



Received: 2024/10/21
Revised: 2024/11/02
Accepted: 2024/11/28
Published: 2024/12/31

***Corresponding Author:**

Jin-Young Park
E-mail: hivajyp@gmail.com

정수계획법을 활용한 미래 기뢰대항전력 최적배치에 관한 연구

A Study on Optimal Deployment of Future Mine Counter Measure Force Using Integer Programming

박진영^{1*}, 박지현², 김성우³

¹해군 중령(진)/해군 전력분석시험평가단 소요분석과 전투함소요분석담당

²해군 소령/해군본부 군수참모부 탄약담당

³해군 중령/해군 전력분석시험평가단 소요분석과장

Jin-Young Park^{1*}, Ji-Hyun Park², Sung-Woo Kim³

¹CDR(Sel.)/Officer of battleship requirement analysis, Dept. of System Analysis, Naval Force Analysis Test Evaluation Group, ROK Navy

²LCDR/Officer of ammo, Logistics Department, ROK Navy HQ

³CDR/Manager of Naval Force Requirement Analysis Department, Naval Force Analysis Test Evaluation Group, ROK Navy

Abstract

해군은 기뢰위협으로부터 안전항로를 보장하기 위해 우리나라 주요 군항에서 기뢰대항작전을 수행하고 있다. 현재 기뢰대항작전은 소해함을 이용하지만, 미래에는 소해 헬기와 무인수상정(USV, unmanned surface vehicle)을 도입할 예정이다. 따라서 본 연구는 다양한 미래 기뢰대항전력 도입 시 최대 소해율 달성을 위한 전력의 최적배치 방안을 모색하였다. 이를 위해 정수계획법을 활용하여 최적배치방안을 도출하였고, 제약식 변화에 따른 민감도 분석을 통해 목표 소해율을 달성하기 위한 적정 보유량을 제안하였다.

ROK Navy is carrying on anti-mine operations at major military ports in Korea to ensure safe route from mine threats. These days, mine countermeasure operations use minesweeper ship but minesweeping helicopter(AMCM) and mine warfare USV(MCM USV) are planned to introduce in the future. Therefore, this study aimed to find the optimal force deployment for each military port to achieve the various future mine countermeasure forces. To solve this problem, this study used integer programming, and proposed to achieve the goal of sweeping rate throughout sensitivity analysis according to change the constrains.

Keywords

기뢰(Naval Mine),
기뢰대항전(Mine Counter Measure Force),
소해함(MCM Vessel), 기뢰전 USV(MCM USV),
소해헬기(MCM Helicopter),
정수계획법(Integer Programming)

1. 서론

기뢰란 바다의 지뢰로서 수중에 부설되어 항해하는 선박을 파괴하는 무기이다. 기뢰는 단 한 발의 부설로도 선박의 자유로운 항해와 항구 출입을 방해할 수 있는 치명적인 무기로서 1·2차 세계대전, 한국전쟁, 걸프전, 이라크전 등에서 주요 항구 봉쇄 및 상륙 저지를 위해 활용되었다. 이러한 기뢰는 Table 1과 같이 부설위치와 작동 방식에 따라 분류할 수 있으며, 수상함·항공기·잠수함 등 다양한 수단으로 부설이 가능하다. 즉, 여러 종류의 기뢰를 다양한 수단을 통해 다량으로 부설할 수 있다는 작전적 이점이 있다. 반면, 이를 처리하려면 많은 시간과 비용이 소모되고 처리 중 피격의 위험이 있어 기뢰대항작전은 매우 어렵고 중요한 작전이라고 할 수 있다.

한편 해군은 기뢰의 위협으로부터 안전한 항로를 확보하기 위해 주요 항구에 최단소해항로(Q-Route)를 지정하고 기뢰 탐색 및 처리를 위한 기뢰대항작전을 평시에 수행하고 있다. 또한 전시에는 개항 우선순위 항구를 지정하고 최단 시간 내 기뢰를 처리하여 안전항로 확보를 목표로 하고 있다. 현재 해군은 소해함이라고 부르는 특수함정 10여 척을 운용하여 기뢰대항작전을 수행하고 있다. 소해함은 기뢰를 찾는 음파탐지기와 이를 처리하는 소해구를 이용

Table 1. Categories of naval mine

Category	Description
Minelaying location	Drifting Laid on surface and drift following sea currents
	Moored Moored by anchoring
	Bottom Auto-moored on sea floor
Operation method	Contact Explodes by direct contact with the hull
	Influence Activated by change of magnetism, sound, noise, etc.
	Remote Operated by remote control

하여 기뢰대항작전을 실시한다. 하지만 소해함은 피격 시 인명피해가 발생하고, 기뢰 처리에 많은 시간이 소요되는 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해 해군은 기동력과 생존성이 우수한 소해헬기와 기뢰전 무인수상정(USV) 획득을 추진하고 있다[1,2]. 이러한 미래 기뢰대항전력은 보유장비, 기동속력 등에 따라 소해능력이 다르다. 그러므로 이를 고려한 적절한 전력 배치는 매우 중요하다.

따라서 본 연구는 미래 기뢰대항전력 확보 시 최대 소해율을 달성하기 위한 최적의 전력 배치에 관한 연구를 수행하였다. 연구를 위해 미래 기뢰대항전력으로 소해함 10대, 소해헬기, 기뢰전 USV를 각 6대씩 보유한다고 가정하고, 정수계획법을 활용하여 주요 군항 7개를 대상으로 최대의 소해율을 달성할 수 있는 배치방안을 연구하였다. 또한 민감도 분석을 통해 목표 소해율을 달성하기 위한 적정 소해헬기와 기뢰전 USV 전력 규모를 도출하였다.

연구 구성은 다음과 같다. 2장은 기뢰대항작전 및 기존 연구를 살펴본다. 3장은 연구방법으로 가정사

항, 기뢰대항전력 소해능력 산출방법, 정수계획법 수리모형에 대해 설명한다. 4장은 최적배치 결과와 민감도 분석 결과를 설명한다. 5장에서는 연구를 정리하고 마무리한다.

2. 관련 연구

2.1 기뢰대항작전 일반

기뢰대항작전은 항만 또는 항로에 부설된 적의 기뢰를 찾고 처리하는 작전을 말한다. 일반적으로 기뢰대항작전은 다음과 같은 절차를 통해 이뤄진다.

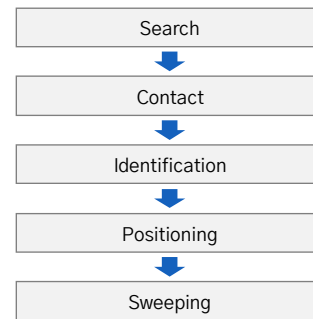


Fig. 1. Procedure of minewarfare[6]

기뢰를 찾는 것을 탐색작전, 이를 처리하는 것을 소해작전이라고 한다. 탐색작전은 수중에 부설된 기뢰를 음파탐지기 등을 활용하여 탐지 및 식별하고 그 위치를 결정하는 것을 말한다. 소해작전은 기뢰를 처리하는 것으로 무인처리기를 활용하여 1발씩 처리하는 hunting 방법과 음압, 소음, 자기장 등의 복합적인 변화를 생성하는 소해구 예인을 통해 여러 개의 기뢰를 동시에 처리하는 sweeping 방법이 있다[3].

이러한 기뢰탐색과 소해작전은 Q-Route라고 부르

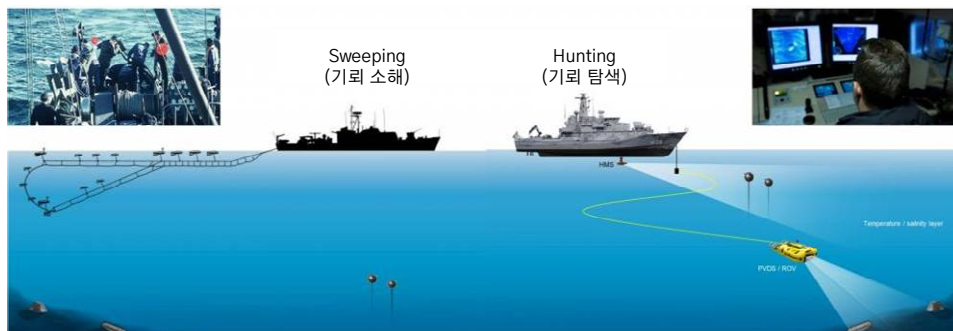


Fig. 2. Mine hunting and sweeping[3]

는 최단소해항로 내에서 이뤄진다. Q-Route는 기뢰 위협으로부터 안전한 출·입항을 보장할 수 있는 최소한의 항로대로 평시부터 기뢰대항전력에 의해 기뢰 탐색작전이 이뤄진다. 또한 전시에는 개전 1일 이내 Q-Route를 완전히 소해하여 군함 및 상선이 안전하게 주요 항구를 이용할 수 있도록 하는 것을 목표로 하고 있다.

2.2 기뢰대항작전 관련 기존 연구

기뢰대항작전과 관련한 기존 연구는 단일전력을 대상으로 최적경로 탐색과 같은 전력 운용에 관한 연구가 주를 이루었다. 이태진 등[8]은 휴리스틱 알고리즘을 적용하여 소해전력의 이동속력 및 소요시간을 고려한 최적 기동경로에 관한 연구를 수행했다. 이해원 등[7]은 무인수상정의 기뢰 탐지 임무수행을 위한 자율화 소프트웨어 개발에 관한 연구를 수행했다. 권석의[5]는 기뢰전에 모자이크전 개념을 도입, 최적화 방식을 적용하여 소해전력 운용에 관한 연구를 실시했다. 배준희[4]는 시뮬레이션 기반으로 다양한 기뢰전력의 배치에 관한 연구를 진행했다. 다만, 배준희의 연구는 기뢰전력 배치를 미리 대안으로 선정하고 이를 시뮬레이션하여 최적의 대안을 제시하고자 했다.

이상에서 살펴본 바와 같이 기존 연구는 최적경로 탐색, 임무할당 등에 초점을 맞추었으며, 본 연구의 목적인 다양한 기뢰대항전력의 최적배치에 관한 연구는 찾아보기 어려웠다.

3. 연구방법론

3.1 가정 및 제한사항

기뢰대항전력의 소해능력을 산출하기 위해서는 항구별 Q-Route와 해역의 해양정보가 필요하다. 하지만 이는 군 작전과 관련된 사항으로 획득이 어려운 데이터이다. 따라서 본 연구에서는 Q-Route 정보 대신 인근 항구의 정보를 활용하였다. 또한 기뢰전 USV 및 소해헬기는 개발 중인 전력으로 정확한 제원을 알 수 없다. 따라서 소해함 및 헬기의 일반제원을 적용하였다. 기뢰대항전력이 배치되는 항구는 주요 군항 7개로 선정하였다. 기뢰대항전력은 소해함, 소해헬

기 기뢰전 USV 3가지 종류이며, 각각의 보유 대수는 10대, 6대, 6대로 가정하였다.

3.2 기뢰대항전력별 소해능력 산출

본 연구의 목적을 달성하기 위해서는 기뢰대항전력의 항구별 Q-Route 소해능력을 산출해야 한다. 소해능력은 기뢰대항전력의 속력, 소해장비의 제원, Q-Route 내 수심 및 저질 등 환경요소에 따라 달라질 수 있다. 본 연구에서는 배준희[4]의 연구에서 활용한 UCPLAN¹⁾을 활용하였다. UCPLAN의 입력 항목은 Table 2와 같다.

Table 2. UCPLAN input items

Parameters	Description	Unit
Width (W)	Width of Q-Route	yds
Length (L)	Length of Q-Route	NM
Velocity (V)	Velocity of MCM force	kts
Non-detection probability (μ)	Non-detection probability when naval mine searching (assumption: 0 %)	%
Alter course time (t)	Elapsed time of alter to 180°	m
Number of forces (N _s)	MCM force deployed in operation	-

Table 2의 입력 항목을 바탕으로, 기뢰대항전력별 Q-Route 면적 전체를 완전히 소해하기 위해 소요되는 총 시간은 식 (1)을 활용하여 구할 수 있다.

$$T_s = \frac{J \times N}{N_s} \times \left(\frac{L}{V} + \frac{t}{60} \right) \tag{1}$$

여기서, T_s : 소해전력 소해시간,
 N : 소항로 수 (= 소해구역 폭/탐색 폭),
 J : 통과횟수,
 V : 소해전력 속력,
 t : 소해전력 변침 소요시간.

¹⁾ UCPLAN (uniform coverage planning): 미 해군의 기뢰대항작전 능력을 분석하기 위해 개발된 프로그램

식 (2)는 1일 기준 기뢰대항전력별 소해면적을 나타낸다. 이는 Q-Route 면적을 총 소해시간(T_s)으로 나누고 24시간을 곱한 값이다. 식 (2)를 통해 산출된 1일 소해면적은 정수계획법의 목적식 데이터로 활용 예정이다.

$$S_s = \frac{\text{Q-Route 면적}}{T_s} \times 24 \quad (2)$$

3.3 정수계획법 수리모형

소해전력 배치를 위한 정수계획법 수리모형은 다음과 같다.

- 집합 및 인덱스
 - $i \subseteq I = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$: 항구 인덱스 (1: 1번 항구, 2: 2번 항구, ... 7: 7번 항구)
 - $j \subseteq J = \{1, 2, 3\}$: 소해전력 인덱스 (1: 소해함, 2: 소해헬기, 3: 기뢰전 USV)
 - K_j : 소해전력 대수 [K_1 : 소해함 (= 10), K_2 : 소해헬기 (= 6), K_3 : 기뢰전 USV (= 6)]
- 데이터
 - C_{ij} : i 항구에 배치된 j 전력의 1일 소해면적 (식 (2)를 통해 산출)
 - Q_i : i 항구의 Q-Route 면적
- 결정변수
 - X_{ij} : i 항구에 배치되는 소해전력 j 의 대수 ($\in Z^+$)
- 목적식

$$\text{Maximize } \sum_i \sum_j C_{ij} X_{ij} \quad (3)$$

subject to

$$\sum_i \sum_j C_{ij} X_{ij} \leq Q_i \quad (4)$$

$$\sum_i \sum_j X_{ij} = K_j \quad (5)$$

$$\sum_i \sum_j X_{ij} \geq 1_i \quad (6)$$

- 소해율 산출
 - 1일 소해면적이 Q-Route 면적 이하일 경우:

$$\frac{\sum_i \sum_j S_s}{\text{Q-Route 면적}} \times 100 \quad (7)$$

여기서, S_s : 1일 소해면적.

- 1일 소해면적이 Q-Route 면적 이상일 경우: 100 %

식 (3)은 본 연구의 목적식으로, 기뢰대항전력의 1일 소해면적을 바탕으로 최대의 소해율 달성을 위한 항구에 배치되는 전력의 대수를 구한다. 결정변수 X_{ij} 는 1, 2, 3, 4와 같이 정수해를 가진다. 식 (4) - 식 (6)은 제약식으로 해군의 기뢰대항작전 목표와 목적식 달성을 위한 식이다. 식 (4)는 항구에 배치되는 기뢰대항전력의 소해면적 합이 Q-Route 면적 이하만 소해함을 의미한다. 식 (5)는 보유하고 있는 모든 기뢰대항전력 활용을 의미하고, 식 (6)은 최소 1개 이상의 전력이 항구마다 배치되어야 함을 의미한다.

식 (7)은 소해율을 산출하는 식으로 항구에 배치되는 전력의 1일 소해면적의 합을 Q-Route 면적으로 나눈 값이다. 만약 1일 소해율이 100 %가 넘을 경우 100 %로 간주한다.

4. 분석 결과

4.1 최적배치 결과

먼저 식 (1), 식 (2)를 활용하여 산출한 기뢰대항전력별의 1일 소해면적은 Table 3와 같다.

Table 3. Daily port sweeping area by MCM force

Type	Q-Route area (NM ²)	MCM vessel (NM ²)	MCM helicopter (NM ²)	MCM USV (NM ²)
Port #1	2.5	1.142	0.792	1.546
Port #2	6.22	1.378	1.167	1.93
Port #3	12.41	1.668	0.416	1.406
Port #4	12.68	1.660	1.473	2.018
Port #5	4.82	3.044	1.520	1.682
Port #6	4.22	0.651	0.330	1.430
Port #7	3.79	1.706	2.038	1.982

Table 3를 활용하여 식 (3)의 목적식 계수 C_{ij} 로 활용하였다. 목적식을 풀기 위한 solver로는 파이썬의 PuLP 패키지를 활용하였다. PuLP를 통해 목적식과 제약식을 구성하고 데이터를 입력하였다. 이후 주어진 목적식의 결과를 도출하며 optimal을 확인하였다. 최대 소해율을 달성하기 위한 항구별 기뢰대항전력의 최적 배치 및 항구별 소해율은 Table 4와 같다.

Table 4. MCM force deployment and sweeping rate by port

Type	MCM Vessel	MCM helicopter	MCM USV	Sweeping rate (%)
Port #1	1	1	0	77.36
Port #2	1	0	1	53.42
Port #3	4	0	0	54.55
Port #4	1	3	3	95.68
Port #5	1	1	0	94.68
Port #6	1	0	2	83.19
Port #7	1	1	0	98.78
Average				79.65

7개 군항의 최대 소해율을 달성하기 위한 기뢰대항전력의 최적 배치 결과 평균 소해율은 79.65 %로 나타났다. 세부적으로 #4, #5, #7 군항의 경우 95 % 이상의 소해율을 보여주었다. 하지만 #1, #2, #3, #6 항구는 이에 저조한 소해율을 보여주었다. 따라서 최소 95 % 이상의 소해율 달성을 위한 적정 규모를 산출하기 위해 민감도 분석을 추가로 수행하였다.

4.2 민감도 분석결과

소해율을 높이기 위해서는 소해전력의 1일 소해면적을 높이거나 더 많은 소해전력이 투입되면 소해율이 향상된다. 먼저 1일 소해면적 증가는 소해장비 및 소해전력의 기동능력과 연관된 분야로, 기술의 진보와 밀접한 연관이 있다. 하지만 미래의 기술진보를 예단하기 매우 어려우므로 민감도 분석에서는 소해면적 향상은 고려하지 않았다.

따라서 본 민감도 분석에서는 보유 대수의 변화에 따른 소해율 변화를 확인하였다. 또한 미래 기뢰대항작전은 헬기 및 무인전력이 주요 전력이므로, 소해함의 대수는 고정하고 소해헬기와 기뢰전 USV의 대수를 6대에서 12대로 증가시키면서 소해율 변화를 확인하였다. 분석방법은 파이썬 PuLP를 이용하였으며, 소해헬기 및 기뢰전 USV의 대수 K_2, K_3 의 제약식 조건을 변화시키면서 소해율을 산출하였다.

Fig. 3는 소해헬기 및 기뢰전 USV 증가 시(6대 → 12대) 평균 소해율(%)을 heatmap으로 나타낸 결과이다. 소해헬기 및 기뢰전 USV 증가에 따라 전체 소해율이 증가함을 알 수 있다. 특히 Table 5와 같은 소해함, 소해헬기, 기뢰전 USV 전력의 조합의 경우 95 % 이상 소해가 가능함을 알 수 있다.

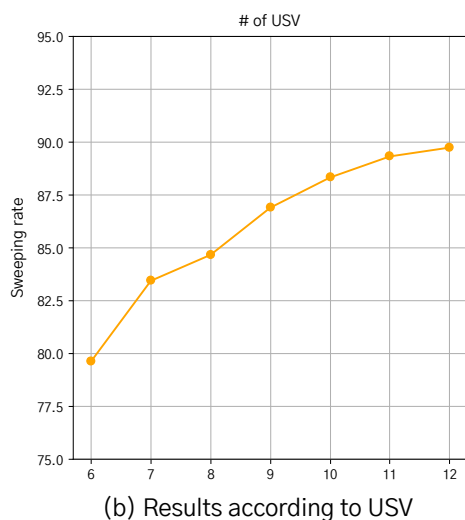
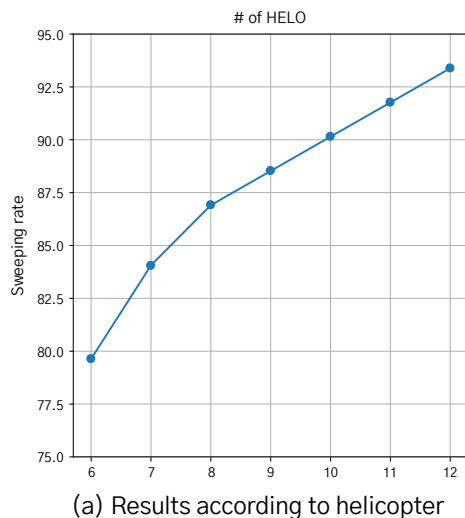
그렇다면 전력별 소해율 향상에 미치는 영향을 확인하기 위해 소해헬기 및 기뢰전 USV의 증가에 따른 소해율의 변화를 각각 확인하였다. Fig. 4(a)는 소해함을 10대로, 기뢰전 USV를 6대로 고정하고, 소해헬기를 6대에서 12대로 증가할 경우 전체 소해율 변화를 나타낸다. Fig. 4(b)는 소해함 10대, 소해헬기는



Fig. 3. Result of sensitivity analysis (heatmap)

Table 5. Combination of sweeping rate over 95 %

Type	MCM Vessel	MCM helicopter	MCM USV
10	10	12	95.66
10	11	10	95.03
10	11	11	96.14
10	11	12	96.77
10	12	7	95.54
10	12	8	95.91
10	12	9	95.91
10	12	10	97.63
10	12	11	98.14
10	12	12	98.14

**Fig. 4.** Minesweeping rate results according to increase in helicopters and USVs

6대로 고정하고 기뢰전 USV가 6대에서 12대로 증가했을 때 전체 소해율의 변화를 나타낸다.

두 그래프를 비교하면, Fig. 4(a) 소해헬기의 대수 변화에 따라 전체 소해율은 79.63 %에서 93.39 %까지 13.63 % 증가하였다. 반면 Fig. 4(b) 기뢰전 USV를 6대에서 12대까지 증가시켰을 경우 79.63 %에서 89.77 %로 10.14 % 증가하였다. 즉, 전력의 단위 증가에 따른 소해율 변화는 소해헬기가 증가할수록 빠르게 높아짐을 알 수 있다. 따라서 소해율을 높이기 위해서는 소해헬기가 기뢰전 USV보다 효과적임을 알 수 있다. 이를 고려한다면 기뢰전 전력 건설 우선 순위 선정에 참고할 수 있을 것으로 기대한다.

5. 결론

본 연구를 통해 기뢰위험으로부터 주요 항구의 최대 소해율 달성을 위한 미래 기뢰대항전력의 최적 배치 방안을 탐구하였다. 그간 소해와 관련된 연구가 단위 소해함의 운용에 집중된 반면 본 연구에서는 다수 다종의 기뢰대항전력의 소해능력 산출과 최적 배치를 다루었다. 또한 전력 대수 변화에 따른 소해율 변화의 민감도를 분석하였다. 이를 통해 완벽한 소해율을 달성하기 위해 보유해야 할 적정 대수를 제시하였다. 다만 본 연구는 전력의 제원, 해양환경 등 획득이 어려운 데이터를 대신하여 유사 데이터를 이용하였다는 한계가 있다. 차후 이를 극복한다면 기뢰대항작전계획 수립 및 기뢰대항전력의 건설에 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

참고문헌

- [1] 국방과 기술 편집부, “방위사업청, 무인수상정 군 시범운용사업 본격 착수,” 국방과 기술, 443호, 2016, pp. 21–22.
- [2] 국방과 기술 편집부, “소해헬기 국내연구개발사업 본격 착수,” 국방과 기술, 527호, 2023, p. 24.
- [3] 최현호, “무인 기뢰 탐지 및 처리, 해군작전을 위협하는 기뢰 제거를 위한 첨단기술,” 국방과 기술, 478호, 2018, pp. 60–73.
- [4] Bae, J. H., “An analysis on the allocation of anti mine warfare forces at wartime,” Master’s Thesis, Korea National Defense University, 2010.
- [5] Kwon, S. E., “Study of unmanned weapon system operation through resource allocation using optimization method: Highlighting on an operation of mine countermeasure assets of future considering Mosaic warfare,” Journal of the KNST, Vol. 6, 2023, pp. 353–358.

[6] Kim, J. W. et al., "A system design method of mine warfare using information for SONAR and MDV," The Journal of Korean Institute of Communications and Information Science, Vol. 39, No. 12, 2014, pp. 1243-1249.

[7] Lee, H.W. et al., "A study on integrated simulation method for mine detection mission of USV," Korean Journal of

Computational Design and Engineering, Vol. 22, No. 3, 2017, pp. 306-316.

[8] Lee. T. J., "A study of decision for sea-mine sweep's routing plan using optimization method," Journal of the Military Operation Research Society of Korea, Vol. 40, No. 2, 2014, pp. 25-36.