

# 함정 소나체계 능동음향 탐지성능에 대한 평가 표준화 연구

심민섭\*, 황지환, 정현섭  
국방기술품질원 함정2팀

## A Study for the Standardized Test of Detection Performance on Active SONAR System

Min-Seop Sim\*, Ji-Hwan Hwang, Hyeon-Seob Jeong  
Defence Agency for Technology and Quality(DTaq) Naval Sea Systems Team 2

**요약** 본 연구에서는 함정 소나체계의 능동음향 탐지성능에 대한 평가 표준화 연구를 수행하였다. 함정의 소나체계는 대표적 수중 탐색체계로 함정의 전투성능, 운용성, 생존성에 중요한 역할을 수행한다. 현대 과학기술의 발달에 따라 잠수함 추진체계의 은밀성이 강화됨에 따라 능동소나를 이용한 수중표적 탐색 및 식별의 중요성이 커지고 있다. 따라서, 신조 함정 소나체계에 대한 객관적이고 정확한 성능평가를 통해 탐지성능을 확인하고 전력화하여야 한다. 능동음향 탐지성능은 능동신호의 음원준위, 중심주파수, 음원수심과 음파의 전달손실 등에 의해 결정된다. 하지만, 탐지성능 평가방법에서는 계절별 수온구조에 따라 탐지거리의 변동성을 반영하지 않고 획일화된 요구성능 만족여부를 평가하고 있다. 본 연구에서는 객관적이고 정확한 탐지성능 평가기준을 위해 소나방정식과 BELLHOP 음선모델을 이용하여 소나체계의 계절별 탐지거리를 추정하였다. 우리나라 동해해역의 여름 및 겨울철 수온구조에서 함정 소나체계 능동신호의 전달손실과 신호이득을 추정하였고 계절별 탐지거리 기준을 확인하였다.

**Abstract** A naval ship sonar system is a representative underwater search system and plays an important role in ship combat performance, operability, and survivability. As the stealth of the submarine propulsion system is strengthened with the development of modern science and technology, the importance of underwater target search and identification using active sonar increases. It is necessary to check the detection performance through an objective and accurate performance evaluation of the sonar system before deployment. Active sonar detection performance is determined by the sound source level, center-frequency, sound source depth, and transmission loss of the active signal. However, the detection performance evaluation does not reflect the variability of the detection distance according to the seasonal sea temperature profile but evaluates whether the required performance is satisfied. In this study, the seasonal detection range of the sonar system was estimated using the sonar equation and the BELLHOP model for objective and accurate detection performance evaluation criteria. The transmission loss and signal excess of the active sonar was estimated in the summer and winter temperature profile of the East Sea of Korea, and the detection range criteria for each season were confirmed.

**Keywords** : Sonar, Detection, Transmission Loss, Signal Excess, Standardized Test

---

\*Corresponding Author : Min-Seop Sim(Defense Agency for Technology and Quality)  
email: simms@dtaq.re.kr

Received June 9, 2021  
Accepted October 1, 2021

Revised July 8, 2021  
Published October 31, 2021

## 1. 서론

함정의 소나(SOund Navigation And Ranging, SONAR)는 대표적인 수중 탐색체계로 음파의 수중 전파를 이용하여 표적을 탐지, 식별하는 체계이다. 수상함의 대표적인 소나체계는 선체고정 음탐기(Hull Mounted Sonar, HMS)이며 수중함 및 어뢰 탐지, 식별, 추적, 수중통신 등의 기능을 수행한다[1,2].

소나체계는 크게 능동소나와 수동소나로 나뉘며 능동소나는 함정의 트랜스듀서에서 수중으로 방사한 능동신호(active signal)의 반사신호를 수신, 분석하여 표적을 탐지, 식별 및 추적한다. 수동소나는 표적에서 수중으로 방사한 능동신호 또는 소음을 수신하여 LOFAR, DEMON 분석함으로써 표적을 식별한다. 능동소나를 이용한 표적 탐지는 복잡한 신호처리 과정을 거치며 높은 추적 정확도를 가진다. 그러나 높은 음원준위의 능동신호를 수중으로 전파하기 때문에 표적의 수동소나에 쉽게 탐지될 수 있다. 반면 수동소나는 능동소나와 달리 표적에서 방사한 신호를 탐지하여 추적하기 때문에 상대적으로 방위 및 거리에 대한 정확성이 낮다.

현대의 대잠전(Antisubmarine Warfare, AW)은 수중함 추진체계의 기술 발전에 따라 고도의 은밀성을 이용한다. 이에 따라 수상함의 생존성을 위해 능동소나를 이용한 수중표적 탐지의 중요성은 더욱 커지고 있으며 수상함의 전투성능과 운용성 및 생존성에 중요한 요소이다. 따라서 객관적이고 표준화된 평가 방안을 바탕으로 소나체계에 대한 성능과 요구사항 충족 여부를 확인하여 전력화할 필요가 있다.

소나체계의 능동음향 탐지성능에는 다양한 요소가 영향을 준다. 능동음향 탐지성능은 소나체계의 음원준위(Source Level, SL), 음원으로부터 표적까지의 양방향 전달손실(Transmission Loss, TL), 능동신호가 표적의 표면에서 반사되는 정도를 나타내는 표적강도(Target Strength, TS)와 그 밖에도 소나방정식(SONAR Equation)을 이루는 여러 요소로 결정된다

소나방정식 파라미터 중 SL, TS 등은 소나체계와 수중표적의 종류에 따라 달라질 수 있으나, 소나체계의 시험평가 과정에서는 고정된 값이다. 수상함에 탑재되는 소나체계는 고유한 SL을 가지며 능동음향 탐지성능 시험평가에 활용되는 표적(함정)의 TS도 표적(함정)의 선체 재질에 따라 고유한 값을 가진다.

소나방정식 파라미터를 이용한 소나체계의 탐지성능 추정은 다양한 방법으로 연구되고 있다. 수중에서의 음

파의 전달, 해양에서의 잡음, 음파의 잔향(reverberation)에 관계없이 표적 거리를 추정하는 성능지수(Figure of Merit) 기반의 탐지거리 추정 기법, 능동소나에서 표적 반사신호의 Fourier transform 분석을 통한 표적 거리 추정 기법 등으로 소나체계의 탐지성능을 분석한다[3,4]. 또, 음선모델을 이용하여 표적 탐지확률과 음원의 음선 경로, 수렴대(convergence zone)를 분석하여 소나체계의 탐지성능을 분석하기도 한다.

본 연구에서는 함정 소나체계의 능동음향 탐지성능 평가에서 계절적 요인(수온구조)에 따라 변화하는 탐지거리에 대해 연구하고 소나체계 성능평가에 대한 표준화된 방안을 제시하고자 한다. 이를 바탕으로 수상함 소나체계 능동음향 탐지성능에 대한 객관적이고 정량적인 평가가 이루어질 수 있으며 탐지성능에 대한 신뢰성을 확보할 수 있을 것이다.

## 2. 본론

### 2.1 함정 소나체계

소나체계 중 선체고정 음탐기(Hull Mounted Sonar, HMS)는 대표적인 수상함용 수중탐색체계로 선체에 고정된 원통형 배열센서(Cylindrical array)를 이용하여 음파를 수중으로 방사, 표적을 탐지, 식별한다. 수중함 및 어뢰 탐지, 식별 및 추적의 기능을 가진다. HMS 소나에는 2 가지 운용모드가 있으며 각각 능동모드, 수동모드이다. 능동모드에서는 함정의 트랜스듀서(원통형 배열센서)에서 방사한 능동신호(active signal)의 표적 반사신호를 자함의 트랜스듀서로 수신하여 음향신호를 분석 후 표적 탐지 및 식별한다. 능동신호는 연속파(Continuous Wave, CW)신호와 변조파(Linear Frequency Modulation, LFM)신호가 있으며 소나체계의 운용자가 필요에 따라 다양한 형태로 수중방사할 수 있다. 수동모드에서는 표

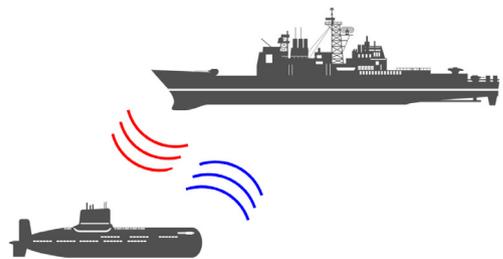


Fig. 1. Concept of Active Sonar

적이 수중으로 방사한 신호(능동신호 또는 소음)을 수신하여 LOFAR, DEMON 분석과 같은 수중음향 신호처리 기법을 통해 표적의 탐지, 식별한다[5].

## 2.2 능동음향탐지 평가방법

전력화를 앞둔 합정은 시운전평가를 통해 탑재장비에 대한 성능을 확인한다. 합정의 소나체계도 다양한 요구 사항을 시운전평가를 통해 확인하며 능동 및 수동 음향 탐지, 탐지 정확도 측정, 능동신호 송신상태, 음원준위, 능동신호 펄스폭 및 중심주파수, 외부장비와의 연동상태 등을 확인한다.

특히, 능동음향 탐지성능 평가는 표적이 자함으로부터 R kyd 이상 거리에서 명확히 탐지되는 조건에서만 평가가 가능하다. 또, 합정에 탑재된 레이더로 측정된 표적의 위치와 소나체계를 통해 추정된 표적의 위치를 비교하여 방위 오차  $\pm 0^\circ$ , 거리 오차  $\pm 0m$  이내를 만족하여야 한다.

그러나, 시운전평가에서 능동음향 탐지성능 측정에 영향을 미치는 계절적 요인에 의한 탐지성능의 불확실성 및 변동성은 미반영되어 있다. 능동소나 음원의 전파는 음원준위(SL), 표적강도(TS)와 전달손실(TL)에 큰 영향을 받는다. 음원준위와 표적강도는 자함과 표적에 의해 정해지는 고정값이지만, 전달손실은 음원의 수심, 주파수 그리고 수온구조에 의해 변화하는 값이다. 합정의 소나체계는 동일한 음원수심과 주파수를 가지지만 수온구조는 시운전평가를 진행하는 계절과 해역에 따라 변화한다. 수온 및 음속구조의 변화에 따라 능동신호의 전달손실값이 달라지며 이는 탐지성능, 탐지거리에 영향을 준다.

## 2.3 현 실태 및 문제점

수상함의 소나체계 능동음향 탐지성능 평가는 앞선 2.2항에서 설명한 바와 같이 탐지거리에 가장 큰 영향을 미치는 계절적 요인에 의한 수온구조의 변화를 고려하지 않고 요구되는 탐지성능, 거리를 동일하게 적용하여 평가한다. 따라서, 수온구조에 의해 음파의 전파거리가 긴 경우에는 시운전평가 시 요구성능 이상의 탐지성능을 쉽게 확인할 수 있으며 계절의 변화에 의한 수온구조 변화로 음파의 전파거리가 짧은 시기의 시운전평가에서는 요구성능 이상의 성능을 확인하기가 어렵다.

본 연구에서는 능동음향 탐지성능 시운전평가에서 소나체계 능동신호의 음원준위(SL), 주파수, 평가 시기의 수온구조를 고려한 음파의 전달손실(TL)과 신호이득

(SE), 탐지거리를 연구하고 이에 따른 시운전평가 표준화 방안에 대해 연구하였다.

## 2.4 능동음향 탐지성능 표준화 방안

### 2.4.1 소나 방정식

앞서 설명한 바와 같이, 소나체계의 탐지성능에는 음파의 특성, 수온구조, 지형, 수심, 유체, 표적(선체)의 재질 등 다양한 요소들이 영향을 미친다. 이러한 현상을 일정한 관계를 따르는 수식으로 나타내기 위해 파라미터로 설정하고 소나 방정식으로 표현하였다. 소나방정식은 능동 및 수동 소나방정식으로 나뉘며 아래의 수식과 같이 나타낸다[6].

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

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

Eq. (1)과 (2)는 각각 능동 소나방정식, 수동 소나방정식에서 신호이득(Signal Excess, SE)을 나타낸다. 여기서 음원준위(Source Level, SL)는 능동 소나방정식에서는 자함에서 방사한 능동신호의 음원준위이며, 수동 소나방정식에서는 표적에서 방사한 신호(능동신호 또는 소음)를 나타낸다. 또 각각의 파라미터는 음원으로부터 표적까지의 전달손실(Transmission Loss, TL), 능동신호가 표적의 표면에서 반사되는 정도를 나타내는 표적강도(Target Strength, TS), 자함의 주변소음(Noise Level, NL), 배열센서에서의 빔형성(Beam-forming)에 의한 지향지수(Directivity Index, DI)와 탐지문턱값(Detection Threshold, DT)을 나타낸다. 능동 소나방정식에서 전달손실은 자함에서 방사한 능동신호가 표적에서 반사하여 다시 자함으로 수신되어야 하므로 양방향 전달손실을 고려하며, 수동 소나방정식에서는 표적에서 방사한 신호가 수중으로 전파하여 자함의 센서에서 수신되어야 하므로 단방향 전달손실을 고려한다.

계절에 따른 소나체계의 탐지성능을 추정하기 위해서는 수온 및 음속구조에 의한 전달손실(TL)을 분석하여야 한다. 이를 위해, BELLHOP 음선모델을 활용하였다.

### 2.4.2 음선모델

BELLHOP 음선모델은 음선이론(ray theory)을 바탕으로 개발된 음선추적모델이다. BELLHOP 모델은 거리-음속 환경에서 해양의 경계면, 수심별 음속 및 수온구조, 음원의 수심, 해저지형 등을 이용하여 음원에서 전파

되는 음파의 경로를 추적한다. 또한, 해수면과 해양의 경계면 및 해저면과 해양의 경계면에서 발생하는 음감쇄 및 난반사, 수중 전파에 따른 음감쇄, 음원준위와 주파수 등을 고려하여 음파의 전파에 따른 음압을 추정할 수 있다.

BELLHOP 모델 외에도 음파전달모델로는 RAM, KRAKEN 모델 등이 있으며, 본 연구의 소나체계와 같이 거리중속 환경에서 높은 주파수 음원을 고려하여 음파전파모델을 추정하기에 BELLHOP 모델이 가장 적합하다.

Fig. 2는 BELLHOP 모델을 이용하여 음파의 음선경로추적과 전달손실을 추정한 예시이다[7]. Fig. 2(a)는 음원에서 방사된 음파의 수중 이동경로를 표현한 것이며 해수면 및 해저면 반사에 의한 음파의 이동경로를 확인할 수 있다. Fig. 2(b)에서는 음파의 이동경로에 따른 전달손실을 나타낸다. 음파의 이동에 따라 전달손실이 증가하고 해저지형에 의해 음파가 전달되지 못하는 영역도 확인할 수 있다.

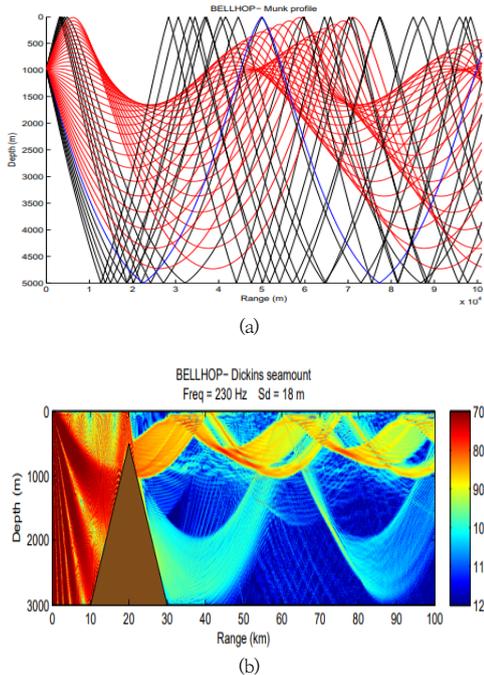


Fig. 2. BELLHOP model example  
(a) Ray tracing (b) Transmission loss

### 2.4.3 계절별 탐지거리

BELLHOP 음선모델을 이용하여 우리나라 동해의 여름, 겨울 수온구조에 따른 소나 능동신호 전달손실(TL)을 추정하였다. Fig. 3은 동해 여름 및 겨울의 수온/음속구조이다.

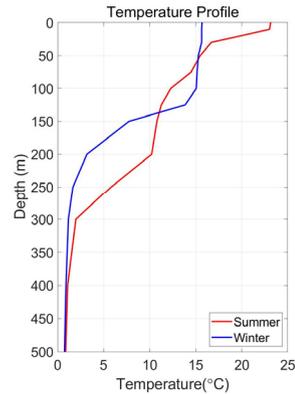


Fig. 3. Temperature Profile

Table 1에서는 BELLHOP 음선모델에 사용한 환경변수값과 소나방정식 변수값을 나타냈다. 주파수는 함정 소나체계 능동신호의 중심주파수로 설정하였으며, 음원의 수심은 함정에서 소나체계의 배열센서가 위치한 소나돔의 수심으로 설정하였다. Fig. 3에 나타난 수온구조에서 각각의 전달손실을 계산하였으며, 수심은 500 m로 가정하였다. Eq. (1)의 음원준위, 표적강도, 소음준위, 지향지수 및 탐지문턱값도 Table 1과 같이 가정하였다.

Table 1. BELLHOP model & Sonar equation parameter

BELLHOP Environment	
Parameter	Value
Source Level	000.0 dB
Signal Frequency	0.0 kHz
Source Depth	0.0 m
Sea Depth	500 m
Temperature profile	East Sea, Summer/Winter
Active Sonar Equation	
Parameter	Value
Source Level, SL	000.0 dB
Target Strength, TS	10 dB
Noise Level, NL	00 dB
Directivity Index, DI	00 dB
Detection Threshold, DT	00 dB

먼저, 여름 및 겨울의 수온구조에서 BELLHOP 모델을 이용한 소나체계 전달손실 추정결과는 Fig. 4와 같고, Eq. (1)에 의한 능동소나의 SE값을 거리에 따라 계산하면 Fig. 5와 같이 나타났다.

여름철 수온구조에서는 Fig. 4(a)와 같이 음선경로가 해저면 방향으로 급격한 기울기로 형성되며 음파 전파거

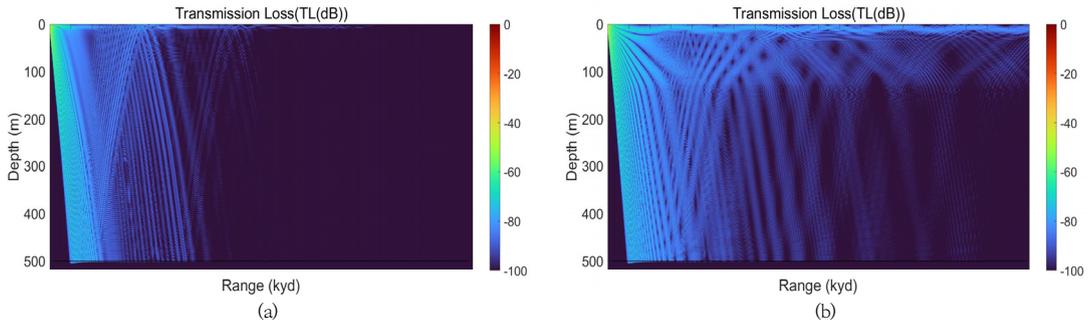


Fig. 4. Transmission Loss(TL) on East Sea Simulated with BELLHOP Model  
(a) Summer (b) Winter

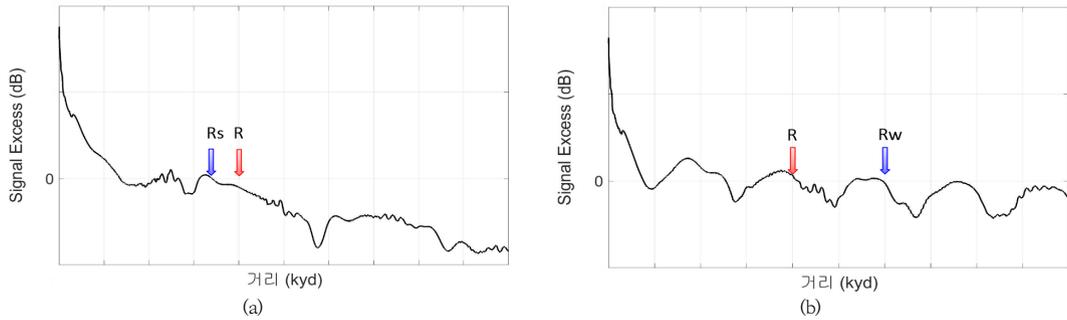


Fig. 5. Signal Excess(SE) on East Sea Simulated with BELLHOP Model  
(a) Summer (b) Winter

리가 짧은 것을 확인할 수 있다. 반대로 겨울철 수온구조에서는 Fig. 4(b)와 같이 음선의 경로가 해수면경계를 따라 이동하며 음파의 전파거리가 길게 형성되는 것을 확인하였다.

BELLHOP 모델의 전달손실 추정결과와 Table 1에 나타난 능동 소나방정식 파라미터를 이용하여 동해해역에서의 거리별 신호이득을 추정하였다. 여름철의 신호이득은 Fig. 5(a)와 같이 거리에 따라 신호이득이 급격히 줄어드는 것을 확인할 수 있으며 소나체계 시운전평가 기준인 R kyd(빨간색 화살표) 대비 짧은 탐지거리( $R_s$ , 파란색 화살표)를 확인할 수 있다. 반면, Fig. 5(b)의 겨울철 신호이득은 전달손실과 유사하게 거리에 따라 길게 형성되며 R kyd 대비 긴 탐지거리( $R_w$ )를 확인할 수 있다.

#### 2.4.4 표준화 방안

현재의 함정 소나체계 능동음향 탐지성능 평가에서는 수온구조의 변화에 따른 탐지거리의 변동성은 고려하지 않고 정해진 요구사항을 만족하는지에 대해 평가하고 있다. 하지만 본 연구에서 추정한 결과와 같이 여름 및 겨울의 수온구조에 따라 소나체계의 탐지거리는 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있으며 시운전평가를 수행하는

시기에 맞추어 요구되는 탐지성능을 달리하여 평가할 필요가 있다. 겨울철 시운전평가에서는 현재 요구되고 있는 탐지거리 대비 긴 탐지거리를 가져야 하며 반대로 여름철에는 짧은 탐지성능이 확인되더라도 소나체계의 성능의 문제가 아닌, 변화된 요인에 의한 적절한 결과임을 고려할 필요가 있다.

따라서, 신조 함정의 소나체계 시운전평가가 이루어지는 해역의 계절별 환경(수심, 수온 및 음속구조)과 능동 신호의 음원준위, 주파수, 음원수심을 고려하여 Table 2와 같이 합리적인 탐지성능 기준을 적용할 필요가 있다.

Table 2. Requirement detection range

Convention		Suggestion	
all the time	R kyd	Summer	R-1.7 kyd ( $\ll$ R)
		Winter	R+4.1 kyd ( $\gg$ R)

### 3. 결론

본 연구에서는 함정 소나체계 능동음향 탐지성능에 대

한 평가 표준화 연구를 위해 함정 소나체계와 탐지성능 평가방법에 대해 고찰하고, 현실태와 문제점에 대해 확인하였다. 현재의 시운전평가에서는 수온구조의 변화에 따른 탐지성능의 변동성을 반영하고 있지 않음을 확인할 수 있었다.

수온구조의 변화에 따른 능동소나의 탐지거리 추정을 위해 소나방정식과 음선모델을 이용한 능동신호의 전달 손실과 능동모드의 신호이득을 계산하였다. 우리나라 동해안의 계절별 대표 수온구조와 BELLHOP 모델 및 능동 소나 파라미터를 이용하여 여름 및 겨울철 탐지거리를 확인하였다. 현재 시운전평가에서 요구하는 탐지거리 대비 여름철 수온구조에서는 짧은 탐지거리가 추정되었고, 겨울철 수온구조에서는 긴 탐지거리를 확인하였다.

소나체계 능동음향 탐지성능 확인을 위해 시운전평가 해역의 계절별 환경과 능동신호의 특성을 바탕으로 한 합리적인 탐지성능 기준이 필요함을 확인하고 제시하였다.

계절별 수온구조의 변화에 따른 소나체계의 탐지성능 기준을 시운전평가에 반영함으로써 탐지성능에 대한 신뢰성을 확보하고 정확한 평가를 통해 요구사항 충족여부를 객관적으로 확인할 수 있다.

## References

- [1] R. J. Urick, "Principle of underwater sound", McGraw-hill Book Company, New York, 3rd ed, 1983.
- [2] James W. Jenkins, "Sonar principles and Antisubmarine Warfare", pp.61-70, Sea Technology, Feb. 1993.
- [3] S. Hyung, M. Park, S. Hwang, and K. Bae, "Estimation of target distance based on fractional Fourier transform analysis of active sonar linear frequency modulation signals", *The Journal of the Acoustical Society of Korea*, Vol.35, No.1, pp.8-15, Jan. 2016. DOI: <https://doi.org/10.7776/ASK.2016.35.1.008>
- [4] H. S. Son, J. B. Park, and Y. H. Joo, "Intelligent Range Decision Method for Figure of Merit of Sonar Equation", *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, Vol.23, No.4, pp.304-309, Aug. 2013. DOI: <https://doi.org/10.5391/ikis.2013.23.4.304>
- [5] W. S. burdic, "Underwater Acoustic System Analysis", Prentice-Hall Inc, Englewood Cliffs, New Jersey, 1984.
- [6] A. D. Waite, "Sonar for Practising Engineers", Wiley and Sons, UK, 3rd ed, 2002.
- [7] Michael B. Porter, "The BELLHOP Manual and User's Guide: PRELIMINARY DRAFT", Heat, Light, and Sound Research, Inc., USA, 2011.

심 민 섭(Min-Seop Sim)

[정회원]



- 2012년 2월 : 경북대학교 IT대학 전자공학부 (공학사)
- 2014년 2월 : 경북대학교 대학원 전자공학부 (공학석사)
- 2019년 8월 ~ 현재 : 국방기술품질원(DTaQ) 연구원

<관심분야>

수중음향, 신호처리, 표적 추적

황 지 환(Ji-Hwan Hwang)

[정회원]



- 1997년 2월 : 해군사관학교 전자공학과 (공학사)
- 2001년 2월 : 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)
- 2011년 2월 : 고려대학교 전기전자공학과 (공학박사)
- 2018년 1월 ~ 현재 : 국방기술품질원(DTaQ) 선임연구원

<관심분야>

신호처리, 인공지능, 시스템 제어

정 현 섭(Hyeon-Seob Jeong)

[정회원]



- 2017년 2월 : 한국해양대학교 전파공학과 (공학사)
- 2017년 2월 ~ 현재 : 국방기술품질원(DTaQ) 연구원

<관심분야>

수중음향, 표적 추적