

무인수상정 탑재 소나시스템 개발

배호석¹⁾ · 김완진^{*,1)} · 김우식¹⁾ · 최상문¹⁾ · 안진형¹⁾

¹⁾ 국방과학연구소 제6기술연구본부

Development of the SONAR System for an Unmanned Surface Vehicle

Ho Seuk Bae¹⁾ · Wan-Jin Kim^{*,1)} · Woo-Shik Kim¹⁾ · Sang-Moon Choi¹⁾ · Jin-Hyeong Ahn¹⁾

¹⁾ *The 6th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea*

(Received 9 March 2015 / Revised 20 July 2015 / Accepted 24 July 2015)

ABSTRACT

Recently, unmanned systems are largely utilized in various fields due to the persistency and the least operational risk and an unmanned surface vehicle(USV) is the one of the representative application in the naval field. To assign multiple roles to an USV, we developed a sonar system which consists of a forward detecting sonar for the long-range detection, a downward detecting sonar for the small target scan and identification, and a strut type body for mounting sonar systems. In this paper, we described the developed sonar system for USV and the sea test results for verifying system performance. The test results showed that the developed sonar system was able to detect the underwater target about several kilometers away and could recognize a small object at the downside of the sonar system. We expect that the developed sonar system will be easily applied to other unmanned platforms without serious consideration.

Key Words : Unmanned Surface Vehicle(무인수상정), Sonar System Development(소나시스템 개발), Forward Detecting Sonar(전방탐지소나), Downward Detecting Sonar(하방탐지소나)

1. 서론

최근 수중감시체계는 기존의 단독 탐지센서 운용에서 복합 수중분산 센서망 탐지체계로 발전하고 있으며^[1], 대잠전에 투입되는 모든 센서가 통합된 송수신

센서로 동작할 수 있도록 설계되고 있다. 특히, 무인수상정(USV : Unmanned Surface Vehicle)과 무인잠수정(UUV : Unmanned Undersea Vehicle)은 기동이 가능한 이동형 분산 센서노드으로써, 적시적소에 대잠감시를 적극적으로 수행할 수 있는 매우 중요한 역할을 수행할 수 있다. 미국에서는 이러한 목적으로 2005년에 PLUSNet(Persistent Littoral Undersea Surveillance NETwork) 프로그램을 추진하였으며, NATO 국가들은

* Corresponding author, E-mail: wjkim@add.re.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

2008년에 CASW(Cooperative Anti Submarine Warfare) 프로그램을 착수하였다²⁾.

무인정은 이동형 센서노드로서의 임무 외에도 장시간 감시 임무가 가능하며 위험 해역에서 특수한 임무 수행이 가능하기 때문에, 선진국에서는 운용자가 접근하기 힘든 지역에서의 장시간 감시나 기뢰 탐지 등 다양한 임무 부여를 위해 무인정에 대한 연구개발을 활발하게 진행하여 왔다³⁾.

한국 해군 및 관련기관에서는 무인정의 중요성을 최근에 인지하기 시작하였으며, 무인정과 관련한 핵심 기술들의 개발을 서두르고 있다^{4,8)}. 그 과정의 일환으로 무인수상정 개발을 통해 무인정의 체계화 가능성을 타진하기 위한 연구가 진행되고 있으며⁹⁾, 무인수상정의 성공적인 임무 지원을 위한 수중 소나시스템의 개발이 요구되었다. 본 논문에서는 무인수상정의 운용 전략에 맞추어 설계한 소나시스템을 소개하고, 소나시스템의 하드웨어 구성장치 및 세부 운용모드를 설명한 후, 개발된 소나시스템 검증하기 위해 수행된 해상시험 결과에 대해 제시한다.

2. 소나시스템 개요

현재 개발 중인 무인수상정은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 다양한 탐지체계와의 협력 탐지뿐만 아니라 독립적 탐지임무 및 자율추적 수행을 목표로 하고 있다. 따라서 무인수상정에 탑재되는 소나시스템은 원거리 감시정찰, 탐색추적, 항만감시, 기뢰탐색과 같은 다양한 임무에 대응이 가능하도록 개발되어야 한다.

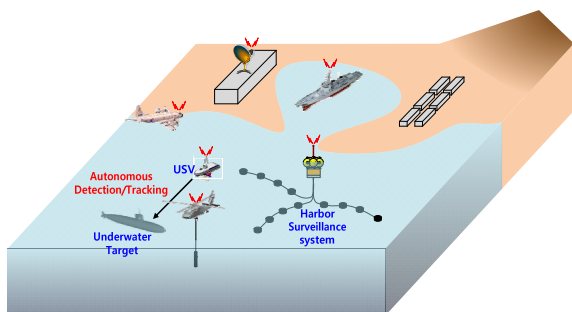


Fig. 1. Operational concept of USV

하지만, 단일 소나장치 만으로는 요구하는 목적을 달성할 수 없으므로, 본 소나시스템은 원거리 탐색용

전방탐지장치와 근거리 표적탐지, 소형 표적인식 및 식별을 위한 하방탐지장치로 분리하여 각각 개발하였다.

2.1 전방탐지장치

무인수상정 탐제용 전방탐지장치의 주목적은 수 km 이상 이격된 거리에서 기동하는 수중표적의 정밀 탐지이므로, 해의 무인 플랫폼에서 주로 사용되는 장애물회피소나(Obstacle Avoidance Sonar)나 전방주시소나(Forward Looking Sonar) 형태가 아닌, 수 km 이상의 탐지거리를 가지고, 방위, 거리 등의 표적정보 추정 가능한 새로운 소나시스템이 요구되었다.

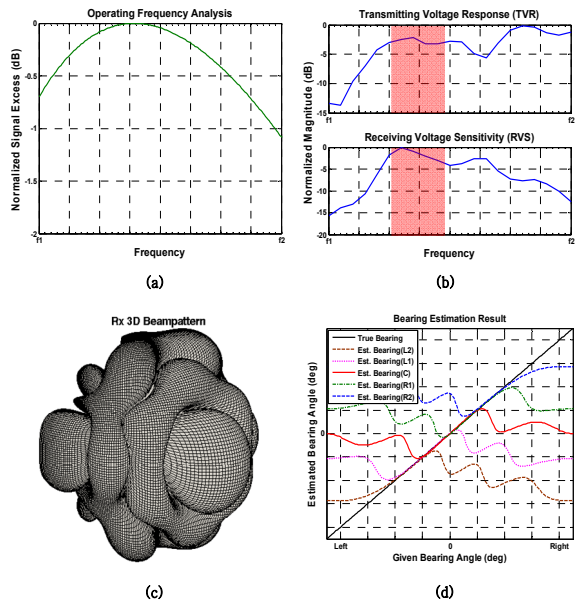


Fig. 2. Design results of the forward detecting sonar: (a) operating frequency analysis, (b) sensor characteristics, (c) 3D beam pattern and (d) bearing estimation analysis

전방탐지장치 설계를 위하여 먼저 소나방정식을 이용한 통상적인 잡음환경 하에서의 탐지 표적에 대한 최적 송신주파수 분석을 수행하였다. 능동모드에 대한 신호 이득(SE : Signal Excess)을 주파수의 함수로 표현하면 다음 식 (1)과 같이 정리할 수 있다^{10,11)}.

$$SE(f) = SL(f) - 2TL(f) + TS(f) + DI(f) - NL(f) \quad (1)$$

여기서 SL 은 음압 준위를, TL 은 전달 손실을, TS 는 표적 강도를, DI 는 지향성 지수를, NL 은 잡음 준위를 각각 의미한다. 분석의 편의를 위해 SL 은 상수로 고정하였고 TS 는 실린더 형상으로 근사하였으며, TL 과 NL 은 각각 Francois-Garrison equation^[12]과 Wenz model^[13]을 따른다고 가정하였다. Fig. 2(a)는 주파수에 따른 SE 준위를 보여주는데, 그림에서 최대 준위를 보이는 주파수가 최적 송신주파수가 된다. 이를 기반으로 전방탐지장치에서 사용할 운용주파수를 결정하였으며, Fig. 2(b)와 같이 송/수신 센서의 응답특성 분석을 통해, 해당 주파수대역에서 요구 성능을 만족하는 것을 확인하였다.

또한, 전방탐지장치는 소형의 수중장착체에 탑재되므로 기계적 조향(mechanical steering) 대신 전자적 조향(electrical steering) 방식을 채택하였으며, 개발 장치의 성능분석을 위해 Fig. 2(c)와 같이 빔 패턴을 계산하여 조향 각도별 수평/수직 방향에 대한 3 dB 빔폭을 분석하였다.

수평방향에 대한 3 dB 빔폭을 이용하여 최대 빔 개수를 선정하였으며, 선정한 빔 별로 각각 방위추정 성능의 만족 여부를 확인하였다. Fig 2(d)는 설계한 빔 중 일부 빔에 대한 방위추정 성능을 보여주는데, 조향각 별로 실제 방위각을 추종하는 것을 확인하였다.

추가적으로, 수직방향에 대한 빔폭과 천해의 운용수심을 고려할 때, 해수면 잔향음으로 인한 탐지성능 저하가 우려되어, 표적탐지 시 해수면 잔향음에 대한 영향을 최소화 할 수 있도록 전방탐지장치의 조향 각도를 수평면 기준 일정 각도로 넓혀 설계하였다.

2.2 하방탐지장치

하방탐지장치는 하방에 위치한 표적 식별을 주요 목적으로 하기 때문에 전방탐지장치와 달리 고해상도의 영상 소나가 요구된다. 대표적인 영상 소나에는 측면주사소나(Side Scan Sonar), 합성개구소나(Synthetic Aperture Sonar) 등이 있는데^[14,15], 본 소나시스템에서는 기술 성숙도 및 운용성 등을 고려하여 측면주사소나를 기반으로 설계하였다.

하방탐지장치가 결합될 수중장착체의 물리적 크기 제약 하에서, 기뢰 탐지 및 식별이 가능한 해상도를 종합적으로 고려하여 운용주파수를 설계하였으며, 최대 탐색거리를 고려하여 송신음압을 결정하였다. Fig. 3(a)는 제작된 하방탐지장치의 송신응답특성을 보여주는데, 설계한 음압준위를 만족함을 확인하였다.

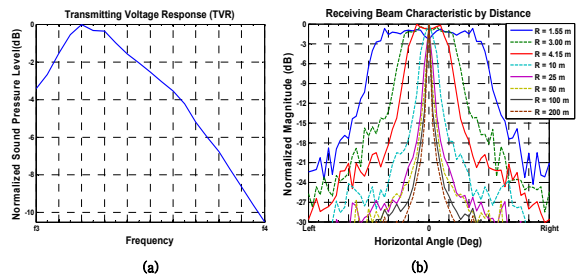


Fig. 3. Design result of the downward detecting sonar: (a) transmitting voltage response of a sensor and (b) receiving beam characteristic by distance

수신 빔의 경우 팬 빔(fan-beam) 형태를 가지도록 설계하였는데, 안정적인 팬 빔을 형성하기 위한 이론적인 탐색거리는 원거리장(Far-Field) 조건인 $D^2/4\lambda$ 보다 멀어야 하며, 하방탐지장치의 송신주파수 및 센서 길이를 고려할 때 최소 탐색거리는 약 50 m 정도가 된다. 하지만, 거리별 빔 패턴을 모델링한 결과(Fig. 3(b))와 천해에서 운용하는 무인수상정의 임무를 종합적으로 고려하여 하방탐지장치의 최소 탐지거리를 결정하였다.

하방탐지장치는 전방탐지장치와 동시 운용 시 전방탐지장치의 송신신호에 의해 신호 간섭이 발생할 소지가 있으므로, 이를 방지하기 위해 아날로그 대역 통과 필터를 설계하였으며, 플랫폼의 고속 기동 시에도 고해상도 영상을 제공하기 위해 무인수상정 기동 속도에 따라 최대 3개의 수신 빔을 선택적으로 사용하도록 설계하였다. 추가적으로, 자세센서를 탑재하여 자세 변화에 따라 수신 빔 형성을 달리해, 보다 높은 해상도의 영상을 얻을 수 있도록 설계하였다.

2.3 수중장착체

플랫폼의 소음, 진동 및 불규칙한 해양환경 및 유체 흐름으로 인한 선체운동의 변동성은 소나시스템의 탐지 성능에 지대한 영향을 미친다. 따라서 플랫폼 및 해양환경의 영향을 최소화하기 위해서 선체 부착형태를 배제하고, 예인형 또는 스트럿 고정형의 수중장착체 개발을 고려하였다. 실제, 해군의 운용 개념상 자세제어가 유리하지만 운용절차가 복잡한 예인형 보다는 스트럿 고정형이 긴급 운용 등의 활용성이 높다고 판단되어 수중장착체 구조를 스트럿 고정형으로 최종 결정하여 Fig. 4와 같이 설계하였다.

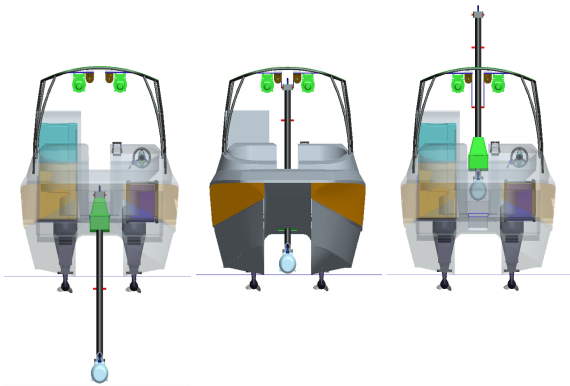


Fig. 4. The strut type of underwater sonar equipment

수중장착체는 수압, 수밀 등 기본적인 설계요소 뿐만 아니라 내부에서 발생하는 고온의 열을 효과적으로 전도시킬 수 있는 재질을 고려하여 설계하였으며, 부가적으로 방열패드와 쿨러 등을 별도로 장착하여 내부의 열을 효과적으로 낮추도록 설계하였다.

전방 및 하방탐지장치 간의 신호 간섭을 최소화하기 위하여 앞에서 설명한 전자적인 방법과는 별도로 수중장착체 내부에 차단벽을 설치하고, 두 장치를 최대한 이격시켜 위치시켰다. 표적 탐지정보의 세부적인 보정을 위하여 수중장착체 내부에 자세센서, 고도센서, 수심센서, 온도센서 등의 부가 센서를 별도로 탑재하였다.

3. 개발시스템 구성

무인수상정의 설계 방향에 따라 아래 Fig. 5와 같이 소나시스템을 구성하였다. 무인수상정 탐제 소나시스템은 수중부에 위치하는 수중장착체, 선상부에 위치하는 소나통합제어장치, 그리고 원격부에 위치하는 소나 원격도시장치로 구성된다. 소나원격도시장치에서 제어한 명령은 무선을 통해 중앙처리장치로 전송되고, 소나통합제어장치를 거쳐 전방탐지장치와 하방탐지장치로 명령이 전달된다. 전방 및 하방탐지장치는 수신된 명령에 따라 탐지를 수행하고, 탐지정보를 추출하여 소나통합제어장치로 획득신호 및 탐지정보를 회신한다. 하방탐지장치 획득신호는 영상처리장치를 통해 표적 식별을 위한 탐지정보를 추가적으로 추출한다. 탐지결과는 중앙처리장치를 거쳐 다시 무선으로 소나원격도시장치로 전달되어 원격운용자가 표적정보에 대

한 합리적인 의사결정을 할 수 있도록 효과적으로 전 시된다. 이에 대한 기본 흐름도는 Fig. 6과 같다.



Fig. 5. Overview of sonar system

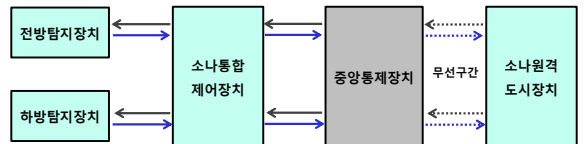


Fig. 6. Data flow of sonar system

3.1 하드웨어 구성장치

3.1.1 수중장착체 구성

수중장착체는 무인수상정 스트럿에 체결되어 수중에 위치되는 조립체이다. 수중장착체는 전방탐지장치, 하방탐지장치, 수중부제어장치 및 부가센서로 구성된다.

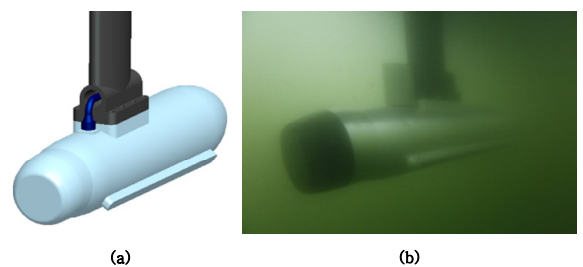


Fig. 7. Underwater equipment of the sonar system

수중부의 전방탐지장치는 전방음향전환장치와 전방 신호처리장치로 구성되며, 전방으로 신호를 인가하여 반향되는 신호로부터 전방표적을 탐지하는 기능을 수행한다. 하방탐지장치도 이와 유사하게 하방음향전환장치와 하방신호처리장치로 구성되며, 하방으로 신호를 인가하여 반향되는 신호로부터 하방의 이미지를 확

득하는 기능을 수행한다. 수중부제어장치는 전방탐지장치와 직접 연결되어 송신전원을 제어하는 전원분배반, 온도정보 및 누수정보 등을 수집하는 수중부제어반으로 구성된다. 부가센서로는 고도계, 수심계, 수온계, 누수센서, 자세센서 등을 포함한다. Fig. 7(a)는 수중장착체의 설계 형상을 보여주고, Fig. 7(b)는 실제 제작된 수중장착체를 수중에서 촬영한 사진을 보여준다.

3.1.2 소나통합제어장치 구성

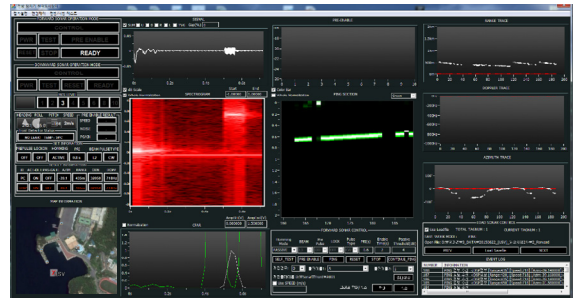
소나통합제어장치는 선상부에 위치하는 장비로, 소나장비제어통신기록반, 전원공급반, 통신분배반, 하방신호처리장치반 및 DSP 처리반 등으로 구성된다. 소나장비제어통신기록반은 수중장착체 내부의 소나장치를 제어하고 획득된 신호를 기록하는 기능을 하며, 전원공급반은 전방탐지장치 및 소나장치에 전원을 각각 안정적으로 공급한다. 통신분배반은 소나장치에 통신을 분배하는 역할을 하며, 하방신호처리장치반은 수중부의 하방탐지장치로부터 획득된 신호를 분석하여 영상화하는 기능을 수행한다. DSP 처리반은 수중부의 소나장치로부터 획득된 신호를 이용하여 탐지 정보를 추출하는 기능을 수행한다.

3.1.3 소나원격통제장치 구성

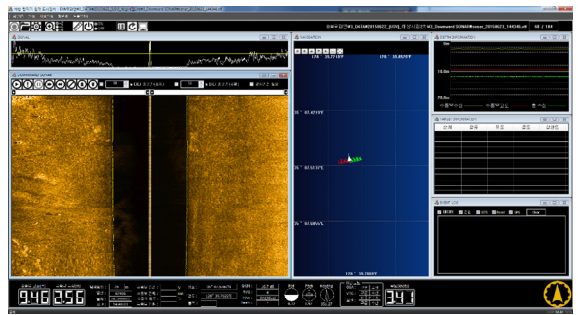
소나원격통제장치는 원격수신모듈, 전방탐지결과 도시모듈, 하방탐지결과 도시모듈, 무인수상정 모사모듈로 구성된다. 원격수신모듈에서는 무인수상정에서 무선으로 전송받은 신호 중 소나와 관련된 신호만을 추출하여 수신하는 기능을 수행하며, 전방 및 하방탐지결과 도시모듈은 전방 및 하방탐지장치에서 수신된 신호 및 탐지정보를 실시간으로 원격운용자가 의사결정을 용이하게 하도록 효율적으로 전시하는 기능을 수행한다. 무인수상정 모사모듈은 성능검증을 위한 자체 시뮬레이션 용도로 무인수상정의 기동을 모사하는 알고리즘을 탑재하여, 무인수상정 기동이 없더라도 소나부 단독 운용이 가능토록 개발하였으며, 소나 탐지 성능의 모니터링 및 자체 분석을 목적으로 한다.

Fig. 8은 소나원격통제장치에서 전시하는 화면정보의 예를 보여준다. 전방탐지결과 도시모듈인 Fig. 8(a)에서는 소나시스템의 상태정보와 획득 시계열 신호, 스펙트로그램(spectrogram) 및 CFAR(Constant False Alarm Rate) 탐지 결과를 기본적으로 도시하고, 표적의 상대거리, 방위각, 도플러 천이량 등의 표적탐지 결과를 시간에 따라 직관적으로 볼 수 있게 전시한다. 하방탐지

결과 도시모듈인 Fig. 8(b)에서는 영상 처리된 하방향의 이미지와 고도, 수심, 항적창, 기타 부가센서 정보를 전시하고, 탐지된 표적의 경/위도, 예측 표적과의 상관도 등을 별도로 보여준다.



(a)



(b)

Fig. 8. Windows of remote control device: (a) forward detecting sonar and (b) downward detecting sonar

3.2 소나시스템 운용 모드

개발된 소나시스템을 무인수상정의 용도에 맞게 운용하기 위하여 세부 운용 모드를 전원제어 모드, 자체진단 모드, Pre-Enable 모드, 데이터 취득 모드, 초기화 모드, 정지 모드로 구분하였으며, 항상 무인수상정 운용, 항해 등을 총괄하는 중앙통제장치의 명령을 대기하도록 설계하였다. Fig. 9는 무인수상정의 기본 운용 전략에 대응되는 소나시스템의 운용 모드를 보여주고 있다.

전원제어모드는 무인수상정 중앙통제장치가 소나장치로의 전원제어 요청 시, 소나장치의 전원을 인가하거나 제거하고, 그 결과를 중앙통제장치로 전송하는 응답을 수행한다. 자체진단모드는 무인수상정 초기점검 중 중앙통제장치가 소나장치의 자체진단 수행을 요청하면, 소나장치는 즉시 소나부 구성장치가 정상

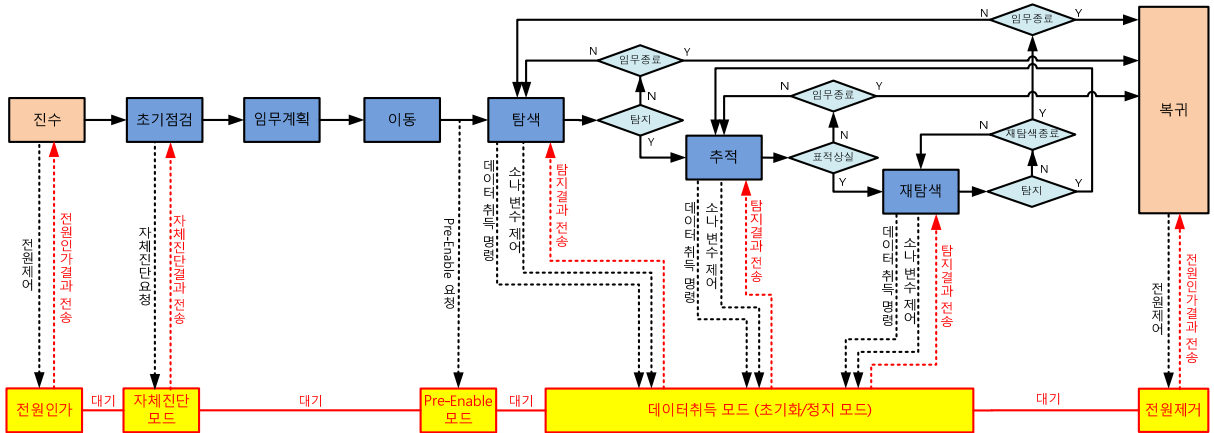


Fig. 9. Operation mode of sonar system

작동하는지 확인하고, 그 결과를 중앙통제장치로 응답하는 단계이다. Pre-Enable 모드는 무인수상정이 실제 탐색모드로 진입하기 직전에 소나시스템의 초기변수를 설정하기 위해 필요한 단계로써, 중앙통제장치가 Pre-Enable 단계를 요청하면, 소나장치에서는 탐지변수를 초기화하고 해당 해역에서의 주변소음을 일정시간 기록하고 분석하여 초기 변수를 할당하는 단계이다. 데이터취득 모드는 실제 중앙통제장치의 요청에 따라 능동모드일 경우, 소나장치에서는 송신신호를 인가하고, 반향된 신호를 기록, 분석하여 탐지정보를 추정하고, 수동모드일 경우, 표적에서 방사하는 신호를 기록, 분석하여 탐지정보를 추정한다. 그리고, 획득한 신호 및 추정된 탐지정보를 중앙통제장치로 응답하고, 중앙통제장치의 다음 명령을 대기하게 된다. 초기화 모드는 설정된 탐지변수를 초기화하는 단계를 말하며, 정지 모드는 현재 진행 중인 단계를 중지하는 명령을 수행한다.

4. 개발시스템 성능 검증

개발된 무인수상정용 소나시스템의 성능을 검증하기 위하여 수차례의 해상시험을 수행하였으며, 전방모의 표적기와 하방표적을 이용하여 전방탐지성능과 하방탐지 성능을 각각 검증하였다.

4.1 검증시험 개요

무인수상정에 탑재된 소나장비를 이용하여 수중표적

에 대한 탐지 가능성을 확인하는 것을 목적으로 2014년 10월 진해만에서 해상시험을 실시하였다. 소나원격도시장치 및 무선 기지국은 육상에 위치시키고 무인수상정을 인근에서 기동하며 임의의 지점에 설치한 수중표적 신호를 획득하였다. 본 시험에서는 시험의 편의를 위하여 전방모의표적기(송신신호를 수신하면 인위적으로 신호를 반향시키는 장치)를 별도로 개발하여, 수중 표적으로 활용하였다.

전방탐지장치, 하방탐지장치 및 부가센서가 탑재된 수중장착체를 실제 수상정 스트럿에 연결한 후, 사전에 설계한 능동신호를 인가하였으며, 인가된 신호는 일정 거리가 이격된 전방모의표적기로 전달되는데, 이를 반향시켜 다시 수중장착체 내부 탐재소나에서 반향신호를 기록하였다. 수중장착체에서 획득한 신호는 전방탐지 알고리즘을 거쳐 표적의 유무, 거리, 방위각 등의 정보를 추정하며, 하방탐지 알고리즘을 통해 하방표적에 대해 영상 및 추정 위치정보를 획득하였다.

4.2 속도에 따른 소나부 자세 변화 측정

소나시스템 내부 구성부의 개별 성능 검증에 앞서 선행적으로 스트럿 고정형 소나장착체의 자세 변화를 측정하여야 하며, 측정된 자세 변화량이 소나시스템에서 설계된 빔폭을 벗어나지 않도록 추가적인 방진설계를 고려하거나 획득신호의 후보정 처리를 수행하여야 한다. 자세 변화량을 확인하기 위하여, 수중장착체 내부에 장착된 부가센서 중 하나인 자세센서에서 취득한 자료를 이용하여 무인수상정 선속에 따른 소나시스템의 자세 변화를 분석하였다. 일반적으로 피치

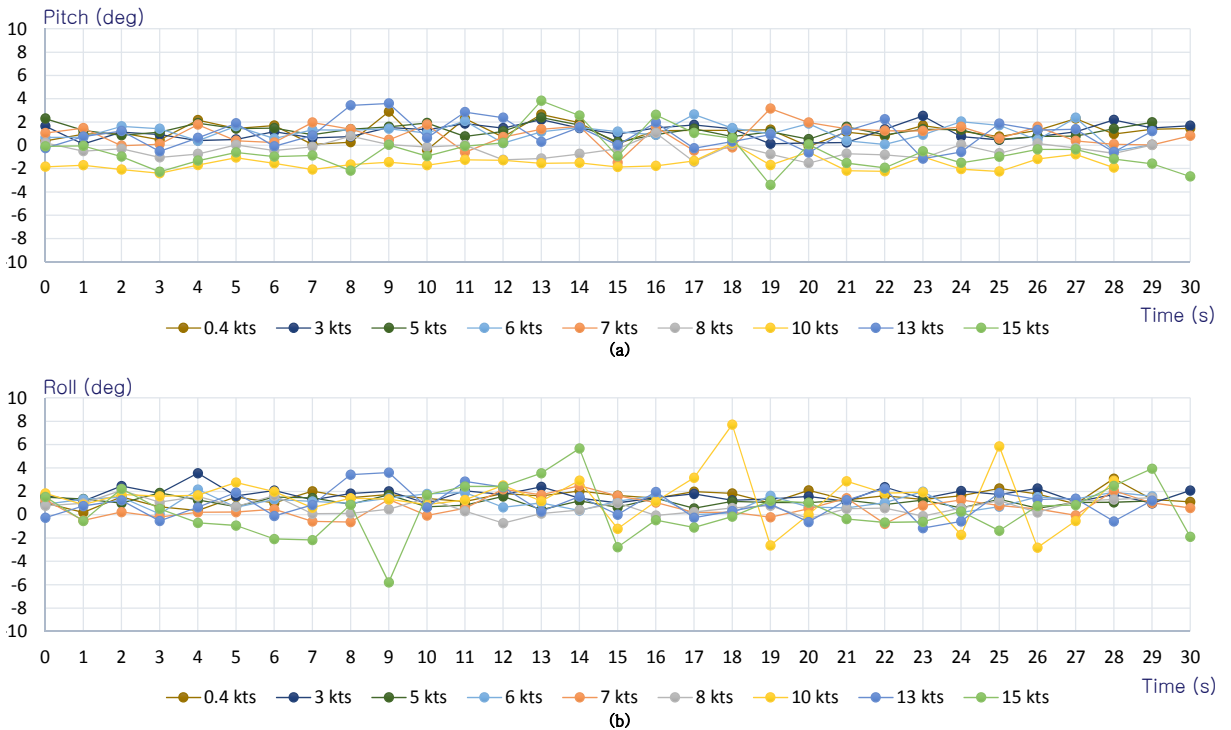


Fig. 10. Variance of sonar body depending on time

(pitch) 값은 전방탐지장치 성능에 지대한 영향을 주며, 롤(Roll) 값은 하방탐지장치 성능에 큰 영향을 주는데, 이에 대한 분석을 수행하기 위하여 일정한 선속으로 주행할 때의 피치 값과 롤 값을 30초 동안 획득하여 Fig. 10과 같이 도시하였다.

시간에 따른 피치 값의 변화량은 시험 속도 내에서 설계 범폭 내에 위치하는 것을 확인하였으나, 시간에 따른 롤 값의 변화량은 10 kts, 15 kts에서 큰 편차 값을 가지는 것을 관찰할 수 있었다. Table 1은 선속에 따른 30초 동안의 피치 값과 롤 값의 평균과 분산을 보여주는데, 10 kts 이상의 속도에서 롤 성분이 상대적으로 분산이 큰 것을 확인할 수 있다. 즉, 선속에 따른 자세정보 분석을 통해, 스트럿 고정형 수중장착체를 이용하여 소나시스템을 운영할 경우, 자세값의 변화가 전방탐지장치 성능에는 영향을 주지 않지만, 하방탐지장치의 성능에는 어느 정도 영향을 미칠 것임을 예측할 수 있다. 현재 롤 값에 대한 움직임을 감쇄하는 방안에 대한 추가적인 연구를 수행하고 있으며, 획득신호를 후처리하는 기법을 적용하고자 시도하고 있다.

Table 1. Average and variance of pitch and roll by vehicle's speed

SPEED	PITCH		ROLL	
	AVG	VAR	AVG	VAR
0.4 kts	1.18	0.63	1.47	0.33
3 kts	1.15	0.41	1.71	0.31
5 kts	1.26	0.27	1.09	0.14
6 kts	1.12	0.54	1.10	0.37
7 kts	0.88	0.91	0.63	0.72
8 kts	-0.41	0.37	0.66	0.41
10 kts	-1.57	0.32	1.48	4.69
13 kts	0.95	1.51	0.95	1.51
15 kts	-0.53	2.32	0.31	5.00

4.3 전방탐지장치 능동탐지 측정 결과

무인수상정 기동 시 수중표적 탐지 가능성을 확인하기 위하여, 전방모의표적기를 무인수상정과 수 km 이격된 위치에 고정시키고 무인수상정이 전방모의표적기

를 향하여 10 kts 이상의 속도로 접근하는 시나리오를 가정하였다. 본 논문에서는 대표적인 두 가지 시험 결과만을 제시한다.

첫 번째 시험은 연속파(CW : Continuous Wave)신호를 사용한 경우로, Fig. 11(a)는 시험 시 기록된 시계열 신호이며, Fig. 11(b)는 그 스펙트로그램을 보여주는데, 여기서 x축은 시간을 y축은 진폭과 주파수를 각각 의미한다. Fig. 11에서 적색으로 표시된 화살표는 표적 신호의 수신위치를 나타내는데, Fig. 11(a)의 시계열 신호에서는 표적신호와 잔향음 신호를 정확하게 구분하기 어려우나, Fig. 11(b)의 스펙트로그램 상에는 상대속도에 따른 도플러 천이로 인해 송신신호와 잔향음 성분이 명확히 구분되는 것을 관찰할 수 있다.

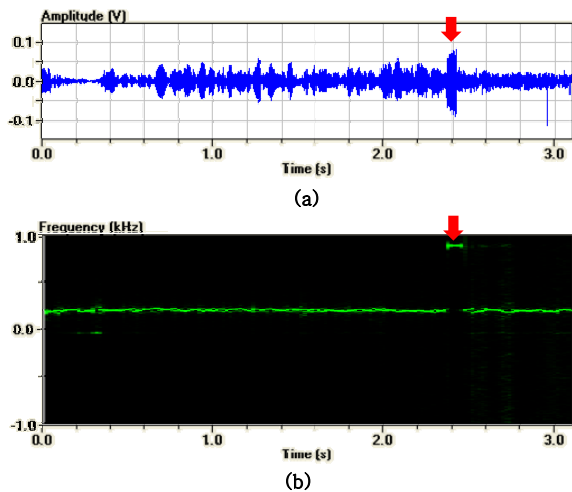


Fig. 11. Acquisition data using a CW pulse:
(a) time-series signal and (b) spectrogram

Fig. 12는 무인수상정이 주행 중 소나시스템에서 획득된 시계열 신호를 연속적으로 나타낸 것으로, 탐지 알고리즘을 이용하여 추출한 표적과의 거리, 방위각 등의 탐지 결과를 순서대로 도시하고 있다. 각 그림에서 x축은 송신신호의 번호를 의미하며, y축은 순서대로 시간, 거리 및 각도를 의미한다. Fig. 12(a)의 연속 시계열 신호(ping-section) 상에서 표적 반향신호는 매우 안정적으로 기록되었음을 볼 수 있으며, Fig. 12(b)에서 보듯이 관심 영역 외에서 정박 중인 선박으로 인해 순간적으로 발생한 오탐지를 제외하고는 의도하는 수중표적에 대해 탐지정보를 성공적으로 추정하였음을 관찰할 수 있다.

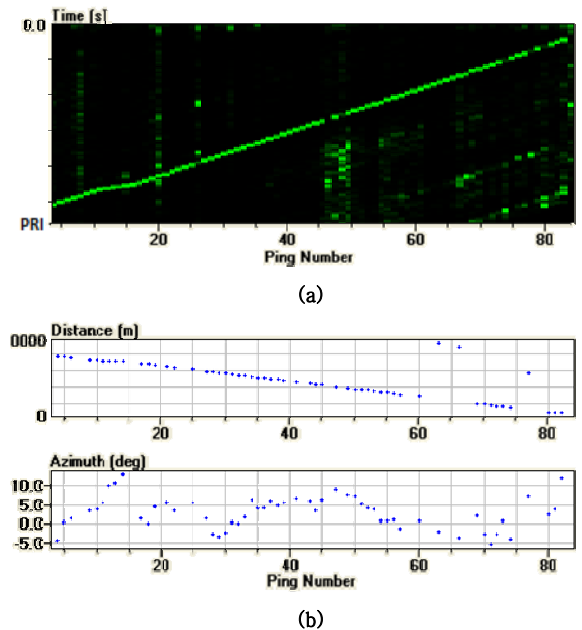


Fig. 12. Active detection results using CW pulse:
(a) ping-section after matched filtering and
(b) distance and azimuth

두 번째 시험은 FM(Frequency Modulation) 송신신호를 사용한 경우로, Fig. 13은 획득된 시계열 신호 및 그 스펙트로그램을 도시한 것이다. 첫 번째 시험과 마찬가지로 시계열 신호에서는 적색 화살표로 표시된 지점에서 표적신호와 잔향음 신호를 정확하게 구분하기 어려우나, 스펙트로그램 상에서 도플러 천이로 인해 잔향음 성분과 표적신호 성분의 구분이 가능함을 확인할 수 있었다.

Fig. 14는 무인수상정이 10 kts 이상의 속력으로 주행 중 전방탐지장치에서 획득한 신호와 탐지 결과를 순서대로 도시하고 있다. 여기서 x축은 송신신호 번호를, y축은 순서대로 시간, 거리 및 각도를 의미한다. Fig. 14(a)의 연속 시계열 신호 상에서 표적신호가 안정적으로 탐지됨을 확인할 수 있으며, 표적신호의 도달시간이 감소하는 것으로부터 무인수상정이 표적에 근접함을 알 수 있다. Fig. 14(b)의 탐지결과 추정 값에서도 표적과의 상대거리가 일관성 있게 줄어들고 있는 것을 확인할 수 있다. 그러나 거리 추정결과와는 달리 방위각 추정 결과에 약간의 흔들림이 있는 것을 볼 수 있는데, 이는 거친 해상환경으로 인한 무인수상정 선수의 흔들림에 의한 것으로 추정된다.

송신신호의 종류를 달리한 두 가지 시험으로부터, 무인수상정용 전방탐지장치는 10 kts 이상의 기동 환경에서 수 km 이상 이격된 전방 수중표적을 안정적으로 탐지한 것을 확인할 수 있었으며, 계획된 기본 성능 이상을 만족한 것을 검증할 수 있었다.

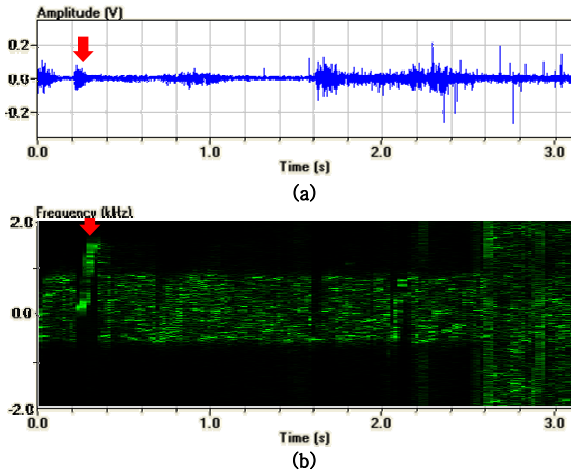


Fig. 13. Acquisition data using a FM pulse: (a) time-series signal and (b) spectrogram

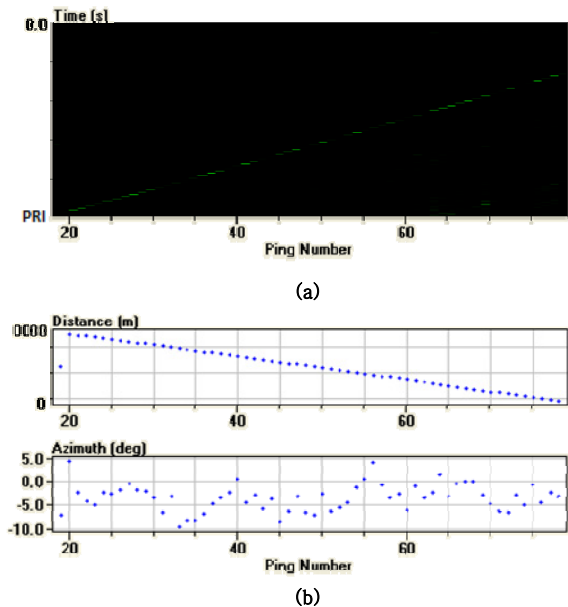


Fig. 14. Active detection results using FM pulse: (a) ping-section after matched filtering and (b) distance and azimuth

4.4 전방탐지장치 수동탐지 측정 결과

무인수상정의 운용전략에 따라 전방탐지장치는 능동 모드와 수동모드를 모두 운용한다. 수동모드로 운용할 때의 수중표적 탐지 가능성을 확인하기 위하여 무인수상정으로부터 일정거리 이격된 위치에서 수동소음원을 위치시키고, 무인수상정을 기동시켰을 때의 수동소음원의 탐지 여부를 확인하는 시험을 추가적으로 수행하였다. 본 시험에서는 고무보트의 엔진 출력음을 수동소음원으로 사용하였으며, 작은 원궤적 주행을 반복함으로써 소음원의 크기를 균일하게 유지하여 안정적인 광대역 신호획득이 가능하도록 하였다.

Fig. 15는 시험을 통해 획득된 신호로부터 수동소음원의 진폭 및 방위각을 추정한 결과를 도시한 것으로, 여기서 x축은 시간을 의미하고, y축은 순서대로 진폭과 각도를 나타낸다. Fig. 15(a)에서 적색 직선은 Pre-Enable 단계에서 측정된 환경소음 준위를 바탕으로 설정한 수동탐지 문턱 값을 의미한다. 수동소음원이 원궤적 기동을 주행하며 무인수상정에 접근할 경우에는 수신신호의 진폭이 증가하고, 무인수상정으로부터 멀어질 경우에는 신호의 진폭이 감소하는 현상을 명확히 관찰할 수 있었으며, Fig. 15(b)의 방위각 추정 결과에서도 소음원의 위치가 전방탐지장치의 좌우로 규칙적으로 반복되는 패턴을 볼 수 있었다.

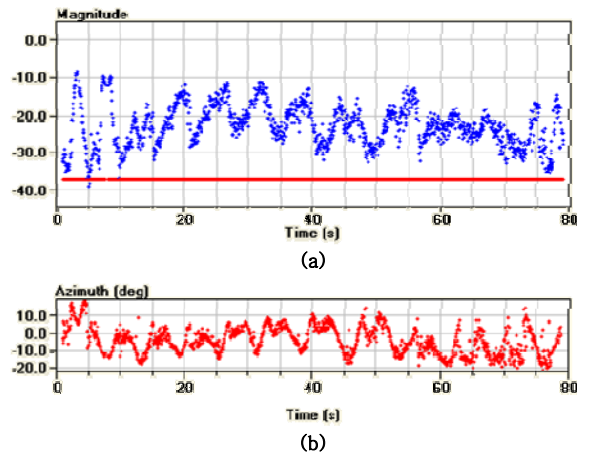


Fig. 15. Passive detection results of forward detecting sonar: (a) amplitude variation with threshold and (b) azimuth

실제 모터보트에 GPS 계측 장치를 탑재하지 못하여 정밀한 결과를 분석하지는 못하였으나, 획득신호와 탐

지결과를 살펴 볼 때 전방탐지장치를 수동모드로 운용할 때에도 수동표적탐지가 가능할 것임을 짐작할 수 있었다.

4.5 하방탐지장치 표적탐지 측정 결과

하방탐지장치의 하방표적 탐지가능성을 확인하기 위하여 안정적인 기동 환경에서 하방표적영상을 취득하였다. 본 논문에서는 CW 신호를 인가하였을 때의 획득 신호를 이용하여, 기본적인 영상처리를 수행한 결과를 실제 표적 형상과 대비하여 Fig. 16에 각각 도시하였다. 시험을 위하여 사용한 하방표적으로는 드럼통을 사용하였으며, 임의의 위치에 입수 및 회수의 편의를 위하여 로프를 연결하여 사용하였다.

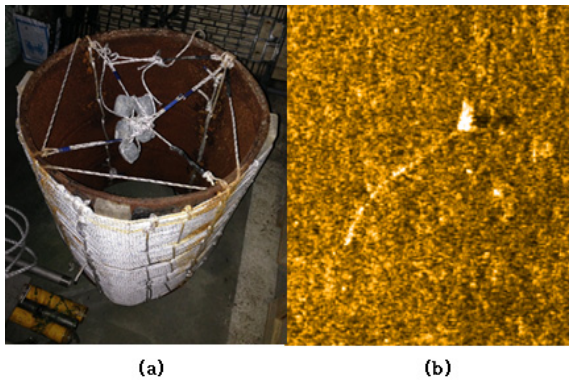


Fig. 16. A target for downward detecting sonar: (a) real target and (b) acquired image

획득 영상에서 로프가 연결된 드럼통 표적은 명확히 식별 가능하였으며, 연결된 로프까지 육안으로 인식 가능하였다. 하지만, 표적의 경계선은 뚜렷이 구분되지 않았기에 실제 무인수상정에서 목표로 하는 소형 표적의 자동 식별을 위한 해상도 개선이 여전히 요구된다. 현재 영상화 로직 개선 및 최적의 송신신호의 선정, 수신빔 추가 생성 등을 통하여 추가적인 연구를 수행중이며, 이에 적용하기 위한 하드웨어를 설계 중이다.

5. 결론

한국 해군의 무인화 체계 가능성을 판단하기 위해 현재 개발 중인 무인수상정 플랫폼에 가장 적합한 소

나시스템은 수중의 적 잠수함 표적을 원거리에서 정밀하게 탐지하는 것이며, 이를 목표로 소나시스템을 설계하여, 해상시험을 통해 탐지성능을 검증하였다.

먼저, 안정적인 자세제어 및 긴급 기동에 대한 운용성을 높이기 위해 스트럿 고정형 수중장착체 형태로 소나시스템을 선정하였으며, 전방의 원거리 수중표적 탐지를 위한 전방탐지장치를 설계하고, 하방의 고해상도 영상 획득을 위한 하방탐지장치를 설계하였다. 설계 고려사항을 바탕으로 무인수상정 임무에 적합하도록 하드웨어를 구성하고, 상세 운용 모드를 수립하여 최종적으로 무인수상정을 총괄하는 중앙통제장치의 제어에 따른 명령에 따른 탐지를 수행하고, 탐지결과를 중앙통제장치로 전송하는 등 본연의 임무를 수행할 수 있도록 개발하였다. 개발된 소나시스템은 해상시험을 통해 기본적인 탐지성능을 검증하였다.

본 소나시스템은 무인수상정에 국한되지 않고 소형화된 공간에 탑재되는 대잠소나에 쉽게 적용할 수 있으며, 수중분산 센서망의 이동노드로도 확장 가능하리라 판단된다. 하지만, 무인화 체계의 특성상 운용시간의 증대는 필수적이며, 소형화된 공간에서 발열문제를 해소시킬 수 있는 방안에 대한 심도있는 후속 연구가 필요하다. 또한, 고속 주행시 제어가 불가능한 수중장착체의 거동에 대해서도 높은 해상도를 확보할 수 있도록 추가적인 방진설계 및 후처리 알고리즘의 개발이 요구된다.

References

[1] W. T. Oh, Y. G. Kim, C. Y. Joh, I. I. Kim, S. I. Kim, and H. S. Seo, "Report of Investigation for Policy and Planning in Defense R&D(An Investigation Study on Network Centric Underwater Anti-Submarine Warfare Systems)," Agency for Defence Development, ADDR-115-080125, 2008.

[2] J. L. Choi, "R&D trend of Unmanned Undersea Vehicle for Anti-Submarine Warfare," Agency for Defense Development, ADDR-115-130971, 2013.

[3] V. Bertram, "Unmanned Surface Vehicle - a Survey," In Skibsteknisk Selskab, Compenhagen, Denmark, 2008.

[4] Y. I. Lee, S. G. Kim and Y. G. Kim, "Fuzzy Relational Product for Collision Avoidance of

- Autonomous Ships,” *Intelligent Automation and Soft Computing*, Vol. 21, No. 1, pp. 21-38, 2014.
- [5] M. K. Kim, K. S. Joe, D. H. Lee, B. H. Lee, and J. H. Shin, “USV System Design for Realizing the Autonomy Pursuit Technology of Underwater Sonar,” 10th Naval Weapon Systems Conference, 2014.
- [6] H. D. Kim, D. H. Kim, H. S. Bae, J. H. Ahn and S. M. Choi, “A Study of the USV Autonomous Trailing of Underwater Target using Active Sonar,” 10th Naval Weapon Systems Conference, 2014.
- [7] Y. J. You, D. H. Kim, J. H. Baek, I. C. Baek, J. S. Choi, H. S. Bae, C. W. You, and J. H. Kim, “The Development of USV’s Remote Control System for Chasing Underwater Acoustic Targets Autonomously,” 10th Naval Weapon Systems Conference, 2014.
- [8] J. H. Baek and I. C. Baek, “Development of Optimal Remote Control and Communication Device for USV Considering Operational Environment,” 22nd Ground Weapon Systems Conference, 2014.
- [9] J. H. Ahn, G. C. Lee, S. B. Park, I. C. Baek, Y. I. Lee, D. H. Kim and H. S. Bae, “A Study on the Autonomous Underwater Target Tracking with Unmanned Surface Vehicle,” *Bulletin of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 51, No. 2, pp. 23-28, 2014.
- [10] A. D. Waite, “SONAR for Practising Engineers,” 3rd Ed., John & Wiley & Sons Ltd., England, pp. 43-124, 2002.
- [11] R. J. Urick, “Principles of Underwater Sound,” 3rd Ed., McGraw-Hill Inc., pp. 17-30, 1983.
- [12] I. J. Doonan, R. F. Coombs and S. McClatchie, “The Absorption of Sound in Seawater in Relation to the Estimation of Deep-Water Fish Biomass,” *ICES Journal of Marine Science*, Vol. 50, pp. 1047-1055, 2003.
- [13] W. M. Carey and R. B. Evans, *Ocean Ambient Noise - Measurement and theory*, Springer, New York, 2011.
- [14] W. H. Key, “Side Scan Sonar Technology,” *OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition*, Vol. 2, pp. 1029-1033, Sep. 11-14, 2000.
- [15] P. E. Hagen, and R. E. Hansen, “Synthetic Aperture Sonar for the HUGIN 1000-MR AUV,” *UDT Europe 2006*, June 2006.