수치모델링 기법을 적용하여 P파 속도에 대한 물성값을 추정하였다. 이는 본 연구의 목적을 정확성보다는 탐지 가능성 검증에 주안점을 두었기 때문이며, 향후 병렬화, FPGA, GPU 등 고속연산 연구가 뒷받침된다면 P파 속도뿐만 아니라 S파 속도, 밀도, Lamé 상수 등에 대한 물성값도 동시에 추정할 수 있는 음향-탄성 결합매질 기반 파동방정식을 적용할 수 있으리라 판단된다. 또한, 사람의 인위적인 판단이 아닌 완전 자동화 공정으로 획득된 결과를 통해서 소형 수중표적의 실시간 탐지 및 식별이 가능하다면 무인화 체계의 부합되는 핵심기술 중 하나로 기대할 수 있다.

References

1. R. Headrick and L. Freitag, "Growth of underwater communication technology in the U.S. Navy", *IEEE Communications Magazine*. **47**, 80-82 (2009).
2. R. W. Button, J. Kamp, T. B. Curtin, and J. Dryden, *A Survey of Missions for Unmanned Undersea Vehicles* (RAND Corp., Santa Monica, 2009), pp. 9-20.
3. J. L. Choi, "R&D trend of unmanned vehicle for anti-submarine warfare," Agency for Defense Development, Tech. Rep., 2013.
4. A. D. Waite, *Sonar for Practising Engineering 3rd Ed.* (John Wiley & Sons Ltd., England, 2002), pp. 119-219.
5. C. M. Payne, *Principles of Naval Weapon Systems* (Hantee Media, Seoul, 2015), pp. 289-387.
6. R. O. Nielson, *Sonar Signal Processing* (Artech House Inc., Boston-London, 1991), pp. 95-257.
7. H. S. Bae, W. Kim, W. S. Kim, and S. M. Choi, "A study on the underwater target detection using the waveform inversion technique," (in Korean), *J. Acoust. Soc. Kr.* **34**, 487-492 (2015).
8. A. Tarantola, "Inversion of seismic reflection data in the acoustic approximation," *Geophys.* **49**, 1259-1266 (1984).
9. H. S. Bae, S. Pyun, C. Shin, and K. J. Marfort, "Laplace-Fourier domain waveform inversion versus refraction-traveltime tomography," *Geophys. J. Int.* **169**, 2165-2179 (2012).
10. J. Shin and C. Shin, "Laplace-domain waveform inversion for the 3D acoustic-elastic coupled media," *J. Appl. Geophys.* **129**, 41-52 (2016).
11. C. H. Jo, C. Shin, and J. H. Suh, "An optimal 9-point, finite-difference, frequency-space, 2-D scalar wave extrapolator," *Geophys.* **61**, 529-537 (1996).
12. R. W. Graves, "Simulating seismic wave propagation in 3D elastic media using staggered-grid finite differences," *Bull. Seismol. Soc. Am.* **86**, 1091-1106 (1996).
13. H. S. Bae, S. Pyun, W. Chung, S. G. Kang, and C. Shin, "Gauss-Newton-CG technique for acoustic-elastic coupled media," 2011 SEG Annual Meeting, 2659-2663 (2011).

저자 약력

▶ 배 호 석 (Ho Seuk Bae)



2007년 2월: 서울대학교 지구환경시스템공학부 (공학사)
2011년 2월: 서울대학교 에너지시스템공학부 (공학박사)
2011년 3월~10월: 서울대학교 에너지자원신기술연구소 선임연구원
2011년 11월~현재: 국방과학연구소 선임연구원
<관심분야> 수중음향, 소나시스템, 탄성파탐사

▶ 김 완 진 (Wan-Jin Kim)



2005년 2월: 부산대학교 전자전기통신공학부(공학사)
2007년 2월: 부산대학교 전자공학과(공학석사)
2011년 8월: 부산대학교 전자공학과(공학박사)
2011년 11월~현재: 국방과학연구소 선임연구원
<관심분야> 적응신호처리, 레이더 및 소나시스템, 디지털 통신

▶ 이 다 운 (Da-Woon Lee)



2016년 8월: 한국해양대학교 에너지자원
공학과 (공학사)
2016년-현재: 한국해양대학교 해양에너지
공학과 (공학석사과정)
<관심분야> 자원 탐사, 수중 음향, 탄성파
탐사

▶ 정 우 근 (Wookeen Chung)



2006년 8월: 서울대학교 지구환경시스템
공학부 (공학사)
2008년 8월: 서울대학교 에너지시스템공
학부 (공학석사)
2011년 2월: 서울대학교 에너지시스템공
학부 (공학박사)
2011년 9월 ~ 현재: 한국해양대학교 교수
<관심분야> 자원 탐사, 수중음향