

# 동해 심해환경에서 잔향음에 의한 양상태 탐지성능 영향 모의 및 분석

## Simulation and analysis of the effects of bistatic sonar detection performance induced by reverberation in the East Sea

양원준,<sup>1</sup> 이대혁,<sup>1</sup> 김지섭,<sup>1</sup> 설호석,<sup>1</sup> 손수욱,<sup>2</sup> 권혁중,<sup>3</sup> 최지웅<sup>4,5,6†</sup>

(Wonjun Yang,<sup>1</sup> Dae Hyeok Lee,<sup>1</sup> Ji Seop Kim,<sup>1</sup> Hoseok Sul,<sup>1</sup> Su-Uk Son,<sup>2</sup>  
Hyuckjong Kwon,<sup>3</sup> and Jee Woong Choi<sup>4,5,6†</sup>)

<sup>1</sup>한양대학교 해양융합학과, <sup>2</sup>국방과학연구소, <sup>3</sup>국방기술진흥연구소, <sup>4</sup>한양대학교 ERICA 해양융합공학과,  
<sup>5</sup>한양대학교 ERICA 국방정보공학과, <sup>6</sup>한양대학교 ERICA 지능정보융합공학과

(Received June 5, 2024; accepted June 10, 2024)

**초록:** 소나를 이용한 수중 표적 탐지를 위해서는 해양환경 및 소나 특성이 반영된 탐지성능 분석이 수행되어야 한다. 수동 및 단상태 소나의 탐지성능 모델링은 해양환경을 고려하더라도 비교적 신속하게 수행될 수 있다. 하지만 양상태 및 다중상태 소나의 경우 수동 및 단상태 소나에 비해 계산 측면에서 높은 복잡성과 연산량이 요구되기 때문에 국내외에서는 음속구조나 해저지형과 같은 해양환경을 고려하지 않거나 단순화된 형태로 양상태 및 다중상태 탐지성능 분석이 수행되고 있다. 따라서 본 연구에서는 동해 울릉분지 해역에서의 음파전달 특성 분석을 통해 잔향음과 해양환경이 양상태 탐지성능에 미치는 영향을 분석하였다. 수평 방위 해상도 변화 및 소음제한환경 가정 여부에 따른 탐지성능 모델링을 수행하였다. 이로부터 소나운용 수심이 최소음속층에 가까워질수록 해저지형의 영향이 줄어들며 잔향음 제한환경은 비교적 근거리에서만 형성된다는 것을 관찰하였다. 이러한 경향은 단순화하여 계산한 탐지성능 모델링의 결과와 정교하게 계산된 양상태 탐지성능 모델링 결과의 비교를 통해서도 확인 가능하였다.  
**핵심용어:** 양상태 소나, 탐지성능 모델링, 음파전달, 잔향음, 해양환경

**ABSTRACT:** To detect underwater targets using sonar, sonar performance analysis that reflects the ocean environment and sonar characteristics must be performed. Sonar performance modeling of passive and monostatic sonar can be performed relatively quickly even considering the ocean environment. However, since bistatic and multistatic sonar performance modeling require higher computational complexity and much more time than passive or monostatic sonar cases, they have been performed by simplifying or not considering the ocean environment. In this study, the effects of reverberation and ocean environment in bistatic sonar performance were analyzed using the bistatic reverberation modeling in the Ulleung Basin of the East Sea. As the sonar operation depth approaches the sound channel axis, the influence of the bathymetry on sound propagation is reduced, and the reverberation limited environment is formed only at short distances. Finally, it was confirmed that similar trends appeared through comparison between the simplified and elaborately calculated sonar performance modeling results.

**Keywords:** Bistatic sonar, Sonar performance modeling, Sound propagation, Reverberation, Ocean environment

**PACS numbers:** 43.30.Cq, 43.30.Vh

†Corresponding author: Jee Woong Choi (choijw@hanyang.ac.kr)

Department of Marine Sciences and Convergence Engineering, Hanyang University, 55 Hanyangdaehak-ro, Sangnok-gu, Ansan, Gyeonggi Province 15588, Republic of Korea

(Tel: 82-31-400-5531, Fax: 82-31-400-5457)



Copyright©2024 The Acoustical Society of Korea. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## I. 서 론

과거에는 수중 표적을 탐지하기 위해 주로 단상태 능동소나와 수동소나가 사용되었다. 하지만 최근에는 수중 표적의 스텔스 기술 발달 및 정숙화 기술 향상으로 인한 탐지의 어려움을 극복하고 피탐 위협을 줄이기 위해 양상태 및 다중상태 소나 시스템을 적용한 연구가 진행되고 있다.<sup>[1]</sup>

양상태 소나시스템은 단상태 소나와 달리 음원/수신기가 분리되어 운용되는 시스템이며, 음원/수신기로부터 표적까지의 전달손실이 단상태 소나보다 작은 조건과 같이 특정한 상황에서 보다 우수한 성능을 얻을 수 있다. 반대로 표적 반향신호가 음원에서 수신기로 전파되는 직접파에 의해 차폐되는 음영구역에서는 단상태 소나에 비해 낮은 탐지성능을 나타낸다. 이러한 직접파는 신호의 길이에 따라 특정 시간 동안에 수신기로 수신되며, 그 시간대에 해당되는 영역에서 표적의 탐지성능이 급격히 감소한다. 따라서 위와 같은 양상태 탐지 특성을 고려한 소나 운용을 위해서는 해양환경이 반영된 탐지성능 모델링이 수행되어야 한다. 현재까지 수동소나와 단상태 능동소나의 경우에는 해양환경을 고려한 탐지성능 모델링을 바탕으로 분석해역 내 탐지거리 도출, 소나 운용 전술 결정을 위한 최적 배치안 도출 등 다양한 연구가 수행되고 있다.<sup>[2-5]</sup> 하지만 양상태 및 다중상태 소나의 경우 단상태 소나에 비해 많은 연산량이 요구되며, 알고리즘의 복잡성으로 인해 카시니의 난형과 같이 단순화된 해양환경을 가정한 탐지성능 분석 연구가 수행되고 있다.<sup>[6-8]</sup> 이에 따라 국내에서는 한양대학교와 국방과학연구소를 중심으로 거리종속 해양환경을 반영한 양상태 소나 탐지성능 모델 및 특성 분석 연구가 지속적으로 수행되고 있다.<sup>[9-14]</sup> 특히 Son *et al.*<sup>[11]</sup>은 양상태 소나 배치를 위한 사전 연구로 탐지성능 분석의 연산량과 복잡도를 줄이기 위해 거리독립 환경에서 전달손실이 소나성능지수(Figure of Merit, FOM)보다 작은 영역과 탐지성능 결과의 비교를 통해 소음 제한환경 가정 시 양상태 소나의 탐지환경을 개략적으로 파악할 수 있음을 확인하였다.

탐지성능 모의를 위한 모델의 연산량 및 복잡도를

줄이기 위한 연구는 단순히 특정 위치에서 소나의 신호초과 또는 탐지확률을 신속하게 모의하기 위한 목적 이외에도 소나 플랫폼의 최적배치 또는 탐색 경로 도출과 같은 문제에 적용하기 위한 목적으로 수행될 수 있다. 이러한 문제 해결을 위해서는 무수히 많은 위치에서 많은 횟수의 탐지성능 모의가 요구된다. 따라서 배치 또는 탐색 경로 도출 등의 문제에서는 공간적으로 정확한 신호초과 값을 도출하기 보다는 전반적인 탐지성능 경향을 신속하게 모의하는 것이 문제 해결의 방법이 될 수 있다. 본 연구에서는 높은 정확도를 가지지만 많은 연산시간이 요구되는 음향 탐지성능 모델을 활용하면서도 신속한 양상태 탐지성능 모의를 위해 동해 울릉분지 해역에서 잔향음과 해저지형에 의한 양상태 탐지성능 특성 분석을 수행하고, 모델 모의 시 단순화 수준에 따른 탐지성능 결과들에 대한 비교·분석이 수행되었다.

분석해역인 동해 울릉분지 해역에서의 음파전달 특성 분석을 통해 잔향음과 주변소음에 의한 탐지성능 특성과 계산하고자 하는 수평 방위 해상도 변화에 따른 탐지성능 변화에 대한 분석을 수행하였다. 울릉분지는 수심이 깊고 평탄한 심해 해양환경에 해당되며, 천해 환경과는 달리 경계면에 의한 영향이 적지만 음향 채널을 통한 장거리 전파로 인해 복잡한 음파전달 특성을 가지고 있다. 또한 이와 같은 심해환경 내 장거리 전파가 가능한 수심에서 가변심도 소나 운용을 가정한다면 음파전달 양상은 해저지형보다는 음속구조와 소나 운용 수심에 의해 더 큰 영향을 받을 수 있다. 이러한 환경에서는 전 방위에 대한 음파전달 경향이 유사할 것으로 예상할 수 있으므로 계산하는 수평 방위 해상도 변화에 따른 탐지성능 분석을 수행하였다. 또한 천해와 달리 심해에서의 독특한 음파전달 특성 중 하나인 수렴영역은 상대적으로 먼 거리에서 존재하게 되는데, 이는 일반적으로 잔향음 준위보다 소음 준위가 높은 소음 제한환경에 해당한다. 따라서 복잡한 음파전달 특성을 가지는 심해 울릉분지 환경에서 잔향음을 고려한 탐지성능 분석 결과와 소음 제한환경을 가정한 탐지성능 분석 결과에 대한 비교를 수행하였다. 최종적으로 단순화하여 모의된 탐지성능 분석 결과와 기존 방법으로 모의된 양상태 탐지성능 분석 결과의 정량

적 비교가 수행되었다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제II장에서는 탐지성능 분석 해역의 특징과 탐지성능 모의 방법에 대해 설명하고 제III장과IV장에서는 소음 제한환경가정 여부 및 계산 방위 해상도 변화에 따른 탐지성능 모의 결과에 대해 분석하였다. 마지막으로 제V장에서는 본 연구의 요약 및 결론에 대해 기술하였다.

## II. 분석 해역 및 탐지성능 모의

본 논문에서는 동해 울릉분지를 분석 해역으로 설정하여 양상태 소나 탐지성능 분석을 수행하였다 (Fig. 1). 분석 해역의 해저지형은 ETOPO1<sup>[15]</sup>을 사용하였으며, 수심은 약 2,000m로 전반적으로 깊고 평탄한 해저지형 특성을 보인다. 거리종속 해양환경을 고려한 탐지성능 모의를 위해 분석 해역에서 GDEM<sup>[16]</sup>

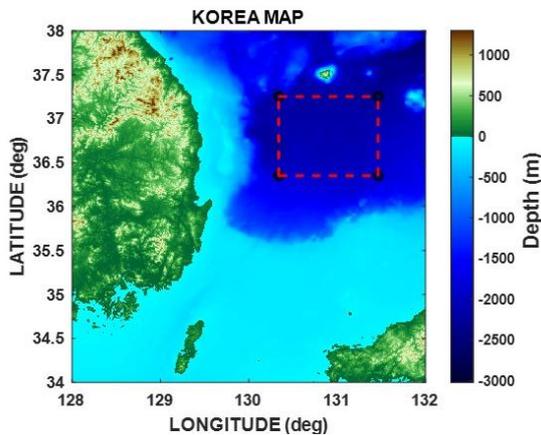


Fig. 1. (Color available online) Bathymetry of the East Sea and the site used for analysis (red dashed box).

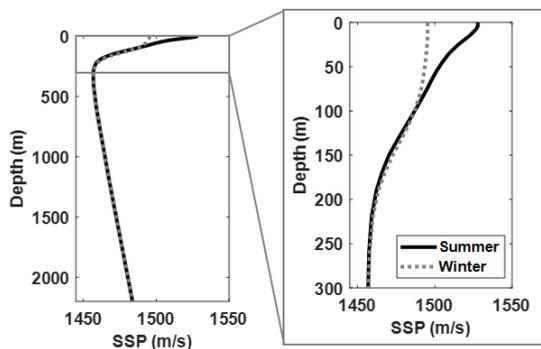


Fig. 2. Sound speed profiles of the East Sea in summer and winter.

의 여름철 및 겨울철 음속구조가 사용되었다. Fig. 2에는 분석해역 중심 위치에서의 여름철과 겨울철의 음속구조를 나타내었다.

양상태 탐지성능 모의를 위해 2019년 국방과학연구소와 한양대학교가 공동 개발한 Bistatic Sonar Performance Analysis System(BiSPAS) 모델이 사용되었다.<sup>[10-14]</sup> BiSPAS는 거리종속 해양환경을 반영할 수 있는 소나성능분석모델로써 음선이론 기반의 음파전달 모델을 사용하여 수동소나 및 단/양상태 탐지성능을 모의할 수 있다. 탐지성능을 나타내는 소나변수인 능동 신호초과(Active Signal Excess, ASE)는 아래와 같은 소나방정식으로 정의된다.<sup>[17]</sup>

$$\begin{aligned}
 ASE_{RL} &= SL - (TL_1 + TL_2) + TS - RL \\
 &\quad - DT \\
 ASE_{NL} &= SL - (TL_1 + TL_2) + TS - NL \\
 &\quad + DI - DT.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Eq. (1)에서  $ASE_{RL}$ ,  $ASE_{NL}$ 은 각각 잔향음 제한환경, 소음 제한환경에서의 능동 신호초과이고  $SL$ 은 음원준위,  $TL_1$ 은 음원에서 표적까지의 전달손실,  $TL_2$ 는 표적에서 수신기까지의 전달손실이다. 그리고  $TS$ 는 표적강도,  $RL$ 과  $NL$ 은 각각 잔향음 준위와 주변소음 준위이며,  $DI$ 는 지향지수,  $DT$ 는 탐지문턱을 의미한다. 본 연구에서는 주파수가 1.7 kHz, 신호 길이는 4s인 중저주파수 대역의 가변심도소나를 가정하였으며, 공간적으로 분포하는 표적 및 경계면 간의 고유음선 정보(전달손실, 전달시간, 입사각)를 이용하여 잔향음과 능동 신호초과를 계산하였다.

## III. 주변소음 제한환경을 가정한 탐지성능 도출

전 방위에 대한 탐지성능을 계산하기 위해서는 능동 신호초과를 계산하는 Eq. (1)에서도 알 수 있듯이 전달손실 및 잔향음이 계산되어야 한다. 이러한 과정은 상당한 연산시간을 필요로 하는데, 특히 양상태 능동 신호초과를 모의하기 위해서는 수동 및 단상태와는 달리 음원과 수신기 두 위치에서의 고유음선 계산이 요구될 뿐 아니라 두 고유음선 정보의 조

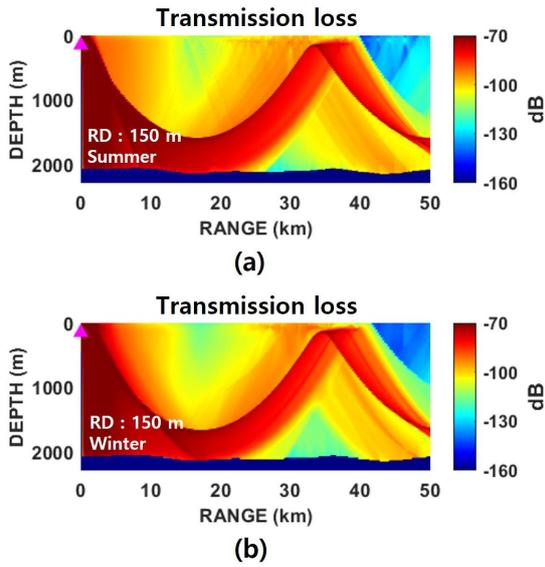


Fig. 3. (Color available online) Transmission loss in (a) summer and (b) winter.

합을 이용한 잔향음 모델링이 수행되어야 한다.<sup>[17]</sup> 따라서 본 장에서는 울릉분지에서의 신호초과, 잔향음 및 주변소음을 모의하고 거리에 따라 변화하는 탐지 성능 및 잔향음의 특성을 분석한 뒤 소음 제한환경을 가정한 탐지성능 결과와의 비교를 수행하였다.

Fig. 3은 분석 해역의 여름철 및 겨울철 음속구조를 이용해 수신기 위치에서의 전달손실을 모의한 결과이다. 동해 울릉분지와 같은 심해 환경에서는 Fig. 3에서 알 수 있듯이 음원에서 방사된 음파가 수직 음속구조에 의해 강하게 하향굴절한 뒤 해저면 반사 또는 상향굴절하는 패턴이 반복된다. 이때 음선이 모여 강한 에너지를 갖는 수렴영역에 의해 원거리 탐지를 가능하게 한다. 본 환경에서는 여름철과 겨울철 모두 약 30 km~40 km 거리에서 수렴영역이 존재함을 확인할 수 있다.

Fig. 4는 음원이 수신기로부터 남쪽으로 10km 이격되어 있으며, 운용수심은 모두 150 m를 가정했을 때의 전 방위에 대한 신호초과, 전달손실, 잔향음, 주변소음 모의 결과로, 10° 방위 해상도로 계산된 결과이다. 먼저 Fig. 4(a)와 (e)는 각각 여름철과 겨울철 잔향음을 고려한 신호초과 모의 결과로 음원, 수신기와 가까운 근거리에서는 음파의 하향굴절과 잔향음 및 직접파의 복합적인 영향으로 인해 낮은 탐지성능을 보인다. 반면 약 30 km 이상 원거리에서는 높은 탐지성능

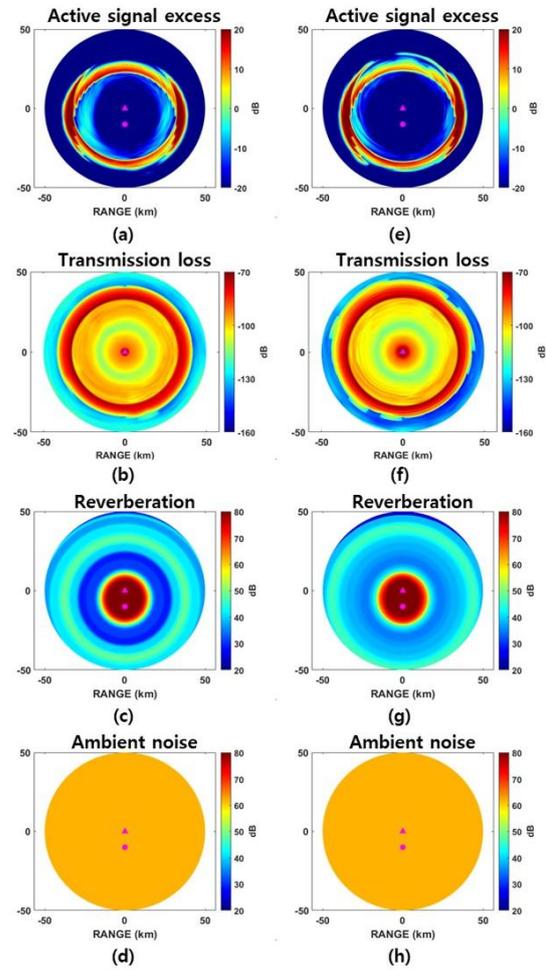


Fig. 4. (Color available online) Modeling results in summer and winter. (a) Active signal excess, (b) transmission loss, (c) reverberation and (d) noise level in summer. (e) Active signal excess, (f) transmission loss, (g) reverberation and (h) noise level in winter (source, receiver and target depth are 150 m, source to receiver range : 10 km).

이 존재하는 구역이 원형 띠 모양으로 생성된다. 이렇게 원거리에서 높은 탐지성능이 나타나는 이유는 수렴영역에 의한 것이며, 특히 송수신기의 수렴영역이 생기는 거리가 일치하는 송수신기 동서 방향에서의 탐지성능이 남북 방향보다 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 다음으로 Fig 4(b)와 (f)는 수신기 위치에서의 방위별 전달손실 모의 결과로, 전 방향에서 유사한 거리에서 수렴영역이 존재하는 것을 확인할 수 있다.

이는 분석 해역의 해양환경이 다른 해역에 비해 해저지형의 영향이 상대적으로 적은 환경임을 보여준다. Fig 4(c)와 (g)는 시간영역에서 계산된 잔향음

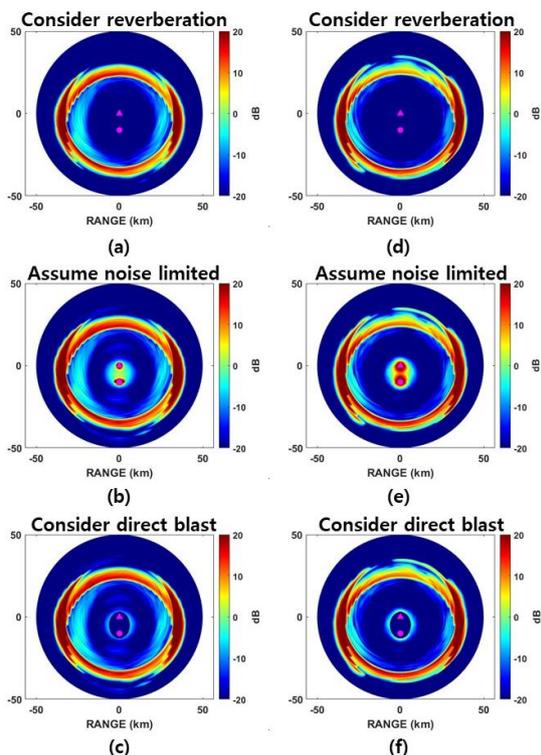


Fig. 5. (Color available online) Active signal excess in summer and winter. (a) Considering reverberation, (b) assuming noise limited environment and (c) assuming noise limited environment and considering direct blast simply in summer. (d) Considering reverberation, (e) assuming noise limited environment and (f) assuming noise limited environment and considering direct blast simply in winter. (source, receiver and target depth are 150 m, source to receiver range : 10 km)

을 송수신기 고유음선 도달시간을 이용해 거리-방위 도메인으로 변환한 결과이다.<sup>[18]</sup> Wenz의 주변소음 모델<sup>[19]</sup>을 이용하여 모의한 소음준위인 Fig. 4(d)와 (h)와 비교하면, 송수신기 위치에서부터 약 15 km까지는 잔향음준위가 주변소음준위보다 큰 잔향음 제한환경임을 알 수 있고, 그 이상의 원거리에서는 주변소음준위가 잔향음준위보다 높은 소음 제한환경이 형성됨을 알 수 있다.

Fig. 5는 여름철과 겨울철 잔향음 고려 유무에 따른 양상태 신호초과 결과로 음원과 수신기, 표적의 수심은 150m를 가정하였다. Fig. 5(a)와(d)는 각각 여름철과 겨울철에 잔향음을 고려한 신호초과 결과로 Fig. 4(a)와 (e)와 동일하다. Fig. 5(b)와 (e)는 잔향음을 고려하지 않고 음원, 수신기의 전달손실과 주변소음

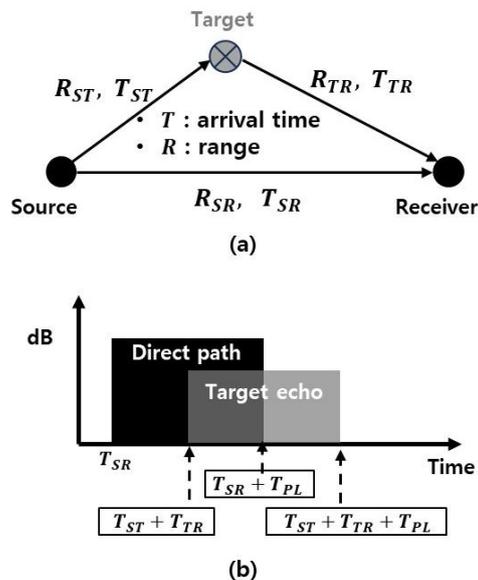


Fig. 6. Schematic diagram of blind zone. (a) Bistatic geometry, (b) target echo signal masked by direct path.<sup>[20]</sup>

만을 이용한 신호초과 계산 결과이다. 음파가 하향 굴절하기 전의 거리에 해당되는 음원과 수신기 부근에서는 높은 신호초과 값을 보이지만 해당 영역을 제외한 나머지 영역에서는 잔향음을 고려한 신호초과와 전반적으로 유사한 경향을 보임을 확인할 수 있다. Fig. 5(c)와 (f)는 잔향음을 고려하지 않았으나 신호초과 결과에서 Eq. (2)와 같이 직접파에 의한 음영구역을 고려한 결과이다.

여기서 음영구역은 송수신기의 및 표적 간 수평 거리와 송신신호 길이(PL)만을 고려할 경우 간단하게 계산될 수 있다.

$$R_{ST} + R_{TR} < R_{SR} + R_{PL} \tag{2}$$

이때  $R_{ST}$ 는 음원에서 표적까지의 거리,  $R_{TR}$ 은 표적에서 수신기까지의 거리,  $R_{SR}$ 은 음원과 수신기 거리이며,  $R_{PL}$ 은 송신신호 길이에 해당하는 거리( $PL \times 1500 \text{ m/s}$ )를 의미한다(Fig. 6).

Fig. 5에서의 신호초과 모의 결과를 통해 울릉분지 해역에서 장거리 전파가 가능한 수심에 송수신기를 위치시킨다면 소음 제한환경을 가정하여 잔향음을 모의하지 않더라도 전반적으로 유사한 탐지성능이 도출됨을 확인할 수 있다.

#### IV. 방위 해상도 변화에 따른 탐지성능 도출

본 장에서는 울릉분지 해역에서의 방위 해상도 변화에 따른 탐지성능 결과에 대한 비교를 수행하였다. 울릉분지 해역과 같은 평탄한 심해 환경은 천해 환경에 비해 해저면의 영향이 상대적으로 적어 소나 운용 수심과 음속구조가 음파전달에 더 큰 영향을 주게 된다. 따라서 IV장에서는 음원 수심 및 계절에 따른 음파전달 특성을 분석한 뒤, 계산하는 방위 해

상도의 변화에 따른 탐지성능 모의 결과에 대한 비교를 수행하였다.

먼저 소나의 운용 수심과 음속구조에 따른 음파전달 특성 분석을 위해 여름철과 겨울철 음원 수심이 각각 100 m와 200 m인 경우에 대한 전달손실을 모의하였다(Fig. 7).

음원 수심이 100 m인 경우 여름철 전달손실 결과는 표층에서의 높은 수온으로 인해 최소음속층과의 음속 차이가 커 겨울철보다 더 강한 하향굴절을 하게 되어 약 20 km~30 km 거리의 표층에서 수렴영역이 존재한다. 반면 겨울철은 여름철보다 느린 표층 음속에 의해 상대적으로 완만한 각도로 하향굴절을 하게 되어 상대적으로 원거리에서 해저면에 반사된 뒤 상향굴절됨을 확인할 수 있다. 이에 따라 겨울철에는 여름철보다 먼 약 30 km~40 km 거리의 표층에서 높은 탐지성능이 예상되는 음파전달 양상을 보인다(Fig. 7(a), (b)). 음원 수심이 200 m에 위치하는 경우에는 음원이 최소음속층 부근에 위치하게 되므로 여름철과 겨울철 모두 해저면 반사보다는 굴절에 의해 음파가 장거리 전파됨을 알 수 있다. 이러한 이유로 두 계절에서 공통적으로 약 30 km~40 km 거리의 표층에서 높은 탐지성능이 예상되는 음파전달 양상을 보인다(Fig. 7(c), (d)). 또한 두 결과를 Fig. 7(b)와 비교해보면 표층에서 수렴영역이 존재하는 거리는 비슷하지만 음원 수심이 200 m인 경우에서 수렴영역의 폭이 더 크며, 해저 경계면의 영향이 상대적으로 적어 더 작은 전달손실을 가짐을 확인할 수 있다. 즉, 수렴영역이 생기는 거리와 폭은 음원의 수심과 표층 혼합층에 의한 음속구조에 따라 달라짐을 알 수 있으며,<sup>[17]</sup> 분석 해역과 같이 해저지형이 평탄한 환경에서는 전 방위에 대한 음파전달 경향이 유사할 것으로 예상할 수 있다. 따라서 Fig. 7의 계절 및 음원 수심에 따라 전달손실을 전 방위에 대해 10° 간격으로 계산한 결과는 Fig. 8과 같다. 여기서 표적의 수심은 150 m로 설정하였다.

음원으로부터 거리가 멀어짐에 따라 하향굴절에 의해 탐지 가능성이 적은 구역과 상향굴절에 의해 탐지 가능성이 커지는 구역이 나타나게 되며, 이러한 특성은 방위별로 유사하여 높은 탐지 가능성을 보이는 구간이 원형 띠 형태로 나타나는 것을 확인할 수 있다.

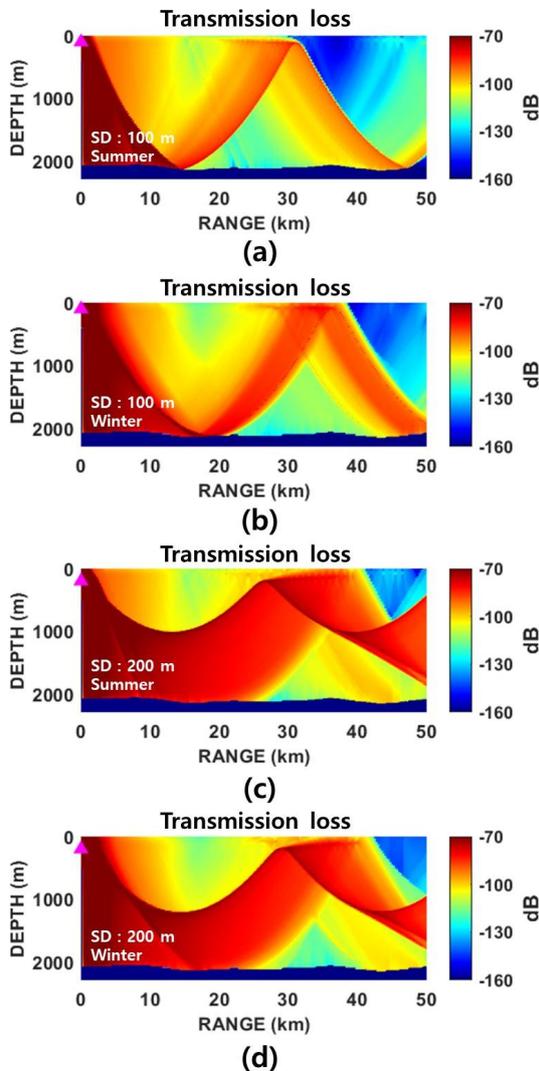


Fig. 7. (Color available online) Transmission loss at (a) source depth 100 m in summer, (b) source depth 100 m in winter, (c) source depth 200 m in summer and (d) source depth 200 m in winter.

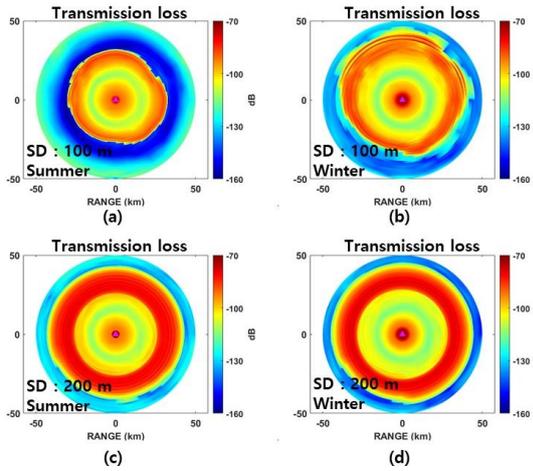


Fig. 8. (Color available online) Transmission loss at (a) source depth 100 m in summer, (b) source depth 100 m in winter, (c) source depth 200 m in summer and (d) source depth 200 m in winter (target depth : 150 m).

할 수 있다. 따라서 분석 해역 내에서는 전달손실을 계산하는 방위 해상도를 줄더라도 그렇지 않은 경우와 비교해 유사한 탐지성능이 모의될 것으로 예상할 수 있다.

Fig. 9는 음원과 수신기 수심이 200 m, 거리가 10 km, 표적의 수심을 150 m로 설정하였을 때의 잔향음 고려 유무에 따른 양상태 신호초과 결과이다. 먼저 Fig. 9(a)와 (e)는 각각 여름철과 겨울철 잔향음을 고려하고 계산하는 수평 방위 해상도를 10°로 설정한 신호초과 계산 결과이다. Fig. 9(b)와 (f)는 소음 제한 환경을 가정하여 수평 방위 해상도를 10°로 설정한 신호초과 계산 결과이며, Fig. 9(c)와 (g)는 소음 제한 환경에서 수평 방위 해상도를 60°로 설정한 신호초과 계산 결과이다. 마지막으로 Fig. 9(d)와 (h)는 소음 제한 환경에서 해저지형의 등방성을 가정한 결과로, 음원과 수신기 위치에서 한 방위의 전달손실과 주변 소음이 모든 방위에서 동일하다고 가정하여 신호초과를 계산한 결과이다. 잔향음을 고려하지 않으면서 계산하는 방위 해상도를 감소시키더라도 잔향음을 고려한 신호초과 결과와 유사하게 모의되었음을 확인할 수 있다.

Fig. 10에서는 Fig. 9에서 계산된 잔향음을 고려한 신호초과 결과와 소음 제한 환경을 가정하고 계산 방위 해상도를 변화시킨 신호초과 결과의 비교를 위해

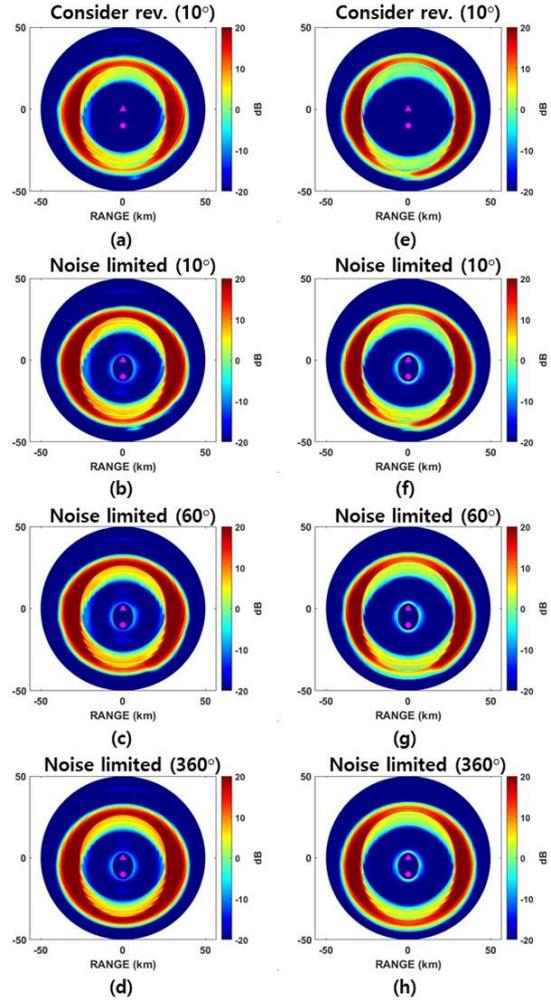


Fig. 9. (Color available online) Active signal excess in summer and winter. (a) Considering reverberation, (b) assuming noise limited environment and calculating transmission loss in 10°, (c) 60° and (d) 360° interval in summer. (e) Considering reverberation, (f) assuming noise limited environment and calculating transmission loss in 10°, (g) 60° and (h) 360° interval in winter (source and receiver : 200 m, target depth : 150 m, source to receiver range : 10 km).

신호초과가 0 dB 이상인 영역을 1로, 0 dB 미만인 영역을 0으로 설정한 뒤 그 차이를 계산하였다. Fig. 10(a)와 (b)는 수평 방위 해상도를 10°로 설정했을 때 잔향음 고려 유무에 따른 신호초과 결과의 차이이다. 잔향음 고려 유무에 의한 신호초과의 차이로 인해 원거리에서 처음으로 탐지되기 시작한 시점과 탐지가 되는 가장 먼거리에서 약간의 차이가 발생한 것을 확인할 수 있다. 다음으로 Fig. 10(b)~(f)에서처럼 주변소음 제한환경을 가정한 신호초과들의 계산

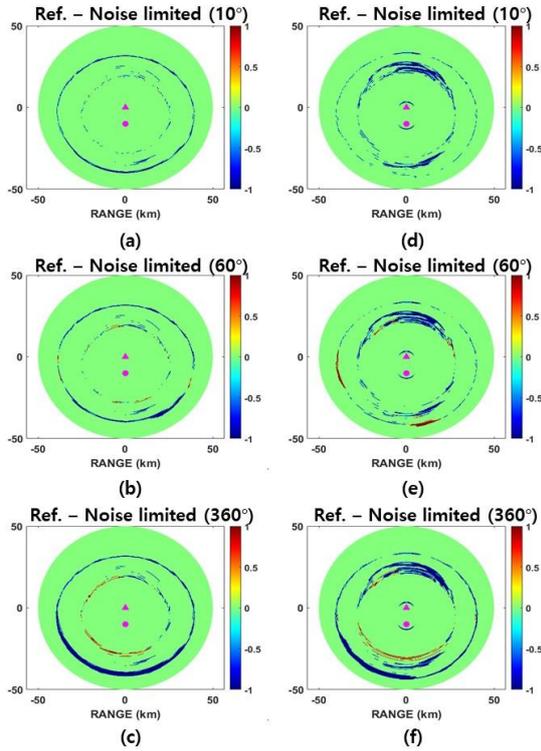


Fig. 10. (Color available online) Differences between active signal excess considering reverberation and assuming noise limited environment in summer and winter. (a) Calculating transmission loss in 10°, (b) 60° and (c) 360° interval for noise limited case in summer. (d) Calculating transmission loss in 10°, (e) 60° and (f) 360° interval for noise limited case in winter (source and receiver : 200 m, target depth : 150 m, source to receiver range : 10 km).

Table 1. Computational time and error of active signal excess for each condition [(Reverberation Limited, RL), (Noise Limited, NL)].

	Summer		Winter	
	Time	Error	Time	Error
RL (bearing resol. : 10°)	212 s	-	214 s	-
NL (bearing resol. : 10°)	74 s	1.6 %	68 s	4.1 %
NL (bearing resol. : 60°)	20 s	1.9 %	18 s	4.7 %
NL (bearing resol. : 360°)	10 s	3.6 %	10 s	6.6 %

방위 해상도를 감소시킴에 따라 차이가 발생하는 영역은 커지게 되는데 이는 방위별 수렴영역이 생기는 거리와 폭이 완전히 동일하지 않기 때문이다. 또한 각 계산 방식에 따른 연산시간 및 전체 계산 영역 대

비 차이가 발생하는 영역의 비율을 Table 1에 나타내었다. 단순화된 계산 방식일수록 기준으로 삼았던 신호초과와의 차이가 커지며 소요되는 연산시간은 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

### V. 요약 및 결론

양상태 소나의 탐지성능 분석은 수동 및 단상태에 비해 모델의 복잡성이 클 뿐 아니라 많은 연산량이 요구된다. 특히 소나 플랫폼의 최적배치 또는 탐색 경로 도출과 같이 다양한 위치에서의 탐지성능 모의가 필요한 경우 전반적인 탐지성능 경향을 신속하게 모의하는 것이 중요하다. 따라서 본 논문에서는 울릉분지 해역에서 잔향음과 해저지형이 양상태 탐지성능에 미치는 영향을 분석하고 모델 모의의 단순화 정도에 따른 탐지성능 변화를 비교하였다. 특히 기존 선행연구<sup>[11]</sup>에서 나아가 해양환경을 거리독립환경에서 거리종속환경으로 확장하고 전달손실 뿐 아니라 공간적인 잔향음 및 주변소음 특성을 함께 모의하고 단순화 과정에 따른 연산시간 및 오차를 분석하였다. 탐지성능 분석을 통해 심해 환경에 해당되는 동해 울릉분지는 천해에 비해 경계면의 영향이 적고 음원이 최소음속층 부근에 위치할 경우 주변소음 준위가 잔향음 준위보다 높은 소음 제한환경까지 장거리까지 음파전달이 가능한 해양환경임을 확인하였다. 이와 더불어 음원에서 방사된 음파는 근거리에서 강한 하향 굴절을 하게 되어 잔향음 제한환경에서는 낮은 탐지성능을 보이게 되므로 장거리 전파가 가능한 최소음속층 부근에서 소나를 운용한다면 소음 제한환경을 가정한 탐지성능 분석이 신속한 양상태 소나 배치안을 도출하기 위한 효과적인 방법이 될 수 있음을 확인하였다. 또한 분석 해역과 같이 수심이 깊고 평탄한 해양환경에서는 해저지형의 공간적 변동성이 음파전달 양상 변화에 미치는 영향이 상대적으로 적다. 따라서 소음 제한환경을 가정하면서 계산 방위 해상도를 낮춘 신호초과 결과와 정교하게 계산된 신호초과 결과에 대한 비교가 수행되었다. 연산량이 적은 방법일수록 정교하게 계산된 신호초과와의 차이가 커지지만 분석 해역에 한해서는 결과 차이 대비 연산시간의 이득이 충분히 크다고

볼 수 있으므로, 신속한 탐지성능 도출을 위해 해저 지형이 평탄한 심해 환경에 대해서는 방위 해상도를 줄이는 방법 또한 고려해볼 수 있다.

본 연구에서 시도되었던 단순화된 탐지성능 모의 방법은 추후 심해환경에서의 양상태 소나의 최적 배치안 도출 등에 활용될 수 있을 것이다. 이는 카시나의 난형과 같이 해양환경을 고려하지 않거나 단순화시킨 양상태 및 다중상태 배치 연구들에 비해 높은 정확성을 가질 것으로 기대되나, 정교하게 계산된 탐지성능 모의 결과를 이용해 얻어진 배치안과의 결과 비교를 통해 본 연구에서 시도된 방법의 타당성을 검증할 필요가 있다.

하지만 이러한 방법을 모든 해역에 대해 일반화하기에는 한계점이 존재한다. 먼저 분석 해역인 동해 심해환경 내에서라도 본 방법이 적용 가능한 범위에 대한 분석이 필요하다. 또한 천해의 경우 최대탐지거리까지도 잔향음이 우세할 수 있어 소음제한환경을 가정한 탐지성능 분석은 오차가 클 수 있으며, 대륙사면과 같이 해저지형 변화가 급격한 해양환경의 경우 계산하는 방위 해상도를 줄인다면 이 또한 큰 오차가 발생할 수 있다. 이러한 해양환경에서는 모델링을 단순화하기보다는 정교하게 모델링을 수행하되, 작전해역 내 모델링 횟수를 줄이는 방식으로의 접근이 효과적일 수 있다. 국외의 경우 해양환경 분석 결과를 바탕으로 음향특성이 유사한 지역들을 구분하는 연구가 수행된 바 있다.<sup>[21,22]</sup> 작전해역 내 소나 배치 또는 탐색경로 도출 등을 위해서는 다양한 위치에서 탐지성능 모델링이 필요하므로, 해양환경 및 음파전달 특성 분석을 바탕으로 음향 환경이 유사한 해역에 대해서는 정교하게 수행된 모델링 결과를 대표 탐지성능 분석 결과로 결정한다면 정확성을 확보하면서도 작전해역에서 요구되는 총 모델링 횟수를 줄일 수 있을 것으로 예상된다.

## 감사의 글

이 논문은 2024년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방과학연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(관리번호: UD210004DD).

## References

1. R. Lilley, "Recapture wide-area antisubmarine warfare," J. Proceedings magazine, **140/6/1336**, 44-50 (2014).
2. S. Kim, W. Kim, J. W. Choi, Y. J. Yoon, and J.-S. Park, "Optimal deployment of sensor nodes based on performance surface of acoustic detection" (in Korean), J. KIMS Technol. **18**, 538-547 (2015).
3. S. Kim and J. W. Choi, "Optimal deployment of sensor nodes based on performance surface of underwater acoustic communication," Sensors, **17**, 2389 (2017).
4. S. Kim and J. W. Choi, "Optimal deployment of vector sensor nodes in underwater acoustic sensor networks," Sensors, **19**, 2885 (2019).
5. S. An, "Optimal depth for dipping sonar system using optimization algorithm" (in Korean), J. Acoust. Soc. Kr. **39**, 541-548 (2020).
6. M. P. Fewell and S. Ozols, "Simple detection-performance analysis of multistatic sonar for anti-submarine warfare," DSTO Tech. Rep., 2011.
7. E. M. Craparo and M. Karatas, "A method for placing sources in multistatic sonar networks," Naval Postgraduate School Monterey United States, Tech. Rep., 2018.
8. E. Craparo and M. Karatas, "Optimal source placement for point coverage in active multistatic sonar networks," Naval Research Logistics (NRL), **67**, 63-74 (2020).
9. R. Oh, J. W. Choi, and W. -K. Kim, "A study on the operation condition of integrated sonar system" (in Korean), Proc. The KIMS Technol. Conf. 422 (2018).
10. S.-U. Son, R. Oh, J. W. Choi, and J.-S. Park, "Development and validation of a performance analysis model for bistatic sonar" (in Korean), Proc. The KIMS Technol. Conf. 374 (2019).
11. S.-U. Son, W.-K. Kim, H. S. Bae, and J.-S. Park, "Assessment of acoustic detection performance for a deployment of bi-static sonar" (in Korean), J. Acoust. Soc. Kr. **41**, 419-425 (2022).
12. D. H. Lee, W. Yang, J. S. Kim, H. Sul, J. W. Choi, and S.-U. Son, "Estimation of underwater acoustic uncertainty based on the ocean experimental data measured in the East Sea and its application to predict sonar detection probability" (in Korean), J. Acoust. Soc. Kr. **43**, 285-292 (2024).
13. W. Yang, D. Kim, D. H. Lee, J. W. Choi, and S.-U. Son, "Sonar detection performance analysis considering bistatic target strength" (in Korean), J. Acoust. Soc. Kr. **43**, 305-313 (2024).
14. J. S. Kim, D. H. Lee, W. Yang, Y. S. Kim, J. W. Choi, H. Kwon, J. -Y. Park, S.-U. Son, H. S. Bae, and J. -S. Park, "Optimal deployment of bistatic sonar using

PSO algorithm” (in Korean), J. Acoust. Soc. Kr. **43**, 437-444 (2024).

15. C. Amante and B. W. Eakins, “Etopol arc-minute global relief model : procedures, data sources and analysis,” NOAA Technical Memorandum, NGDC (National Geophysical Data Center), Rep., 2009.

16. M. R. Carnes, “Description and evaluation of GDEM-V 3.0,” Nav. Res. Lab., Rep., 2009.

17. R. J. Urick, *Principles of Underwater Sound 3rd ed.* (McGraw-Hill, New York, 1983), pp. 17-30, 164-168.

18. C. H. Harrison, “SUPREMO : A multistatic sonar performance model,” NATO SACLANT Undersea Research Centre. SM-396, Rep., 2002.

19. G. M. Wenz, “Acoustic ambient noise in the ocean : Spectra and sources,” J. Acoust. Soc. Am. **34**, 1936-1956 (1962).

20. E. J. Yun, *Optimal deployment of multi-static sonobuoys in fixed-wing aircraft using genetic algorithm*, (Master’s thesis, University of Hanyang, 2022).

21. R. E. Delgado, B. W. Northridge, and L. S. Ladner, “A range-dependent transmission loss database application: countermeasures assessment simulation at NRaD,” Center for Environmental Acoustics NRL/FR, Rep., 1993.

22. F. C. Newman, A. C. Biondo, M. D. Mandelberg, C. C. Matthews, and J. R. Rottier, “Enhancing realism in computer simulations: environmental effects,” Johns Hopkins APL technical digest, Rep., 2002.

저자 약력

▶ 양 원 준 (Wonjun Yang)



2020년 2월 : 한양대학교 해양융합공학과 학사  
 2020년 3월 ~ 현재 : 한양대학교 해양융합 과학과 석·박사통합과정

▶ 이 대 혁 (Dae Hyeok Lee)



2015년 2월 : 부산대학교 해양학과 학사  
 2024년 2월 : 한양대학교 해양융합과학과 박사  
 2024년 3월 ~ 현재 : 한양대학교 박사 후 연구원

▶ 김 지 섭 (Ji Seop Kim)



2022년 2월 : 한양대학교 해양융합공학과 학사  
 2024년 2월 : 한양대학교 해양융합과학과 석사  
 2024년 3월 ~ 현재 : 한양대학교 ERICA 산학협력단 연구원

▶ 설 호 석 (Hoseok Sul)



2021년 2월 : 한양대학교 해양융합공학과 학사  
 2023년 2월 : 한양대학교 해양융합과학과 석사  
 2023년 3월 ~ 현재 : 한양대학교 해양융합 과학과 박사과정

▶ 손 수 욱 (Su-Uk Son)



2008년 2월 : 한양대학교 지구해양과학 학사  
 2010년 2월 : 한양대학교 해양환경과학 석사  
 2015년 8월 : 한양대학교 해양환경과학 박사  
 2016년 9월 : 한양대학교 박사 후 연구원  
 2016년 10월 ~ 현재 : 국방과학연구소 선임연구원

▶ 권 혁 중 (Hyuckjong Kwon)



2013년 2월 : 한양대학교 해양환경과학 학사  
 2020년 2월 : 한양대학교 해양융합과학과 박사  
 2020년 3월 ~ 2022년 8월 : 한국해양과학기술원 박사후연구원  
 2022년 9월 ~ 현재 : 국방기술진흥연구소 연구원

▶ 최 지 웅 (Jee Woong Choi)



1996년 2월 : 한양대학교 지구해양과학 학사  
 1998년 2월 : 한양대학교 지구해양과학 석사  
 2002년 8월 : 한양대학교 지구해양과학 박사  
 2002년 11월 : Applied Physics Lab., Univ. of Washington, USA, Research Associate  
 2007년 9월 ~ 현재 : 한양대학교 해양융합 공학과/국방정보공학과/지능정보융합공학과 교수