

## 소나방정식 기반의 초음파카메라 모델링 알고리즘 개발

이다운<sup>1</sup> · 배호석<sup>2</sup> · 임예리<sup>3</sup> · 정우근<sup>†</sup>

(Received October 29, 2018 ; Revised December 17, 2018 ; Accepted March 28, 2019)

### Development of an acoustic camera modeling algorithm based on a sonar equation

Dawoon Lee<sup>1</sup> · Ho-Seuk Bae<sup>2</sup> · Yeli Lim<sup>3</sup> · Wookeun Chung<sup>†</sup>

**요약:** 무인수중체에 대한 연구가 활발해짐에 따라 무인수중체의 안정적인 기동을 위한 관심이 높아지고 있다. 초음파카메라라는 안정적인 기동을 위한 장비 중 하나로서 수중환경에서 기동방향 전방에 대한 영상을 취득하기 위한 장비이며, 탁도로 인해 광학 영상을 취득하기 어려운 상황에서 전방에 존재하는 장애물을 탐지하고 회피하기 위한 필요한 장비이다. 초음파카메라를 통해 취득된 영상자료를 이용하여 장애물 탐지, 기동회피 알고리즘을 개발하기 위해서는 다양한 지형환경에서의 실험이 필요하며, 장애물의 종류와 크기 형태에 따른 준비가 필요 할 뿐만 아니라 초음파카메라의 운용조건에 따른 많은 영상이 필요하다. 본 논문에서는 초음파카메라 장비의 취득 자료 모사를 위한 모델링 알고리즘을 개발 하였으며, 각 알고리즘 구성에 대한 설명과 수치예제를 통한 취득 영상의 적합성을 확인하였다. 개발된 모델링 알고리즘은 초음파카메라 취득 자료를 이용한 실시간 장애물 탐지, 기동회피를 위한 알고리즘 개발에 보조수단으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

**주제어:** 초음파카메라, 모델링, 무인수중체

**Abstract:** With the increase in research on unmanned underwater vehicles (UUVs), interest in stable movement of UUVs is also increasing. An acoustic camera is a device used to ensure the stable movement of a UUV. Specifically, it is used to acquire images in front of the UUV as the vehicle moves through an underwater environment, which helps in detecting and avoiding obstacles in situations where acquiring optical images is difficult owing to turbidity. To develop an algorithm for detecting and avoiding obstacles using an acoustic camera, performing experiments in various topographic regions and with obstacles of different types and sizes is necessary. In addition, several types of images are required for the operation of an acoustic camera. In this study, we developed a modeling algorithm to simulate images acquired from an acoustic camera. We confirmed the suitability of the acquired images by describing the algorithm's composition and providing numerical examples. It is expected that the proposed modeling algorithm can be used as an auxiliary model to develop algorithms for real-time detection and avoidance of obstacles using simulated data.

**Keywords:** Acoustic camera, Modeling, Unmanned underwater vehicle (UUV)

### 1. 서론

수중환경에서 해저면 또는 장애물을 영상화하기 위해 이 용되는 장비 중 광학 특성을 이용한 장비는 빛의 산란과 탁도로 인하여 원거리 영상취득이 어려움이 있다. 이러한 문제로 수중에서는 음향 특성을 이용한 장비가 주로 사용 되어지고 있다[1]-[3].

음향 특성을 이용하여 수중영상을 취득하는 대표적인 장 비는 측면주사소나(Side Scan Sonar), 초음파카메라(Acoustic

Camera)가 있다. 측면주사소나는 측면으로 음원을 송수신 하여 얻어지는 신호를 통해 측면에 존재하는 넓은 영역의 해저면과 장애물을 영상화 할 수 있는 장비이며, 빠르고 효율적으로 운용할 수 있으므로 해저지반탐사에 많이 사용된다[4]. 초음파카메라는 전방을 향하여 음원을 송·수신하고 얻어지는 신호를 영상화하는 장비이며, 기존 소나장비에 비해 고주파수 음원을 사용하여 탐지거리의 작지만 고해상도의 영상을 취득한다는 특성이 있다. 초음파카메라는 주

† Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9101-3864>): Associate professor, Department of Energy & Resources Engineering, Korea Maritime & Ocean University, 727, Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan 49112, Korea, E-mail: wkchung@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4681

1 Ph.D Candidate, Department of Ocean Energy & Resources Engineering, Korea Marine & Ocean University, E-mail: dwlee@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4916

2 Senior Researcher, Maritime Technology Research Institute, Agency for Defense Development, E-mail: belfre@add.re.kr, Tel: 055-540-6337

3 M.S Candidate, Department of Ocean Energy & Resources Engineering, Korea Marine & Ocean University, E-mail: ye2929@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4916

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

로 해저지반 탐사, 장애물 탐지에 주로 이용되고 있으며, 최근에는 무인수중체(Unmanned Underwater Vehicle)와 같은 수중이동체에 이용되고 있다. 초음파카메라와 같은 수중환경에서의 고해상도 영상장비는 무인수중체의 작전 수행 시 목표물 탐지, 장애물 회피와 같은 역할을 수행하기에 필수적인 장비이다[5]-[7].

초음파카메라는 전방의 각 방향에 따른 신호를 구분하고 영상을 얻기 위해 빔 조향(Beam Steering)을 통해 주 로브의 방향을 변화 시키며 음원을 송신하고, 기록된 신호의 주파수를 분석하여 취득된 방향을 정하고 이를 영상화한다. Figure 1은 조향 배열(Steered Array)로 구성된 센서를 이용한 음원을 통해 표적을 탐지하는 과정의 간단한 모식도이다. 초음파카메라는 일반적으로 수MHz의 고주파수 대역의 음원을 이용하여 수평방향에 대한 수cm~ 수십cm의 고해상도 2차원 영상을 취득할 수 있으며, 장비 목적에 따라 음원을 수평, 수직 방향으로 송신하여 취득되는 신호를 통해 3차원 영상을 취득 할 수 있다[8].

실제 초음파카메라 장비를 이용하여 목적하는 환경에서 장비의 최적화된 설계를 수행하기 위해서는 다양한 운용조건(음원 특성, 빔의 방향, 운용심도, 항해 속도 등)에 따른 자료를 취득해야 되기 때문에 많은 어려움이 존재한다. 그러므로 초음파카메라 자료 취득 모델링 알고리즘 개발은 장비의 성능과 최적화된 설계를 위해 필요한 도구이다. 실제 국외에서는 측면주사소나 장비와 초음파카메라 취득 자료를 모사하기 위한 연구는 많이 존재하지만[9], 국내에서는 측면주사소나 장비에 대한 모델링 연구는 활발하지만 초음파카메라에 관한 모델링 연구는 미흡한 실정이다. 초음파카메라 장비의 취득 자료 모사 연구는 목적하는 해양 환경에 대해 효율적인 장비 개발을 위한 사전 연구가 될 수 있으며, 다양한 수중환경과 운용조건에 따라 취득된 영상에서 물체를 탐지하고 분류하기 위한 알고리즘을 개발하고 테스트하기 위한 연구이다.

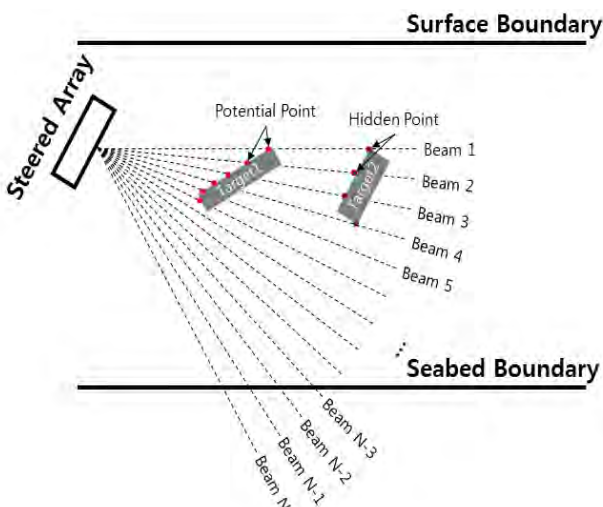


Figure 1: Source transmission process of acoustic camera

본 논문에서는 무인수중체의 3차원 기동을 가정하였을 때, 다양한 수중환경과 운용조건을 고려하여 영상을 모의할 수 있는 소나방정식(Sonar Equation) 기반의 모델링 알고리즘을 개발 하였다. 개발된 모의 신호 모델링은 좌표 기반의 지형모델과 장애물을 이용하였으며, 특정 환경에서의 영상을 모의하고자 하였다.

## 2. 초음파카메라 모델링 알고리즘

초음파카메라 모델링의 작업 순서는 Figure 2와 같이 설계되어있다. 해당 알고리즘은 크게 시나리오 입력 부, 신호 생성 부, 영상 생성 부로 구성된다. 시나리오 입력 부는 지형 및 장애물 모델과 초음파카메라 장비의 운용조건, 경로를 설정한다. 그 다음 신호 생성 부는 시나리오 입력 부에서 설정된 값을 이용하여 소나방정식 기반으로 경로에 따른 신호를 생성한다. 마지막으로 영상 생성 부는 생성된 신호를 취득 방향에 따라 구분 하고 실제 초음파카메라 장비의 영상 화면과 유사하게 신호를 영상으로 변환한다.

처음 시나리오 입력 부의 지형 및 장애물 설정 부에서는 수치표고자료(DEM)를 이용하기 위해 3차원 좌표기반의 모델링 알고리즘을 구성하고자 하였다. 따라서 해저면과 장애물은 3차원 좌표 정보 기반으로 구성되어 있어야한다. 초음파카메라 장비의 신호를 모의하기 위해서는 운용조건인 주파수(Frequency), 주파수 폭(Frequency Bandwidth), 빔 개수, 신호 길이(Pulse Length) 등을 고려할 수 있어야한다. 기동의 경우 3차원 좌표기반으로 구성되어야 하며 무인수중체에 장착된 초음파카메라를 고려하여 기동에 따른 탐지각도의 변화를 고려할 수 있어야한다. 신호 생성 부에서는 탐지 범위 내 좌표를 구분하고, 탐지 범위 내 은면에 속하는 좌표를 제외한 다음, 소나방정식을 활용하여 구분되어진 좌표와 설정된 운용조건을 이용하여 신호를 생성한다. 마지막으로 영상 생성 부에서는 모의된 신호를 영상처리(image processing)를 통해 실제 초음파카메라 장비와 유사하도록 영상화시킬 수 있어야 한다.

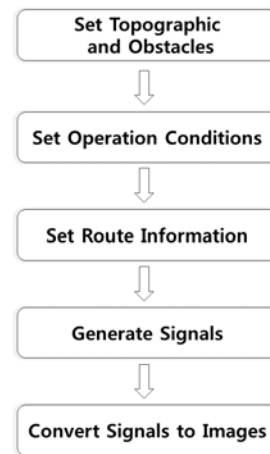
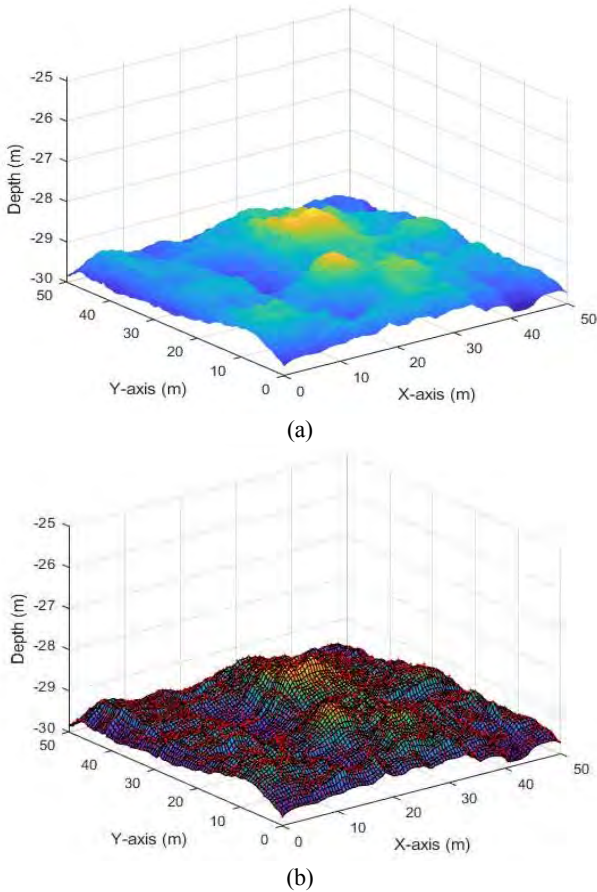


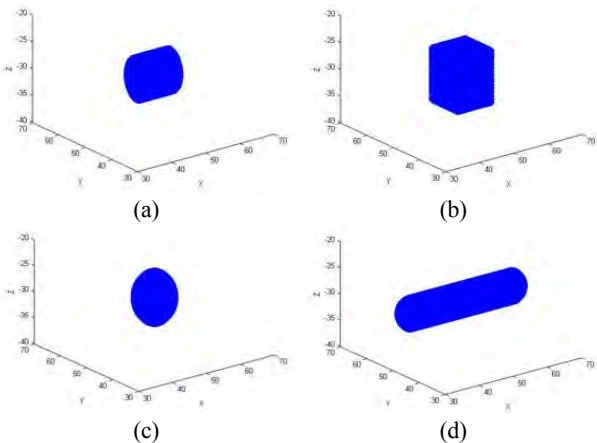
Figure 2: Work flow of acoustic camera modeling algorithm

### 2.1 지형 & 장애물 정보

개발된 초음파카메라 모델링 알고리즘은 좌표기반의 정보를 이용하여 신호를 모의하기 때문에 지형 및 장애물에 대한 정보 또한 좌표로 구성되어야 한다. **Figure 3 (a)**는 표현하고자하는 3차원 지형정보이며 **Figure 3 (b)**는 3차원 지형정보에서 좌표를 추출하여 나타내었다.



**Figure 3:** The seabed topographic (a) Three-dimensional information, (b) Coordinate extraction

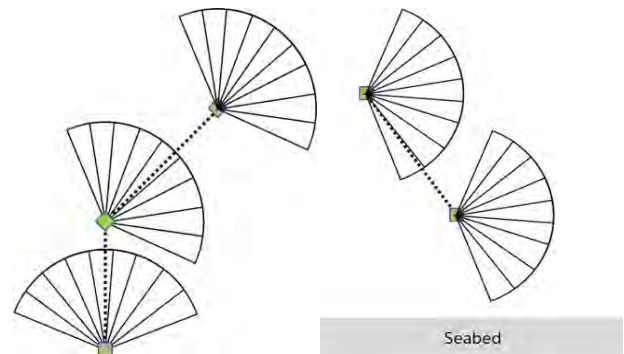


**Figure 4:** Underwater target (a) Cylinder, (b) Hexahedron, (c) Sphere, (d) Combined hemi-spheres and cylinders

수중장애물 정보의 경우 3차원 좌표기반으로 구성하였으며, **Figure 4**은 원기둥(Cylinder), 직육면체(Hexahedron), 구(Sphere), 반구와 원기둥을 결합 모델을 좌표기반으로 표현한 것이다.

### 2.2 무인수중체 기동환경

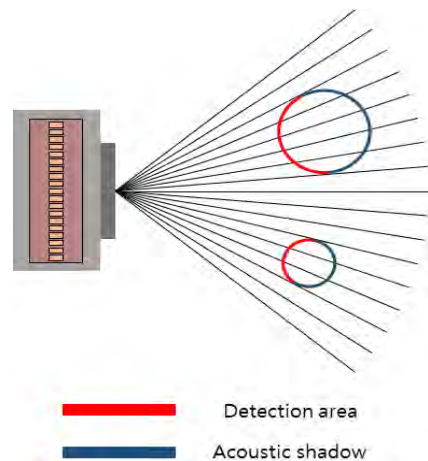
개발된 모델링 알고리즘은 초음파카메라가 무인수중체에 장착된 상황을 고려한 기동 환경을 모사하였다. 개발된 알고리즘은 무인수중체의 수평방향 이동에 따른 헤드 방향이 전향됨을 고려하여 수평 탐지 각도가 변하도록 하였으며, 수직방향 이동의 따른 방향전환은 고려하지 않았다. (**Figure 5**). 본 연구에서는 설정한 기동 경로 중간지점의 송신지점을 펄스반복주기(Pulse repetition interval)를 이용하여 결정하였다.



**Figure 5:** The changed detection area due to motion.

### 2.3 신호 모의

초음파카메라 장비의 신호모의는 탐지영역에 존재하는 좌표를 인식하고 지형 및 장애물로 인해 나타나는 음향음영 영역을 고려할 필요가 있다. **Figure 6**은 탐지영역 내 구형 장애물이 존재하는 상황에서의 탐지영역과 음향음영 영역을 나타내는 그림이다. 본 연구에서는 파선법에 근거하여 음향음영 영역을 판단하고자 하였으며, 보다 효율적인 판단을 위해 탐지영역 내 좌표를 빔 각도와 빔 개수 기준으로 양자화(Quantization)를 수행하였다. **Figure 7**은 송신 빔의 형태와 빔 개수와 빔 각도에 따라 좌표정보를 양자화 한 것을 나타낸 것이다.



**Figure 6:** Sonar detection area and acoustic shadow

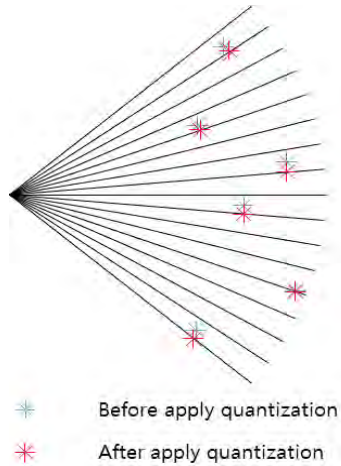


Figure 7: Quantized result examples

탐지범위 내 음향음영 영역 좌표를 제외한 신호를 모의하기 위해 제외되지 않은 좌표를 인식하고 수신기 위치와의 거리를 이용하여 임펄스 반응(Impulse response)을 계산한다. 계산된 임펄스 반응은 식 (1)의 소나방정식을 이용하여 송신신호의 수신준위를 적용한 신호를 합성곱(Convolution)을 통해 신호를 모의한다. 모의된 신호의 경우 1차 반사 신호만을 고려하였으며, 2차 반사, 산란 신호 등은 고려하지 않았다[10].

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

여기서 SE(Signal Excess)는 신호초과 준위로서 최종 취득된 신호 정보를 의미하며, SL(Source Level)은 송신 준위, TL(Transmission Loss)은 전달손실 준위, TS(Target Strength)는 표적강도, NL(Noise Level)은 잡음준위, DI(Directivity Index)는 지향지수, DT(Detection Threshold)는 탐지문턱 준위이다.

#### 2.4 영상화 & 검증

초음파카메라는 무인수중체 전방으로 음원을 스위핑하며 각 방향에 따라 다른 주파수의 신호를 송신한다. 이때, 송신원의 주 로브의 방향은 특정각도를 향해 전파되며, 역으로 취득된 신호를 분석하여 취득신호의 방향을 알 수 있다. 취득된 신호는 각도-거리 영역으로 직교좌표계로 영상화할 수 있지만, 이는 직관적이지 않기 때문에 주 로브의 방향에 따른 신호의 전파양상을 직관적으로 분석할 수 있는 극 좌표계로 영상화하는 것이 분석에 있어서 효율적이다.

Figure 8은 벽 앞에 존재하는 구를 모사하여 취득한 자료를 나타낸 것이다. Figure 8 (b)는 취득된 신호를 직교좌표계 형태로 영상화 한 것이며, Figure 8 (c)는 스위핑 각도인  $\pm 60^\circ$ 를 고려하여 극 좌표계 형태로 영상화 한 것이다. 직교좌표계 형태의 영상은 취득된 신호의 거리에 대한 분석이 수월하지만, 장애물이 무엇인지 형태에 대한 구분이 어려워 짐을 확인 할 수 있다. 극 좌표계 형태로 영상화 한 것은

거리에 대한 분석은 어렵지만, 장애물의 형태와 음향음영에 대한 분석에 있어서 유리해짐을 확인 할 수 있다.

소나방정식 기반으로 개발된 본 알고리즘은 음향영역에 존재하는 좌표에 대한 기하학적 거리를 이용하여 임펄스 반응을 계산한다. 개발된 알고리즘의 검증을 위해서는 초음파카메라의 위치에 따른 음향영역에 대한 기하학적 검증이 필요하다. 본 논문에서는 해당 알고리즘에 대한 검증을 위하여 초음파카메라의 기하학적 위치에 따른 음향영역에 대한 영상을 확인하고 이를 모델링 알고리즘을 통해 얻어진 영상과 비교를 통한 검증을 수행하였다[11]. Figure 9는 알고리즘 검증을 위해 원기둥 형태의 물체를 이용하여 초음파카메라의 기하학적 위치에 따라 나타난 음향영역의 영상과 초음파카메라 모델링 알고리즘을 이용하여 취득한 영상이다. 모델링을 통해 음향영역에 대한 신호가 기하학적 영상에서 원기둥의 형상을 따라감을 확인할 수 있으며, 원기둥의 음향음영 영역에 대한 구분이 잘 수행됨을 확인할 수 있다.

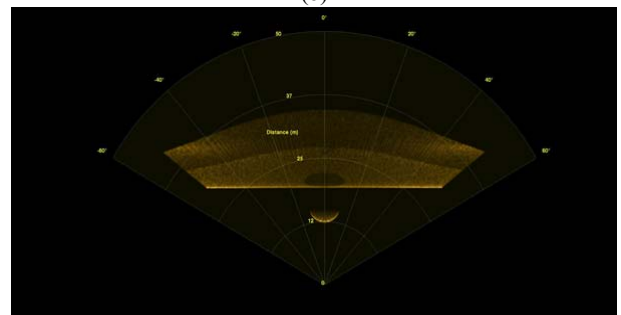
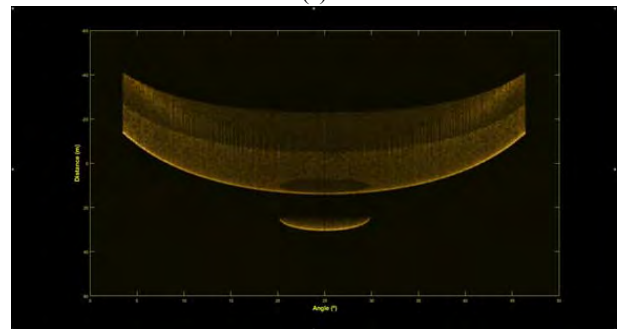
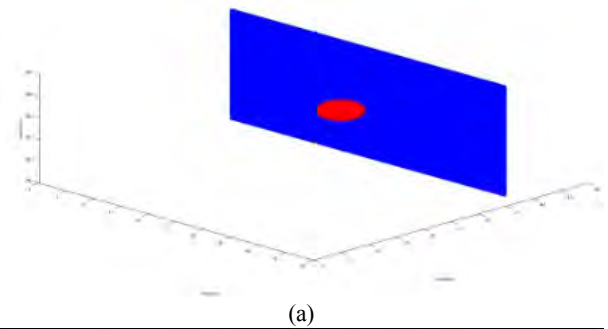


Figure 8: (a) Geometry, (b) Rectangular coordinates image, (c) Polar coordinates image

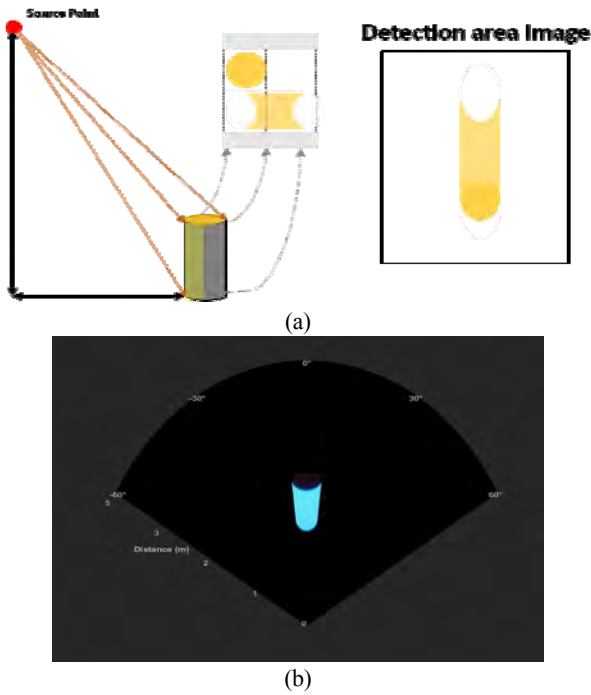


Figure 9: (a) Geometric model and detection area image, (b) Simulated image

### 3. 수치 실험

초음파카메라 모델링에 대한 결과를 확인하기 위해 다양한 장애물에 대한 음향음영 영역 분석과 전체 영상에 대한 분석이 필요하다. Figure 10은 음향음영 영역 분석을 위해 사용된 장애물을 나타낸 것이다. 이때 파란색과 적색은 각각 벽과 장애물을 표현한 것이며, 수치 실험에 사용한 장애물의 형태는 정육면체와 타이어 형태를 사용하였다. 각 장애물은 음향음영 영역이 잘 구분되었는지 확인하기 위해 추가적으로 45° 회전을 하여 신호를 영상을 획득하였다. 모의된 신호영상인 Figure 11을 확인해보면 각 장애물에 대한 음향음영 영역이 벽에 표현되어 잘 구분됨을 확인 할 수 있으며, Figure 11 (c)에서 타이어의 중심에 좌표가 존재하지 않은 부분에 대해서 벽의 신호가 정상적으로 나타남을 확인함으로써 음향음영 영역이 잘 구분되었음을 확인 할 수 있다. Figure 11 (d)의 경우 45° 회전하였을 때 타이어 상, 하부 탐지영역과 음향음영 영역이 잘 구분됨을 확인 할 수 있다.

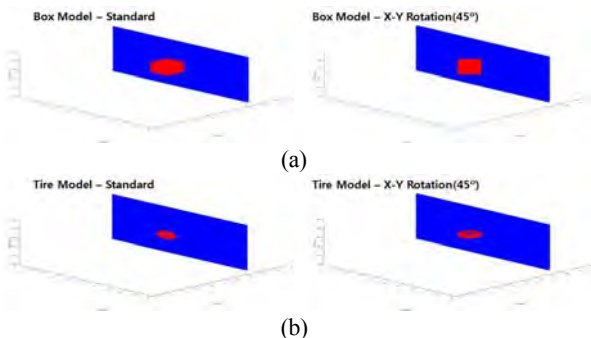


Figure 10: (a) Box model, (b) Tire model

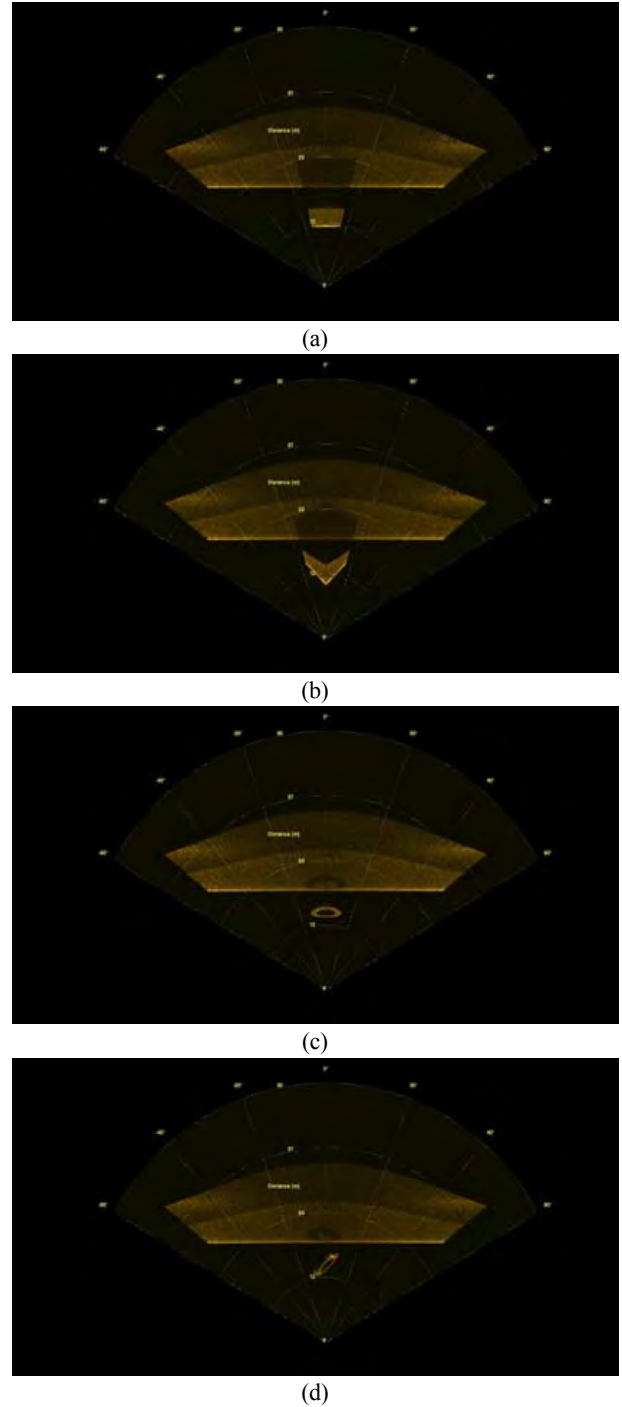


Figure 11: (a) Box model(0°), (b) Box model(45°), (c) Tire model(0°), (d) Tire model(45°)

복잡한 지형에 대한 모델링 기법의 적용을 확인하기 위해 Figure 12과 같은 지형&장애물 환경에서 초음파카메라 모델링을 수행하였다. 지형은 50m × 50m의 크기로 설계하였으며 장애물은 중심이 좌표축(X, Y, Depth) 기준으로 (20m, 30m, 28m) 지점인 위치에 지름 2m에 구를 설치하였다. 초음파카메라를 장착한 무인수중체의 기둥의 경우 (40m, 10m, 25m) 지점에서 (30m, 20m, 25m) 지점으로 6 knot의 항해속도를 가진 상황을 모사하였다. 초음파카메라

의 운용조건은 Table 1과 같다.

Figure 13은 10번째 송신지점인 (37.35m, 12.64m, 25m)과 20번째 송신지점인 (34.41m, 15.59m, 25m)에서 취득된 영상이다. 무인수중체가 장애물에 접근할수록 해지면과 장애물의 사이의 각에 따라 음향음영 영역이 축소되는 것을 알 수 있으며, 신호모의에 따른 영상이 잘 묘사됨을 확인할 수 있다.

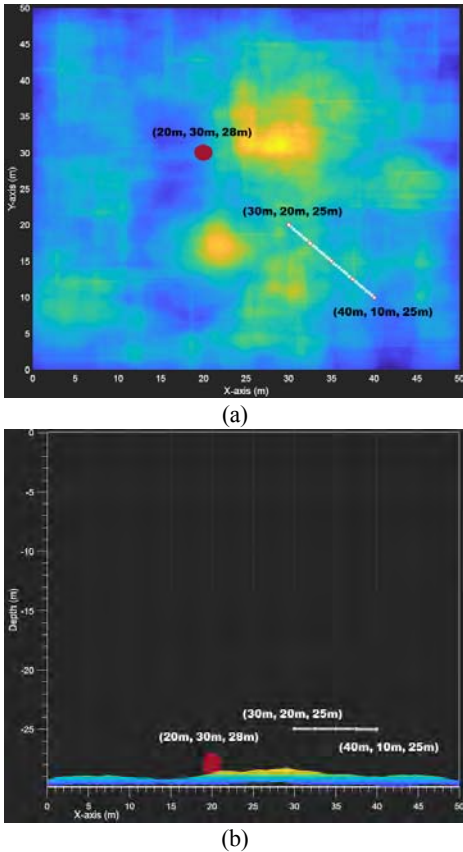


Figure 12: Information of Geometry and route (a) Top-view, (b) Side-view

Table 1: Initial Operating Conditions

Sweep. Minimum Frequency (MHz)	0.6	Pulse Repetition Interval (ms)	70.0	Vertical Beam Angle (°)	20
Sweep. Maximum Frequency (MHz)	1.2	Sampling Rate (MHz)	2.4	Horizontal Beam Angle (°)	120
Pulse Bandwidth (MHz)	0	Pulse Length (ms)	0.5	Number of Beam	512

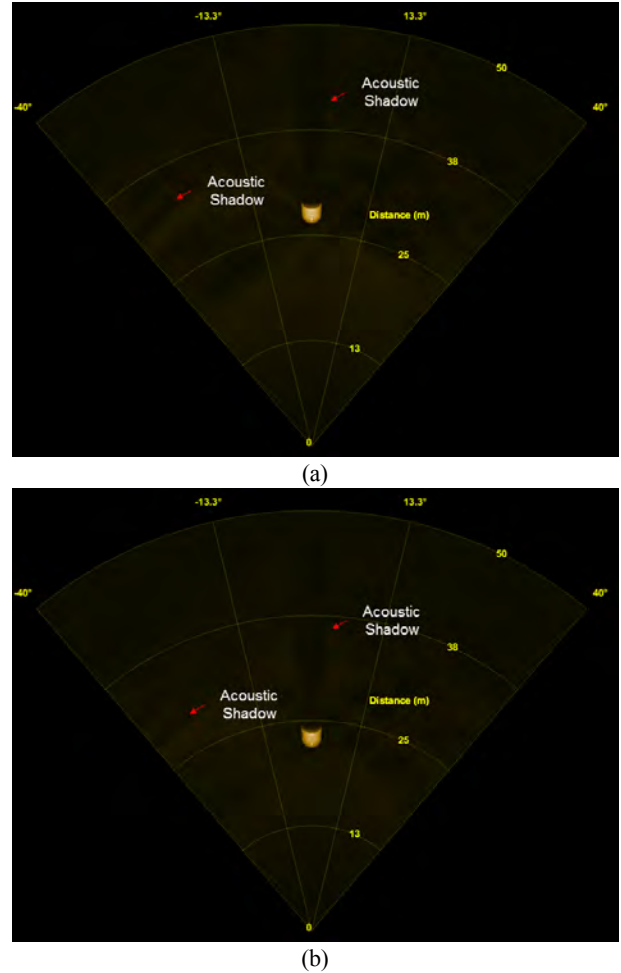


Figure 13: Acquisition image using Forward Looking Sonar modeling technique (a) 10th ping, (b) 20th ping

#### 4. 결론

본 논문에서는 무인수중체의 움직임과 다양한 지형과 장애물, 초음파카메라 장비의 운용조건을 고려한 영상을 모의할 수 있는 소나방정식 기반의 모델링 알고리즘을 개발하였다. 개발된 모델링 알고리즘은 3차원 좌표기반으로 구성된 지형과 장애물을 이용할 수 있으며, 실시간으로 3차원 공간을 기동하면서 변하는 탐지영역과 음향음영 영역을 구분하고 신호를 모의하여 영상을 취득할 수 있다.

개발된 모델링 알고리즘은 탐지영역 내 좌표를 양자화함으로써 효율적으로 음향음영 영역이 탐지 되도록 하였다. 3차원 기동에 따른 탐지영역을 재설정하도록 하였으며, 펄스반복주기를 고려하여 지정한 기동경로의 중간 송신지점을 결정하였다. 모의된 신호를 이용한 영상화의 경우 취득 각도-거리에 대한 직교좌표계 영상이 아닌 수신 신호의 취득방향과 장애물의 형상을 직관적으로 분석이 가능한 극좌표계로 영상화 하였다. 개발된 모델링 알고리즘을 이용

하여 수치 실험을 수행한 결과 설정한 운용조건에 따라 탐지영역과 음향음영 영역에 대한 영상이 실제 초음파카메라 장비와 유사하게 취득됨을 확인 할 수 있었다.

개발된 초음파카메라 모델링 알고리즘은 실제 장비를 개발하기 전 최적의 설계를 위한 도구로서 이용할 수 있을 것으로 판단되며, 탐사환경의 변화에 따른 적절한 운용조건 선택을 위한 사전 준비도구로서 이용할 수 있을 것으로 예상된다. 모델링을 통해 취득된 영상자료는 실 장비에서 취득된 영상에 적용하기 위해 개발된 영상처리 알고리즘을 시험하기 위한 도구로서 이용될 것으로 사료된다.

## 후 기

본 연구는 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다 (계약번호 UE170036DD).

## Author Contributions

Conceptualization, D. Lee and W. Chung; Methodology, D. Lee and H. S. Bae; Software, D. Lee and Y. Lim; Validation, D. Lee, H. S. Bae and W. Chung; Formal Analysis, D. Lee; Investigation, Y. Lim; Data Curation, D. Lee and H. S. Bae; Writing—Original Draft Preparation, D. Lee; Writing—Review & Editing, H. S. Bae and W. Chung; Visualization, D. Lee and Y. Lim; Supervision, W. Chung; Project Administration, H. S. Bae; Funding Acquisition, W. Chung.

## References

[1] 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.

[2] Y. Lee, J. Lee. and H. T. Choi, "A framework of recognition and tracking for underwater objects based on sonar images : Part 1. Design and recognition of artificial landmark considering characteristics of sonar images," Journal of The Institute of Electronics and Information Engineers, vol. 51, no. 2, pp. 182-189, 2014 (in Korean).

[3] S. L. Maxwell and N. E. Gove, The Feasibility of estimating migrating salmon passage rates in turbid rivers using a dual frequency identification sonar, Regional Information Report 1 No. 2A04-05, Alaska Department of Fish and Game Division of Commercial Fisheries, U.S, 2004.

[4] S. R. Kim, Y. K. Lee, and B. H. Jung, "Practical theory and ocean survey application of side scan sonar," Proceedings of the the Korean Society of Marine

Engineering 2006 First Conference, pp. 201-204, 2006 (in Korean).

[5] 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.

[6] 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. 36, no. 1, pp. 104-111, 2005.

[7] 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.

[8] Y. Yang and D. Zhu, "Research on dynamic path planning of auv based on forward looking sonar and fuzzy control," Proceedings of the 2011 Chinese Control and Decision Conference, pp. 2425-2430, 2011.

[9] D. Gueriot and C. Sintès, "Forward looking sonar data simulation through tube tracing," OCEANS 2010, IEEE, pp. 1-6, 2010.

[10] W. C. Knight, R. G. Pridham, and S. M. Kay, "Digital signal processing for sonar," Proceedings of the IEEE, vol. 69, no. 11, 1981.

[11] S. C. Yu, T. W. Kim, S. Weatherwax, B. Collins, and J. Yuh, "Development of high-resolution acoustic camera based real-time object recognition system by using autonomous underwater vehicles," OCEANS 2006, IEEE, pp. 1-6, 2010.