

## 무인수상정 탑재 측면주사소나 설계를 위한 모델링 연구

배호석<sup>\*.1)</sup> · 김우식<sup>1)</sup> · 김정훈<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> 국방과학연구소 제6기술연구본부

### Study to Design of Side-scan Sonar for Unmanned Surface Vehicle

Ho Seuk Bae<sup>\*.1)</sup> · Woo-Shik Kim<sup>1)</sup> · Jung Hoon Kim<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> The 6th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 14 September 2017 / Revised 14 December 2017 / Accepted 12 January 2018)

#### ABSTRACT

In order to successfully detect and identify underwater targets located on the seabed, unmanned surface vehicles (USVs) typically acquire acoustic signals with a side-scan sonar device and reconstruct information about the target from the processed images. As the quality of the side-scan sonar images acquired by USVs depends on the environment and operating parameters, using modeling and simulation techniques to design side-scan sonar devices can help optimize the reconstruction of the sonar images. In this work, we study a side-scan sonar design for use in USVs, that takes the movement of the platform into account. First, we constructed a simulated seabed environment with underwater targets, and specified the maneuvering conditions and sonar systems. We then generated the acoustic signals from the simulated environment using the sonar equation. Finally, we successfully imaged the simulated seabed environment using simple signal processing. Our results can be used to derive USV side-scan sonar design parameters, predict the resulting sonar images in various conditions, and as a basis for determining the optimal sonar parameters of the system.

Key Words : Side-scan Sonar(측면주사소나), Simulation Based Design(시뮬레이션 기반 설계), Unmanned Surface Vehicle(무인수상정)

#### 1. 서론

최근 무인수상정, 무인잠수정 등 해상에서 운용되는 무인플랫폼은 요소기술의 발전으로 인해 감시·보안,

해양 시추, 해양학 연구 등 매우 다양한 분야에서 활발히 적용되고 있으며 세계적 시장규모도 지속적으로 증가하는 추세이다. 이러한 무인플랫폼은 실제 해상 및 수중환경에서 자율적으로 주어진 임무를 수행하기 위하여 특정 운용조건에서의 수중물체 탐지·식별, 자율회피·기동, 수중통신 등의 능력이 필수적으로 요구되는데<sup>[1]</sup>, 수중표적 탐지·식별 임무를 성공적으로 수

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

행하기 위해서는 빛을 활용한 레이저, 카메라 등의 광학장비보다는 음향센서를 활용한 소나장비가 주로 사용된다.

해저면에 위치하는 수중표적 탐지·식별을 위한 소나장비는 1950년대에 미국 해군에 의해서 최초로 제시된 측면주사소나(Side-scan Sonar)를 시작으로 최근 개발된 합성개구소나(Synthetic Aperture Sonar)에 이르기까지 각 장비의 요구사항에 맞도록 운용속도와 영상분해능을 고려하여 설계·개발되고 있다<sup>2)</sup>. 특히, 측면주사소나는 송신호를 탑재플랫폼 측·하방으로 방사한 후, 해저면 및 수중표적에서 반향된 음향신호를 이용하여 해저면의 형상을 가독적으로 영상화하는 능동소나의 한 종류로써, 군사분야뿐만 아니라 민수분야에서도 널리 활용되고 있다<sup>3,4)</sup>.

무인수상정에 탑재되는 측면주사소나는 플랫폼이 요구하는 임무를 성공적으로 지원하기 위하여 요구사항에 최적화된 설계가 필요하다. 즉, 이론적인 해석해와 경험식에 근거하여 기본설계를 수행한 후, 축소시제를 이용한 수조/해상시험을 통해 기본성능 충족 가능성을 확인하여야 하며, 최종적으로 상세설계를 수행하여 시스템을 개발하여야 한다. 하지만, 실제 수중시험환경은 제어할 수 없는 환경변수가 많으며, 수중에서의 시스템 정밀 제어가 불가능한 문제를 가진다. 또한 시간 및 비용적인 제한조건이 있기 때문에 시뮬레이션 기반 설계를 수행하는 것이 보다 현실적이다. 따라서, 무인수상정용 측면주사소나를 개발하기 위해서는 측면주사소나 영상신호를 모의하는 연구가 선행되어야 하며, 다양한 수중환경, 운용조건 등에 대한 성능 및 효과도 분석 등을 수행하여야 한다.

실제 측면주사소나는 수 십년간 연구된 전통적인 주제로써, 많은 연구자들은 측면주사소나의 획득영상을 보다 정확하게 모의하고자 시도하였으며<sup>5-7)</sup>, 획득된 영상을 처리하는 기법과 획득영상을 분석하는 연구 등 무수히 많은 연구들이 선행되었다<sup>8,9)</sup>. 그럼에도 불구하고, 기존의 모델링 연구들은 모의영상의 정확도 및 정밀도 향상을 목적으로 모델링 알고리즘을 제안하는 것에 주안점을 두고 있으며, 실제 플랫폼의 기동을 고려한 무인수상정용 측면주사소나의 개발 설계치를 도출하기 위한 시뮬레이션 용도의 모델링 연구는 거의 없었다.

본 연구에서는 무인수상정 탑재 측면주사소나 개발을 위한 사전 연구로써, 무인수상정의 기동을 고려한 시뮬레이션 기반 측면주사소나 모델링을 연구하였다.

본 측면주사소나 모델링을 통해 다양한 운용조건에서 소나영상을 모의할 수 있었으며, 독립적으로 제어 가능한 운용조건 및 소나변수의 설정치에 따른 소나영상을 모의함으로써 무인수상정 탑재 측면주사소나의 설계를 위한 최적의 변수를 도출하고자 하였다.

## 2. 측면주사소나 모델링 고려요소

무인수상정 탑재 측면주사소나를 모델링하기 위해서는 Fig. 1에서 나타나는 요소들을 고려하여야 하며, 해저지형 내에서 탐지 대상이 되는 수중표적을 영상화하여 위치시켜야 한다. 다음으로 실제 무인수상정의 임무에 따른 3차원 기동궤적을 모사하여야 하며, 마지막으로 측면주사소나 시스템에 대한 운용조건을 설정할 수 있도록 설계하여야 한다.

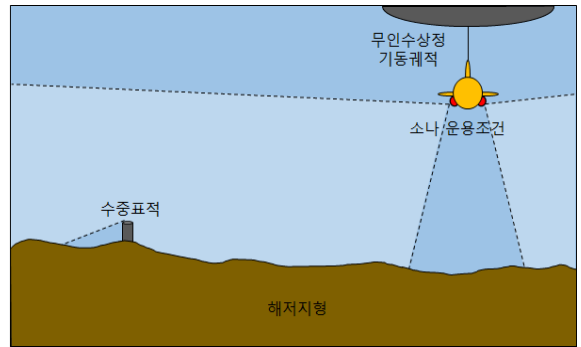


Fig. 1. The consideration factor of side-scan sonar modeling

먼저, 해저지형을 모사하기 위하여 무인수상정이 운용되는 전장환경의 최대영역을 고려하여야 한다. 그리고 실제 해역과 유사한 해저면 형상을 모델링하여야 하는데, 수치 표고 모형(Digital Elevation Model, DEM)을 이용하여 지형을 모사하거나 또는 개발자의 편의를 위하여 임의의 해저면 형상을 생성하기도 한다. 여기서, 측면주사소나는 변화가 심한 지형에서는 영상의 왜곡이 심해지는 제한성을 가지기 때문에, 가능한 해저지형은 평탄한 해저면을 갖도록 모의하는 것이 유리하다. 해저지형의 저질에 따른 반사신호의 감쇄를 고려하기 위하여 해저면의 반사계수(Reflection Coefficient)를 정의할 수 있어야 한다.

수중표적을 모사하기 위하여 탐지하고자 하는 대상

체를 결정하고 형상화하여야 하는데, 현실적인 이유로 인하여 타이어, 드럼통 또는 구형물체 등을 주로 사용한다. 수중표적은 크기, 재질 등에 따라 표적강도(Target Strength, TS)를 정의할 수 있도록 모델링하여야 하며, 앞에서 모의한 해저지형의 원하는 곳에 위치시킬 수 있어야 한다.

기동궤적을 모사하기 위하여 측면주사소나가 탑재된 플랫폼의 위치를 3차원적으로 설정할 수 있어야 하며, 플랫폼의 요동, 운용심도, 운용속도 등을 반영할 수 있도록 설계하여야 한다. 이 때, 기동궤적은 실제 무인수상정의 선체특성을 고려하여 기동 가능한 궤적으로 보정될 수 있어야 한다.

마지막으로, 측면주사소나 시스템의 운용조건을 모사하여야 하는데, 운용주파수, 송신음압, 수신센서 배열정보, 수신빔 개수, 송신주기, 펄스정보, 센서의 장착각도, 영상처리필터 등 소나 변수에 대해 독립적으로 제어 가능하도록 설계하여야 한다. 시스템 잡음준위, 타 장비와의 간섭 환경에서 요구해상도를 만족시킬 수 있도록 주파수 범위를 설정할 수 있도록 설계하여야 하며, 센서의 수신감도, 수신 지향지수 등을 고려하여 목표탐지거리를 구현할 수 있도록 송신음압 범위를 설계하여야 한다. 횡방향(across-track) 해상도 구현을 위해서는 해상도에 반비례하는 주파수 대역폭을 고려하여야 하는데, 대역폭은 송신펄스 설계에 따라 결정된다. 종방향(along-track) 해상도 구현을 위해서는 해상도에 비례하는 과장 길이와 해상도에 반비례하는 수신배열 길이를 고려하여야 하며, 이는 운용주파수, 수신배열 정보, 송신주기 및 플랫폼 기동속도 등의 설정을 통해 결정된다. 또한, 획득된 영상의 신호대잡음비(Signal to Noise Ratio, SNR)를 향상시키기 위한 펄스정보를 설계할 수 있어야 하며, 해수면 초동반사 신호를 고려할 수 있도록 측면주사소나의 장착각도를 설정할 수 있도록 개발하여야 한다. 그 외 영상처리를 위한 필터종류, 신호처리모듈, 영상처리모듈을 세부적으로 설정할 수 있는 설계가 요구된다.

본 논문에서는 전술한 모델링 고려요소를 반영하여 측면주사소나 모델링을 수행하였다.

### 3. 측면주사소나 모델 개발

측면주사소나를 이용한 영상을 모의하기 위해서는 본 논문에서는 해수층을 균일한 매질로 가정하여, 음

파의 굴절 및 회절현상 등을 고려하지 않았다. 또한 음파는 직접반사(direct reflection) 신호만 고려하고, 직접반사 신호를 제외한 2차 반사 및 다중경로반사(multi-path reflection) 신호는 무시하였다. 수중음향환경은 잔향음 제한(reverberation-limited) 환경이 아닌 잡음 제한(noise-limited) 환경으로 가정하였다. 또한, 전술한 모델링 고려요소들을 최대한 반영하되, 구현의 편의를 위하여 가능한 단순한 모델을 사용하였다. Fig. 2는 본 연구에서 구현한 측면주사소나 모델링을 위한 시나리오 생성단계와 시나리오 실행단계의 전반적인 흐름도를 보여주고 있다.

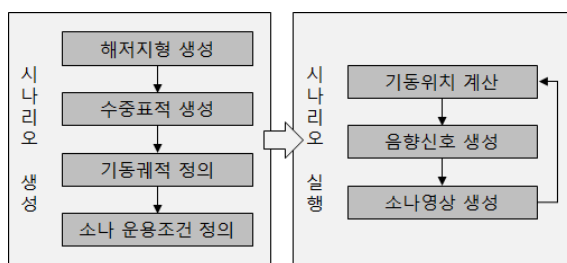


Fig. 2. Work-flow of side scan sonar modeling

#### 3.1 시나리오 생성단계

시나리오 생성단계에서는 해저지형 생성, 수중표적 생성, 기동궤적 정의 및 소나 운용조건 정의 단계로 구성된다. 먼저 해저지형을 생성하는 단계와 수중표적을 생성하는 단계를 Fig. 3과 같이 구현하였는데, 전장환경의 최대영역, 격자간격을 정의하고, 해수면의 평균심도를 설정하면, 임의의 지형으로 생성되도록 구현하였다. 여기서는 전장환경을 200 m × 200 m, 격자간격은 0.2 m, 평균 심도를 15 m의 천해로 가정하였다.

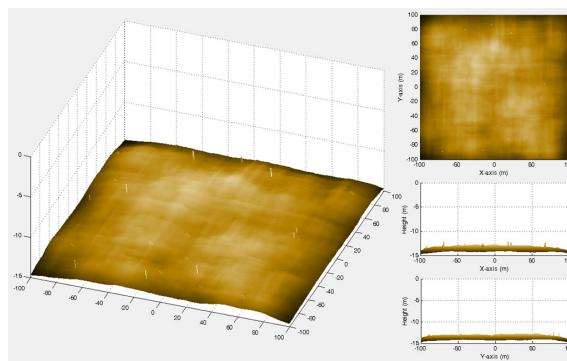


Fig. 3. Definition of seabed and target models

수중표적은 운용자가 입력하는 크기의 타이어, 드럼 통 등의 인공표적 형상을 해저지형의 임의 위치에 생성토록 구현하였는데, Fig. 4는 직경 1.6 m, 높이 0.4 m로 입력한 타이어와 직경 0.6 m, 높이 1.0 m로 입력한 드럼통의 형상화 결과의 한 예를 보여주고 있다.

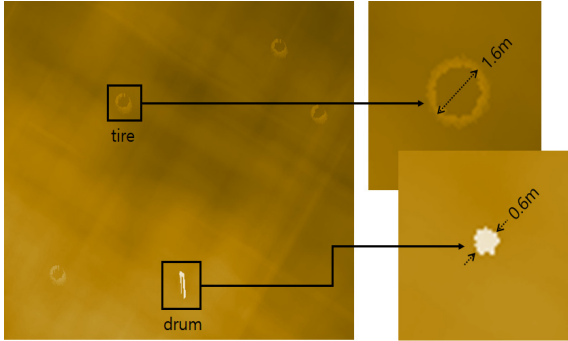


Fig. 4. Underwater targets: tire and drum

기동궤적 정의 단계는 측면주사소나가 탑재된 무인수상정의 기동궤적을 입력하는 단계로, 경로점(way point)을 입력할 수 있도록 Table 1과 같이 구현하였다. 즉, 경로점의 3차원 좌표정보, 기동속도, 탐색거리, 수신빔 개수, 송신펄스 정보 등을 구간별로 정의할 수 있도록 설계하여, 무인수상정의 운용조건을 구간별로 변화시킬 수 있도록 하였으며, Fig. 5와 같이 가독성 있게 기동궤적을 전시하도록 구현하였다.

Table 1. Trajectory input window

	#1	#2	#3	#4
Start Way-Point (X)	0	-10	10	20
Start Way-Point (Y)	-90	-40	10	50
Start Way-Point (Z)	-2	-2	-2	-2
End Way-Point (X)	-10	10	20	60
End Way-Point (Y)	-40	10	50	90
End Way-Point (Z)	-2	-2	-2	-2
Speed [kts]	3	3	3	3
Detection Range [m]	150	150	150	200
Number of Beams	3	3	1	1
Pulse Type (0: CW/1: FM)	0	0	1	1

시나리오 생성단계의 마지막인 소나 운용조건 정의 단계는 운용변수에 따른 소나의 성능과 효과도 등을 분석하기 위해 필요한 기능으로, 각각의 운용변수를 독립적으로 제어할 수 있도록 설계하여야 한다. 여기서는 측면주사소나의 운용주파수, 송신음압, 수신감도, 수신센서 배열정보, 수신빔 갯수, 송신주기, 펄스정보, 센서의 장착각도, 이산화율, 잡음수준, 탐색거리, 전시 해상도 등 측면주사소나에서 운용할 수 있는 대부분의 소나변수를 설정할 수 있도록 구현하였다. 여기서는 200  $\mu$ s 길이를 가지는 450 kHz 정현파 신호를 0.14 s 주기로 송신음압 220 dB re 1 $\mu$ Pa/V@1m로 송신하며, 총 길이 0.8 m인 8개의 수신센서 배열로 수신감도는 -190 dB re 1V/ $\mu$ Pa@1m로 가정하였다. 또한 센서의 장착각도는 하방으로 10도를 조향하도록 가정하였다.

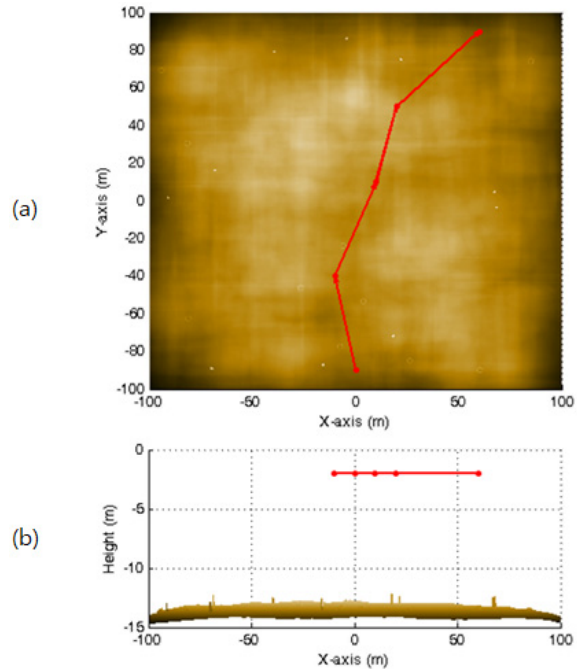


Fig. 5. Trajectory: (a) top-view and (b) side-view

운용주파수, 수신센서 배열에 따른 빔패턴은 Fig. 6(a)와 같이 거리에 따라 시간 영역에서의 적분을 통해 모델링을 각각 수행하였는데, 50 m 이상의 원거리에서는 설계한 바와 같이 첨예한 빔패턴을 가지는 것을 확인할 수 있으나, 50 m 이하의 근거리에서는 근거리 간섭으로 음압을 거리와 직접적으로 관련지을 수 없는 프레넬 영역(Fresnel Zone)을 보여주고 있다.

타당성을 검증하기 위하여 Fig. 6(b)와 같이 수조시험을 통해 획득한 기록신호와 비교를 수행하였다. 여기서, TD1과 TD2는 각각 측면주사소나의 좌/우현 수신 센서를 의미하는데, 제한적인 크기의 수조환경으로 인하여 운용주파수 및 센서배열 길이에 비해 측정거리가 짧아, 근거리장이 불가피하였으며, 근거리장 환경에서 모델링 결과와 유사한 패턴을 가지는 것으로부터 모델링의 타당성을 부분적으로 검증하였다.

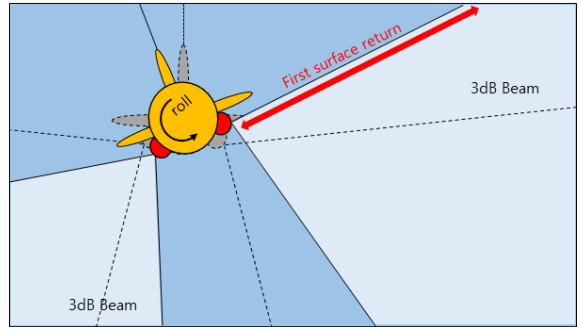


Fig. 7. Concept of first surface return signal

### 3.2 시나리오 실행단계

시나리오 실행단계에서는 무인수상정의 기동에 따라 현재 위치 계산하고, 그 지점에서의 음향신호를 모의한 후, 간단한 신호처리를 거쳐 소나영상을 생성하는 과정을 반복적으로 수행한다.

먼저, 기동위치 계산 단계에서는 무인수상정의 기동 궤적과 운용속도, 수신빔수, 측면주사소나의 장착각도 및 송수신 3dB 빔폭에 따라 탐색영역을 산정하고, 영역 내에 위치하는 지형 정보로부터 거리, 입사/반사각도, 초동시간 등을 음선법에 기반하여 계산하였다.

음향신호 생성단계에서는 앞에서 계산한 기하학적인 정보와 해저지형의 반사계수, 수중표적의 표적강도, 운용자가 입력하는 송신음압 등의 운용변수를 바탕으로, 격자화시킨 해저지형의 모든 위치에서 음향신호의 수신준위를 식 (1)을 이용하여 계산하였다.

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

여기서, SE(Signal Excess)는 신호초과 준위, SL(Source Level)은 송신 준위, TL(Transmission Loss)은 전달손실, TS(Target Strength)는 표적강도, NL(Noise Level)은 잡음준위, DI(Directivity Index)는 지향지수, 그리고 DT (Detection Threshold)는 탐지문턱 준위이다. 격자화시킨 해저지형의 모든 위치로부터 측면주사소나가 위치한 좌표까지 음선법에 근거하여 음선이 도달하는지의 여부를 계산하였으며, 음선이 도달하지 않는 해저지형의 격자를 은면부로 판단하여 음향신호의 수신준위 계산을 제외시켜 음영구역을 표현하였다. 추가적으로, 해수면 초동반사 신호를 표현하기 위해서 측면주사소나의 장착각도, 수직빔폭, 그리고 횡요동을 계산한 후, 해수면과의 최단거리에서의 해수면 초동반사 신호의 수신준위가 특정 문턱치 이상으로 계산될 경우에만

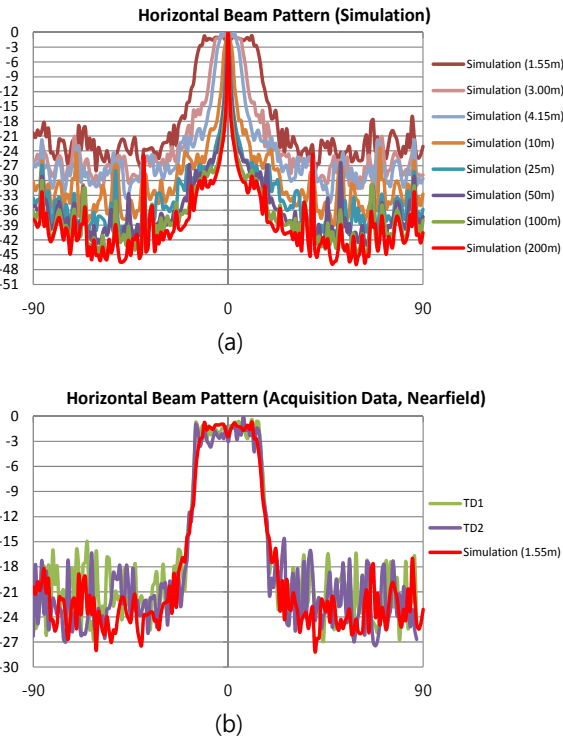


Fig. 6. Verification of beam pattern: (a) simulation results and (b) comparison with water-tank test

또한 해수면으로부터 소나의 장착각도가 작거나, 혹은 횡요동이 심할 경우 등 특정한 경우에서 관찰하는 해수면 초동반사(first surface return) 신호도 선택적으로 모의 가능하도록 개발하였다. Fig. 7은 횡요동이 생겼을 때의 센서의 조향 범위를 도식화한 그림으로 파선은 횡요동이 없는 정적인 상황을 보여주는 반면, 실선은 횡요동이 생겼을 때의 상황을 보여준다. 조향 영역은 색상으로 구분하였는데, 여기서 지배적인 해수면 초동반사 신호를 이해하기 쉽게 보여주고 있다.

해수면 반사신호가 존재한다고 판단하였다. 최종적으로 탐색영역 내의 모든 해저지형에서 계산한 임펄스 응답(impulse response)과 운용자가 설정한 송신펄스와의 합성곱(convolution)을 수행한 후, 잡음신호를 추가하여 Fig. 8(a)와 같은 측면주사소나 좌/우현의 시계열 신호를 생성하였다.

이렇게 모의된 음향신호에서 전달손실을 보상하기 위한 이득과 소나영상의 가독성을 향상시키기 위한 추가적인 이득 등을 고려하여 좌/우현에 대한 시계열 신호를 Fig. 8(b)에서와 같이 각각 보상하였다.

음향신호의 영상화를 위해서 간단한 영상필터를 설계하였는데, 영상의 감도(intensity)를 0부터 255까지의 수로 변환하여 Fig. 8(c)와 같이 도시하였으며, 사전에 별도로 정의한 RGB 색상으로 매핑하였다. 소나영상의 해상도는 운용자가 측면주사소나 전시장비의 해상도를 기준으로 정의할 수 있도록 구현하였는데, 기본값을 1024로 가정하였다. 기동위치의 변화에 따라 위의 과정을 반복적으로 수행하면 Fig. 8(d)과 같은 최종 소나영상을 획득할 수 있다.

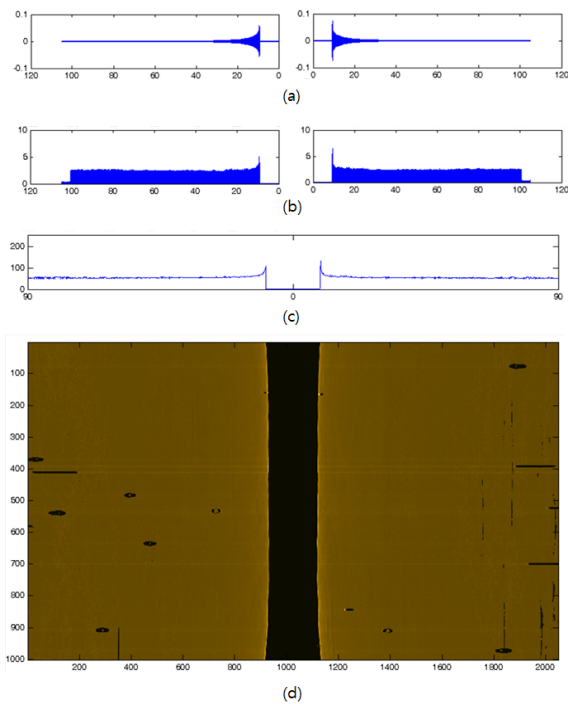


Fig. 8. Modeling procedure: (a) raw signals, (b) processed signals, (c) converted pixel value, and (d) generated image

본 연구에서는 Fig. 4에서 제시한 타이어와 드럼을 임의의 수중표적으로 가정한 후, 무인수상정의 기동궤적과 소나의 운용조건에 따른 소나영상을 모의하였는데, Fig. 9는 모의영상에서의 확대 영상을 각각 보여주고 있다. 타이어 표적인 경우, 타이어의 형상이 명확히 영상화된 것을 확인할 수 있으며, 드럼 표적인 경우, 타이어에 비해 높이가 높아서 음영구역이 넓게 구현되고, 넓은 반사면으로 인해 영상 감도가 높은 것을 관찰할 수 있다.



Fig. 9. Enlarged images of underwater targets

Fig. 10은 Fig. 7에서 말한 횡요동을 고려한 소나영상의 한 예를 보여주고 있다. 횡요동이 심할 경우, 해수면 반사 신호의 영향이 반영되어 모의된 것을 확인할 수 있다.

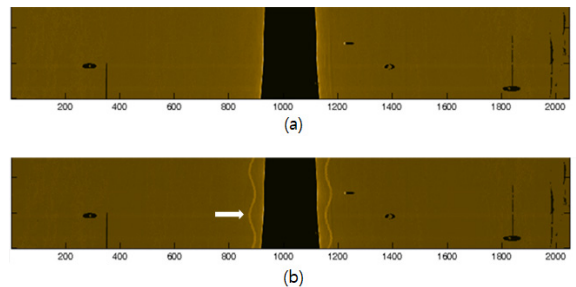


Fig. 10. Example of first surface return signals

#### 4. 결론

본 연구에서는 무인수상정에 탑재되어 운용되는 측면주사소나의 설계치를 도출하고, 성능을 예측하기 위한 기본설계 단계의 접근 방법으로, 측면주사소나의 신호를 모의하는 연구를 수행하였다. 본 연구에서 개발한 모델링 알고리즘은 표적반사의 관점에서 소나신호를 모델링한 것으로, 복잡한 해저지형뿐만 아니라 주변의 수중표적 등의 이상체를 합성한 지형을 생성할 수 있으며, 무인수상정의 기동궤적을 정의할 수 있

다. 또한, 해수면 초동반사신호의 모의도 선택적으로 가능하며, 무인수상정에서 운용 가능한 대부분의 소나 변수를 독립적으로 제어할 수 있도록 개발하여 각 변수에 따른 성능을 분석할 수 있도록 구현하였다.

본 모델링 알고리즘은 무인수상정 탑재 측면주사소나가 획득하는 소나영상을 1차적으로 예측할 수 있으며, 최적의 소나영상을 획득할 수 있도록 운용 변수를 제시할 수 있는 등 교육적인 자료로의 활용이 기대된다. 하지만, 본 연구는 음향신호의 산란현상을 고려하지 않고, 단순 반사현상만을 모사하였기 때문에 정확성을 검증하기에는 현실적으로 한계를 가진다. 따라서, 해저면 산란효과 및 클러터 효과 등을 고려할 수 있는 후방 산란신호를 모의할 수 있는 알고리즘이 추가된다면, 더욱 양질의 측면주사소나 영상을 모의할 수 있으리라 기대된다.

## References

- [1] D. Langer and M. Hebert, "Building Qualitative Elevation Maps from Side Scan Sonar Data for Autonomous Underwater Navigation," Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol. 3, pp. 2478-2483, 1991.
- [2] M. F. Fallon, M. Kaess, H. Johannsson, and J. J. Leonard, "Efficient Auv Navigation Fusing Acoustic Ranging and Side-scan Sonar," Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2398-2405, 2011.
- [3] B. Li, W. An, J. Li, Y. Zhao, X. Shi, and W. Wang, "Application of Side Scan Sonar in the Detection of Sunken Oil in Shallow Sea," International Geophysical Conference, pp. 886-889, 2017.
- [4] H. S. Yoo, S. J. Kim, and D. W. Park, "Discovery of the Dmitri Donskoi Ship Near Ulleung Island (East Sea of Korea), using Geophysical Surveys," Exploration Geophysics, Vol. 8, No. 1, pp. 104-111, 2005.
- [5] D. H. Gwon, T. Y. Kim, M. H. Kim, H. G. Park, T. Y. Kin, and A. Kim, "Development of a Side Scan Sonar Module for the Underwater Simulator," International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence, pp. 662-665, 2017.
- [6] W. Jin, "Side Scan Sonar Modeling for Maritime Robotic Operations," Applied Mechanics and Material, Vol. 152-154, pp. 1195-1201, 2012.
- [7] M. Helferty, "The Geological Interpretation of Side-scan Sonar," Reviews of Geophysics, Vol. 28, pp. 357-380, 1990.
- [8] S. Reed, I. T. Ruiz, C. Capus, and Y. Petillot, "The Fusion of Large Scale Classified Side-Scan Sonar Image Mosaics," IEEE Transactions on Image Processing, pp. 2049-2060, 2006.
- [9] S. Reed, Y. Petillot, and J. Bell, "A Model Based Approach to Mine Detection and Classification in Sidescan Sonar," Ocean 2003 Proceeding, pp. 1402-1407, 2003.