



Received: 2024/11/18
Revised: 2024/11/21
Accepted: 2024/12/03
Published: 2024/12/31

***Corresponding Author:**

Youngman Park

Dept. of Management Science, Republic of Korea
Naval Academy

1 Jungwon-ro, Jinhae-gu, Changwon-si,
Gyung-sangnam-do, 51704, Republic of Korea

Tel: +82-55-549-5247

E-mail: ymanpark@navy.ac.kr

북한 탄도미사일의 효과적인 탐지와 요격을 위한 이지스함 배치 방안 연구

A Study on the Deployment of Aegis Destroyers for Effective Detection and Interception of DPRK Ballistic Missiles

박영만*

해군사관학교 국방경영학과 교수

Youngman Park*

Professor, Dept. of Management Science, Republic of Korea Naval Academy

Abstract

본 연구에서는 북한 탄도미사일 위협에 대하여 이지스함의 레이더 탐지 및 요격미사일을 통한 효과적인 방어를 수행하기 위한 이지스함의 배치 위치를 결정하는 문제를 다루었다. 이지스함 배치 위치 결정 문제에 대하여 중요 해상 해역 및 영토 구역 방어에 대한 여러 가지 방어 조건을 고려한 정수계획법 모델을 제시하였다. 제시된 모델을 이용하여 다양한 조건들에 대한 수치 실험을 수행하여 이지스함의 최적 배치 위치 및 담당 해상 해역과 영토 구역 등 방어 구역을 제시하고 분석하였다.

This study deals with the issue of determining the location of the Aegis destroyer for effective defense through SPY-1D radar detection and intercept missiles against the North Korean ballistic missile threat. An inter programming model considering various defense requirements for the defense of important sea and territorial areas was presented. Through numerical experiments on various requirements using the proposed model, the optimal location of the Aegis destroyer and the area in charge, such as defensive sea and territories, were presented and analyzed.

Keywords

이지스함(Aegis Destroyer),
탄도미사일(Ballistic Missile),
배치 위치(Location),
정수계획법(Integer Programming)

1. 서론

최근 북한은 국제적인 경제제재와 고립으로 인한 주민들의 불만을 외부로 돌리고 국제사회의 관심을 끌며 협상력을 높이고자 한 국과 국제사회를 향해 핵과 미사일 위협을 증대시키고 있다. 특히 북한 탄도미사일의 위협은 우리 안보에 대한 직접적이고 실제적인 위협으로 이에 대한 지속적인 관심과 적극적인 대처가 필요하다.

북한 미사일에 대한 방어는 크게 지휘체계, 탐지체계, 요격체제로 구성된다. 대표적인 탐지체계로는 레이더, 인공위성, 정찰기 등이 있다. 주요 요격체계로는 TAAD, L-SAM, 패트리엇 미사일, 천궁 등이 있으며, 해상 요격체계로는 함정에서 운용 중인 SM-3, SM-6 미사일 등이 있다. 특히, 최근 도입한 이지스함에는 강력한 탐지체계인 SPY-1D 레이더와 함께 탄도미사일 요격이 가능한 SM-6 미사일이 운용됨에 따라 이지스함 자체로 북한 탄도미사일에 대한 방어가 가능해졌다. 따라서 북한 탄도미사일에 대한 중요 대응 전력으로서 이지스함의 효과적인 배치 및 운용은 해군에서 더욱 중요하게 다루어지고 있다.

지금까지 해군 함정들의 배치와 관련된 여러 가지 연구들이 많이 수행되었다. Park(2017)은 해군에서 평시 경비 임무를 수행하는 경비함정을 위한 전진기지의 위치를 결정하는 문제를 수리 모델로 제시하고, 각 전진기지에 경비함정들을 할당하는 방안에 관

한 연구를 수행하였다[4]. Lee(2018)는 SLBM의 효과적인 탐지를 위한 구축함 배치 최적화 문제를 2인제로섬 게임을 기반으로 다루었다. 적 잠수함은 최대한 SLBM이 탐지되지 않는 발사 및 도착 지점과 비행궤적을 결정하고자 하며, 아군 함정은 적의 SLBM 탐지를 최대화할 수 있는 구축함 배치 계획을 결정하는 것이다[1]. 이 연구는 적 잠수함 1척과 아군 구축함 1척에 관한 연구라는 제한점을 가지고 있다. Kim and Jeon(2004)은 적의 항공기나 미사일의 공격으로부터 영토 방위를 수행하기 위하여 경비구역을 최대화하는 SAM-X의 최적 위치를 할당하는 문제를 다루었다[3]. Lee and Jeong(2006)은 공격자는 방어자의 방어계획을 고려하여 표적에 대한 피해를 최대화하는 공격계획을 수립하고, 방어자는 공격자의 공격계획을 예측하여 피해를 최소화하는 KDX 함정의 배치 위치를 결정하고 방어 미사일을 할당하는 모델을 제시하여 시나리오 설정과 실험을 통하여 결과를 분석하였다[2].

한국해군은 북한 탄도미사일의 위협이 있는 경우 NLL 주변 해상 해역뿐만 아니라 영토 전역을 방어할 수 있어야 한다. 또한 영토 중에서도 수도권과 산업도시가 많은 지역 등 일부 구역은 중첩적으로 방어가 이루어져야 한다. 때에 따라서는 북한의 잠수함이 남하하여 우리 영해에서 SLBM을 발사할 수도 있다. 따라서 적 잠수함에 대한 효과적인 경계 임무 수

행을 위해서는 함정이 얼마나 많은 해상 해역을 탐지할 수 있는지도 중요한 고려 요소이다.

본 연구는 대한민국 영토 방어를 수행하면서 동시에 해상 탐지 범위를 최대화 설정하기 위하여 경계 임무를 수행하는 이지스함의 배치 위치를 결정하는 문제를 다루었다. Fig. 1은 국립해양조사원에서 제공하는 우리나라 연안도이다. Fig. 1의 연안도는 위도와 경도를 기준으로 격자형으로 구성되며 한 칸은 가로 및 세로로 대략 각각 100 km를 나타낸다. 이지스함에서 육상 및 해상의 적 미사일을 탐지하고 방어하기 위하여 이지스함에서 운용하는 SPY-1D 레이더와 함대공 미사일의 사정거리를 고려하여 탐지 및 요격거리를 연구의 편의상 직각 거리로 300 km를 설정하였으며 이는 Fig. 1에서 3칸의 구역에 해당하는 거리이다.

2. 정수계획법(IP) 모델

탄도미사일 방어 임무를 수행하는 이지스함의 배치 위치 결정을 위한 수리 모델에서 사용하는 입력 변수는 다음과 같다.

- N : 전체 이지스함 수
- NS : 해상 해역(S_i)의 중첩 탐지 구역 요구 수
- NL : 영토 구역(L_k)의 중첩 탐지 구역 요구 수
- TS_i : 이지스함을 해상 해역 i 에 배치했을 때 탐지 해상 해역 수
- TL_i : 이지스함을 해상 해역 i 에 배치했을 때 탐지 영토 구역 수
- Θ_i : 이지스함을 해상 해역 i 에 배치했을 때 탐지할 수 있는 해상 해역들의 집합
- Ω_i : 이지스함을 해상 해역 i 에 배치했을 때 탐지할 수 있는 영토 구역들의 집합
- Ψ : 해상 해역들의 전체 집합
- Ψ_S : 탐지가 필요한 해상 해역들의 집합
- Φ : 탐지가 필요한 영토 구역들의 집합
- Φ_L : 중첩 탐지가 필요한 영토 구역들의 집합

또한, 수리 모델의 의사결정 변수는 다음과 같다.

- x_i : 이지스함을 해상 해역 i 에 배치하면 1, 아니면 0
- y_i : 해상 해역 i 가 탐지 해상 해역으로 설정하면 1,

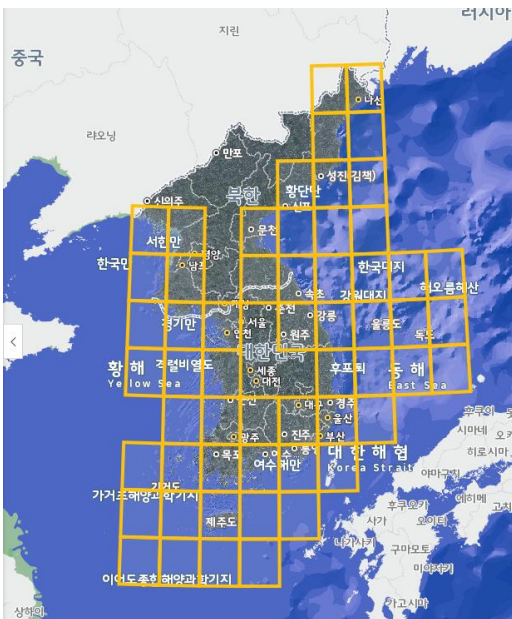


Fig. 1. Coastal chart of Korea[5]

아니면 0

y_{ij} : 해상 해역 i 에 배치한 이지스함이 해상 해역 j 를 탐지 해상 해역으로 설정하면 1, 아니면 0

z_{ik} : 해상 해역 i 에 배치한 이지스함이 영토 구역 k 를 탐지 영토 구역으로 설정하면 1, 아니면 0

앞에서 정의한 입력 및 의사결정 변수를 이용하여 개발된 정수계획법 수리 모델은 식 (1) - 식 (11)과 같다.

$$\max w_1 \sum_{i=1}^l y_i + w_2 \sum_{i=1}^l i x_i \tag{1}$$

subject to

$$\sum_{i=1}^l x_i = N \tag{2}$$

$$\sum_{i=1}^l y_{ij} \geq NS \quad \text{for } j \in \Psi_s \tag{3}$$

$$\sum_{i=1}^l z_{ik} \geq 1 \quad \text{for } k \in \Phi \tag{4}$$

$$\sum_{i=1}^l z_{ik} \geq NL \quad \text{for } k \in \Phi_L \tag{5}$$

$$\sum_{j \in \Theta_i} y_{ij} \geq TS_i x_i \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, l \tag{6}$$

$$\sum_{i=1}^l y_{ij} \geq TS_i x_i \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, l \tag{7}$$

$$\sum_{k \in \Omega_i} z_{ik} \geq TL_i x_i \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, l \tag{8}$$

$$\sum_{k=1}^m z_{ik} \geq TL_i x_i \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, l \tag{9}$$

$$\sum_{i=1}^l y_{ij} \geq y_j \quad \text{for } j = 1, 2, \dots, l \tag{10}$$

$$x_i, y_i, y_{ij}, z_{ik} = 0 \text{ or } 1 \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, l, \tag{11}$$

$$j = 1, 2, \dots, l$$

$$\text{and } k = 1, 2, \dots, m$$

제시된 정수계획법 중 식 (1)은 이지스함 배치 문제의 목적함수로, 첫 번째 부분은 가능한 탐지 해상 해역을 최대로 하는 것이며, 두 번째 부분은 해군에서 이지스함은 중요자산이므로 전력 유지를 위하여 가

능한 후방의 해상 해역에 이지스함을 배치하고자 하는 것이다. 목적함수의 첫 번째 부분의 가중치(w_1)는 두 번째 부분의 가중치(w_2)보다 상대적으로 큰 것으로 설정하였다.

식 (2)부터 식 (11)은 제약조건을 나타낸다. 식 (2)는 배치하는 이지스함은 총 N 척임을 나타낸다. 식 (3)은 해상 NLL이나 중요한 특정 해상 해역은 여러 척(NS)의 이지스함에 의해 탐지 해상 해역으로 설정되어야 함을 나타낸다. 식 (4)는 모든 영토 구역은 최소 1척 이상의 이지스함에 의해 탐지 영토 구역으로 설정되어야 함을 나타낸다. 식 (5)는 특정 영토 구역은 NL 척 이상의 이지스함에 의해 중첩 탐지 영토 구역으로 설정되어야 함을 나타낸다. 식 (6)과 식 (7)은 이지스함이 해상 해역 i 에 배치되면 탐지가 가능한 해상 해역은 탐지 해상 해역으로 설정한다. 만약 해상 해역 i 에 배치되지 않으면 해당 해역은 미탐지 해상 해역으로 설정한다. 식 (8)과 식 (9)는 이지스함이 해상 해역 i 에 배치되면 탐지가 가능한 영토 구역은 탐지 영토 구역으로 설정한다. 탐지가 가능한 영토 구역이 아닌 곳은 미탐지 영토 구역으로 설정한다. 식 (10)은 해상 해역이 하나 이상의 이지스함에 의해 탐지 해상 해역으로 설정되면 해당 해상 해역은 탐지 해상 해역으로 설정됨을 나타낸다. 식 (11)은 사용된 의사결정 변수는 모두 0 또는 1의 값을 가짐을 나타낸다.

3. 수치 실험

이지스함이 배치될 수 있는 해상 해역은 국립해양조사원이 제공하는 우리나라 연안도에서 해상 NLL 이하인 구역을 대상으로 설정하였다. 따라서 Fig. 2에 나타난 바와 같이 이지스함을 배치할 수 있는 해

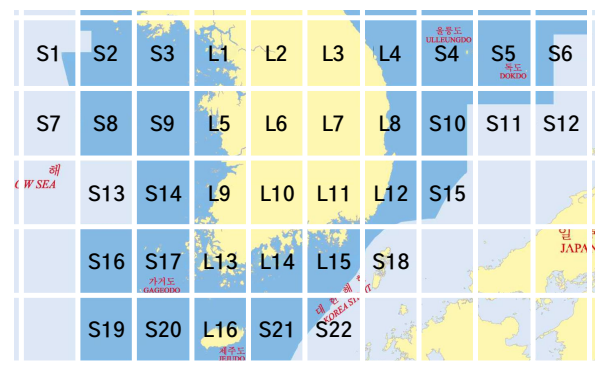


Fig. 2. The area map for research

상 해역은 총 22곳(S1~S22)으로, 영토 구역은 16곳(L1~L16)으로 설정하였다.

Table 1과 Table 2는 이지스함의 해상 해역 배치 시 탐지거리를 직각 거리 300 km로 적용하였을 때 탐지 해상 해역과 탐지 영토 구역을 보여주고 있다.

Table 1. Defensible sea areas by location of Aegis destroyer

x_i	Detectable sea areas (Θ_i)
S1	S1, S2, S3, S7, S8, S9, S13
S2	S1, S2, S3, S7, S8, S9, S13, S14, S16
S3	S1, S2, S3, S7, S8, S9, S13, S14, S17
S4	S4, S5, S6, S10, S11, S12, S15
S5	S4, S5, S6, S10, S11, S12, S15
...	...
S21	S17, S19, S20, S21, S22, S18
S22	S20, S21, S22, S18

Table 2. Defensible territorial areas by location of Aegis destroyer

x_i	Detectable territorial areas (Ω_i)
S1	L1
S2	L1, L2, L5
S3	L1, L2, L3, L5, L6, L9
S4	L2, L3, L4, L7, L8, L12
S5	L3, L4, L8
...	...
S21	L6, L9, L10, L11, L13, L14, L15, L16
S22	L7, L10, L11, L12, L13, L14, L15, L16

Table 3는 해상 해역에 대한 4가지 종류의 방어 조건을 나타내고 있다. 이에 따르면 SDR1과 SDR2는 해상 NLL 방어에 대한 제약조건으로 NLL 부근 해상 해역은 이지스함 1척 또는 2척에 의해 반드시 방어되어야 한다. 이에 반하여 SDR3과 SDR4는 NLL 부근 해상 해역 방어와 동시에 SLBM의 탐지를 위하여 동해와 서해에 인접한 해상 해역에 대해서도 1척

또는 2척의 이지스함에 의해 방어되어야 한다.

Table 3. Sea defense requirements(SDR)

SDR	SDR areas (Ψ_s)	NS
SDR1	(S1, S2, S3), (S4, S5, S6)	1
SDR2	(S1, S2, S3), (S4, S5, S6)	2
SDR3	(S1, S2, S3), (S4, S5, S6, S11, S12, S15)	1
SDR4	(S1, S2, S3), (S4, S5, S6, S11, S12, S15)	2

본 연구에서 기본적으로 영토 구역은 모두 탐지 및 요격이 가능하도록 방어 구역 내에 포함되어야 한다. Table 4는 일부 영토 구역에 대한 추가적인 중첩 방어 조건을 보여주고 있다. TDR1은 서울, 포항 구역에 대한 중첩 방어 조건이며, TDR2은 서울, 경기권, 창원, 포항 구역에 대한 중첩 방어 조건을 나타내고 있다.

Table 4. Territorial defense requirements(TDR)

SDR	TDR areas (Ψ_T)	NL
TDR1	(L2, L12)	2
TDR2	(L1, L2, L11, L12)	2

현재 한국해군의 이지스함 건조 사업이 계속 진행 중이다. 본 연구에서는 북한 탄도미사일을 SPY-1D 레이더로 탐지하고 요격미사일을 사용하여 방어할 수 있는 이지스함의 수(N)를 3척에서 6척까지 변화 시키면서 이지스함의 최적 배치 위치를 살펴보았다.

4. 실험 결과분석

수치 실험은 Windows 10 운영체제를 사용하는 Intel(R) Core(TM) i3 CPU PC에서 최적화 프로그램인 Extended LINDO/PC 6.1을 이용하여 수행하였다. Table 5는 해상 해역 및 영토 구역에 대한 탐지 및 방어 조건에 대한 시나리오를 바탕으로 이지스함의 수(N)가 3척부터 6척일 때의 이지스함 배치의 최종 결과를 보여주고 있다. 실험에서 목적함수의 가중치는 $w_1 = 1.0, w_2 = 0.1$ 값으로 설정하였다.

Table 5. Final results of numerical experiments

Constraints	TDR1				TDR2			
	Objective function value	Location of Aegis destroyer (x_i)	Undetected sea area	Objective function value	Location of Aegis destroyer (x_i)	Undetected sea area		
SDR1	N	3	20.6	S3, S4, S22	S16, S19	-	Infeasible	-
		4	23.0	S3, S4, S17, S22	-	22.9	S2, S4, S14, S22	-
		5	23.4	S2, S4, S18, S21, S22	-	23.3	S2, S4, S14, S17, S22	-
		6	23.8	S3, S4, S18, S20, S21, S22	-	23.7	S2, S4, S14, S16, S18, S22	-
SDR2	N	3	-	Infeasible	-	-	Infeasible	-
		4	-	Infeasible	-	-	Infeasible	-
		5	23.1	S3, S4, S12, S13, S22	-	23.0	S2, S3, S10, S11, S21	-
		6	23.5	S3, S4, S11, S13, S18, S21	-	23.4	S2, S3, S10, S11, S19, S21	-
SDR3	N	3	20.6	S3, S4, S22	S16, S19	-	Infeasible	-
		4	23.0	S3, S4, S17, S22	-	22.9	S3, S4, S14, S22	-
		5	23.4	S3, S4, S17, S21, S22	-	23.3	S2, S4, S14, S19, S22	-
		6	23.8	S2, S4, S17, S18, S20, S21	-	23.7	S2, S4, S14, S16, S18, S21	-
SDR4	N	3	-	Infeasible	-	-	Infeasible	-
		4	-	Infeasible	-	-	Infeasible	-
		5	23.1	S3, S4, S11, S13, S22	-	23.0	S2, S4, S8, S10, S22	-
		6	23.5	S3, S4, S12, S13, S16, S21	-	23.4	S3, S4, S8, S11, S18, S22	-

Table 5에서 최적해를 구하는 데 걸리는 시간은 1 초 이내의 짧은 시간으로 나타났으며, 이지스함의 수가 증가할수록 미탐지 해상 해역은 줄어들어 목적함수 값은 증가하는 것으로 나타났다.

Table 5에서 TDR1의 방어 조건의 결과를 살펴보면, 특정 해상 해역에 탐지 및 요격 목적으로 이지스함 1척을 배치하는 SDR1과 SDR3의 경우에는 모든 이지스함의 최적 배치 위치를 결정하였으며, 두 경우 모두 $N = 3$ 일 때만 두 곳의 미탐지 해상 해역(16, 19)이 발생하는 것으로 나타났다. 또한 특정 해상 해역에 이지스함 2척을 탐지 및 요격 목적으로 배치하는 SDR2와 SDR4의 경우에는 최소 5척 이상의 이지스함이 필요함을 알 수 있으며, 최적해가 있는 경우에는 미탐지 해상 해역이 발생하지 않았다.

TDR2의 방어 조건 결과에서는, SDR1과 SDR3의 경우 이지스함이 4척 이상 있어야 최적 배치 위치를 결정할 수 있으며, SDR2와 SDR4의 경우 5척 이상의 이지스함이 필요하였다. SDR1, SDR2, SDR3, SDR4

모두 이지스함의 최적 배치 위치를 결정할 수 있는 경우 미탐지 해상 해역은 발생하지 않았다.

Fig. 3는 SDR1과 TDR1의 조건에서 이지스함이 3척인 경우의 수치 실험 결과를 그림으로 나타낸 것이다. Fig. 3에서 이지스함은 S3, S4, S22의 해상 해역에 배치하는 것이 최적 배치 위치임을 알 수 있다. 이때 서해 해상 해역 S3에 배치된 이지스함은 해상 해역 S1, S2, S3, S7, S8, S9, S13, S14, S17을 담당하고, 영토 구역은 L1, L2, L3, L5, L6, L9을 담당하는 것으로 나타났다. 또한 동해 해상 해역 S4에 배치된 이지스함은 해상 해역 S4, S5, S6, S10, S11, S12, S15과 영토 구역 L2, L3, L4, L7, L8, L12를 담당함을 알 수 있다. 이때 L2와 L3에서는 두 척의 이지스함에 의해 중첩 방어가 이루어짐을 알 수 있다.

Fig. 4는 SDR1과 TDR2의 조건에서 이지스함이 4척인 경우의 실험 결과이며, Fig. 5는 SDR2와 TDR2의 조건에서 이지스함이 5척인 경우의 이지스함 배치 위치 및 방어 구역을 제시하고 있다.

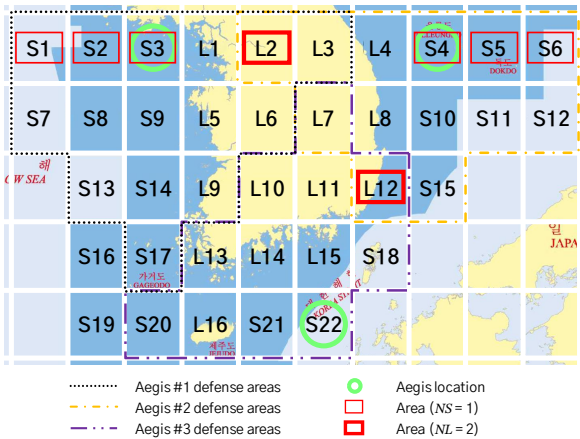


Fig. 3. Optimal solution for case SDR1, TDR1 and $N = 3$

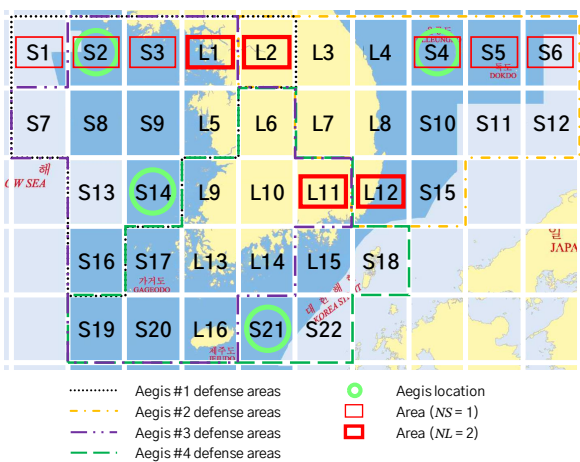


Fig. 4. Optimal solution for case SDR1, TDR2 and $N = 4$

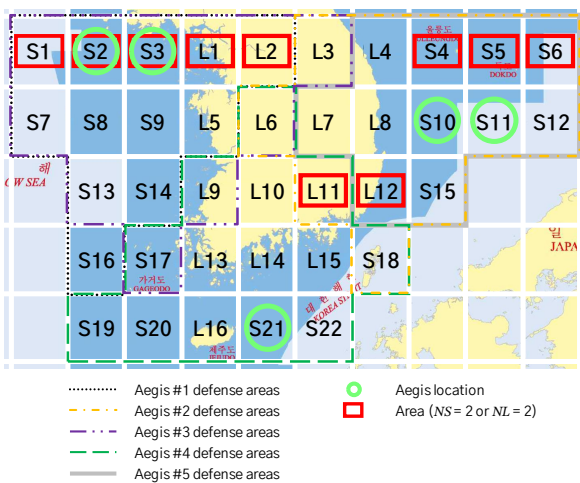


Fig. 5. Optimal solution for case SDR2, TDR2 and $N = 5$

5. 결론

본 연구는 북한 탄도미사일 위협에 대한 효과적인 방어를 목적으로 이지스함의 배치 위치를 결정하는

문제에 대한 정수계획법 모델을 제시하였다. 또한 중요 해상 및 영토 방어에 대한 여러 가지 전략을 고려한 수치 실험을 수행하여 이지스함의 최적 배치 위치 및 담당 해상 해역과 영토 구역을 제시하였다.

수치 실험 결과, 주요 해상 해역에 최소 1척의 이지스함을 배치하는 해상 방어 조건 SDR1과 SDR3에서 영토 방어 조건 TDR1의 경우 3척의 이지스함으로 방어할 수 있지만, 영토 방어 조건 TDR2에서는 4척 이상의 이지스함이 필요함을 알 수 있었다. 그에 반해 주요 해상 해역을 중첩 방어하는 해상 방어 조건 SDR2와 SDR4에서는 영토 방어 조건 TDR1과 TDR2 모두 최소한 5척 이상의 이지스함이 필요함을 알 수 있었다.

본 연구는 가로 및 세로 약 100 km로 설정된 격자형 구역에 대하여 이지스함에서 운용 중인 SPY-1D 레이더의 탐지 범위와 요격미사일의 사정거리를 연구 편의상 직각 거리 300 km로 단순화하여 적용하였다. 이는 정밀도가 다소 떨어져 실제 적용에 제한이 있을 수 있으므로, 레이더의 탐지 범위 및 요격미사일 사정거리 산정이 실제 데이터와 부합하도록 설정하여 추가적인 연구가 진행된다면 이지스함을 이용한 탄도미사일 방어 전략 수립에 유용하게 적용될 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] Jinho Lee, "Optimization of Destroyer Deployment for Effectively Detecting an SLBM based on a Two-Person Zero-Sum Game," Journal of the Korea Society for Simulation, 27(1), 2018, pp. 39-49.
- [2] S.-H. Lee and I.-C. Jeong, "Optimal Allocation Model of KDX for Missile Defense," Journal of the Korea Society for Simulation, 24(3), 2006, pp. 69-77.
- [3] S. B. Kim and G. Jeon, "An Optimal Allocation Model for SAM-X," Journal of the Military Operations Research Society of Korea, 30(1), 2004, pp. 48-69.
- [4] Y.-M. Park, "Determination of Outpost and Allocation of Patrol Ship for the Marine Patrol," Journal of the Korean institute of Plant Engineering, 22(2), 2017, pp. 3-11.
- [5] Korea Hydrographic and Oceanographic Agency, <http://www.khoa.go.kr/oceanmap/main.do>, 2024 (accessed 2024. 10. 1.)