저고도 방공 레이더 최적 배치에 관한 연구

백경혁¹⁾ · 이영우^{*,2)} · 장 훈²⁾

¹⁾ 10전투비행단

²⁾ 한국과학기술원 산업 및 시스템 공학과

Study on the Optimal Location of Low Altitude Air Defense Radar

Kyung-Hyock Baek¹⁾ · Youngwoo Lee^{*,2)} · Hoon Jang²⁾

¹⁾ ROKAF 10th Fighter Wing

²⁾ Korea Advanced Institute of Science and Technology, Korea

(Received 16 January 2014 / Revised 3 March 2014 / Accepted 29 March 2014)

ABSTRACT

As observed in the recent war, suppression of enemy air defense operation is one of the major tactics, simultaneously conducted with high payoff target. Specifically, our air defense operation should be properly constructed, since the operating environment of our forces mostly consists with mountainous terrain, which makes detections of the enemy difficult. The effective arrangements of low altitude air defense radars can be suggested as a way of improving the detection capability of our forces. In this paper, we consider the location problem of low altitude air defense radar, and formulate it as an Integer Programming. Specifically, we surveyed the previous researches on facility location problems and applied two particularly relevant models(MCLP, MEXCLP) to our problem. The terrain factor was represented as demand points in the models. We verified the optimal radar locations for operational situations through simulation model which depicts simple battle field. In the simulation model, the performance of optimal radar locations are measured by the enemy detection rate. With a series of experiments, we may conclude that when locating low altitude air defense radars, it is important to consider the detection probability of radar. We expect that this finding may be helpful to make a more effective air defense plan.

Key Words : Radar Location Problem(레이더 최적 위치 문제), Low Altitude Air Defense(저고도 항공 방어), MCLP, MEXCLP

1. 서론

* Corresponding author, E-mail: leeyoungwoo@kaist.ac.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

2차 세계대전 이후부터 최근 이라크 전쟁에서의 작전 상황을 살펴보면 항공력에 의한 제공권 확보가 전쟁 승리에 초석임이 입증되고 있다. 게다가 과학기술이 빠른 속도로 발전함에 따라 새로워진 전투수행방

식 즉 네트워크 중심전(Network Centric Warfare), 효과중심전(EBO), 동시/통합전 양상은 초기에 적의 방공망을 무력화하여 더 나은 조건에서 작전을 전개시키기 위해 초기 제공권 확보를 목표로 한다. 실제로 미 의회 조사국(Congressional Research Service)에 따르면 최근 전쟁에서 적방공망제압(SEAD : Suppression of Enemy Air Defenses) 비행횟수가 상당히 증가했음을 언급하였다^[1]. 이에 따라 우리 군도 제공권 확보를 위한 전력 강화에 노력하고 있으며, 무엇보다도 방공무기에 대한 개선 및 강화에 힘쓰고 있다. 특히 북한군의 비대칭 전력에 대한 대비는 철저히 해야 한다고 많은 전문가들이 조언하고 있다^[2].

북한군의 대표적 대공 위협은 빠른 속도로 침투하는 전투기, 미사일 공격, 저고도 침투 등이 있는데, 특히 특수목적 부대의 항공기를 통한 저고도 침투가 위협적이다^[3,4]. 특수 목적에 활용되는 항공기는 레이더로 탐지하기가 쉽지 않을 뿐만 아니라, 저고도 작전이 이뤄지는 산악지형은 레이더 활용에 제약을 유발한다. 하지만 특수 목적 침투의 대부분이 전쟁 전반에 결정적인 영향을 미칠 수 있기 때문에, 우리군은 불리한 전장 환경 속에서 최대한의 조기 탐지를 수행하여야 한다. 이를 위해서는 첨단 탐지 장비 도입뿐만 아니라, 기존의 탐지 레이더의 적절한 배치와 운용을 통해 탐지 레이더 시스템을 구축하는 것이 필요하다^[5].

탐지 레이더 시스템 구축에 세 가지 요소가 중요하다. 레이더 자산의 최적 배치와 레이더들의 협업, 획득 데이터의 융합 등이 중요한데, 특히 레이더 자산의 최적 배치는 레이더 시스템 구축에 가장 기초가 되는 요소라 할 수 있다^[6]. 제한된 수로 레이더를 적절히 배치하는 것은 비용 대비 전력을 극대화할 수 있는 방안 중 하나로서, 특히 적군 침투에 대한 탐지 확률을 높여 적 조기 제압에 대한 능력을 높일 수 있다.

본 연구는 제한된 탐지 레이더 자산에 대한 최적 배치를 산출할 수 있는 방법을 제안한다. 특히, 산악 지형에 저고도로 침투하는 적들에 대처하는 작전을 대상으로 한다. 작전 환경을 기반으로 하여 상황 별 최적 배치에 대한 해를 기존의 수리 모델을 활용해 도출하였고, 이 해를 시뮬레이션에 적용해 최적 배치의 실효성을 검증하고, 기존의 수리 모델에 대해 고찰하여 레이더 자산 최적 배치 산출을 위한 수리 모델 개발에 필요사항을 제시하였다.

2. 관련연구 및 기존 수리 모델

2.1 관련 연구 분석

최적 배치 선정 문제는 많은 분야에서 연구가 진행되고 있으며, 군에서도 미사일 및 설비자원할당 문제에 적용되었다. 이영해 외 연구^[6]에서는 단거리 지대공 미사일의 최적배치 연구를 수행하였다. 기존 모델을 이용하여 SAM(Surface to Air Missile) 접근로 공격 위치에 따른 격추거리와 그에 따른 차별적인 격추확률을 부여하여 위치를 선정했다. 광기훈 외 연구^[7]는 지대공 유도 무기 최적배치 모형을 항공기와 SAM의 규모를 표현할 수 있는 새로운 모형을 제시하고 그 해를 유전자 알고리즘과 복합 휴리스틱 알고리즘을 활용해 문제를 해결하였다. 정치영 외 연구^[8]는 격추확률 최대화를 위한 미사일 배치 문제로 페트리어트 미사일 개발시 축적된 명중확률을 이용하여 격추확률을 최대화하는 수리 모형을 설계하였다. 이상현 외 연구^[9]는 미사일 방어를 위한 KDX 최적 배치 모형 연구를 통해 최적의 KDX 배치 선정과 방어 미사일 할당에 대한 의사 결정 방안을 제시하였다. 레이더 배치에 관한 연구는 오제상 외 연구^[10]이 있는데, 이 연구에서는 설비의 중복담당을 막기 위해 병렬 구조의 신뢰도 개념을 도입한 수리 모델을 제안하였다.

최적 배치 선정 문제는 군 이외 타 분야에서도 많이 활용되고 있다. 김근영 외 연구^[11]는 수도권 지역의 최대 수용 인구 입지 이론에 의한 소방서 입지 선정에 관한 연구를 통해 기존에 위치한 소방서가 수도권 인구 전체에 대해 긴급소방 서비스를 제공하지 못하는 것을 파악하고 소방 서비스를 제공하기 위한 입지 개선 및 증설에 대한 최적안을 제시했다. 김정민의 연구^[12]는 Set Covering과 Minisum 기법을 상호 활용한 위치 선정 문제를 119구급대 최적 위치 선정에 적용하여 개선된 배치안을 제시하였다. Luce Brotcorne 외 연구^[13]는 응급차 배치 및 재배치 모델 연구를 통하여 기존에 입지 선정에 연구된 내용을 정리하고 각각의 모델에 대한 특징을 설명하였다.

여러 분야에서 설비의 최적 배치 선정에 관한 연구 활발히 이루어지고 있지만, 군 분야에서는 대공 방어시 요격에 초점을 두고 있고 레이더 위치에 관한 연구는 부족한 것을 확인할 수 있다. 특히 작전 위치가 상세해 질수록 환경의 시계도 분석이 중요한데, 많은 연구들의 수리 모델에서는 지형 요소에 대한 반영이 이뤄지지 않았다. 따라서 본 연구는 작전 환경에 지형

요소를 반영하여 탐지 지역을 최대한 넓힐 수 있는 수리 모델을 제안하였다.

2.2 기존 수리 모델

기존 연구에서 활용된 수리 모델은 Set-coverage 모델(지역담당 모델)이다. 이 모델은 설비의 입지 문제에 널리 적용되고 있으며^[7], 그 특성에 따라 확정적(Deterministic) 모델과, 확률적(Probabilistic) 모델, 동적(Dynamic) 모델로 나눌 수 있다. 확정적 모델은 시설이나 자원의 서비스 거리를 정의하고 모든 수요 지점을 커버하되, 그 시설의 수를 최소화하는 LSCM(Location Set Covering model)과 시설이나 자원의 수가 제한될 때 수요 지점을 최대 커버 할 수 있도록 제안하는 MCLP(Maximum Covering location Problem)모델이 대표적이라 할 수 있다^[14]. 기존 연구에서 활용하는 모델이 대부분 MCLP를 기초로 하고 있다^[6-10].

확률적 모델은 시설이나 자원이 서비스를 제공하지 못한 확률을 고려함으로써 확률적인 요소를 추가 한 모델이다. 대표적인 모델로는 확률을 통한 기대치를 최대화 하여 수요지점을 커버하는 MEXCLP(Maximum Expected Covering Location Problem)와 신뢰도 수준을 지정하여 그 수준 이상을 만족할 수 있도록 최대 커버하는 MALP(Maximum Availability Location Problem)가 있다^[14,15]. 동적 모델은 시설이나 자원 중 1대가 서비스에 응했을 때 그 공백을 채우기 위해 새로운 재배치를 제공하는 모델이며 DDSM(Dynamic Double Standard Model)이 대표적이다^[13].

본 연구에서는 현재 설비 배치 연구에 많이 활용되는 MCLP와 확률적 개념이 추가된 MEXCLP를 활용하여 연구하였다. 참고로, MCLP와 MEXCLP는 Integer Programming으로 모델 할 수 있다. 또한 MCLP와 MEXCLP 모델은 NP-Hard 문제로 알려져 있어, 문제의 크기가 커질수록 쉽게 해결되지 않아 특별한 문제 풀이 방법이 필요하다고 알려져 있다. 다만, 본 연구에서는 일반적인 상용 최적화 소프트웨어(CplexTM, ver. 12.3)를 통해 효과적으로 최적해를 도출 할 수 있는 수준에서 문제를 다루었다.

2.2.1 MCLP

MCLP(Maximum Covering Location Problem)는 제한된 시설의 개수로 각 수요지점의 수요량을 통하여 가장 많은 수요를 만족 할 수 있도록 시설의 적정 위치를 결정하기 위해 1974년 Church와 ReVelle에 의해 고

안되었다. LSCM과 MCLP 차이점은 모든 수요에 대한 시설물의 최소 필요 수가 계산을 통해 결정되는가, 혹은 시설의 수를 제한하고 제한된 범위에서 최대의 수요 지점을 만족하는가를 결정하는데 차이가 있다. 그 모델 식은 다음과 같다^[14].

$$\max \sum_{i \in V} d_i y_i \quad (1)$$

$$s.t. \sum_{j \in W_i} x_j \geq y_i \quad (i \in V), \quad (2)$$

$$\sum_{j \in W} x_j = p \quad (3)$$

$$x_j \in \{0, 1\} \quad (j \in W), \quad (4)$$

$$y_i \in \{0, 1\} \quad (i \in V). \quad (5)$$

i : 수요지역

j : 시설 설치 지역

d_i : 수요지역의 수요량

p : 시설물의 수

V : 수요지역의 집합, $i \in V$

W : 시설물 설치가능지역의 집합, $j \in W$

W_i : 수요지역 i 를 담당하는 설치 지역의 집합

<의사결정 변수>

x_j : j 지역의 시설물 설치 여부

y_i : i 지역의 처리여부

식 (1)은 지역별 수요량을 고려해 시설물 x_j 에 의해 커버되는 지역의 수를 최대화 하는 목적 함수를 나타내며, 식 (2)는 임의의 지역 y_i 가 x_j 에 의해 커버되기 위해서는 해당 수요지역 i 를 담당하는 시설물(W_i)중 최소 한 곳 이상 설치되어야 함을 의미하는 제약식이다. 식 (3)은 설치하는 시설물의 숫자는 p 곳임을 의미하며, 식 (4)와 식 (5)는 각각 해당 시설물이 설치되면 (혹은 해당 수요 지역이 커버되면) 1 아니면 0을 갖는 이진 변수임을 의미한다.

2.2.2 MEXCLP

MEXCLP(Maximum Expected Covering Location Problem)는 확률적 모델의 하나로 1983년 Daskin에 의해 고안되었으며, 수요 발생 시 설비가 반응하지 못할

가능성(Busy Fraction)을 반영하였다. 응급차 배치 문제에서는 Busy Fraction을 응급차 전체 수 대비 전체 수요 지역의 응급환자 처리 시간의 기대값으로 계산한다^[14]. 즉, 환자가 발생해도 응급차가 출동하지 못할 확률을 계산한 것이다. MEXCLP 모델 식은 다음과 같다^[14].

$$\max \sum_{i \in V} \sum_{k=1}^p d_i (1-q)^{k-1} y_{ik} \quad (6)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j \in W_i} x_j \geq \sum_{k=1}^p y_{ik} \quad (i \in V), \quad (7)$$

$$y_{ik} \leq y_{i(k-1)} \quad (8)$$

$$\sum_{j \in W} x_j \leq p, \quad (9)$$

$$x_j = \{0, \dots, p\} \quad (j \in W), \quad (10)$$

$$y_{ik} \in \{0, 1\} \quad (i \in V, k = 1, \dots, p). \quad (11)$$

i : 수요지역

j : 시설 설치 지역

d_i : 수요지역의 수요량

p : 시설물의 수

q : Busy Fraction

V : 수요지역의 집합, $i \in V$

W : 시설물 설치가능지역의 집합, $j \in W$

W_i : 수요지역 i 를 담당하는 설치 지역의 집합

<의사결정 변수>

x_j : j 지역에 설치하는 시설의 수

y_{ik} : i 지역이 적어도 k 개의 시설에 의해 처리되는지에 대한 여부

식 (6)은 Busy Fraction q 를 고려해, 수요지역 i 에 대한 커버율의 기대값을 최대화하는 목적 함수이고, 식 (7)은 수요지역 i 가 k 곳의 시설에 의해 커버되기 위해서는 i 를 커버할 수 있는 시설 설치 후보 지역 (W_i)에서 최소 k 곳의 시설이 설치되어야 함을 의미한다. 식 (8)은 수요지역 i 가 k 곳의 시설에 의해 커버되기 위해서는 반드시 $k-1$ 곳의 시설에 의해 커버되어야 함을 의미하며, 식 (9)는 설치할 시설의 수는 최

대 p 곳임을 의미한다. 식 (10)은 j 위치에 배치 가능한 시설의 수는 최소 0 곳에서 최대 p 곳임을 의미하며 (정수조건), 식 (11)은 i 지역 k 곳의 시설에 의해 커버되면 1 아니면 0을 갖는 이진 변수임을 나타낸다.

3. 레이더 최적 배치 모델 설계

3.1 작전환경 표현

레이더 최적 배치가 적용될 작전 환경은 우군 작전 지형을 대상으로 한다. Fig. 1과 같이 산악지형을 포함한 작전 지형은 가로 100km, 세로 100km의 범위로 가정 하였다. 이는 대략 00개 군단 작전 범위라 할 수 있다. 저고도 탐지 레이더가 군단 자산에 배속되어 있고 인접 군단과의 명확한 기준선이 있는 것이 아니라 탐지 범위에 따라 배치 될 수 있기 때문에, 탐지 레이더는 가정한 작전 환경 내에 배치될 수 있다.

Fig. 1. Battle field for the mathematical models

또한, 수리적 표현을 위해 작전 지형을 격자형으로 표현하였다. 하나의 셀을 한 변이 10km인 정사각형으로 하여, 격자들을 탐지 지역 및 레이더 배치 후보지역으로 설정하였다. 총 100개의 탐지 지역들은 각각 하나의 수요 지역으로서 고려된다.

수리 모델에 지형 효과를 반영하기 위해 각 수요 지역들을 대변하는 지형 데이터를 구축하여, 탐지 가

능한 지역이면 1, 지형에 의해 불가능 한 지역이면 0으로 표기하여 전장 상황의 지형 효과를 적용하였다. 각 격자의 고도가 300m 이상일 경우, 탐지 레이더가 진입 및 탐지가 불가능하다고 가정하여 탐지 가능 여부를 결정하였다.

이 밖에, 레이더 탐지 거리 및 탐지 확률은 20km 범위 내에 모든 지역이 동일하게 50%로 가정하였다.

3.2 수리 모델 구축

3.2.1 입력 데이터의 형식

수리 모델을 구축하기 앞서, 수리 모델에서 활용될 입력 데이터 형식을 정의하였다. 입력 데이터 형식을 정의에 따라, 수리 모델의 계산량 및 풀이 가능 여부를 결정할 수 있기 때문이다.

본 연구에서는 기존의 수리 모델(MCLP, MEXCLP)을 활용할 수 있도록, 입력 데이터 형식을 Table 1과 같이 정의하였다.

3.1에서 설명했듯이, 지형효과를 반영하기 위해 각 격자 별 탐지 여부를 0 또는 1로 표현하였다. 여기에 레이더의 탐지거리(20km)를 적용하여 각 레이더 후보지에 레이더가 설치되었을 때 탐지할 수 있는 지역만을 1로 표현한 100×100 테이블을 입력 데이터 형식으로 표현하였다. 즉, Table 1에서 레이더가 56번 후보지에 설치되었을 경우, 지형효과에 영향을 받지 않는 탐지 지역 중 탐지 거리 안에 들어오는 탐지 지역만이 1로 표현된다. 56번, 58번 탐지 지역은 지형효과에 영향을 받지 않는 탐지 지역이지만, 100번 레이더 후보지에 레이더가 설치되었을 경우 탐지거리 내에 들어오지 않으므로 100번째 줄에서는 0으로 표기된다.

Table 1. Format for input data

	수요지역(<i>j</i>)									
		1	2	3	...	56	57	58	...	100
레이 더 위 치	1	1	1	1	...	0	0	0	...	0
	2	1	1	1	...	0	0	0	...	0
	3	0	1	1	...	0	0	0	...	0
	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	56	0	0	0	...	1	0	1	...	0
	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	100	0	0	0	...	0	0	0	...	1

3.2.2 확정적 모델

대공 레이더는 항상 적의 표적이 되기 때문에 손실을 피할 수 없다. 따라서 작전 운영 시 제한된 자원을 가지고 효과적인 최대 커버를 위한 방어 배치가 필요하다.

위에서 설정한 작전 환경 및 입력데이터를 토대로 제한된 레이더를 운용하여 많은 지점을 탐지 할 수 있도록 MCLP 모델을 적용하여 레이더 최적 배치를 찾아보았다. 그 모델 식은 다음과 같다.

$$\max \sum_{i \in V} d_i y_i \quad (12)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j \in w_i} x_j \geq y_i \quad (i \in V), \quad (13)$$

$$\sum_{j \in W} x_j = p \quad (14)$$

$$x_j \in \{0, 1\} \quad (j \in W), \quad (15)$$

$$y_i \in \{0, 1\} \quad (i \in V). \quad (16)$$

i : 탐지지역

j : 레이더 설치 지역

d_i : 탐지지역의 중요도 (=1)

p : 설치 레이더의 수

V : 탐지지역의 집합, *i* ∈ *V*

W : 레이더 설치가능지역의 집합, *j* ∈ *W*

W_i : 탐지지역 *i*를 담당하는 레이더 설치 지역의 집합

<의사결정 변수>

x_j : *j*지역의 레이더 설치 여부

y_i : *i* 탐지지역의 처리여부

식 (12)는 지역별 중요도를 고려해 레이더 *x_j*에 의해 커버되는 지역의 수를 최대화 하는 목적 함수를 나타내며, 식 (13)은 임의의 지역 *y_i*가 *x_j*에 의해 커버되기 위해서는 해당지역 *i*를 커버할 수 있는 레이더 중 최소 한 곳 이상 설치되어야 함을 의미하는 제약 식이다. 식 (14)는 설치하는 레이더의 수는 *p* 대임을 의미하며, 식 (15)와 식 (16)는 각각 해당 지역에 레이더가 설치되면 (혹은 해당 지역이 커버되면) 1 아니면 0을 갖는 이진 변수임을 의미한다.

MCLP를 적용한 확정적 모델에서 수요지역은 탐지

지역으로 대체되고, 모든 탐지지역이 동일한 중요도를 가지도록 설정하였다. W_i 는 앞서 설명한 입력 데이터에서 선처리되어 모델에 적용된다.

3.2.3 확률적 모델

MEXCLP를 적용한 레이더 최적 배치 모델은 일반 위치 선정 문제에서 적용하는 Busy Fraction을 레이더가 탐지 하지 못할 확률로 대체하여 적용하였다. 이 모델은 Busy Fraction이 반영된 탐지 지역에 대한 기대치를 최대화하여 최적 레이더 배치를 도출한다. 모델 식은 다음과 같다.

$$\max \sum_{i \in V} \sum_{k=1}^p d_i (1-q) q^{k-1} y_{ik} \quad (17)$$

$$s.t. \sum_{j \in w_i} x_j \geq \sum_{k=1}^p y_{ik} \quad (i \in V), \quad (18)$$

$$y_{ik} \leq y_{i(k-1)} \quad (19)$$

$$\sum_{j \in W} x_j \leq p, \quad (20)$$

$$x_j = \{0, \dots, p\} \quad (j \in W), \quad (21)$$

$$y_{ik} \in \{0, 1\} \quad (i \in V, k = 1, \dots, p). \quad (22)$$

i : 탐지지역

j : 레이더 설치 지역

k : 설치레이더 (1, ..., p)

d_i : 탐지지역의 중요도 (=1)

p : 설치 레이더의 수

q : Busy Fraction (= 1 - 탐지확률 = 0.5)

V : 탐지지역의 집합, $i \in V$

W : 레이더 설치가능지역의 집합, $j \in W$

W_i : 탐지지역 i 를 담당하는 레이더 설치 지역의 집합

<의사결정 변수>

x_j : j 지역의 레이더 설치 여부

y_{ik} : i 탐지지역이 적어도 k 곳의 레이더에 의해 커버되는지에 대한 여부

식 (17)은 탐지확률 q 를 고려해, 탐지지역 i 에 대한 커버율의 기대값을 최대화 하는 목적 함수이고, 식

(18)은 지역 i 가 k 곳의 레이더에 의해 커버되기 위해서는 i 를 커버할 수 있는 레이더 설치 후보 지역(W_i) 가운데 최소 k 곳에 레이더가 설치되어야 함을 의미한다. 식 (8)은 탐지지역 i 가 k 곳의 레이더에 의해 커버되기 위해서는 반드시 $k-1$ 곳의 레이더에 의해 커버되어야 함을 의미하며, 식 (9)는 설치할 레이더의 수는 최대 p 대임을 의미한다. 식 (10)은 j 위치에 배치 가능한 레이더의 수는 최소 0대에서 최대 p 대임을 의미하며 (정수조건), 식 (11)은 i 지역이 k 대의 레이더에 의해 커버되면 1 아니면 0을 갖는 이진 변수임을 나타낸다.

4. 최적 배치 결과 및 비교

본 논문은 두 가지 모델을 활용해 최적 배치를 산출하였다. 두 모델 모두 제한된 탐지 레이더 수를 바탕으로 탐지 지역 수를 최대화하는 방식이다. 제한된 탐지 레이더 수를 점차 늘려가며, 해당 작전 환경에 대한 최적 배치 결과를 도출하였다. Fig. 2와 3은 확정적 모델 및 확률적 모델을 활용해 도출한 결과이다.

Fig. 2. Optimal arrangement results by the deterministic model(3-6 radars)

Fig. 3. Optimal arrangement results by the probabilistic model(3-6 radars)

두 모델 공통적으로 제한된 자원으로 수요 지점에 대한 커버를 최대화 할 수 있도록 고안되었기 때문에 유사한 형태의 위치 결과를 얻을 수 있었다. 하지만 MCLP 모델이 MEXCLP 모델보다 커버하는 지점이 더 많다(Table 2). 이는 MEXCLP 모델 특성상 기대치를 최대화하기 위해 지점간 두 번 커버하는 지역이 상대적으로 많았기 때문이다.

Table 2. Comparison of the number of site candidates of deterministic model with that of stochastic model¹⁾

레이더수/모델	확정적 모델 처리 지점 수	확률적 모델 처리 지점 수
3	37	35
4	48	47
5	57	55
6	65	65

1) 모든 수리 모델은 Cplex™ ver 12.3을 이용해 풀었으며 풀이 소요 시간은 < 1sec 미만으로 따로 표기 하지 않음

5. 레이더 최적 배치 시뮬레이션 실험

확정적 모델 및 확률적 모델을 통해 얻은 레이더 최적 배치에 관한 결과들이 가지는 탐지 비율 값을 측정하기 위해 시뮬레이션 검증을 활용하였다. 더 나아가, 시뮬레이션의 가상환경을 활용해 두 모델에 대한 실효성에 대해 판단하였다.

5.1 시뮬레이션 구성

5.1.1 전장 환경 모델

시뮬레이션에서 표현한 전장 환경은 수리 모델의 전장 환경과 동일하게 지형정보를 포함한 2차원 격자형으로 표현하였다. 또한, 시뮬레이션 모델의 지형을 표현하는 지형 데이터 역시 수리모델에서 활용한 것과 같은 데이터를 활용한다.

Fig. 4. A moving route of enemy aircraft

적 항공기는 5초당 1대가 발생한다. 적 항공기는 실제와 같이 연속적인 이동을 수행하고, 이동 경로는 지형의 네 변 중 한 지점에서 출발하여 나머지 다른 변 중 한 지점으로 직선으로 이동하게 표현하였다. 이 직선이동 구간에서 탐지 레이더에 의해 표적으로서 탐지될 수 있다(Fig. 4).

5.1.2 탐지 레이더 모델

수리 모델에서 도출한 최적 배치의 실제 탐지율을 확인하는 것이 시뮬레이션 실험의 목적이기 때문에,

시뮬레이션 모델에서 표현한 레이더 모델은 적을 탐지하는 과정 및 탐지 결과에 초점을 두었다. 적을 탐지하는 과정을 간단히 표현하는 방법은 탐지 범위, 탐지 확률을 고려하는 것이다^[16]. 탐지 범위에 적이 들어오게 되면, 탐지 확률을 바탕으로 적 탐지 성공 여부를 판단할 수 있다.

본 연구의 시뮬레이션 모델에는 탐지 확률로 표현한 탐지 과정 모델에 지형효과를 반영하였다. 탐지 확률로 성공 여부를 판단하기 전에 적과 탐지 레이더 간의 LOS(Line of Sight)^[17]를 우선 조사하여, 지형에 의해 탐지가 불가능한지 여부에 대해 판단하여야 한다. 탐지 확률은 탐지 성공에 대한 내부적 요인(레이더 성능)을 의미하고, 적과 탐지 레이더 간의 LOS 판단은 탐지 성공에 대한 외부적 요인이라 말할 수 있다.

Fig. 5는 적과 탐지 레이더 간의 LOS 판단 모델이다. 이 모델은 탐지 지역 중심의 격자를 형성해 셀 내의 지형은 셀 중심의 탐지 지역의 지형 데이터 값과 일치시킨다. 만약 적 항공기가 탐지 레이더의 탐지 거리 내에 들어오게 되면, 적 항공기와 탐지 레이더 간의 직선을 바탕으로 LOS여부를 판단하게 된다. 그 직선이 통과하는 셀의 지형 데이터 값을 확인하여, 그 값이 하나라도 0이 있게 되면 산악지형으로 적 항공기를 발견하지 못하는 것이 되므로 탐지가 불가능한 것으로 표현하였다.

Fig. 5. Model for LOS

수리 모델에서는 레이더의 탐지 범위가 격자형으로 표현된다고 말할 수 있는데, 시뮬레이션 모델은 실제와 유사하게 원형으로 탐지 범위를 표현하였다. 레이더의 초당 회전율로 2초당 1회전으로 가정하여 레이더 안테나의 움직임을 간략하게 표현하였다.

5.2 실험 방법

확정적 모델 및 확률적 모델에서 도출한 최적 배치를 시뮬레이션 모델에 그대로 적용하면, 가상환경에서 각 최적 배치에 대한 적 항공기 탐지율을 획득할 수 있다. 그리하여 적 항공기 탐지율을 바탕으로 각 최적 배치 안에 대한 평가를 수행할 수 있고, 실험 조건 환경에 대한 레이더 수 및 위치에 적절한 판단을 내릴 수 있을 것이다.

탐지율은 적군 발생 수 대비 적 탐지 대수로 정의하고, 실험 당 적군을 총 200대를 발생시켜, 마지막 적 항공기가 탐지되거나 그대로 통과하게 되면 실험이 종료된다. 실험에서 200대의 항공기들은 서로 다른 발생위치, 비행방향을 가지지만, 비행속도는 일정한 것으로 가정하였다. 실험에서 얻는 최종 결과는 최적 배치 안에 따른 적 항공기 탐지율(=탐지된 적 항공기 수 / 200대)이다.

총 100회 실험 후, 얻은 결과의 평균으로 최적 배치 안에 대한 탐지율을 결정하였다.

5.3 실험 결과

Fig. 6은 MCLP 모델을 적용한 레이더 배치 시뮬레이션 결과이다. 탐지율은 레이더 운용 대수의 증가와 함께 유사하게 증가 추세를 보이고 있지만 운용대수 4대와 5대일 때 탐지율 수치가 유사하고, 9대와 12대일 경우도 유사한 탐지율을 가진다. 운용대수 4대와 5대의 경우는 실제 배치 위치가 유사한 형태를 보이고 있고(Fig. 2), 9대와 12대 경우에서도 전체적인 유사한 배치에 대한 결과이기 때문에, 시뮬레이션에서도 비슷한 결과가 도출되었다고 판단된다.

Fig. 6. Detection rate for the arrangement result of deterministic model

Fig. 7은 확률적 모델을 적용한 레이더 배치 시뮬레이션 결과이다. 확률적 모델의 최적 배치에서도 탐지율이 레이더 배치 대수가 늘어남에 따라 증가함을 보인다. 하지만 레이더 5대(탐지율 : 77.1%)와 6대(탐지율 : 76.8%) 운용 시 오히려 탐지율이 떨어지게 되는데, 이는 5대 운영 시 두 개 이상의 레이더들로 커버되는 지점이 상대적으로 많고, 이것이 시뮬레이션에서 반영된 결과라 판단된다.

Fig. 7. Detection rate for the arrangement result of probabilistic model

Fig. 8은 두 모델에 대한 탐지율을 비교한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 대체적으로 비슷한 탐지율을 가지나, 레이더 3대 운영 시와 5대 운영 시에 시뮬레이션 결과에 다소 차이가 있음을 확인할 수 있다.

수리 모델에서는 확정적 모델이 수요 지점 커버 수가 더 많았고, 반대로 확률적 모델은 중복 커버하는 지점이 확정적 모델보다 많았다. 시뮬레이션 결과로 유추할 수 있는 것은, 레이더 성능을 고려하여 중복 커버를 적절히 추가하는 것이 탐지율을 높일 수 있는 배치 방법이라는 것이다.

Fig. 8. Comparison of detection rate of MCLP with that of MEXCLP

6. 결론 및 추후 연구

본 연구에서는 저고도 방공 레이더의 최적 배치를 위하여 이전 연구들을 통해 제안되었던 시설 입지 선정 문제를 이용하여 저고도 방공 레이더를 배치하고, 실제 전장 환경을 모사한 시뮬레이션 모델을 이용해 레이더 배치 결과를 평가하였다. 기존의 입지 선정 문제들 중 대표적인 두 타입의 문제(확정적 모델, 확률적 모델)를 방공 레이더 배치 문제에 적용 및 그 성능을 평가해 봄으로써, 일반적으로 지역의 물리적 커버만을 위해 레이더를 배치하는 것과 비교해, 비행체 탐지 확률을 고려해 레이더를 배치하는 우수한 성능을 보여준다는 것을 실험을 통해 입증하였다. 이를 통해, 실제 레이더 배치/운영 시 확률적 모델을 이용하여 이들을 배치/운영하는 것이 그렇지 않은 경우와 비교해 보다 효과적임을 보였다.

본 연구에서 수행한 연구에서는 수리 모델 및 시뮬레이션 모델에 몇 가지의 보완사항이 요구된다. 수리 모델 간략화 및 최적 해를 얻는 속도를 위해 작전 환경을 단순한 격자 형태로 표현하였는데, 레이더 배치 지역이 한정되는 약점이 있다. 따라서 작전 환경 및 아군 구성, 지형 제약을 고려해 몇몇의 배치 후보군을 먼저 획득하는 방식을 먼저 적용하여, 수리 모델의 배치 결과에 대한 현실성을 높일 수 있을 것이다. 또한 수리 모델에서 레이더의 탐지율을 좀 더 현실적으로 표현하는 방안이 필요하다. 공학급 시뮬레이션 모델에서 표현하는 방식인 거리 및 환경요소에 따른 탐지율 변화^[18]를 적용한다면, 레이더 배치 결과 및 탐지율에 대한 정확성을 더욱 높일 수 있을 것이다.

실제 저공으로 침투하는 적기는 탐지가 쉽지 않은 특성이 있기 때문에 탐지율 증가를 위한 배치가 더욱 중요하다고 할 수 있다. 제한된 수의 레이더 배치를 통하여 아군 저고도 방공 작전에 있어서 더 나은 작전 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 추가적으로 위 보완사항들의 추가 적용을 통해 저고도 탐지 레이더 작전 운용에 대한 조언을 더욱 구체화할 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원(UD110006MD)으로 수행되었습니다.

References

- [1] Congressional Research Service, RS21141, 2005. 1. 24.
- [2] National Assembly Budget Office (ROK), "The Analysis of Budget Proposal for 2007," p. 432, 2006.
- [3] Ministry of National Defense (ROK), "The Defense White Paper," pp. 24-26, 2010.
- [4] <http://www.asiae.co.kr/news/view.htm?idxno=2010100409171251370>, 2010. 10. 4.
- [5] Q. Weiyan, P. Yingning, L. Dajin and H. Xiuying, "An Approach to Radar Netting," Proc. CIE International Conference, pp. 573-577, 1996.
- [6] Y. H. Lee and S. E. Nam, "A Study on Optimal Allocation of Short Surface-to-Air Missile," Journal of the Military Operations Research Society of Korea, Vol. 26, No. 1, pp. 34-46, 2000.
- [7] K. H. Kwak, J. Y. Lee and C. Y. Jung, "The Optimal Allocation Model for SAM Using Multi-Heuristic Algorithm: Focused on Aircraft Defense," Journal of the Korean Operations Research and Management Science Society, Vol. 34, No. 4, pp. 43-56, 2009.
- [8] C. Y. Jung, J. Y. Lee and S. H. Lee, "An Optimal Missile Allocation Problem for Maximizing Kill Probability," Korean Management Science Review, Vol. 27, No. 1, pp. 75-90, 2010.
- [9] S. H. Lee and I. C. Jeong, "Optimal Allocation Model of KDX for Missile Defense," Journal of the Korean Society for Simulation, Vol. 15, No. 4, pp. 69-77, 2006.
- [10] J. S. Oh and S. I. Kim, "On a Set Covering Model to Maximize Reliability," Journal of the Military Operations Research Society of Korea, Vol. 8, No. 1, pp. 53-70, 1982.
- [11] G. Y. Kim, C. H. Song and S. I. Kang, "Siting fire Stations Based on the Maximal Covering Location Theory in the Seoul Metropolitan Region," Journal OF Korea Planners Association, Vol. 38, No. 3, pp. 317-324, 2003.
- [12] S. C. Oh and J. M. Kim, "An Optimal Facility Location Using Set Covering and Minisum (Application to Optimal Location of 119 Eru)," Journal of Korean Society of Transportation, Vol. 27, No. 4, pp. 103-113, 2009.
- [13] L. Brotcorne, G. Laporte, F. Semet, "Ambulance Location and Relocation Models," European Journal of Operation Research, Vol. 147, pp. 451-463, 2003.
- [14] X. Li, Z. Zhao, X. Zhu, T. Wyatt "Covering Models and Optimization Techniques for Emergency Response Facility Location and Planning: A Review," Mathematical Methods of Operations Research, Vol. 74, No. 3, pp. 281-310, 2011.
- [15] C. ReVelle and K. Hogan, "The Maximum Availability Location Problem," Transportation Science, Vol. 23, No. 3, pp. 192-200, 1989.
- [16] M. C. Straver, E. Vincent and P. Fournier, "Experiences with the MANA Simulation Tool," Defence Research and Development Canada(DRDC) Valcartier TM 2006-404, 2006.
- [17] Y. Zou and K. Chakrabarty, "Sensor Deployment and Target Localization Based on Virtual Forces," Proc. the 22th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications, Vol. 2, pp. 1293-1303, 2003.
- [18] M. D. Proctor and W. J. Gerber, "Line-of-sight Attributes for a Generalized Application Program Interface," Journal of Defense Modeling and Simulation: Applications, Methodology, Technology, Vol. 1, No. 1, pp. 43-57, 2004.