



Received: 2026/05/04
Revised: 2026/05/16
Accepted: 2026/06/17
Published: 2026/06/30

***Corresponding Author:**

Yonghoon Ha

Hwangsanbul-ro 1040, Yangchon-myeon, Nonsan-si,
Chungcheongnam-do 33021, Republic of Korea

Tel: +82-41-831-5385

Fax: +82-2-748-7588

E-mail: yonghoonha@korea.kr

Abstract

본 연구는 초기 기뢰탐색 단계에서 허용 미탐기뢰 수와 신뢰도 기준을 직접 반영할 수 있는 확률모형 기반 임무계획 산출 알고리즘을 제안한다. 제안 알고리즘은 기뢰 수량의 불확실성과 탐색전력의 성능을 고려하여 요구 탐색수준을 산정하고, 이를 소향계획으로 도출하도록 구성하였다. 알고리즘의 타당성은 평균 총 기뢰수, 허용 미탐기뢰 수 및 신뢰도 기준을 변화시킨 시나리오를 통해 요구조건 충족성을 확인하고, 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 임무계획의 실현 가능성을 검증하는 방식으로 평가하였다.

This paper proposes a probabilistic-model-based mission planning algorithm that directly reflects the allowable number of undetected mines and the required confidence level during the initial mine search phase. The proposed algorithm was designed to estimate the required search level by considering uncertainty in the number of mines and the performance of search assets, and to derive the corresponding search plan. The validity of the algorithm was evaluated by verifying requirement satisfaction under scenarios with varying mean total numbers of mines, allowable numbers of undetected mines, and confidence levels, and by assessing the feasibility of the mission plans through Monte Carlo simulation.

Keywords

기뢰대항작전(Mine Countermeasures),
임무계획(Mission Planning),
포아송 확률분포(Poisson Distribution),
Koopman 탐색이론(Koopman Search Theory)

확률모형 기반 기뢰탐색 임무계획 산출 알고리즘

Probabilistic-Model-Based Algorithm for Mine Search Mission Planning

권오준¹, 하용훈^{2*}

¹해군 대위/국방대학교 국방과학학부 무기체계학과 석사과정

²국방대학교 국방과학학부 무기체계학과 부교수

Ohjoon Kwon¹, Yonghoon Ha^{2*}

¹LT, ROK Navy/M.S. candidate, Dept. of Defense Science, KNDU

²Associate professor, Dept. of Defense Science, KNDU

1. 서론

기뢰는 낮은 비용으로 해상교통로를 차단하고 우세 전력의 기동을 지연시키며 제거 이전까지 지속적인 심리적·작전적 압박을 유발할 수 있다는 점에서 대표적인 비대칭 해양위협 무기체계이며, 이러한 해상 위협은 최근 분쟁에서도 반복적으로 확인할 수 있다. 러시아-우크라이나 전쟁 이후 흑해에서는 기뢰로 인한 항행 위험이 지속적으로 제기되어 왔으며[1], 미국·이스라엘-이란 전쟁 과정에서도 이란이 호르무즈 해협에 기뢰를 부설할 가능성이 제기되었다[2]. 이는 기뢰가 현대 해상전에서도 여전히 해상교통로의 안전과 전력운용에 중대한 영향을 미치는 현실적 위협임을 보여준다.

북한은 현재 수만 개 이상의 기뢰를 구축하고 있는 것으로 알려져 있으며[3], 유사시 우리나라의 주요 항만과 접근수역, 해상교통로에 기뢰를 대량 부설함으로써 증원 전력의 전개와 항만 운용을 지연시키려 할 가능성이 있다. 따라서 적이 부설한 기뢰를 탐색, 제거하여 해상교통로와 주요 항만을 보호하고 안전한 통항을 보장하는 기뢰대항작전에서는 제한된 시간과 가용 전력 하에서 요구되는 안전 수준을 언제, 어떤 임무계획으로 달성할 것인지를 정량적으로 산출하는 것이 중요하다. 이를 위해서는 탐색전력의 센서 성능, 기뢰위험 수준, 기뢰제거율과 신뢰도 등 다양한 이론적 요소가 적용되나 국내 기뢰대항작전 분야에서는 이러한 이론 연구 및 발전 기반이 충분하지 않으며 이는 임무계획 수립도구 개발에도 영향을 줄 수 있다고 지적된다[4].

본 연구는 기뢰대항작전 임무계획에 사용되는 주요 요소를 바탕으로, 허용 미탐기뢰 수와 신뢰도 기준을 직접 반영할 수 있는 확률모형 기반 기뢰탐색 임무계획 산출 알고리즘을 제안한다. 이를 위해 기뢰 수량의 불확실성과 탐색전력의 성능을 고려하여 요구 탐색수준을 산정하고, 이를 충족하는 전력별 담당 구역과 소항계획을 도출하도록 알고리즘을 구성하였다.

2. 관련연구

2.1 기뢰대항작전 임무계획

기뢰대항작전 임무계획 연구는 미 해군과 NATO의 임무계획·평가 도구를 중심으로 발전해 왔다. Pollitt(2006)는 미 해군의 기뢰대항작전 전술 의사결정 지원 도구가 초기 자동화 지원체계에서 출발하여 MEDAL(mine warfare & environmental decision aid library) 계열로 발전해 온 과정을 정리하고, MEDAL을 기뢰대항작전 계획과 위험평가를 지원하는 도구로 설명했다[5]. Redmayne(1996)은 NATO의 기뢰대항작전 계획·평가 도구인 MCM expert가 항로폭, 기뢰 위치 확률밀도, 제거확률 등을 결합하여 통항 위험을 평가하는 방식으로 구성되어 있음을 보였다[6]. 이러한 연구들은 기뢰대항작전 임무계획이 단순한 경로계획 문제가 아니라, 기뢰위협과 통항 위험을 확률적으로 평가하고 이를 작전계획에 반영하는 의사결정 문제임을 보여준다.

국내 연구에서 정미애·이택선(2026)은 한국 해군의 기뢰대항작전 임무계획 절차의 제한사항을 지적하였다[7]. 이 연구에 따르면 현행 임무계획 수립 도구는 임무 목표인 허용 잔존 기뢰 수와 신뢰도의 직접 산출 기능이 없어 지휘관이 의도하는 허용 위험 수준을 계획에 직접 반영하기 어렵다. 또한, 핵심 입력 변수인 탐색폭·탐지율에 대한 실측 데이터 부족과 기뢰 부설 수량을 고정값으로 입력하는 구조로 인해 계획의 신뢰성이 저하될 우려가 있다.

2.2 기뢰탐색 확률 모델

기뢰탐색 임무에서 탐색노력과 탐지확률의 관계는 Koopman(1946)의 탐색이론을 통해 설명할 수 있

다[8]. Koopman은 탐색면적, 유효탐색폭 및 탐색경로 길이의 관계를 이용하여 random search formula를 제시하였다. 이는 탐색구역에 투입된 누적 탐색노력에 따라 탐지확률이 어떻게 증가하는지를 설명하는 대표적인 탐색이론으로 활용되고 있다. Stone(1977)은 이러한 탐색이론이 이론적 최적성과 실제 운용조건을 함께 고려하여 적용되어야 함을 설명하고, 탐색계획에서 확률적 탐지함수를 사용하는 사례를 제시하였다[9].

항로 전체를 다수의 작은 격자로 분할하여 각 격자를 기뢰 부설 가능 위치로 가정하면, 각 격자에서의 기뢰 존재 여부는 ‘기뢰 존재/미존재’의 베르누이 시행으로 볼 수 있다. 이때 격자 수는 많고 개별 격자에서 기뢰 존재 확률은 작으며, 전체 기대 기뢰 수가 주어진다고 가정하면, 전체 기뢰 수는 다수의 희소한 베르누이 시행의 합이 된다. Le Cam(1960)은 이러한 독립 베르누이 시행들의 합이 포아송분포로 근사될 수 있음을 보였다[10]. 따라서 본 연구에서는 초기 기뢰 수를 평균 λ 로 갖는 포아송 확률변수로 모델링한다.

D. Daley·D. Vere-Jones(2003)는 포아송 과정의 각 점을 서로 독립적으로 보존하거나 삭제할 경우, 보존된 점들 역시 포아송 과정을 이루는 성질을 설명하였다[11]. 따라서 초기 기뢰 수가 포아송분포를 따르고 탐색 후 각 기뢰가 독립적으로 미탐 상태로 남는다고 가정하면, 잔여 미탐기뢰 수 역시 포아송 분포로 모델링할 수 있다. 본 연구는 이 확률모형을 바탕으로 허용 미탐기뢰 수와 신뢰도 기준으로 표현되는 임무 요구조건을 정량적으로 산정한다.

2.3 기존 연구와의 차이

기존 연구들은 기뢰 대항작전 임무계획 수립에 필요한 이론적 요소와 현행 절차의 제한 사항을 정리하고 발전 방향을 제시하였으나, 실제 임무계획 산출 알고리즘으로 구체화한 연구는 제한적이다. 이에 본 연구는 정미애·이택선(2026)이 제시한 문제의식을 바탕으로, 초기 기뢰 탐색 단계에 적용 가능한 확률모형 기반 임무계획 산출 절차를 제안하고, 허용 미탐기뢰 수, 신뢰도 기준, 총 기뢰수의 불확실성 및 탐색전력의 성능을 통합적으로 반영하는 계산 구조를 제안한다는 점에서 기존 연구와 차별점을 가진다.

3. 확률모형 기반 임무계획 알고리즘

본 연구에서 설계한 알고리즘은 기뢰대항작전에서 기뢰 부설 징후가 포착된 후 항로 내 부설된 기뢰를 탐색하는 초기 기뢰탐색 단계에 적용할 수 있는 탐색 중심 임무계획 산출 알고리즘이다. 이 알고리즘은 항로 정보와 가용 탐색전력의 성능(탐색폭, 속력)이 주어졌을 때 지휘관이 요구한 탐색수준을 만족하는 전력별 담당 탐색구역의 폭, 소항로 수, 소항폭, 항주횟수 및 예상 임무시간을 산출하는 것을 목적으로 한다. 임무계획 산출 절차는 Fig. 1과 같다.

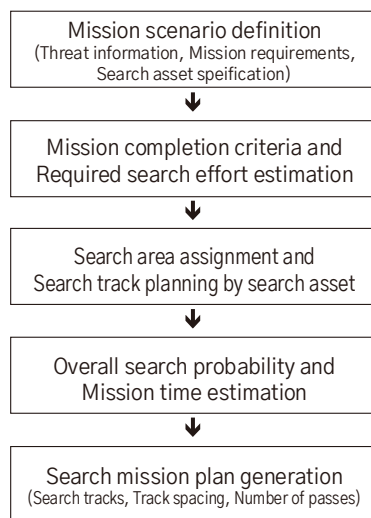


Fig. 1. Proposed mine search mission planning procedure

먼저 항로의 규모, 예상 총 기뢰수의 평균값, 허용 미탐기뢰 수, 신뢰도 기준, 탐색전력별 성능정보를 입력한다. 다음으로 임무 완료조건을 설정하며, 이를 만족하는 최소 요구 누적 탐색확률을 계산한다. 이후 전력별 성능지수에 비례하는 탐색 담당구역의 폭을 산출하고 각 전력이 요구 탐색수준을 만족하도록 소항로 수, 소항폭, 항주횟수를 결정하며 이로부터 임무 완료조건 만족 여부를 확인한 후 최종 임무계획을 산출한다.

3.1 임무 완료조건 및 요구 탐색노력 산출

기뢰대항작전에서 임무목표는 허용 잔여기뢰 수와 신뢰도 기준을 바탕으로 기뢰제거율이라는 정량적 수치로 산정될 수 있으며, 기존 임무계획에서는 이

를 달성하기 위한 계획 요소가 소항로 개수, 소항폭, 항주횟수 등으로 산출된다[7]. 본 연구는 이러한 기뢰제거율 입력 방식과 구별하여, 전체 항로에 대해 만족되어야 할 완료조건을 명시적으로 정의한다. 작전 종료 시 항로에 남아 있을 수 있는 미탐 기뢰 수를 U , 허용 가능한 최대 미탐기뢰 수를 t , 요구 신뢰도 기준을 CL 이라고 할 때, 임무 완료조건은 다음과 같다.

$$\Pr(U \leq t) \geq CL \quad (1)$$

이와 같은 임무 요구조건 설정은 기존의 고정 목표 입력 방식과 구별된다. 기존 방식은 t 와 CL 이 주어지더라도 이를 다시 0.64, 0.95와 같은 기뢰제거율 값으로 환산하여 입력하는 방식이 사용되어 왔으나[7] 이러한 방식은 지휘관이 의도한 허용 위험 수준을 직접 반영하기 어렵다. 이에 본 연구는 기뢰제거율 값을 사전 입력값으로 사용하는 대신 허용 미탐 기뢰수와 신뢰도 기준을 직접 반영하여 필요한 탐색 수준을 역산하는 구조를 적용하였다.

또한, 총 기뢰 수를 단일한 고정값으로 두지 않고, 부설 예상 기뢰의 수량을 평균 λ 를 갖는 포아송 확률 분포로 모델링하였다. 전체 항로에 대한 누적 탐색확률을 Q 라고 하면, 탐색 종료 후 개별 기뢰가 미탐 상태로 남을 확률을 $1-Q$ 라고 할 수 있다. 이때 각 기뢰의 탐색 결과가 서로 독립적이라고 가정하면, 포아송 분포의 독립 속아내기(thinning) 성질[11]에 따라 잔여 미탐기뢰 수 U 는 평균 $\lambda(1-Q)$ 인 포아송 분포를 따른다. 따라서 항로에 남아 있는 미탐기뢰 수 U 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$U \sim \text{Poisson}(\lambda(1-Q)), (0 < Q < 1) \quad (2)$$

본 연구에서는 탐색 성과를 개별 항주의 고정 탐지 확률 상수로 다루지 않고, Koopman의 random search formula를 바탕으로 누적 탐색확률을 정의하였다. Koopman은 유효탐색폭 W , 총 탐색거리 L , 탐색면적 S 에 대해 표적 탐지확률 p 를 $p = 1 - e^{-WL/S}$ 로 제시하였는데[8], 본 연구에서는 이를 특정 탐색계획이 대상구역 내 표적을 발견할 확률적 수준을 나타내는 누적 탐색확률 Q 로 사용하였다. 또한 WL/S 를 누적 탐색노력 c 로 정의한다. 이에 따라 전체 항로에 대

한 누적 탐색확률 Q 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = 1 - e^{-c} \quad (3)$$

여기서 c 는 Koopman 식의 WL/S 에 대응하는 값이며, 본 연구의 소항계획 구조에서는 탐색전력의 탐색폭, 총 소항거리 및 탐색면적의 비율로 변환할 수 있다.

폭 C , 길이 L 인 탐색구역을 탐색폭 A 의 탐색전력이 N 개의 소항로로 구분하여 J 회 반복 탐색한다고 하면, 총 탐색거리는 NJL , 탐색면적은 CL 이므로 누적 탐색노력 c 는 다음과 같이 표현된다.

$$c = \frac{A(NJL)}{CL} = \frac{NJA}{C} \quad (4)$$

이때, 소항폭 D 는 $D = C/N$ 이므로, 누적 탐색노력 c 는 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$c = \frac{JA}{D} \quad (5)$$

식 (1)과 식 (2)를 바탕으로, 미탐기뢰 수가 허용 기준 t 이하일 확률이 요구 신뢰도 CL 이상이 되도록 하는 최소 누적 탐색확률 Q_{req} 는 다음과 같이 정의된다.

$$Q_{req} = \min \{ Q : \Pr(U \leq t) \geq CL \} \quad (6)$$

여기서 U 는 식 (2)에 따라 Q 에 의해 결정되는 잔여 미탐기뢰 수이다. 이때 요구 누적 탐색확률 Q_{req} 를 달성하기 위한 요구 탐색 노력 c_{req} 는 식(3)으로부터 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$c_{req} = -\ln(1 - Q_{req}) \quad (7)$$

여기서 c_{req} 은 하나의 항로를 여러 탐색전력이 분담하여 탐색할 때, 각 전력의 담당구역에서 달성해야 하는 기준 누적 탐색노력을 의미한다.

3.2 탐색전력별 구역 배정 및 소항계획 산출

알고리즘은 요구 누적 탐색확률 및 탐색노력이 결정되면 이를 각각의 탐색전력에 어떻게 분담할 것인

지 계산한다. 본 연구는 전력별 구역 담당 비율을 별도의 최적화 변수로 두지 않고, 탐색폭과 속력에 비례하여 산정하는 방식을 사용한다. 탐색전력 k 의 탐색폭을 $A_k(m)$, 탐색속력을 $v_k(m/s)$ 라 할 때, 탐색전력 k 의 성능지수 w_k 를 다음과 같이 정의한다.

$$w_k = A_k v_k \quad (8)$$

성능지수는 단위시간 당 폭 방향으로 처리할 수 있는 상대적 탐색능력을 나타내는 값으로 해석할 수 있다. 따라서 탐색전력 k 의 담당 비율 ρ_k 는 전체 전력의 성능지수 합에 대한 비율로 다음과 같이 정의한다.

$$\rho_k = \frac{w_k}{\sum_{j=1}^K w_j} \quad (9)$$

전체 항로 폭을 $C(m)$ 라고 할 때 탐색전력 k 에 배정되는 담당구역의 폭 $C_k(m)$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$C_k = \rho_k C \quad (10)$$

알고리즘은 각 탐색전력이 배정된 담당구역 C_k 를 대상으로 요구 탐색노력 c_{req} 이상을 달성할 수 있는 소항계획을 계산한다. 탐색전력 k 의 담당구역 내 소항로 수를 N_k , 항주횟수를 J_k 라 하면, 전체 항주 수 $N_k J_k$ 는 담당구역을 폭 방향으로 반복 탐색하는 총 탐색기회의 수를 의미한다. 한편 C_k/A_k 는 해당 담당구역을 탐색폭 기준으로 폭 방향을 한번 탐색하는 데 필요한 상대적 탐색량으로 볼 수 있다. 따라서 담당구역 전체에 대해 기준 누적 탐색노력 c_{req} 를 달성하기 위해서는 다음과 같은 조건이 만족되어야 한다.

$$N_k J_k \geq \frac{c_{req} C_k}{A_k} \quad (11)$$

식 (11)은 Koopman 탐색이론의 누적 탐색노력 개념을 소항로 수와 항주횟수라는 임무계획 변수로 변환한 제약식이다. 식 (11)의 우변은 전력 k 가 담당구역에서 달성해야 할 최소 상대 탐색량이며, 좌변은 계획된 소항로 수와 항주횟수의 곱으로 표현되는 실제 탐색기회의 총량이다. 알고리즘은 이 조건을 만족하는 N_k 와 J_k 의 조합 중 총 탐색횟수 $N_k J_k$ 가 최소가 되는

해를 선택하며 이를 해당 전력의 소항계획으로 채택한다. 또한, 공간적으로 과도한 공백이 발생하는 해를 배제하기 위하여, 소항폭 D_k 가 탐색폭 A_k 에 비해 지나치게 커지는 조합은 제외하는 기하학적 커버 제약을 함께 적용하였다.

3.3 전체 누적 탐색확률 및 임무시간 산출

탐색전력별 소항계획이 결정되면, 이를 바탕으로 각 전력의 실제 누적 탐색확률을 계산한다. 탐색전력 k 의 누적 탐색노력 c_k 는 다음과 같이 표현된다.

$$c_k = \frac{J_k A_k}{D_k} \quad (12)$$

여기서 D_k 는 탐색전력 k 의 소항폭으로, 담당구역 폭 $C_k(m)$ 을 소항 수 N_k 로 나눈 값이다. 이에 따라 전력 k 의 실제 누적 탐색확률 Q_k 는 식 (3)에 따라 다음과 같이 계산된다.

$$Q_k = 1 - e^{-c_k} \quad (13)$$

전체 항로는 각 전력이 서로 다른 구역을 분담하여 탐색하므로, 전체 항로의 평균 미탐확률은 식 (9)의 담당구역 비율을 가중치로 하여 계산할 수 있다. 이를 다시 전체 항로의 누적 탐색확률로 표현하면 다음과 같다.

$$Q = 1 - \sum_{k=1}^K \rho_k (1 - Q_k) \quad (14)$$

식 (14)는 각 전력이 담당한 구역에서 달성한 미탐확률을 담당 비율에 따라 평균한 뒤, 이를 전체 항로 차원의 누적 탐색확률로 환산한 식이다. 이에 따라 탐색 종료 후 전체 항로에서의 평균 미탐기뢰 수의 평균은 다음과 같이 표현된다.

$$\lambda_{residual} = \lambda(1 - Q) \quad (15)$$

따라서 최종 미탐기뢰 수 U 는 평균이 $\lambda_{residual}$ 인 포아송 확률변수이므로, 식 (1)의 임무 완료조건 만족

여부는 포아송 누적확률을 통해 계산된다. 알고리즘은 이 확률이 신뢰도 기준 CL 이상이면 산출된 소항계획이 임무 요구조건을 충족하는 것으로 판단한다. 또한 산출된 소항계획으로부터 전력 k 의 임무 소요 시간 T_k 는 전체 항로 길이를 $L(m)$ 라고 할 때, 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$T_k = \frac{N_k J_k L}{v_k} \quad (16)$$

여러 탐색전력이 병행하여 탐색을 수행하는 경우 전체 임무완료 시간 $T_{mission}$ 은 가장 오래 소요되는 전력의 시간으로 정의된다.

4. 알고리즘 검증 및 분석

제안한 확률모형 기반 기뢰탐색 임무계획 알고리즘의 계산적 타당성 및 일관성과 산출 계획의 실현 가능성을 검증하고, 임무 요구조건 변화에 따른 산출 결과를 분석하였다. 기존 임무계획 알고리즘의 세부 계산 절차가 공개되어 있지 않은 점을 고려하여, 본 연구에서는 제안 알고리즘이 허용 미탐기뢰 수와 신뢰도 기준으로 표현되는 임무 완료조건을 만족하는지 확인하고, 산출된 소항계획이 별도의 시뮬레이션 환경에서 구현 가능한 탐색 성과를 보이는지 검토하였다. 이를 위해 검증은 요구조건 충족성 검증과 시뮬레이션 기반 실현성 검증의 두 단계로 구성하였다.

4.1 요구조건 충족성 검증

요구조건 충족성 검증은 제안 알고리즘이 입력된 임무 요구조건을 계산적으로 타당하고 일관되게 만족하는 계획을 산출하는지 확인하는 데 목적이 있다. 이를 위해 평균 총 기뢰 수 λ , 허용 미탐기뢰 수 t , 신뢰도 기준 CL 을 요인으로 하는 3요인 설계로 구성하였으며 각 요인의 수준은 Table 1과 같다.

Table 1. Scenario factor design

Factor	Levels
Mean total number of mines (λ)	30, 50, 70
Allowable number of undetected mines (t)	1, 2
Confidence level (CL)	0.90, 0.95

이에 따라 총 12개의 시나리오를 구성하였으며, 항로 조건과 탐색전력 구성은 모든 시나리오에서 동일하게 유지하였다. 항로 길이 L 과 폭 C 는 각각 10,000 m, 2,700 m로 설정하였고, 탐색전력은 2개의 플랫폼으로 구성하였다. 플랫폼 1의 탐색폭 $A_1 = 60$ m, 속력 $v_1 = 20$ m/s, 플랫폼 2의 탐색폭 $A_2 = 150$ m, 속력 $v_2 = 2$ m/s로 설정하였으며, 각 시나리오에 대해 제안 알고리즘을 적용하여 평균 미탐기뢰 수 $\lambda_{residual}$, 완료 조건 만족확률 $\Pr(U \leq t)$, 전체 임무시간 $T_{mission}$ 을 산출하였다.

검증 결과, 제안 알고리즘은 12개 시나리오 모두에서 $\Pr(U \leq t) \geq CL$ 조건을 만족하는 계획을 산출하였으며, 세부 내용은 Table 2와 같다.

Table 2. Results of requirement satisfaction validation

Case	Input			Output		
	λ	t	CL	$\lambda_{residual}$	$\Pr(U \leq t)$	$T_{mission}$ (hr)
1	30	1	0.90	0.4974	0.9106	20.8
2	30	1	0.95	0.3523	0.9508	22.2
3	30	2	0.90	1.0702	0.9063	16.6
4	30	2	0.95	0.7713	0.9566	19.4
5	50	1	0.90	0.4877	0.9135	25.0
6	50	1	0.95	0.3368	0.9545	25.0
7	50	2	0.90	1.0701	0.9063	19.4
8	50	2	0.95	0.7751	0.9561	20.8
9	70	1	0.90	0.5159	0.9049	25.0
10	70	1	0.95	0.3244	0.9575	27.7
11	70	2	0.90	1.0852	0.9034	20.8
12	70	2	0.95	0.7339	0.9616	25.0

이는 제안 알고리즘이 주어진 임무 요구조건인 허용 미탐기뢰 수 t 와 신뢰도 기준 CL 을 임무 완료 조건으로 직접 반영하고 있음을 의미한다.

임무 요구조건 변화에 대한 알고리즘의 반응도 전반적으로 일관되게 나타났다. Fig. 2는 이러한 반응을 보다 넓은 범위에서 확인하기 위해 평균 총 기뢰 수 λ 를 10부터 100까지 변화시켜 분석한 결과이다. 평균 총 기뢰 수 λ 가 증가하면 동일한 허용 미탐기뢰 수와 신뢰도 기준을 만족하기 위해 더 높은 누적 탐색 확률이 요구되므로 임무시간은 증가하는 경향을 보였다. 신뢰도 기준 CL 이 0.90에서 0.95로 강화되는

경우에도 잔여 미탐기뢰 수가 허용치 이하일 확률을 더 높게 확보해야 하므로 임무시간이 증가하였다. 반대로 허용 미탐기뢰 수 t 가 1에서 2로 증가하는 경우에는 임무 완료 조건이 완화되므로 동일한 λ 와 CL 조건에서 임무시간이 감소하는 경향이 나타났다.

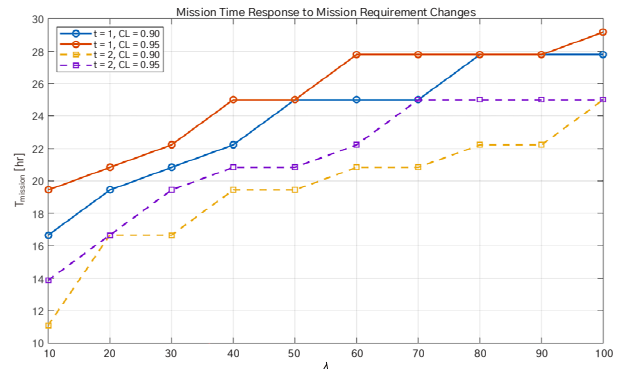


Fig. 2. Mission time response to mission requirement changes

일부 시나리오에서는 임무시간이 연속적으로 증가하지 않고 동일한 값으로 유지되는 구간이 나타났는데, 이는 알고리즘이 연속적인 탐색시간을 직접 출력하는 것이 아니라 소항로 수 N_k 와 항주횟수 J_k 를 정수형으로 산출하여 조합하기 때문이다. 요구 탐색수준이 소폭 증가하더라도 기존의 조합으로 여전히 조건을 만족할 수 있는 경우에는 임무시간이 동일하게 나타날 수 있다. 종합하면, 요구조건 충족성 검증 결과는 제안 알고리즘이 입력된 허용 미탐기뢰 수와 신뢰도 기준을 임무 완료조건에 직접 반영하며, 총 기뢰 수 및 요구 신뢰도 변화에 대해 논리적인 방향으로 반응함을 보여준다.

4.2 시뮬레이션 기반 실현성 검증

4.1절의 요구조건 충족성 검증은 제안 알고리즘이 확률모형 상에서 완료조건을 만족하는지를 확인하는 절차이다. 그러나 실제 임무계획은 단순한 확률값이 아니라 소항로 수, 소항폭, 항주횟수와 같은 공간적 기동계획으로 구현되어야 한다. 따라서 제안 알고리즘이 산출한 소항계획을 별도의 시뮬레이션 환경에 입력하여 해당 계획이 실제 탐색경로로 구현되었을 때에도 요구조건을 만족하는지 확인하였다.

시뮬레이션에는 4.1절과 동일한 12개 시나리오를

적용하였다. 각 시나리오에서 제안 알고리즘이 산출한 탐색전력별 담당구역 폭 C_k , 소항로 수 N_k , 소항폭 D_k , 항주횟수 J_k 를 시물레이션 입력값으로 사용하였다. 시물레이션 환경에서는 전체 항로를 각 탐색전력의 담당구역으로 분할하고 구역 내에서 산출된 임무계획에 따라 반복적으로 탐색을 수행하도록 구성하였다. 기뢰 위치는 항로 내에 균등하게 생성하였고 총 기뢰 수는 평균 λ 를 갖는 포아송 분포로부터 표본화하였으며, 각 기뢰가 탐색전력의 탐색폭 범위 내에 포함되는 경우, 1회 통과 시 탐지확률을 0.7로 설정하였다. 이는 특정 장비의 실측 탐지율이 아닌 산출된 소항계획의 실현성을 보수적으로 확인하기 위한 검증용 가정이다. 각 시나리오별 결과의 통계적 안정성을 확보하기 위해 Monte Carlo 시물레이션을 2,000회 반복 수행하였다.

Table 3. Results of simulation-based feasibility validation

Case	Plan			Simulation	
	λ	t	CL	λ_{resid}	$\Pr(U \leq t)$
1	30	1	0.90	0.1045	0.9950
2	30	1	0.95	0.0740	0.9985
3	30	2	0.90	0.2320	1.0000
4	30	2	0.95	0.1900	0.9995
5	50	1	0.90	0.0960	0.9970
6	50	1	0.95	0.0495	0.9995
7	50	2	0.90	0.2150	0.9995
8	50	2	0.95	0.1620	0.9995
9	70	1	0.90	0.0935	0.9960
10	70	1	0.95	0.0520	0.9985
11	70	2	0.90	0.2235	0.9985
12	70	2	0.95	0.5560	0.9830

시물레이션 결과, Table 3와 같이 알고리즘이 산출한 소항계획이 시물레이션 환경에서 구현 가능함을 확인하였다. 전체 시나리오에서 시물레이션 기반 잔여 미탐기뢰 수는 허용 미탐기뢰 수 t 이하의 수준으로 나타났으며, $\Pr(U \leq t)$ 또한 모든 시나리오에서 요구 신뢰도 기준 CL 이상으로 산출되었다. 실현성 검증을 통해 제안 알고리즘의 산출 계획은 해석적 확률모형상 임무 완료조건을 만족할 뿐만 아니라, 별도의

공간기동 시물레이션 환경에서도 요구 수준 이상의 탐색 성과를 보이는 것으로 확인되었다. 이는 제안 알고리즘이 단순한 확률 계산 절차에 그치지 않고, 소항로 수, 소항폭 및 항주횟수로 구체화 가능한 임무계획 산출 알고리즘으로 활용될 수 있음을 의미한다. 다만, 시물레이션에서는 산출된 소항계획을 공간적으로 구현하고, 탐색폭 내 포함 여부를 기준으로 탐지 여부를 판정하였기 때문에, 평균적 확률모형에 기반한 해석 결과와 일부 차이가 발생할 수 있다.

5. 결론

본 연구는 초기 기뢰탐색 단계에서 지휘관이 의도하는 허용 미탐기뢰 수와 신뢰도 기준을 직접 반영할 수 있는 확률모형 기반 기뢰탐색 임무계획 산출 알고리즘을 제안하였다. 기존의 고정 목표 기뢰제거율 입력방식은 위험 허용 수준을 계획 과정에 직접 반영하는 데 한계가 있으므로, 본 연구에서는 임무 완료 조건을 $\Pr(U \leq t) \geq CL$ 로 명시하고, 이를 만족하는 요구 누적 탐색확률 및 탐색노력을 역산하는 구조를 적용하였다. 또한 총 기뢰 수를 고정된 단일값으로 가정하지 않고 평균 λ 를 갖는 포아송분포로 모델링함으로써, 초기 정보의 불확실성을 임무계획 단계에 반영하였다. 제안 알고리즘의 검증 결과 다양한 평균 총 기뢰 수, 허용 미탐기뢰 수 및 신뢰도 기준 조합에서 임무 완료조건을 일관되게 만족하는 계획을 산출하였다. 또한, 별도의 시물레이션에서도 알고리즘이 산출한 소항계획이 임무 완료조건을 만족하는 것으로 확인되었다.

본 연구는 향후 기뢰대항작전 임무계획 수립도구가 임무 요구조건을 보다 효과적으로 반영하는 방향으로 발전하는 데 기초 자료로 활용될 수 있다는 데 의의가 있다. 다만 본 연구는 다음과 같은 한계를 가진다. 첫째, 총 기뢰 수의 불확실성은 평균 λ 를 갖는 포아송 모형으로 단순화하여 반영하였으나, 실제 작전에서는 정보 출처, 적 기뢰부설 양상, 항로 특성 등에 따라 더 복잡한 모형이 필요할 수 있다. 둘째, 임무 시간 산출 과정에서 단순화를 위해 선회시간, 작전구역 진입 시간 등을 반영하지 않았다. 셋째, 데이터 부족으로 해저환경에 따른 탐지장비의 탐색폭 변화를 반영하지 않았다. 넷째, 본 연구의 알고리즘은 기뢰탐색 단계에서 탐지에 초점을 맞추었으므로 이후의

분류, 식별, 위치결정 결과를 반영하지 않았다.

향후 연구에서는 이러한 한계를 보완하기 위해 다음과 같은 확장이 필요하다. 실시간 해양환경 정보를 탐색폭과 탐지성능에 반영할 수 있는 환경 보정모형을 추가하고, 평균 누적 탐색확률 기반 구조를 발전시켜, 센서별 거리 의존 탐지확률 모형 또는 측면거리별 탐지확률 곡선을 반영한다면 실제 센서 운용 특성을 보다 정교하게 표현할 수 있을 것이다. 또한 탐색 중 발견된 기뢰 정보를 바탕으로 잔여 기뢰 수 분포와 요구 탐색수준을 갱신하는 동적 재계획 기능을 추가한다면, 초기 계획수립뿐 아니라 작전 수행 중 의사결정 지원에도 활용 가능성이 높아질 것이다. 마지막으로 다양한 해역 조건, 전력 조합 및 기뢰 분포 조건에 대한 추가 시뮬레이션 검증을 수행함으로써 알고리즘의 일반성과 신뢰성을 지속적으로 보완할 필요가 있다.

참고문헌

- [1] Yeonhap News, 'Ukraine "Black Sea Grain Transport Ship Blown Up by Russian Mine" (in Korean),' 2023.
- [2] Global Economic, 'Iran Lays Mines in Strait of Hormuz... 'Asymmetric Counterattack' Targeting Global Oil Arteries (in Korean),' 2026.
- [3] R. Pedrozo, 'Mine Warfare at Sea in a Korea Contingency,' KIMS Periscope, NO. 301, 2023.
- [4] Sang-Yeon Ham & Taeg Seon Lee, 'Study on the Impact Lack of Theoretical Research on Mine Warfare Has on Mine Countermeasure Operation and Its Mitigation Measures,' Journal of the KNST, VOL. 8, NO. 4, 2025, pp. 928-934.
- [5] George W. Pollitt, 'Mine Countermeasures (MCM) Tactical Decision Aids (TDAs), A Historical Review,' Military Operations Research, VOL. 11, NO. 3, 2006, pp. 7-17.
- [6] J. C. Redmayne, Evaluation of Mine Threat, Saclant Undersea Research Centre Report, SR-251, 1996.
- [7] Miae Jeong & Taeg Seon Lee, 'Development of Mission Planning for Effective Mine Countermeasures Operations,' Journal of the KNST, VOL. 9, NO. 1, 2026, pp. 194-201.
- [8] B. Koopman, 'Search and Screening,' Operations Evaluation Group Office of the Chief of Naval Operations Navy Department, 1946.
- [9] Lawrence D. Stone, 'Search Theory: A Mathematical Theory for Finding Lost Objects,' Mathematics Magazine, VOL. 50, NO. 5, 1977, pp. 248-256.
- [10] Lucien Le Cam 'An Approximation Theorem for the Poisson Binomial Distribution,' Pacific Journal of Mathematics, VOL. 10, NO. 4, 1960, pp. 1181-1197.
- [11] Daryl J. Daley & D. Vere-Jones, An Introduction to the Theory of Point Processes: Volume I: Elementary Theory and Methods (2nd ed.), Springer, 2003.