

## 무인잠수정 기뢰 탐색 효과도 분석

### A Study on Unmanned Underwater Vehicle Operational Performance Analysis for Mine Search Operation

황아롬\*  
Arom Hwang

김문환\*  
Moonhwan Kim

이심용\*\*  
Sim Yong Lee

윤재문\*\*  
Jaemoon Yoon

김찬기\*\*  
Chanki Kim

#### Abstract

Mine countermeasure missions(MCMs) may induce the loss of human and ship because of the covert of mine. In recent years, unmanned underwater vehicles(UUVs) have emerged as viable technical solution for conducting underwater search, surveillance, and clearance operations in support of mine countermeasure missions because of her autonomy and long time endurance capability. This paper introduces a technical approach to mine countermeasure mission effectiveness analysis and presents some simulation-based analysis results for engineering of the UUV system definition which could be support analysis of alternatives for system definition and design.

Keywords : Unmanned Underwater Vehicle(무인잠수정), Performance Analysis(효과도분석), Measure of Effectiveness, Measure of Performance, Mine Countermeasure Mission(대기뢰전), Simulator(시뮬레이터)

#### 1. 서론

해양 자원 개발을 위한 해양 탐사 활동에서 활용도가 높아지고 있는 무인잠수정(UUV : Unmanned Underwater Vehicle)은 국방 분야에서도 무인화 작업으로 인명 손실 방지 및 장시간 운용 가능한 특성 때문에 그 역할이 증대될 것으로 기대되고 있다<sup>[1]</sup>. 특히 기뢰 탐색 작전과 같이 인명 손실을 가져올 수 있는 임무에 무인잠수정을 활용한다면, 전통적인 소해 작전보다 안전하고 효율적으로 임무를 수행할 수 있고 적

해역 감시 활동 작전과 같은 임무에 무인잠수정을 활용한다면 유인 함정 운용 시간 보다 긴 시간 동안 운용하는 것이 가능하기 때문에, 미 해군은 무인잠수정을 활용하는 작전 개념을 수립하고 작전 개념에 적합한 무인잠수정 개발 계획을 가지고 있다<sup>[2]</sup>. 실제로 미 해군은 기뢰 탐색 작전에 민수용으로 개발된 무인 잠수정을 활용하기 시작했다. 민수용으로 개발된 무인 잠수정은 본래 기본적인 해양 탐사 활동을 목적으로 개발되었기 때문에, 기뢰 탐색 작전에 요구되는 임무에 일부 부족한 성능을 가지고 있을 수 있다. 기뢰 탐색 작전에 적합한 새로운 무인잠수정을 개발하기 위해서는 다른 무기체계와 마찬가지로 먼저 임무에 적합한 무인잠수정과 각종 무인잠수정 탑재 장비에 대한 요구 성능을 결정하고 요구 성능에 따른 제원을 결정하는 것이 가장 우선적으로 이루어져야 할 것이

† 2011년 6월 17일 접수~2011년 9월 16일 게재승인

\* LIG 넥스원(LIG Nex1)

\*\* 국방과학연구소(ADD)

책임저자 : 황아롬(aromhwang@lignex1.com)

다. 이러한 요구 성능을 결정하고 요구 성능에 따른 초기 제원을 결정하는 방법으로는 여러 가지 방법이 있지만, 모델링과 시뮬레이션을 통한 효과도 분석을 활용하여 결정하는 것이 시간과 비용 측면에서 가장 효율적인 방법 중 하나라고 할 수 있다<sup>[3]</sup>.

현재 많은 무인잠수정용 시뮬레이터들이 개발되어 있으나, 대부분 설계 완료된 무인 잠수정의 운동 모델 등을 검증하는데 활용되고 있거나 무인잠수정 시뮬레이터 역시 기본적으로 연구 목적으로 개발되어 실제 무인 잠수정이 없는 경우, 이를 활용하여 학술 및 연구 목적으로 활용되고 있다<sup>[4~7]</sup>. 이처럼 학술적 연구 목적 등을 위한 시뮬레이터 효과도분석을 통하여 요구사항 검증 및 초기 제원 도출을 통한 무인 잠수정의 개발 과정에 반영하는 경우는 매우 드문 현실이다

본 논문에서는 기뢰 탐색 작전에 적합한 무인잠수정의 장비에 대한 제원 및 필요 요구 성능에 결정할 수 있는 무인잠수정 체계 성능 분석을 위한 시뮬레이터를 소개한다. 또한 공개되어 있는 무인 잠수정의 제원, 운동 모델, 유체 동역학 계수 등을 이용하여 개발한 시뮬레이터의 시스템 모델과 기뢰전 작전에 적합한 효과도 모델을 소개한다. 또한 개발한 체계 성능 분석 시뮬레이터를 활용하여 기뢰 탐색 작전에 적합한 무인잠수정의 속도, 운용 시간, 무인잠수정 탑재 음향 센서 종류 및 음향 센서 제원 등에 대한 효과도 분석을 수행한 결과를 제시하였다.

## 2. 무인잠수정 체계 성능 분석 시뮬레이터

본 논문에서 구현한 체계 성능 분석 시뮬레이터는 미래 우리 해군에서 사용할 수 있는 잠수함에 탑재하여 기뢰 탐색 작전에 투입되는 길이 6미터 급 대형 무인 잠수정을 설계하기 위하여 체계 요구 성능 및 제원과 같은 설계 인자를 도출을 목적으로 하였다.

또한 기존에 개발한 잠수함, 함정, 항공기 등의 시뮬레이터와 함께 연동 할 수 있도록 하였다<sup>[8]</sup>.

전술한 무인잠수정 설계 인자 도출을 위한 성능 분석 시뮬레이션과 타 무기 체계 연동을 통한 가상 전투 시뮬레이션을 수행을 위해서 시뮬레이터는 워크스테이션 급 PC를 적용하여 총 10개의 소프트웨어 모듈로 구성하였으며, HLA/RTI 통신을 지원하도록 개발하였다. Fig. 1은 개발된 시뮬레이터의 소프트웨어 모듈 사이의 관계를 보여주고 있다. Fig. 2는 실제 시뮬레

이터 형상과 시뮬레이터 운용 화면을 보여주고 있다. 시뮬레이터는 실제 적용하고 있는 기뢰전 시나리오에 따라 효과도 분석을 위한 시나리오를 설정하였다. 기본 시나리오는 기뢰전을 수행하기 위한 기뢰가 부설되어 있는 적절한 해역을 설정하고, 그 해역의 기뢰를 탐색할 수 있도록 설정하였다. 설정된 시나리오에 따라 UUV는 진수하여 탐색해역으로 이동하고, 기뢰를 탐색한 후 잠수함으로 귀환하게 된다. 귀환 후에는 기뢰전에 투입된 무인잠수정의 성능에 대한 효과도분석을 수행한다.

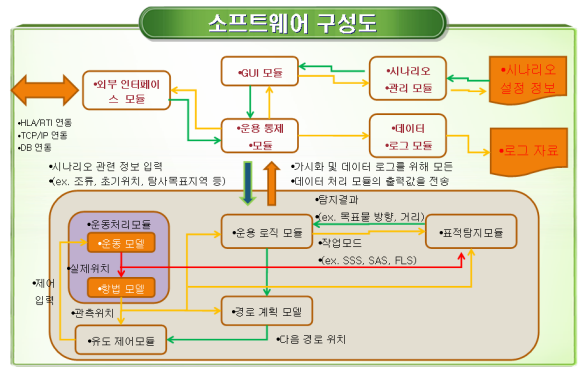


Fig. 1. 시뮬레이터 소프트웨어 구성도



Fig. 2. 시뮬레이터 형상

### 3. 시뮬레이터 모델

임무에 적합한 무인잠수정의 성능 검증과 제원 도출을 위한 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 시뮬레이터에 적용하기 위한 모델이 필요하다. 본 논문에서 적용한 시뮬레이터 모델은 효과도 모델과 체계 모델로 구성하였다. 효과도 모델은 소요군에서 요구되는 목표를 설계된 무인잠수정이 정성적 또는 정량적으로 달성 정도를 측정하는 무인잠수정 설계목적(MOE : Measure Of Effectiveness)을 선택하고 이를 구현하며, 체계 모델은 소요군에서 요구하는 특정 임무에 대한 사양 사항을 만족하는 설계 제원을 결정할 수 있는 근거를 제공하고, 설계 제원에 대한 물리적 특징 및 성능적 특징을 추정할 수 있는 근거를 제공한다. 체계의 각종 제원들 중에서 전체적인 체계 성능을 측정하기 위해서 주요 성능 제원을 선택하여 사용하는 데 이때 사용되는 제원을 Measure Of Performance(MOP)라고 한다. MOP는 무인잠수정 전체 시스템 성능을 표시할 수 있어야 하고, 설정된 전체 임무에 적합한 제원을 표시 할 수 있어야 한다. 또한 MOP는 MOE를 계산하



Fig. 4. 시뮬레이터 모델 관계도

기 위한 효과도 모델의 입력값으로 사용되어야 하기 때문에, MOE와도 물리적인 연관성을 가져야 한다. 효과도 모델, 체계 모델, MOE 및 MOP의 관계는 Fig. 4와 같다.

본 논문에서 무인 잠수정 운동 및 운용 성능을 모사하기 위한 체계 모델은 운동 모델, 항법 모델, 경로 계획 모델, 유도제어 모델 및 표적 탐지 모델로 구성되어 있다. 대상 무인잠수정은 길이 6미터 이내, 지름 21인치로 잠수함에서 운용 가능한 어뢰형 무인잠수정을 목표로 하였다. 또한 기뢰 탐색 작전 수행 시 가장 필요한 기뢰탐지용 센서로 합성 개구면 소나(SAS : Synthetic Aperture Sonar)또는 측면주사소나(SSS : Side Scan Sonar)를 탑재하는 것을 가정하였다. 또한 수중 환경에서 안전한 자율 운항을 위해서 필요한 장애물 탐지 센서로 전면주사소나(FLS : Forward Looking Sonar)를 탑재하는 것으로 가정하였다. 체계 모델의 자세한 설명은 참고문헌<sup>[8]</sup>에 제시되어 있다.

본 논문에서 목표로 하고 있는 기뢰 탐색 작전에 적합한 무인잠수정의 성능을 검증하기 위한 효과도 모델은 공개되어 있는 미국 해군의 무인잠수정 기뢰 탐색 작전 효과도 모델<sup>[9]</sup>을 준용하였다. 본 논문에서는 공개된 효과도 모델 MOE 중 진수 이후 모선과 통신 없이 단독으로 임무 수행하는 무인잠수정을 가정하여 임무 수행 시간, 임무 성취도를 MOE로 선정하였다.

임무 수행 시간은 무인 잠수정이 기뢰 탐색 작전을 수행하는 모든 시간을 포함한다. 즉 임무 수행 시간은 무인잠수정이 모선에서 진수 이후 작전 해역까지 이동 시간, 기뢰 탐색 시간, 탐색 종료 후 회수 지점까지 이동 시간, 모선 회수 시간 등을 모두 포함하고 있어 무인잠수정을 이용한 기뢰 탐색 작전이 기존 기뢰 탐색 작전 대비 효율성 평가 지표로 활용할 수 있다. 임무 수행 시간을 수학적으로 표현하기 위해서 본 논문에서는 기뢰 탐색 지역을 전체 임무 시간으로 나누어서 표현하는 Average Coverage Rate(ACR)를 도입하였다.

임무 성취도는 무인잠수정을 이용하여 기뢰를 탐색하는 작전인 경우에는 기뢰를 수색하고 탐지할 수 있는 능력에 대한 평가 지표로 기뢰를 제거하는 능력에

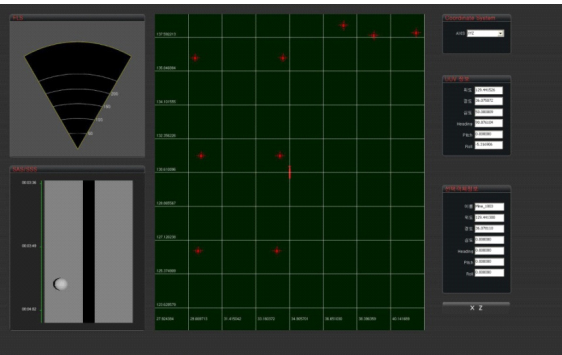
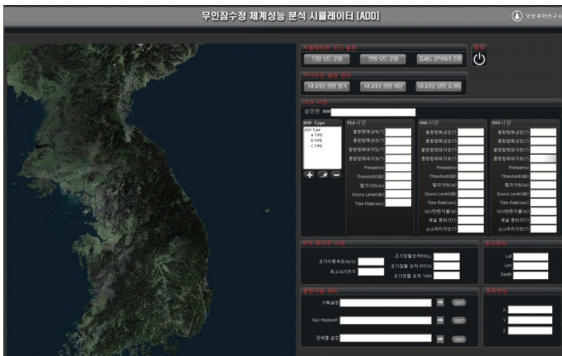


Fig. 3. 시뮬레이터 설정 및 운용 화면

대한 평가 지표로 작성할 수 있다. 본 논문에서 목표로 하는 기뢰 탐색 작전 임무는 기뢰 설치 지역에 대한 기뢰 탐색 임무이기에 임무 성취도는 기뢰를 수색하고 탐지할 수 있는 능력에 대한 평가 지표로 결정하였다. 이를 위하여 sub MOE로 기뢰 탐지 능력에 대한 평가로 탐색 수준과 기뢰 위치를 정확하게 표시할 수 있는 위치 측정 정확도로 결정하였다.

전술한 MOE 중 ACR은 ACR을 표현하는 기뢰 탐색 영역과 전체 임무 시간 중 기뢰 탐색 영역은 이미 작전 운용 개념에 의해서 사전에 결정되어지기 때문에, 무인 잠수정의 물리적 성능과는 연관성이 매우 적다고 할 수 있다. 이러한 이유에서 ACR에 대한 MOP는 전체 운용 시간에 관련되어 있는 무인잠수정 체원 중에서 결정하였다. 또 다른 MOE인 임무 성취도는 전술한 바와 같이 sub MOE인 탐색 수준과 위치 측정 정확도로 나누었기 때문에 MOP 역시 각 sub MOE에 대해서 결정하였다. 탐색 수준은 기뢰를 탐색하여 찾아내는 확률이기때, 이를 표현할 수 있는 기뢰 탐지용 센서 제원 중에서 결정하였다. 또한 무인잠수정 위치 측정 정확도는 무인잠수정 항법 시스템의 성능과 밀접한 관계가 있기 때문에 항법 시스템 제원과 관련된 제원으로 결정하였다. 전술한 MOE/sub MOE와 연관되어 결정된 MOP가 Table 1에 제시되어 있다.

Table 1. MOE - MOP 관계식

MOE	Sub-MOE	MOP
임무수행시간		탐색 속도
		이동 속도
임무성취도	탐색 수준	탐색 너비
		탐지 인식 확률
		기뢰 확인 확률
	탐지 경로 오차	
	위치 측정 정확도	항법 오차

기뢰 탐색 작전 무인잠수정에 대한 성능 분석을 하기 위해서 가장 핵심적인 문제는 Table 1에 제시되어 있는 MOE와 MOP 사이의 관계식을 정립하는 것이다. 본 논문에서 모델링 기법을 통해서 각 MOE와 MOP 사이의 관계식을 정립하였다. ACR과 무인잠수정 임무 수행 속도과의 관계식은 아래 식과 같다.

$$ACR_{eff} = \frac{L_{search} \cdot W_{search}}{T_{mission}} \tag{1}$$

$$T_{mission} = \frac{L_{search}}{v_{search}} \times n + 2 \times \frac{L_{transit}}{v_{transit}}$$

식 (1)에서 좌측항의 의미는 아래 Fig. 5에 도시되어 기뢰 탐색 경로 개념도에 설명되어 있다.

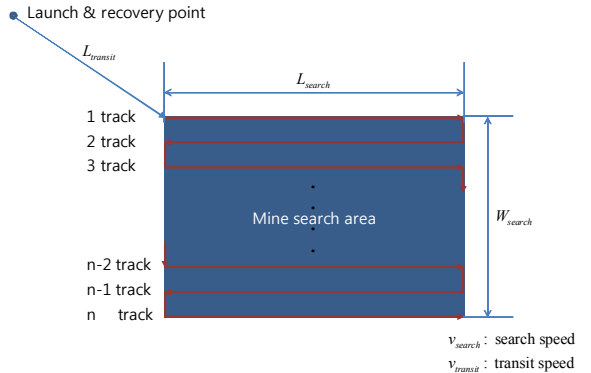


Fig. 5. 기뢰탐색 경로 개념도

임무성취도의 탐색 수준에 대한 sub MOE와 MOP 사이의 관계식은 아래 식 (2)과 같다.

$$P_{search} = (1 - \mu)P_{imm}(1 - e^{-MY}) \tag{2}$$

$$M = \frac{J \cdot A \cdot B}{D_{track}}$$

$$Y = -\frac{2\sigma}{A \cdot B} \int_0^\infty \ln[1 - B \left\{ cnorm\left(\frac{u+A}{2\sigma}\right) - cnorm\left(\frac{u+A}{2\sigma}\right) \right\}] du$$

식 (2)에 표시되어 있는 각 항의 의미는 아래와 같다.

- $\mu$  : fraction of undetectable mines
- $P_{imm}$  : probability of identifying a mine as mine
- $J$  : number of runs per track
- $A$  : sensor characteristic search width
- $B$  : characteristic probability of detection/classification
- $D_{track}$  : distacne between tracks
- $\sigma$  : std. of track keeping error
- $cnorm$  : cumulative normal distribution function

임무성취도의 위치측정 정확도에 대한 sub MOE와

MOP 사이의 관계식은 아래 식과 같다.

$$avg\_pos\_err = 0.5 * max\_pos\_err \quad (3)$$

식 (1), (2), (3)에 의해서 계산된 MOE들에 대해서 각 MOE 간의 중요도 비교에 의해서 가중치(weight)를 계산하였으며, 계산된 가중치를 적용하여 전체 시스템 MOE(overall MOE)을 아래 식 (4)와 같이 계산하였다.

$$MOE_{overall} = 0.6 * f_1(ACR_{eff}) + 0.16 * f_2(avg\_posi\_err) + 0.24 * f_3(P_{search}) \quad (4)$$

식 (4)에서  $f_n(x)$ 는 각 MOE 항목에 대한 정규화 함수이며 식 (5)와 같이 표현된다.

$$f_n(x) = \frac{x - value\_min}{value\_max - value\_min}$$

$$f_1(ACR_{eff}) = \frac{ACR_{eff} - 0.5}{3 - 0.5}$$

$$f_2(avg\_posi\_err) = \frac{avg\_posi\_err - 35}{10 - 35}$$

$$f_3(P_{search}) = \frac{P_{search} - 0.3}{0.9 - 0.3} \quad (5)$$

#### 4. 효과도 분석 결과

본 논문에서는 우리 해군에 적합한 기뢰 탐색 작전용 무인잠수정의 요구 성능을 도출하기 위하여 전술한 시뮬레이터를 이용하여 무인잠수정 속도, 기뢰탐지 경로의 트랙 개수 및 기뢰 탐지용 센서 즉 합성개구면소나(SAS : Synthetic Aperture Sonar)과 측면주사소나(SSS : Side Scan Sonar)에 대한 효과도 분석 시뮬레이션을 수행하고 각 설계 인자에 대한 적절성을 분석하였다. 효과도 분석 시뮬레이션 시나리오를 정하기 위하여 필요한 효과도 모델 적용 인자들 값은 아래 Table 2에 정리되어 있다. 또한 SAS와 SSS에 따른 각 무인 잠수정의 효과도 분석을 위한 조건 역시 정리되어 있다. Table 2에 언급되어 있지 않은 인자( $J, D_{track}$ ) 등은 시뮬레이션 조건에 의해서 계산된다. 최대 거리 오차(max\_pos\_eeer)는 시뮬레이션 체계 모델에 의해서 사전에 결정된 무인잠수정의 경로와 실제 시뮬레이션 수행을

통하여 계산된 무인잠수정의 경로 사이 차이 계산값 중 최대값으로 하였다. 효과도 분석 시뮬레이션에 대한 조건은 Table 3에 정리되어 있다.

Table 2. 시뮬레이션 시나리오 인자.

기뢰 탐색 구역	1km×1km
$P_{imm}$	0.95
기뢰 미탐지 비율( $\mu$ )	0(SAS), 0.05(SSS)
기뢰 인식 비율(B)	0.90(SAS), 0.85(SSS)

Table 3. 시뮬레이션 조건

조건	I	II	III
속도(m/s)	1.5, 2, 2.5, 3	3	3
way point	10	4, 6, 8, 10	10
탐지거리(A)(m)	200	200	100, 120, 140, 160, 180, 200

Table 2와 Table 3에 정리되어 있는 시나리오에 대한 효과도 분석 결과가 Fig. 6~8에 표시되어 있다. Fig. 6은 무인잠수정 waypoint 개수와 탐지거리가 일정하며 속도만 변화하는 Table 3의 조건 I에 대한 결과이며, Fig. 7은 기뢰 탐지 경로의 트랙 개수를 결정하는 waypoint 개수가 변화하는 Table 3의 조건 II에 대한 결과를, Fig. 8은 탐지거리가 변화하는 Table 3의 조건 III에 대한 결과를 보여주고 있다.

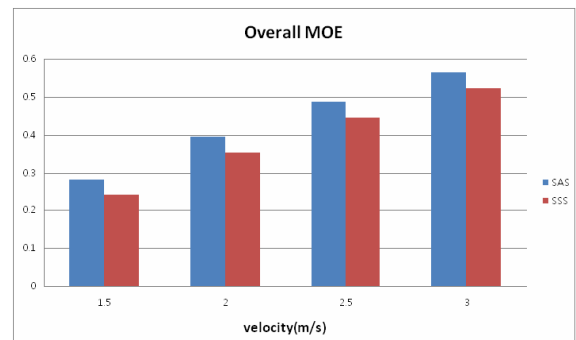


Fig. 6. 속도 변화에 따른 효과도 분석 결과

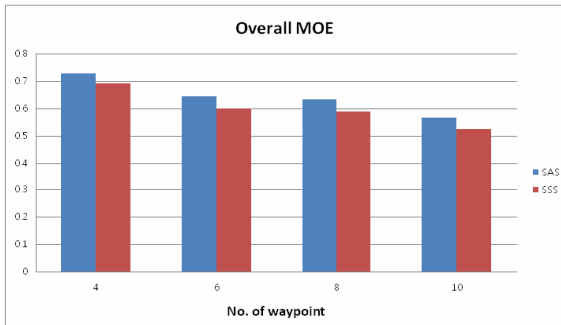


Fig. 7. way point 개수 변화에 따른 효과도 분석 결과

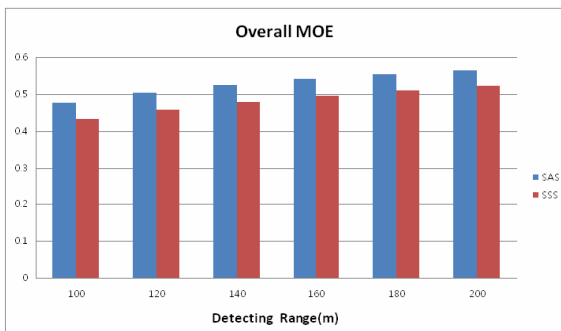


Fig. 8. 기뢰탐지용 센서 탐지 거리에 따른 효과도 분석 결과

Fig. 6~8에서 푸른색 그래프는 SAS 탑재 무인잠수정에 대한 효과도 분석 결과를 보여주고 있으며, 붉은색 그래프는 SSS 탑재 무인잠수정에 대한 효과도 분석 결과를 보여주고 있다. Fig. 6과 Fig. 7을 살펴보면, 무인잠수정의 속도가 증가함에 따라, 효과도가 증가하지만, waypoint 개수 증가는 효과도 감소를 불러 오고 있음을 확인할 수 있다. 또한 속도 변화가 waypoint 개수 변화보다 효과도 결과에 많은 영향을 주고 있음을 확인할 수 있으며, 적절한 성능 도출을 위한 효과도 최소값은 0.5로 설정하였을 때, 기뢰 탐색 작전용 무인잠수정은 최소 3노트 이상의 운항 속도가 필요하며 waypoint 개수는 10개 이하로 설정하는 것이 적절하다고 판단할 수 있다. 또한 Fig. 8에서 탐지 거리가 길어짐에 따라 효과도가 증가하고 있음을 확인할 수 있으며 속도와 waypoint 개수에 대한 효과도 분석과 마찬가지로 효과도 최소값을 0.5로 할 경우 SAS는 120m 이상, SSS는 180m 이상 탐지거리를 요구하고 있음을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 6~8 모두 SAS 탑재 무인 잠수정이 SSS 탑재 무인잠수정 보다 모든 경

우에서 효과도가 높은 사실을 확인할 수 있으며 이러한 사실로부터 기뢰 탐색 작전용 무인잠수정은 SSS 보다는 SAS을 장착하는 것이 보다 효율적인 운용이 가능할 것을 예측할 수 있다.

## 5. 결론

본 논문에서는 기뢰 탐색 작전에 사용할 수 있는 무인 잠수정의 요구 성능 도출 및 타체계 연동 성능을 검증하기 위하여 개발한 기뢰 탐색 작전용 무인잠수정 효과도분석 시뮬레이터를 소개하였다. 또한 기뢰 탐색 작전 무인잠수정의 전술적 성능을 분석하기 위한 효과도 모델과 목표 사양을 도출하기 위한 체계 모델을 정립하였다. 개발된 모델을 적용한 시뮬레이터를 이용한 효과도 분석을 수행하여 SAS와 SSS를 탑재한 무인잠수정에 대한 속도, 경로 개수 및 탐지 거리에 대한 기뢰 탐색 작전 효과도 분석을 수행하였으며, 효과도 분석을 통하여 기뢰 탐색 작전에 적합한 운항 속도 및 경로 계획 waypoint 개수를 도출하였으며, 동일한 조건에서는 SAS 탑재 무인잠수정이 기뢰 탐색 작전 수행에 보다 적합한 것을 확인하였다.

향후 과제로서는 SAS와 SSS에 보다 정밀한 MOP 설정 및 몬테카를로 시뮬레이션을 활용한 다양한 경우에 대한 효과도 분석을 통한 대한민국 해군에 적합한 무인잠수정 체원 도출 및 성능 도출 작업을 수행할 예정이다.

## 후 기

본 연구는 국방과학연구소 선형 개발과제인 ‘무인잠수정 체계 성능 분석 시뮬레이터’의 일부로 수행되었으며, 위 기관의 후원에 감사드립니다.

## References

- [1] 최중락, “무인잠수정(UUV) 개발 추세 및 핵심기술 분석,” 국방기술플러스, Vol. 55, 국방과학연구소, 2008.
- [2] Deputy Assistant Secretary of the Navy, and OPNAV N77, “UUV Mater Plan”, <http://www.navy.mil/>

- navydata/technology/uuvmp.pdf, 2004.
- [3] 박성희, “한국에서의 모의기반 획득”, 국방과학기술플러스, Vol. 55, 국방과학연구소, 2008.
- [4] Brutzman, D. P., Kanayama V. and Zyda M. J., “Integrated Simulation for Rapid Development of Autonomous Underwater Vehicle”, Proc. of AUV' 92, pp. 3~10, 1992.
- [5] Correia L. and Steiger-Garcao A., “An AUV Simulator for Test and Development of a Behavior Based Architecture”, Proc. of AUV'93, 1993.
- [6] Ridao, P., Carreras, M., Ribas D., and El-Fakdi, A., “Graphical Simulators for AUV Development”, 1st. International Symposium on Control, Communications and Signal Processing, 2004.
- [7] Chappell S. G. and Komerska R. J., “An Environment for High-Level Multiple AUV Simulation and Communication”, CLOUT, NOAA/NASA Workshop, 2000.
- [8] 황아름, 김문환, 김찬기, 이심용, 윤재문, “성능분석 시뮬레이션을 위한 어뢰형 무인잠수정 운동 모델 및 유도 제어 모델 연구”, 2010년도 한국해양과학기술협의회 공동학술대회 논문집, 2010.
- [9] Gooding T., “A Framework for Evaluating Advanced Search Concept for Multiple Autonomous underwater Vehicle(AUV) Mine Countermeasures(MCM)”, M.S. Thesis Massachusetts Institute of Technology, 2001.