



Received: 2026/03/03
Revised: 2026/03/13
Accepted: 2026/06/19
Published: 2026/06/30

Corresponding Author:*Kyungwon Oh**70, Hannam-ro, Daedeok-gu, Daejeon,
Republic of Korea

Tel: +82-42-629-8435

E-mail: kwoh@hnu.kr

기뢰탐지 무인잠수정
군집기반 탐색 효과도 분석Effectiveness Analysis of Swarm-Based Mine
Detection Using Unmanned Underwater Vehicles오경원^{1*}, 유태석², 윤선일³¹한남대학교 기계공학과 교수²LIG넥스원 수중이동체계발단 단장³LIG넥스원 수중이동체계발단 2팀장Kyungwon Oh^{1*}, Taesuk Yoo², Seonil Yoon³¹Professor, Dept. of Mechanical Engineering, Hannam University²Research fellow, Unmanned Underwater Vehicle Systems, LIG Nex1³Chief research engineer, Unmanned Underwater Vehicle Systems, LIG Nex1**Abstract**

본 논문은 항만 진입로 환경에서 무인잠수정(UUV) 군집을 활용한 기뢰탐지 작전의 효과도를 수학적 모델링과 몬테카를로 시뮬레이션으로 분석하였다. 동일한 3대의 UUV를 기준으로 이종 군집(M1+S2)과 동종 군집(M3)을 구성하고, 병렬·계층적·협업적 탐색 전략을 비교하였다. 3,000 m × 3,000 m 해역에 20개 기뢰를 임의 배치한 시나리오에서 성능측도는 기뢰제거율, 임무소요시간, 재획득 성공률, 종합작전효과지수(OEI)로 설정하였다. 분석 결과, 이종 군집의 협업적 전략이 기뢰제거율 94.3%, OEI 83.0%로 가장 우수하였다. ANOVA 결과 탐색 전략은 기뢰제거율에 통계적으로 유의한 영향을 미쳤으며, 이종 군집에서 전략 선택 효과가 특히 크게 나타났다.

This paper analyzes the effectiveness of UUV swarm-based mine detection in a harbor approach environment using mathematical modeling and Monte Carlo simulation. Two configurations, a heterogeneous swarm (M1+S2) and a homogeneous swarm (M3), were compared under parallel, hierarchical, and collaborative search strategies. In a 3,000 m × 3,000 m search area with 20 randomly deployed mines, clearance rate, mission time, reacquisition success rate, and overall operational effectiveness index (OEI) were used as measures of effectiveness. The results show that the collaborative strategy with the heterogeneous swarm achieved the best performance, with a clearance rate of 94.3% and an OEI of 83.0%. ANOVA confirmed that search strategy significantly affected clearance performance, especially in the heterogeneous swarm case.

Keywords

무인잠수정(Unmanned Underwater Vehicle),
기뢰대응전(Mine Countermeasures),
군집 탐색(Swarm Search),
몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo Simulation),
효과도 분석(Effectiveness Analysis)

Acknowledgement

이 논문은 2023년도 정부(방위사업청)의 재원으로
국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(No
KRIT-CT-23-035, 군집 무인잠수정 임무제어 및
통합기술)

1. 서론

1.1 연구 배경

해상 기뢰는 비대칭 전력 수단으로서 항만 진입로 및 해상교통로(sea lines of communication, SLOC)에 대한 심각한 위협을 구성한다. 특히 한반도 주변 해역의 수심이 얕고 조류가 복잡한 연안 환경에서 기뢰 위협은 해군 작전의 자유를 제한하고 해상수송 능력을 마비시킬 수 있는 전략적 위험 요소이다. 전통적인 기뢰대응전(mine countermeasures, MCM)은 소해함 중심의 유인 작전에 의존해 왔으나, 이는 인명 피해의 위험이 높고, 넓은 해역을 제한된 시간 내에 탐색하는 데 한계가 존재한다[1].

최근 무인잠수정(unmanned underwater vehicle, UUV) 기술의 발전과 함께 UUV 군집(swarm)을 활용한 기뢰탐지 작전이 차세대 MCM 패러다임으로 주목받고 있다[2]. 다수의 UUV가 협력적으로 해역을 탐색하는 군집 기반 접근법은 단일 플랫폼 운용 대비 탐색 속도 향상, 시스템 강건성(robustness) 증대, 그리고 임무 유연성 확보 측면에서 유리하다[1].

그러나 UUV 군집의 효과적 운용을 위해서는 개별 UUV의 센서 성능(소나 탐지폭, 탐지확률), 플랫폼 특성(속도, 항속시간), 그리고 군집 탐색 전략 간의 복합적 상호작용을 정량적으로 분석하는 것이 필수적이다. 기존 연구에서는 단일 UUV의 경로계획[3] 또는

동종(homogeneous) 군집의 커버리지 최적화[4]에 대한 연구가 주를 이루었으며, 이종(heterogeneous) UUV 군집의 다단계 탐색 전략에 대한 체계적 효과도 분석은 부족한 실정이다.

1.2 연구 목적

본 연구의 목적은 항만 진입로 환경에서 이종 군집(중형 UUV 1대 + 소형 UUV 2대)과 동종 군집(중형 UUV 3대)의 기뢰탐지 효과도를 수학적 모델링과 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 비교 분석하고, 최적 군집 구성 및 운용 전략을 도출하는 것이다. 구체적으로, 두 가지 군집 구성에 대해 세 가지 탐색 전략 “병렬, 계층적, 협업적”의 성능척도(MOE)를 비교하고, ANOVA 분산분석을 통해 작전 성공에 미치는 주요 인자를 통계적으로 검증한다.

1.3 논문의 구성

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 UUV 군집 기뢰탐지의 수학적 모델을 정립하고, 3장에서는 군집 탐색 전략, 시뮬레이션 설계 및 결과 분석을 기술한다. 마지막으로 4장에서 결론 및 향후 연구방향을 논의한다.

2. 수학적 모델링

2.1 탐색 해역 및 기뢰 배치 모델

항만 진입로 환경을 $L \times W$ 의 직사각형 탐색 해역 A 로 모델링한다. 본 연구에서는 $L = W = 3,000m$ 인 정사각형 해역을 설정하였다. 해역 내 Nm 개의 기뢰는 경계 여유(margin) $\delta = 50m$ 를 고려하여 균일분포(uniform distribution)에 따라 임의 배치된다.

$$(x_i^m, y_i^m) \sim U[\delta, L - \delta] \times U[\delta, W - \delta] \quad (1)$$

여기서 $i = 1, \dots, Nm$ 이며, $Nm = 20$ 은 기뢰 수를 나타낸다.

2.2 UUV 운동 모델

각 UUV_j는 웨이포인트(waypoint) 기반 직선 운동 모델을 따른다. 시간 t 에서 UUV_j의 위치 $(x_j(t), y_j(t))$ 는 현재 목표 웨이포인트를 향해 갱신된다.

$$\begin{cases} x_j(t + \Delta t) = x_j(t) + v_j \cos \theta_j(t) \cdot \Delta t \\ y_j(t + \Delta t) = y_j(t) + v_j \sin \theta_j(t) \cdot \Delta t \end{cases} \quad (2)$$

여기서 v_j 는 UUV_j의 속력, $\theta_j(t)$ 는 현재 진행 방향(heading), Δt 는 시간 간격이다. 진행 방향 $\theta_j(t)$ 는 최소회전반경 $R_{\min}$ 에 의한 최대 선회율 $\dot{\theta}_{\max} = v_j / R_{\min}$ 의 제약을 받는다.

$$|\theta_j(t + \Delta t) - \theta_j(t)| \leq \dot{\theta}_{\max} \cdot \Delta t \quad (3)$$

UUV의 작전 가용 시간은 항속시간(endurance) T_{end} 에 의해 제한되며, 잔여 항속시간이 0이 되면 비활성화(deactivation)된다.

2.3 소나 탐지 모델

UUV_j의 소나에 의한 기뢰 i 의 탐지 여부는 탐지폭(swath width) S_j 와 탐지확률(probability of detection) $P_{d,j}$ 에 의해 결정된다. UUV_j와 기뢰 i 사이의 거리가 탐지폭의 절반 이내일 때 탐지 기회가 발생한다.

$$d_{ij}(t) = \sqrt{(x_j - x_i^m)^2 + (y_j - y_i^m)^2} \leq \frac{S_j}{2} \quad (4)$$

탐지 조건이 충족되면 환경 인자를 반영한 보정 탐지확률 $\tilde{P}_{d,j}$ 에 의해 탐지가 결정된다.

$$\tilde{P}_{d,j} = P_{d,j} \cdot \alpha_{\text{env}} \quad (5)$$

여기서 $\alpha_{\text{env}} \in (0, 1)$ 는 수중 음향 환경의 탐지능 계수이다.

2.4 누적 탐지확률 모델

해역 내 임의 지점에 위치한 기뢰가 UUV 군집에 의해 총 n 회 탐색 기회를 가질 때, 최소 1회 이상 탐지될 누적 탐지확률은 다음과 같다:

$$P_{cum,i} = 1 - \prod_{k=1}^{n_i} (1 - \tilde{P}_{d,k}) \quad (6)$$

여기서 $\tilde{P}_{d,k}$ 는 k 번째 탐색 기회에서의 보정 탐지확률이다.

2.5 해역 커버리지 모델

탐색 해역을 $C \times C$ 크기의 격자(cell)로 분할하여 커버리지를 추적한다. 셀 크기 $C = 10m$ 로 설정하였으며, 각 셀 (i, j) 에 대한 탐색 횟수 n_{ij} 를 기록한다. 전체 해역 커버리지율은 다음과 같다.

$$R_{cov} = \frac{|((i, j) | n_{ij} > 0)|}{N_{cell}} \times 100[\%] \quad (7)$$

여기서 N_{cell} 은 전체 격자 수이다.

3. 군집 탐색 전략 및 시뮬레이션 분석

3.1 군집 탐색 전략

본 연구에서는 UUV 군집의 운용 방식에 따라 세 가지 탐색 전략을 설계하고 비교 분석하였다.

3.1.1 병렬 전략(Parallel)

병렬 전략은 모든 UUV가 탐색 해역을 균등 분할하여 독립적으로 탐색하는 가장 기본적인 방식이다.

총 N 대의 UUV가 투입될 때, 해역의 y 축 방향을 N 개의 동일한 수평 구간(strip)으로 분할하여 각 UUV에 배정한다:

$$A_j = [0, L] \times \left[\frac{(j-1)W}{N}, \frac{jW}{N} \right] \quad (8)$$

각 UUV는 배정된 구간 내에서 잔디깎기(lawn-mower) 패턴에 따라 순차적으로 탐색을 수행한다. UUV 간 정보 교환이나 임무 재배정은 이루어지지 않

으며, 탐지된 표적에 대한 재획득(reacquisition) 또는 식별(classification) 과정이 없다.

3.1.2 계층적 전략(Hierarchical)

계층적 전략은 2단계로 구분된 탐색/식별 체계를 적용한다. 이 전략은 이중 군집(Case~1)에서 중형/소형 UUV의 역할 분화를 활용하며, 동종 군집(Case~2)에서는 SAS의 자체 식별 능력에 의존한다.

(1) 제1단계(탐색): 중형 UUV(N_M 대)가 SAS를 이용하여 전체 탐색 해역을 대상으로 광역 탐색을 수행한다. 소형 UUV(N_S 대)는 중형 UUV 후방에서 대기(loitering) 상태를 유지한다.

(2) 제2단계(식별): 중형 UUV의 해역 커버리지율이 임계값 θ_H 에 도달하면, 탐색 단계에서 탐지된 미식별 표적에 대해 소형 UUV를 투입하여 재획득 및 정밀 식별을 수행한다.

$$\text{식별 단계 개시: } R_{cov} \geq \theta_H \quad (9)$$

여기서 $\theta_H = 0.5$ 로 설정하였다.

3.1.3 협업적 전략(Collaborative)

협업적 전략은 계층적 전략과 동일한 역할 분화를 사용하되, 임계값 없이 중형 UUV가 표적을 탐지하는 즉시(real-time) 소형 UUV를 투입하여 식별을 수행한다.

$$j^* = \arg \min_{j' \in S_{avail}} d(\mathbf{p}_{j'}, \mathbf{p}_{mine}) \quad (10)$$

$$\mathbf{p}_{j'} = (x_{j'}, y_{j'}), \quad \mathbf{p}_{mine} = (x_m, y_m)$$

여기서 S_{avail} 은 통신 범위 내 가용 소형 UUV 집합이다. Table 1은 세가지 전략의 주요 특성을 요약한다.

Table 1. Comparison of swarm search strategies

Category	Parallel	Hierarchical	Collaborative
Role Assignment	None	SAS/SSS	SAS/SSS
Cooperation	Independent	After Threshold	Immediate
Reacquisition	None	Batch Allocation	Real-time

3.2 시뮬레이션 설계

3.2.1 시뮬레이션 환경

본 연구에서는 Python 기반 UUV MCM 시뮬레이션 시스템(v8)을 개발하여 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하였다[5].

Table 2. Simulation parameters

Parameter	Description	Value
$L \times W$	Search Area	3,000 ² m
N_m	Number of Mines	20
Δt	Time Step	5 s
$T_{\max}$	Max Simulation Time	10 hr
N_{MC}	Monte Carlo Iterations	100
α_{env}	Acoustic Environment Factor	1.0
C	Grid Cell Size	10 m
θ_H	Hierarchical Threshold	0.5

3.2.2 군집 구성

본 연구에서는 동일한 총 3대의 UUV를 투입하되 군집 구성을 달리하여 효과도를 비교한다.

(1) Case 1(이종 군집): 중형 UUV 1대(SAS 탑재) + 소형 UUV 2대(SSS 탑재). 중형 UUV가 광역 탐색을 수행하고, 소형 UUV가 탐지된 표적의 정밀 식별을 담당하는 SAS-SSS 이원화 체계이다.

(2) Case 2(동종 군집): 중형 UUV 3대(SAS 탑재). 모든 UUV가 동일 사양으로 탐색과 SAS 자체 식별을 수행한다. 소형 UUV가 부재하므로 재획득 임무는 수행되지 않으며, SAS 자체 식별 정확도(0.9)에 의존한다.

Table 3. UUV specifications

Parameter	Unit	Medium	Small
Speed (v)	m/s	2.5	1.5
Endurance	hr	40	15
Nav. Accuracy	m	0.5	1.0
Comm. Range	m	1,000	500
Swath Width (S)	m	400	320
Turning Radius	m	50	30
Detection Prob. (P_d)	–	0.95	0.80
False Alarm Rate	km ²	0.005	0.01
Sonar Type	–	SAS	SSS

3.2.3 성능척도(MOE)

(1) 기뢰제거율(clearance rate, CR):

$$CR = \frac{N_{\text{classified}}}{N_m} \times 100[\%] \quad (11)$$

(2) 임무소요시간(T_{mission}): 모든 기뢰가 식별 완료되거나 시뮬레이션 종료까지의 경과 시간[hr]이다.

(3) 재획득 성공률(R_{reacq}):

$$R_{\text{reacq}} = \frac{N_{\text{reacq, succ}}}{N_{\text{reacq, att}}} \times 100[\%] \quad (12)$$

(4) 종합작전효과지수(E_{OEI}):

$$E_{OEI} = 0.4\hat{CR} + 0.3\hat{T} + 0.2\hat{FA} + 0.1 \quad (13)$$

여기서 $\hat{CR} = CR/100$, $\hat{T} = \max(0, 1 - T/20)$, $\hat{FA} = \max(0, 1 - FA/20)$ 이다.

3.2.4 통계적 검증 방법

시뮬레이션 결과의 통계적 유의성 검증을 위해 일원분산분석(one-way ANOVA)을 수행하였다. 유의수준 $\alpha = 0.05$ 에서 귀무가설 H_0 : “전략 간 평균 기뢰제거율에 차이가 없다”를 검정하며, 유의한 차이가 확인될 경우 사후검정으로 Tukey HSD 검정을 적용하였다.

시뮬레이션 결과의 통계적 유의성 검증을 위해 일원분산분석(one-way analysis of variance, ANOVA)을 수행하였다. 유의수준 $\alpha = 0.05$ 에서 귀무가설 H_0 : “전략 간 평균 기뢰제거율에 차이가 없다”를 검정하며, 유의한 차이가 확인될 경우 사후검정으로 Tukey의 정직유의차이(honestly significant difference, HSD) 검정을 적용하였다. 모든 결과에 대해 95% 신뢰구간(confidence interval, CI)을 산출하였다.

3.3 시뮬레이션 결과 및 분석

3.3.1 Case 1: 이종 군집(중형 1대 + 소형 2대)

협업적 전략이 기뢰제거율 94.3%, 종합작전효과

지수 83.0%로 Case 1에서 최우수 성능을 달성하였다. 계층적 전략(93.2%)도 근접한 성능을 보였으나, 임무소요시간이 9.4시간으로 협업적 전략(9.1시간)보다 다소 길었다. 이는 계층적 전략의 임계값 기반 일괄 처리 방식이 1대의 중형 UUV로 광역 탐색을 수행하는 경우 식별 단계 개시가 지연되기 때문이다. 반면 병렬 전략은 기뢰제거율 25.3%에 그쳐 작전 요구 수준에 크게 미달하였다. 이는 소형 UUV 2대의 낮은 탐지확률($P_d = 0.80$)과 재획득/식별 과정의 부재에 기인한다.

Table 4. Simulation results: Case 1 (M1 + S2)

MOE	Parallel	Hierarchical	Collaborative
CR [%]	25.3	93.2	94.3
95% CI	23.5--27.0	92.1--94.4	93.3--95.2
T_{mis} [hr]	10.0*	9.4	9.1
R_{reacq} [%]	--	75.9	71.0
E_{OEI} [%]	52.3	82.5	83.0

*Terminated due to timeout

3.3.2 Case 2: 동종 군집(중형 3대)

Table 5. Simulation results: Case 2 (M3)

MOE	Parallel	Hierarchical	Collaborative
CR [%]	78.6	88.2	88.7
95% CI	76.9--80.3	86.7--89.7	87.3--90.0
T_{mis} [hr]	10.0*	9.3	9.0
R_{reacq} [%]	--	--	--
E_{OEI} [%]	73.8	79.3	78.8

*Terminated due to timeout

Case 2에서는 소형 UUV가 부재하므로 모든 전략에서 재획득이 수행되지 않으며, SAS 자체 식별 정확도(0.9)에 의존한다. 병렬 전략의 기뢰제거율이 78.6%로 Case 1(25.3%)보다 현저히 높은데, 이는 3대의 중형 UUV가 각각 높은 탐지확률($P_d = 0.95$)과 넓은 탐지폭(400 m)으로 독립적으로 탐색하기 때문이다. 그러나 계층적/협업적 전략(88.2~88.7%)은 Case 1의 동일 전략(93.2~94.3%)보다 약 5~6%p 낮은 기뢰제거율을 보였다. 이는 소형 UUV에 의한 정밀 재획득/식별 단계가 부재하여, SAS 1차 탐색에서 미식별된 기뢰에 대한 후속 처리가 이루어지지 않기 때문이다.

3.3.3 Case 1 vs. Case 2 비교

두 군집 구성의 최적 전략(협업적) 간 비교를 Table 6에 제시한다.

Table 6. Case comparison: Collaborative strategy

MOE	Case 1 (M1+S2)	Case 2 (M3)
CR [%]	94.3	88.7
T_{mis} [hr]	9.1	9.0
R_{reacq} [%]	71.0	--
E_{OEI} [%]	83.0	78.8

동일한 3대의 UUV를 투입하더라도 이종 군집(Case 1)이 동종 군집(Case 2)보다 기뢰제거율에서 5.6%p, OEI에서 4.2%p 우수한 성능을 달성하였다. 이는 SAS에 의한 광역 탐색과 SSS에 의한 정밀 식별이라는 역할 분화(role specialization)가 동일 센서의 병렬 투입보다 효과적임을 입증한다.

3.3.4 센서 파라미터 영향 분석

Case 1 계층적 전략을 기준으로, 중형 UUV의 소나 탐지폭(S)과 탐지확률(P_d) 변화에 따른 기뢰제거율을 Table 7에 제시한다.

Table 7. Clearance rate by sensor parameters [%] (Case 1)

Swath Width	Detection Probability P_d		
	0.85	0.90	0.95
300 m	93.7	93.8	94.3
400 m	93.3	92.8	91.0
500 m	94.3	95.7	96.2

탐지폭 500 m, 탐지확률 0.95 조합에서 최고 기뢰제거율(96.2%)이 달성되었다. 전반적으로 탐지폭이 넓을수록 탐색 커버리지가 증가하여 성능이 향상되는 경향을 보였다. 다만 탐지폭 400 m 구간에서 탐지확률 증가에 따른 성능 향상이 미미하거나 오히려 감소하는 구간이 관찰되는데, 이는 탐지폭-탐지확률 간의 비선형 상호작용과 시뮬레이션의 확률적 변동에 기인한다.

UUV 군집 기뢰탐색 시뮬레이션 경로 결과

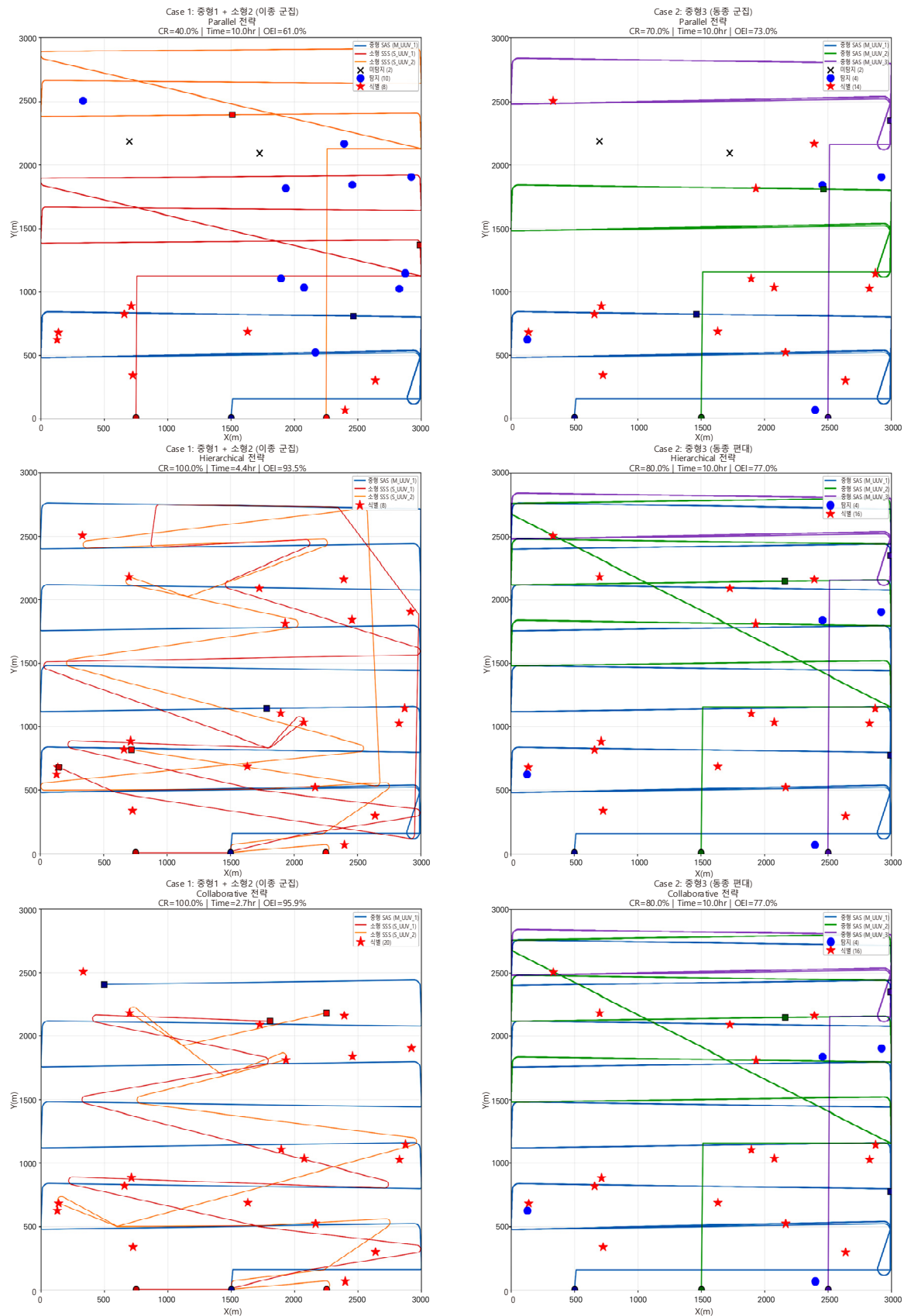


Fig. 1. Path results of a UUV swarm mine search simulation

3.3.5 ANOVA 분산분석

각 Case에서 탐색 전략이 기뢰제거율에 미치는 영향을 ANOVA로 검정하였다. Table 8에 결과를 제시한다.

Table 8. ANOVA results by case

Case	df	F Sig.
Case 1 (M1 + S2)	2, 297	3,278.0 ***
Case 2 (M3)	2, 297	52.0 ***

*** $p < 0.001$

두 Case 모두 탐색 전략이 기뢰제거율에 통계적으로 유의한 영향을 미치는 것으로 확인되었다($p < 0.001$). 특히 Case 1의 F 값(3,278.0)이 Case 2의 F 값(52.0)보다 약 63배 높아, 이종 군집에서 전략 선택의 영향이 동종 군집보다 압도적으로 큼을 확인하였다. 이는 이종 군집의 역할 분화 구조에서 적절한 전략이 성능 향상의 핵심 동인(driver)으로 작용함을 시사한다.

Tukey HSD(honestly significant difference) 사후검정 결과, 두 Case 모두에서 병렬 전략과 계층적/협업적 전략 간에 유의한 차이가 존재하였으나($p < 0.001$), 계층적 전략과 협업적 전략 간의 기뢰제거율 차이는 통계적으로 유의하지 않았다.

4. 결론

4.1 연구 결과 요약

본 연구에서는 항만 진입로 환경에서 동일한 3대의 UUV를 이종 군집(Case 1: 중형 1대 + 소형 2대)과 동종 군집(Case 2: 중형 3대)으로 구성하여 기뢰탐지 효과도를 수학적 모델링과 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 비교 분석하였다. 주요 연구 결과는 다음과 같다.

첫째, 이종 군집(Case 1)의 협업적 전략이 기뢰제거율 94.3%(95% CI: 93.3%~95.2%), OEI 83.0%로 전체 6개 구성 전략 조합 중 최적의 성능을 달성하였다. 이는 SAS에 의한 광역 탐색과 SSS에 의한 즉시 정밀 식별이라는 실시간 협업이 기뢰 식별률을 극대화함을 입증한다.

둘째, 동일한 3대 자산을 투입하더라도 이종 군집

(Case 1)이 동종 군집(Case 2)보다 기뢰제거율에서 5.6%p(94.3% vs. 88.7%) 우수하여, 군집 구성의 이종화(heterogeneity)가 단순 자산 증대보다 효과적임을 확인하였다.

셋째, ANOVA 분산분석 결과, 이종 군집(Case 1)에서 탐색 전략의 F 값(3,278.0)이 동종 군집(Case 2)의 F 값(52.0)보다 약 63배 높아, 이종 군집 운용 시 전략 선택이 작전 성공에 결정적 영향을 미침을 확인하였다.

넷째, 동종 군집(Case 2)에서도 계층적/협업적 전략(88.2~88.7%)이 병렬 전략(78.6%)보다 유의하게 높은 기뢰제거율을 달성하여, SAS 자체 식별에 의존하는 경우에도 전략적 탐색이 무작위 분할 탐색보다 우수함을 보였다.

4.2 시사점 및 기여

본 연구의 결과는 UUV 군집 기뢰대응전 운용교리 수립에 다음과 같은 시사점을 제공한다. MCM 작전에서 제한된 UUV 자산을 운용할 때, 동일 사양의 UUV를 다수 투입하는 것보다 SAS-SSS 이원화 체계의 이종 군집으로 구성하는 것이 기뢰제거율 향상에 더 효과적이다. 또한 이종 군집 운용 시 협업적 또는 계층적 탐색 전략의 적용이 필수적이며, 단순 병렬 투입은 이종 군집의 장점을 활용하지 못함을 확인하였다.

4.3 한계 및 향후 연구

본 연구의 한계와 향후 연구방향은 다음과 같다. 첫째, 해류, 수온약층(thermocline), 해저 지형 등 실제 해양 환경의 복잡한 동적 특성을 반영한 시뮬레이션 고도화가 필요하다. 둘째, UUV 간 수중 통신의 지연 및 오류가 군집 협업에 미치는 영향을 분석해야 한다. 셋째, 중형/소형 UUV의 대수 비율 최적화(예: 1:3, 2:2 등)에 대한 추가 분석이 필요하다. 마지막으로, 실험역 시험(sea trial)을 통한 시뮬레이션 모델의 실증적 검증(validation)이 필수적이다.

참고문헌

- [1] Y. Yang, Y. Xiao, & T. Li, 'A Survey of Autonomous Underwater Vehicle Formation: Performance, Formation Control, and Communication Capability,' IEEE

Communications Surveys & Tutorials, VOL. 23, NO. 2, 2021, pp. 815–841.

[2] U.S. Navy, Department of the Navy Unmanned Campaign Framework, Dept. of the Navy, 2021.

[3] N. K. Yilmaz, C. Evangelinos, P. F. J. Lermusiaux, & N. M. Patrikalakis, 'Path Planning of Autonomous Underwater Vehicles for Adaptive Sampling Using Mixed Integer Linear Programming,' IEEE Journal of Oceanic Engineering, VOL. 33, NO. 4, 2008, pp. 522–537.

[4] Y. Cao, W. Yu, W. Ren, & G. Chen, 'An Overview of Recent Progress in the Study of Distributed Multi-Agent

Coordination,' IEEE Transactions on Industrial Informatics, VOL. 9, NO. 1, 2013, pp. 427–438.

[5] Nicholas Metropolis & S. Ulam, 'The Monte Carlo Method,' Journal of the American Statistical Association, VOL. 44, NO. 247, 1949, pp. 335–341.

[6] Bernard Osgood Koopman, Search and Screening: General Principles with Historical Applications, Pergamon Press, 1980.

[7] Lawrence D. Stone, Roy L. Streit, Thomas L. Corwin, & Kristine L. Bell, Bayesian Multiple Target Tracking (2nd ed.), Artech House, 2014.