

탄도미사일 방어무기의 최적배치를 위한 의사결정지원모델 Decision Making Support Model for Optimal Location of Anti-Tactical Ballistic missile

윤용복, 김기범, 정봉주

연세대학교 정보산업공학과

서울시 서대문구 신촌동 134 연세대학교 공과대학 정보산업공학과

Fax : 364 - 7807 E-mail : kafa0443@yonsei.ac.kr

Abstract

기존의 탄도미사일 방어무기의 배치와 관련된 대부분의 연구들은 배치규모가 결정된 상태에서 후보지 중 최적위치를 구하는 것이 일반적이며, 방어확률이 최대가 되는 것을 목적으로 하는 확률적 부분담당모델의 개념을 적용한다. 본 연구에서는 무기의 도입 및 배치를 담당하는 의사결정자들에게 보다 많은 상황과 변수를 가정할 수 있도록 하는 의사결정모델을 제안한다. 모델에는 기존에 고려하지 않았던 후보지의 수준 및 방호시설의 최소방어요구수준 등이 포함되어 있으며, 모델은 의사결정자들이 결정하는 결정변수에 따라 각기 다른 방어무기의 위치와 규모 및 방어확률을 제시 하게 된다. 모델의 결과로 제시되는 내용은 무기체계의 최소소요제기 단계에서 필요규모와 위치를 결정하고 또한, 그 결과 값이 최초계획단계의 대략적 무기배치규모와 상이할 경우는 그 값이 필요성과 타당성을 가질 수 있는 수치적 분석을 제공해 준다.

1. 서론

2000년 국방백서에 의하면 북한은 탄도미사일을 운용하는 2개 여단을 편성하고 스커드 및 노동미사일 탄두 650여발이 보유하고 있으며 이중 60% 가량이 화학탄두로 확인되고 있다. 이와 같은 규모라면 60개 이상의 표적에 대해 표적 당 10발이상의 탄도미사일타격이 가능하며, 또한 2005년 12월 이란에 18기의 3500km사거리의 장거리 미사일을 수출한 것이 확인된 것으로 보아 현재 보유량은 2000년 수치를 훨씬 증가할 것으로 예상된다. 뿐만 아니라 북한의 핵무기 보유주장 및 미국에서 계속발표 되고 있는 북한 핵무기보유설 등에서 알 수 있듯이 북한은 가공할 탄도탄 위협을 가지고 있으며, 이것은 비단 우리나라뿐만 아니라 주변국들에게도 큰 위협으로 작용하고 있다.

이와 같은 상황에서 현재 우리나라 공군은 노후화된 나이키 지대공미사일을 교체하고 그 동안 전적으로 미군에게만 의존하던 탄도탄방어능력을 보유하기 위해 차세대 유도무기사업인 패트리엇 미사일 도입을 추진 중에 있다. 그러나 관련국가와의 가격협상의 문제 및 예산부족 등의 이유로 인해 사

업은 계속해서 연기되고, 그 규모 역시 축소화 되고 있는 실정이다.

공군에서의 무기도입 전력화사업은 여러 복잡한 단계를 거쳐서 결정이 된다. 우선 필요부서/대에서 중장기 계획에 따라 소요제기를 하고, 이것은 합동참모본부에서의 각종회의절차를 거쳐 통과/결정되며, 최종적으로 국회의 국방예산 심의과정을 거쳐 대상, 규모 및 시기가 결정되게 된다.

소요제기시의 규모의 결정은 현재와 향후의 위협을 고려하여 필요규모를 결정하게 되는데 대부분 한반도 전체를 대상으로 하여 무기체계효과지수를 반영하여 필요규모를 산정하거나, 현재 운영 중인 부대의 규모를 산출의 근거로 하며, 이 단계에서 후보자의 위치는 고려되지는 않는다. 따라서 규모가 결정된 후 후보지를 결정할 때 지형적인 여건 등에 의한 불균형으로 인해 최초에 결정된 규모에서의 방어수준을 보장하지 못하는 문제점이 발생하게 된다. 특히, 탄도미사일 방어무기의 경우 후보지의 입지조건이 까다롭기 때문에 여타 방공무기체계와 같은 전체 면적 대비 필요무기규모의 계산 등은 실제로 규모가 결정된 후 배치위치 결정시에 큰 문제점을 갖게 된다. 또한 규모가 축소되었을 경우 방어수준에 미치는 영향에 대한 분석 등이 포함되어 있지 않기 때문에 소요기준이나 규모의 필요성에 대한 설득력 있는 타당한 근거를 제공할 수 없게 된다.

이에 본 연구에서는 최적의 규모 및 위치를 결정하는데 있어 방호시설의 방어요구수준을 반영하고, 후보지별 수준을 고려하는 의사결정모델을 <그림 2>와 같이 제안한다. 제안된 모형을 통해 의사결정자들은 방호시설별 방어요구수준을 만족하는 충족하는 후보지의 규모와 위치를 결정할 수 있다. 또한 what-if분석을 통해 소요제기된 규모의 타당성 및 필요성 제시하여 보다 설득력 있는 결정안을 작성할 수 있다.

본 연구의 구성은 다음과 같다. 2장에서 관련 무기배치 위치 결정에 관한 기존연구현황을 고찰하고, 3장에서는 최적위치를 결정하는 의사결정 모형을 제시한다. 4장에서는 현실을 반영한 축소화된 수치가 포함된 시나리오 분석을 통해 현실적인 의미를 찾고 실시하게 되고, 5장에서 결론 및 향후 연구방향을 제시한다.

2. 기존 연구 현황

탄도미사일방어무기의 위치결정에 관한 연구는 주로 주어진 제약조건(배치규모)하에서 방어확률을 최대화 하는 후보지를 선정하는 모형이 주류를 이루고 있으며, 확률적 부분담당 문제(Probabilistic Partial Covering Problem)의 개념인 병렬신뢰도(Reliability of Parallel System) 개념이 주로 사용되어 왔다. Shooman(1968)은 한 고객 i 가 j_1, j_2, \dots, j_l 위치에 설치된 l 개의 설비로부터 동시에 중복 담당을 받게 될 때 한 고객 i 가 l 개의 설비들로부터 담당 받게 되는 확률은 $1 - (1 - P_{ij_1})(1 - P_{ij_2}) \dots (1 - P_{ij_l})$ 로 표현된다고 하였으며, 이것을 기초로 하여 오제상(1981)은 (1)번 형태로 수식화 하였다.

$$\begin{aligned} \text{Max } Z &= \sum_{i=1}^m W_i \left\{ 1 - \prod_{j=1}^n (1 - P_{ij})^{x_j} \right\} \\ \text{subject to } \sum_{j=1}^n x_j &\leq K \\ x_j &= (0, 1) \quad j=1, 2, \dots, n \\ W_i &> 0 \quad i=1, 2, \dots, m \\ K &= 1, 2, \dots, n(\text{정수}) \end{aligned} \quad (1)$$

위의 식(1)에서 W_i 는 고객의 중요도를 나타내기 위한 가중치이며, P_{ij} 는 설비 j 가 설치됨으로써 고객 i 가 담당되는 확률이며, K 는 제한된 설비의 수를 나타낸다. 즉, 제한된 수량 K 의 범위 내에서 고객이 설비로부터 담당 받을 확률이 최대인 설비 j 를 결정하는 모형이다.

오원민(1994)은 처음으로 병렬신뢰도개념을 방공무기인 패트리엇 무기배치에 적용하였다. 이 연구에서는 (1)번식과 유사한 모형으로 K 값을 배치개수 제한으로 변형하였으며, 제한된 수량 내에서 방어확률을 최대화 하는 패트리엇 후보지에 대해 배치방향도 추가로 고려하여 결정하는 모형을 제시하였으며, 분지-한계기법을 적용한 간단한 수치예제를 통해 실제 적용가능성을 보여주었다. 이후 병렬신뢰도 개념은 레이더 배치나 방어무기의 배치에 많이 사용되었다.

강성진 등(1995)은 한반도내 레이더 배치문제에 관련 제한된 배치 수량 내에서 전체 탐지확률이 최대가 되는 후보지를 선정함에 있어 각 후보지의 최소요구수준(해당지역의 레이더 탐지요구수준)이 반영되는 모형을 제시하였다. 남상익(2000)은 비행단등 특정한 곳에서의 단거리 방공무기의 배치를 위해 예산제약하의 배치수량을 제한으로 하는 병렬신뢰도 모형을 제시하였으며, 김승민(2004)은 차기 유도무기를 패트리엇를 대상으로 하여 기존의 탄도탄 대응과 더불어 항공기위협까지를 추가하여 고려하는 모형을 제시하고 CPLEX를 통하여 미사일 기지의 최적위치와 방향을 결정하였다. 백장욱 등(2005)은 SAM-X의 배치 후보지를 결정하기 위해 기존의 배치된 호크전력을 고려하여, 대규모에 문제에 적용가능토록 Simulated annealing 기법을 사용하였다.

그러나 기존의 모든 모형들은 제약조건이 이미 결정된 규모로 한정된 상황에서 방어확률을 최대화 하는 것으로 문제풀이 결과가 배치효과가 큰 후보지에만 전력을 집중함으로써 방어확률최대가 전

체적으로 균등한 방어확률을 보장하지 못하는 한계가 있다.

정치영 등(2006)은 병렬신뢰도 모형을 이용하지 않는 확률 값의 합을 최대화 하는 0-1 IP모형을 제시하고, 설치개수의 제한과 지휘관이 요구하는 적정 방어수준 이상을 제약조건으로 하여 후보지의 최적위치를 결정하였다. 이 연구에서는 기존의 연구들이 방호시설에 방어확률에 중점을 둔데 비해 미사일 및 항공기를 직접 격추 가능한 확률 값을 이용하였다. 하지만, 병렬신뢰도가 아닌 IP모형을 사용하여 풀이는 간단하게 할 수 있으나, 각각의 확률을 더하여 목적식을 만족시키는 형태로 결과 값이 최적 값을 보장할 수 없는 단점이 있다.

후보지의 수준에 관한 연구는 민간부문에 있어서는 매우 활발하게 이루어지고 있지만, 군 관련 시설에 있어서의 후보지의 수준을 고려하는 연구는 거의 이루어지지 않고 있으며, Reza, Z.F등(2006)이 이란지역에서 실제 적용문제로서 군사용 군수창고의 위치를 결정하는데 있어서 TOPSIS기법 이용하여 23개의 기준에 맞춰 후보지의 수준(Quality)을 수치화된 우선순위로 나타내고 이를 설치 수를 최소화하고, 후보지의 수준(Quality)은 최대가 되는 위치를 결정하는 목표계획모형을 제시하였다.

3. 의사 결정지원 모델

3.1 기존 의사결정 체계분석

현재 공군에서 이루어지는 무기배치에 관련된 의사결정모형은 아래의 <그림 1>과 같이 간략모형으로 표현된다.

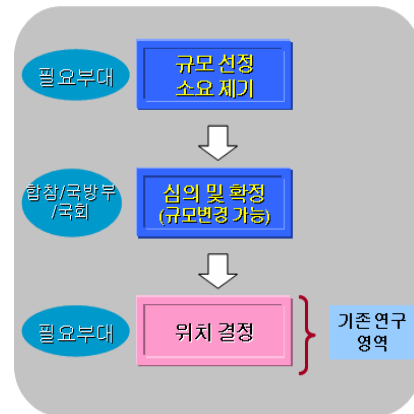


그림1. 무기배치결정 간략모형

최초 필요부대/전발단 에서 몇 가지의 요소를 통해 규모를 결정하여 소요제기를 하게 되며, 소요 제기 후에는 상위부대에서 심의 및 확정절차를 거쳐 최종결정이 된다. 필요부대는 이 최종결정이 확인된 후에 위치결정을 하며 이에 따라 기존의 연구영역 역시 이를 뒷받침하기 위한 위치결정에 국한되어왔다.

그러나 1장에서 언급한바와 같이 국가적으로 매우 중요한 무기체계인 탄도미사일 방어무기는 최초 배치규모를 선정하는 소요제기의 단계에서부터 후보지의 위치 및 방호시설의 방어요구수준에 기초한 결정모형이 필요하며, 상위부대에서의 최종심의 및 확정에 결정적인 영향을 미칠 수 있는 what if 분석이 수반되어야 한다.

3.2. 최적배치를 위한 의사결정 지원모델

본 연구에서 제안하는 의사결정 지원모델은 최초 소요제기를 위한 규모 및 위치를 결정 하는 것이 특징 되며, <그림 2>의 형태로 표현된다.

본 모델은 기존의 절차에서처럼 최종 결정 후에 위치결정을 하는 것이 아닌 위치를 기반으로 하는 규모를 산출하는 것으로 방호시설별 방어요구수준과 후보지의 수준을 고려하여 소요규모와 위치를 결정한다. 또한 최종단계에서는 기존의 방식에서 결정된 규모와 비교하는 절차를 거치면서 필요규모의 필요성과 타당성을 분석하게 되며, 결정절차는 아래의 6단계로 구성된다.

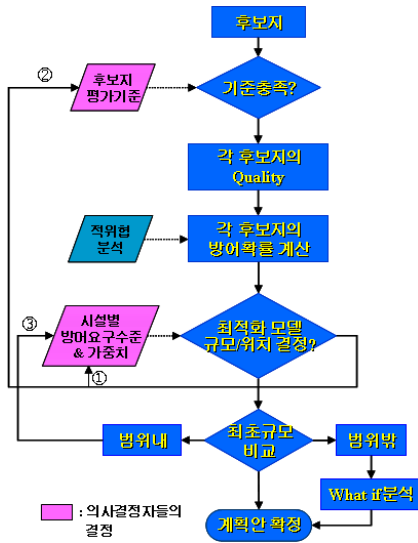


그림 2. 최적배치를 위한 의사결정 지원모델

- **단계 1.** 최대한 많은 모든 후보지를 수집한다.
- **단계 2.** 후보지의 기준을 마련한다.
 <표 1>처럼 후보지별 평가기준을 정하며, 이를 수치로 환산하고, 진입 및 탈락에 대한 절대기준을 정한다.
- **단계 3.** 후보지의 수준을 측정한다.
 TOPSIS 방법을 이용하여 절대기준을 통과한 각 후보지들의 수준을 측정한다.
- **단계 4.** 후보지별 방어확률을 계산한다.
 제공되는 적 위협분석을 기초로 하여 적의 탄도탄 공격에 대한 각 후보지에서의 방어확률을 시뮬레이션모델인 EADSIM을 사용하여 계산한다.
- **단계 5.** 후보지의 최적위치 및 규모를 결정한다.
 사전에 결정된 방호시설별 우선순위에 따른 최소방어 요구수준을 결정하고, 최적화모델에 입력 하여 최적의 위치와 규모를 결정한다. 모형에서 feasible한 값을 못 찾을 경우 방어 요구수준을 낮추거나(①), 후보지의 진입기준을 조건을 완화한다(②).
- **단계 6.** 최종계획안을 결정한다.
 최종 결정된 규모를 최초의 대략적인 계획안과 비교한다. 최종결정규모가 작은 경우 방어요구수준을 높여서 규모를 증가시키고(③), 최초의 계획과 비교하여 값이 큰 경우는 What-if 분석을 통하여 필요성을 부각시킨다. 이 단계의 분

석의 수준이 상위부대에서의 결정과정에 중대한 영향을 미치게 된다.

3.3 후보지 수준 계산

3.3.1 후보지 선정시 고려요소

본 연구에서는 탄도미사일방어무기의 후보지지를 선정하는데 있어 방공무기의 배치원칙과 운용원칙에 기초하여 <표 1>과 같은 기준을 제시한다.

기준은 크게 지형, 적 위협 기후 및 운용성 등 4개 부분으로 구분된다. 지형은 실제 방공무기체계의 배치에서 가장 많이 고려되고 있는 사항이며, 적 위협은 후보지의 위치에 대한 안전성과 보호가능성을 의미한다. 기후는 대부분의 무기체계가 전천후라서 무기의 직접운용에 제한을 주지는 않지만, 평시 운용요원들의 편의성을 위한 것이며, 뇌우경보는 장비의 안전성을 고려한 것이며, 기상청의 통계자료를 사용하게 된다. 운용성은 평시 부대관리에 있어서의 편의성을 고려한 것을 말하며, 총 9개 항목으로 구분한다.

표 1. 후보지 평가기준

구분	세부구분	내용(단위)
지형	시계범위	평균시계거리/최대탐지거리(%)
	가용면적	필요면적/사용가능면적(%)
적위협	공중위협	Flot으로 부터의 거리(km)
	지상위협	경계지원가능부대의 거리(km)
기후	평균기온	연평균기온이 18~22℃이 안되는 일수(일)
	강우일수	연평균강우 일수(일)
	뇌우경보	해당지역 연평균 뇌우경보 발령 일수(일)
운용성	행정편이성	지휘상급부대의 이격거리(km)
	정비지원	보급/정비 지원부대의 이격거리(km)

위의 평가기준의 절대 허용범위는 의사결정자들에 의해 정해지며, 절대기준을 충족하지 못하면 후보지군에서 탈락하게 된다. 예를 들어 의사결정자들이 Flot으로 부터의 이격거리 기준을 40km 이상으로 설정하면, 40km내에 위치한 후보지들이 탈락하게 된다.

3.3.2 TOPSIS기법을 통한 후보지 수준측정

TOPSIS(Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)기법은 SAW, ELECTRE, MAVT 및 AHP와 같은 다요소 의사결정(Multiple Attribute Decision Making:MADM)기법중의 하나로 간단한 논리로서 정량화된 data를 바탕으로 Ideal 한 값과 negative Ideal한 값을 동시에 고려한 스칼라량을 제공해준다는 장점이 있다. 본 연구에서는 4장에서 진행할 시나리오 분석을 위해 가상후보지군의 값을 <표 2>과 같이 설정하고 6단계를 걸쳐 후보지의 우선순위 값을 계산하였다.

표 2. 무기배치 후보지들의 기초자료

후보지	시계범위	가용면적	공중위협	지상위협	평균기온	강우일수	뇌우경보	행정편이	정비지원
A	80	70	35	12	185	140	12	12	13
B	70	85	45	2	205	135	5	3	3
C	90	75	30	10	190	145	13	15	15
D	75	95	55	3	205	136	5	3	3
E	90	80	43	7	200	138	8	8	7
F	75	90	60	4	203	137	5	3	3
G	95	75	35	16	175	140	15	10	18

• 단계 1. 표준화된 의사결정 매트릭스를 작성
식 (2)를 사용하여 후보지 수준측정을 위해 단위가 없는 통일된 값으로 변환한다.

$$r_{ij} = x_{ij} / \sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}$$

$i=1, \dots, m$ (후보지수)
 $j=1, \dots, n$ (평가기준) (2)

• 단계 2. 각 평가기준에 대한 가중치를 결정하고, 가중-표준화 의사결정 매트릭스를 작성
위의 4가지 기준은 다음 단계에서 TOPSIS기법에 의해 표준 상대 값으로 변환되는데 가중치가 필요하게 된다. 본 연구에서는 임의로 지형(0.5), 적 위협(0.3), 기후(0.1), 운용성(0.1)의 값을 부여하였다.
위에서 결정한 가중치(0.5, 0.3, 0.1, 0.1)를 표준화 값(r_{ij})에 곱해주고 각 값에 곱해주어 이용하여 값들은 계산하면 <표 3>의 가중-표준화된 결과 값을 얻는다.

표 3. 후보지들의 가중-표준화 값

구분	시계범위	가용면적	공중위협	지상위협	평균기온	강우일수	뇌우경보	행정편이	정비지원
A	0.146403	0.129292	0.089224	0.14974	0.035856	0.038927	0.04612	0.050709	0.046135
B	0.128103	0.156997	0.114716	0.024957	0.039732	0.034061	0.019217	0.012677	0.010647
C	0.164703	0.138527	0.076477	0.124784	0.036825	0.043793	0.049963	0.063387	0.053233
D	0.137253	0.175468	0.140209	0.037435	0.039732	0.035034	0.019217	0.012677	0.010647
E	0.164703	0.147762	0.109618	0.087348	0.038763	0.03698	0.030746	0.033806	0.024842
F	0.137253	0.166233	0.152955	0.049913	0.039345	0.036007	0.019217	0.012677	0.010647
G	0.173853	0.138527	0.089224	0.199654	0.03918	0.038927	0.05765	0.042258	0.06388

• 단계 3. ideal solution과 negative ideal solution을 결정
결정된 값 중에서 시계범위, 가용면적, 공중위협 등은 큰 값일수록 유리하므로 ideal로 기타항목은 작을수록 좋은 값을 가지므로 negative ideal로 선정하고 ideal solution(A^*)과 negative ideal solution(A^-)의 값을 구한다.

$$A^* = \{v_1^*, v_2^*, \dots, v_j^*, \dots, v_n^*\}$$

$$= \{(\max_i v_{ij} \quad j=J), (\min_i v_{ij} \quad j=J) \quad i=1, 2, \dots, m\} \quad (3)$$

$$= \{0.17385, 0.17546, 0.15295, 0.02495, 0.03391, 0.034061, 0.019217, 0.012677, 0.010647\}$$

$$A^- = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_j^-, \dots, v_n^-\}$$

$$= \{(\min_i v_{ij} \quad j=J), (\max_i v_{ij} \quad j=J) \quad i=1, 2, \dots, m\} \quad (4)$$

$$= \{0.12810, 0.12929, 0.07647, 0.199654, 0.039732, 0.043793, 0.05765, 0.063387, 0.06388\}$$

• 단계 4. 분리측정치를 계산
각 후보지들의 평가기준에 대한 값과 ideal solution(A^*)과 negative ideal solution(A^-)분리측정값을 식(5)에 의해서 ideal solution과의 분리값(S_i^*)식(6)에 의해서 negative ideal solution과의 분리값(S_i^-)을 구한다.

$$S_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^*)^2}, \quad i=1, 2, \dots, m \quad (5)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}, \quad i=1, 2, \dots, m \quad (6)$$

• 단계 5. 각 후보지와 ideal solution과의 상대적 거리를 계산
각 후보지들이 이상적 대체안과의 이격거리(C_i)식(7)에 의해 구한다.

$$C_i = S_i^- / (S_i^* + S_i^-) \quad i=1, 2, \dots, m \quad (7)$$

여기서, $0 \leq C_i \leq 1$ 이고, $A_i = A^-$ 이면 $C_i = 0$ 이고,

$A_i = A^*$ 이면 $C_i = 1$ 이 된다.

• 단계 6. 각 후보지의 우선순위를 결정한다.
각 후보지들의 수준(Quality)을 계산하면 <표 4>과 같은 값을 갖게 된다.

표 4. 후보지들의 수준(Quality) 값

후보지	후보지 수준(C_i)	우선순위
A	0.272269	6
B	0.760722	3
C	0.360483	5
D	0.828593	2
E	0.612408	4
F	0.807595	1
G	0.208181	7

3.4 각 후보지의 방어확률계산

각 후보지들의 방어확률은 김승빈(2005)의 연구에서 처럼 속도, 비파시간 및 반응시간 등을 고려한 수학적 방법에 의해 계산이 가능하다, 계산에 있어서의 핵심요소인 여러 종류별 탄도탄의 비행계획에 대한 정확한 자료를 획득하기가 어렵고, 방어무기 체계의 고도/거리별 방어확률에 관한 자료가 부정확하다는 단점이 있다.

따라서 본 연구에서는 공군에서 사용 중인 위계 임모델인 EADsim(Extend Air Defense simulation)을 사용하였다. 이 모델은 임무급 분석 모델로서 미국, 이스라엘 등지에서 항공기 및 미사일 방어에 관한 방공임무의 분석에 널리 쓰이고 있으며, 수학적 계산에 비해 신뢰성이 높으며 현재 적의 보유하고 있는 무기체계를 모두 표현이 가능하다는 장점이 있다.

3.5 최적 위치 및 규모 결정모형

3.5.1 각 방호시설의 방어요구 수준

본 연구에 있어서 방호시설이라 함은 적 위협으로부터 안전을 보장해야 하는 시설이나 지역을 말하는 것으로 연합사 작계5027에 나와 있는 방호우선 순위 및 민간 방어자산등에 대해 의사결정자들의 의견을 참고하여 우선순위를 결정하고, 적 위협판단에 의해 얻어지는 북한의 스킵/노동 사격계획에 의해 해당시설이나 지역의 대략적인 최소 방어요구수준을 결정한다.

3.5.2 최적화 결정모형

본 연구에서의 위치결정모형은 적 탄도탄 기지에서

발사되는 탄도탄 공격 j 를 후보지 i 의 위치에서 방어할 때 아군 방호시설별 최소방어요구수준을 표현하는 Y_j 를 만족하는 최소수량 및 최대수준을 만족하는 후보지를 선택하는 것이다.

결정되는 후보지의 위치가 최대의 방어확률을 의미하지는 않지만, 방어확률 자체가 확률적인 값을 갖는다는 한계가 있으므로 최소방어요구수준을 만족하면서 후보지의 수준이 가장 최상인 후보지의 규모와 위치를 의미한다. 모델의 전개에 사용되는 기호는 다음과 같이 정의된다.

$$MaxZ = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^L C_i \times x_{ij} \quad (8)$$

$$MinZ = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^L x_{ij} \quad (9)$$

$$1 - \prod_{i=1}^I \prod_{j=1}^L (1 - P_{ij})^{x_{ij}} (1 - P_{sj}) \geq Y_j, \forall j \quad (10)$$

$$\sum_{j=1}^L x_{ij} \leq 1, \forall i \quad (11)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \forall j \quad (12)$$

$$0 < C_i \leq 1, \forall i \quad (13)$$

- P_{ij} : 적의 탄도미사일기지에서 아군의 주요시설을 향해 발사된 탄도미사일 j 를 i 방향으로 설치된 아군의 미사일기지 후보지 i 에서 방어(격추)할 확률
- P_{sj} : 적의 탄도미사일 j 를 현재 운용중인 기지 s 에서 방어(격추)할 확률
- x_{ij} : 아군의 미사일기지 후보지 i 가 j 방향으로 설치되는 것이 선택되면 1, 아니면 0을 나타내는 이진변수
- C_i : 아군의 미사일기지 후보 j 의 Quality를 나타내는 TOPSIS의 결과 값
- Y_j : 적의 탄도미사일 j 에 대한 격추 요구수준

식(8)식은 후보지의 수준이 가장 높은 곳을 선택하게 하고 식(9)는 주어진 제약을 만족하는 범위 내에서 후보지의 숫자를 작게 하는 것으로, 기존 연구에서의 배치수의 제한을 완화한 것이다. 이에 따른 제약조건을 살펴보면, 식(10)은 적의 탄도미사일 j 에 대한 방어요구 수준으로 j 가 목표하는 시설의 방호우선순위에 따라 달라지며 그 값은 의사결정자들에 의해 결정됨을 표현한다. 식(11)은 패트리엇처럼 무기체계의 사격범위가 전방향이 아닐 경우에 사용되며, 하나의 후보지 i 에는 한 방향으로 설치되는 것을 나타낸다. 식(12)는 후보지 i 가 설치되면 1, 설치되지 않으면 0의 값을 갖는 이진변수임을 나타내고, 식(13)은 2장에서 구한 각 후보지의 수준값으로 1보다 작은 범위를 나타낸다.

위의 모형은 비선형조건을 포함하고 있으므로 변환작업이 필요하다. 즉, (10)식의 제약조건을 선형으로 변환시키기 위해 각 값을 \log 값을 취하면, (10)'의 형태로 선형으로 바뀌게 된다.

$$\prod_{i=1}^I \prod_{j=1}^L (1 - P_{ij})^{x_{ij}} (1 - P_{sj}) \leq 1 - Y_j$$

$$x_{ij} \log \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^L (1 - P_{ij}) + \log(1 - P_{sj}) \leq \log(1 - Y_j)$$

(10)'

위의 목적함수인 (8)과 (9)를 동시에 충족시키기 위해 목표계획법의 형태로 모형을 다시 정리해보면 다음과 같이 표현된다.

$$\text{Minimize } Z' = w_1 d_1 + w_2 d_2 \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^L C_i \times x_{ij} + d_1 = M \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^L x_{ij} - d_2 = 0 \quad (16)$$

$$x_{ij} \log \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^L (1 - P_{ij}) + \log(1 - P_{sj}) \leq \log(1 - Y_j), \forall j \quad (17)$$

$$\sum_{i=1}^L x_{ij} \leq 1, \forall i$$

(15)과 (16)식에서의 d_1, d_2 는 각각 부족 및 과잉에 대한 편차변수를 나타내며, (14)식의 w_1, w_2 는 의사결정자들의 후보지의 수준(Quality)의 최대화와 위치의 최소화에 대한 가중치를 나타내며 목적식은 편차변수를 최소화하는 것을 의미한다. (17)식에 의해 최소 방어요구수준을 만족하게 된다.

4. 수치 예제

4.1 실험 데이터 구성

모형을 실험하기 위해 축소된 형태로 하여 후보지, 탄도미사일, 방호시설, 방어요구수준, 기존 방어시설 등에 관련된 데이터를 <표 5>와 같이 구성하였으며 <그림 3>과 같은 형태를 나타낸다.

표 5. 실험 데이터

구 분	내 용
적 탄도탄 기지	4곳, 이기중 탄도미사일 사용
탄도탄 공격(j)	13개 방향으로 아군 방호시설(K) 공격 - 1, 4, 7 : K=1 - 5, 8 : K=2 - 2, 9, 11 : K=3 - 3, 12 : K=4 - 6, 10, 13 : K=5
후보지(i)	7개의 후보지
설치 방향(l)	후보지별 2개 방향
기존방어시설(s)	네 번째 방호시설(K=4)에 위치
방어확률(p_{ij})	EADSIM 결과 값 사용
아군방호시설(K)	5곳, 시설별 2~3발의 공격을 받음
방어요구수준(Y_j)	우선순위별로 차등적용

위의 data중 탄도탄 공격(j)을 아군 방호시설(K)로 나타낸 것은 방어요구수준을 즉, 같은 방호시설(K)에 대하여 공격하는 탄도탄 공격(j)에 대하여 갖은 방어요구수준을 적용하기 위한 것이며, 설치방향(l)은 방어무기체계를 패트리엇로 가정하였기에 발생한 것으로 패트리엇 시스템의 레이다가 갖는 좌우 60도 범위만을 탐색 및 통제가 가능하다는 제한 사항을 반영한다.

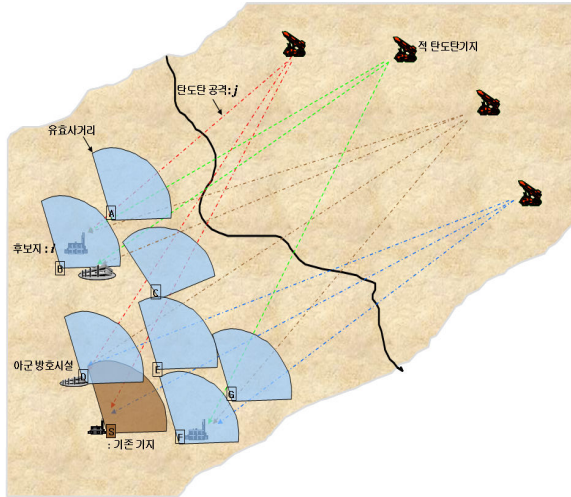


그림 3. 방호배치도

4.2 실험결과 분석

4.2.1 최소방어요구수준 변화에 따른 분석
 최소방어요구수준 변화에 따른 후보지 선택을 보기 위해 방호시설별 우선순위를 고려하거나, 하지 않는 몇 개의 data를 작성하여 실험한 결과 <표 6>와 같은 결과를 얻게 되었다.

표 6. 최소방어요구수준 변화에 따른 결과

구분	우선순위	최소방어요구수준(%)					
		Case1	Case2	Case3	Case4	Case4	
방호시설	K=1	2	80	80	70	70	60
	K=2	3	70	80	60	70	50
	K=3	2	80	80	70	70	60
	K=4	2	80	80	70	70	60
	K=5	1	90	80	80	70	70
결과값	Case 1	6개소 : A2*, B2, C1, D1, F2, G2					
	Case 2	-					
	Case 3	5개소 : A2, B2, C1, D1, G2					
	Case 4	5개소 : A2, B2, C1, D1, F2					
	Case 5	4개소 : B2, C1, D1, F2					

*A2에서의 2는 방향을 나타냄

• 실행가능한 해가 없는 경우

실험결과 방어요구수준이 낮아짐에 따라 결정되는 규모역시 작아짐을 알 수 있다. 하지만 Case 2의 경우는 평균적 방어요구수준은 80%로 Case 1과 동일하지만 실행가능한 값을 구하지 못하였다. 그 원인은 Case 1에 비해 K(2)시설의 요구수준이 높는데 비해 공격목표로 하는 적 탄도탄 공격 j(5), j(8)에 대한 방어확률이 낮기 때문이다.

이와 같은 경우는 <그림 2>에 있는 단계 5에서의 ①인 방어요구수준을 낮추거나 ②의 후보지 평가수준을 낮추어 더 많은 후보지를 고려하여야 한다. 만약에 탈락된 후보지에 있던 탄도탄 공격 j(5), j(8)를 방어할 수 있는 후보지(H)가 다시 채택되고 그 방어확률(P_{ij})이 <표 7>과 같다면, 최종

선택되는 후보지는 모델 수행결과 {B2, D1, F2, G2, H2}의 총 5개소가 선택해도 요구조건이 충족되는 것으로 나타났다.

표 7. 추가되는 후보지 H의 방어확률

방어확률 (P _{ij})	후보지	방향	탄도탄 공격(j)					
			2	3	4	5	7	8
H	H	1	80	15	25	80	70	85
		2	80	35	-	85	50	90

• 필요규모가 최초의 계획 규모와 상이한 경우

의사결정결과 최소방어요구수준이 Case 1과 같은데 비해, 기존 방법에 의한 대략 계획규모는 5개의 배치규모라 하면 1개의 오차가 발생하게 된다. 이 경우는 <그림 2>의 단계 6에 관련된 문제로 방어요구수준의 근거에 대한 분석에 중점을 두고, 그것을 보장하기 위해서는 6개 규모가 필요하다는 것을 강조해야 한다. 즉, 6개가 안될 경우의 what-if를 분석하는 것으로 위의 경우로 예를 들면, 6개가 아닌 경우의 최적은 Case 3, 4에서 나온 5개이다. 이에 따른 방호시설(K)방호확률은 식 (18)에 의해 구해진다.

이러한 분석은 의사결정자들로 하여금 소요제기시에 위의 내용을 분석내용에 추가함으로써 필요성에 대한 설득력 있는 타당성을 가능케 해준다.

$$1 - \prod_{i=1}^I \prod_{j=1}^L (1 - P_{ij})^{x_{ij}} (1 - P_{sj}) \quad (18)$$

{A2, B2, C1, D1, G2}가 선택된 경우 K(5)의 방어확률은 적의 탄도탄 공격 j(6), j(10), j(13)에 대해 대략 82%, 73%, 74%로 요구수준인 90%를 보장할 수 없게 된다.

4.2.2 w₁, w₂ 값 변화에 대한 분석

식 (12)의 후보지 수준(Quality)과 최소후보지 선택의 가중치의 변화에 따른 결과를 분석하기 위해 <표 4>에 있는 Case 4를 대상으로 가중치를 변화시키면서 실험한 결과 <그림 4>와 같은 결과를 나타냈다.

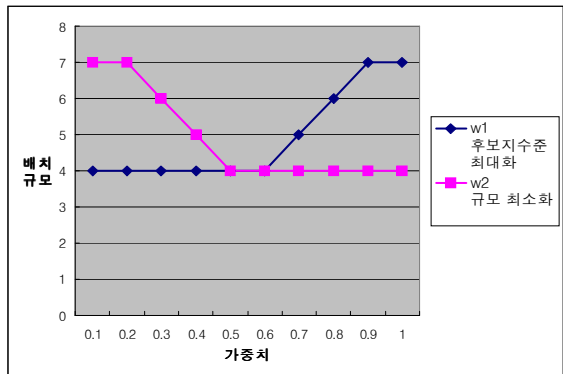


그림 4. 가중치 변화에 따른 배치규모 결정결과

후보지의 수준(Quality)의 가중치(w₁)를 최소로 할 경우는 w₂값이 최대가 됨으로서 필요규모는 최소인 4개로 결정되었으며 반대로 최대로 할 경우는

반대의 결과를 나타냈다. 가중치 0.4 ~0.5 구간에서 동일한 결과를 나타냈으며, 의사결정자들의 가중치 결정이 후보지의 규모결정에 큰 영향을 미치는 것을 보여준다. 또한, w_1 의 값이 0으로 하여 후보지의 수준을 고려하지 않고 단지 방호시설의 최소방어요구수준만을 만족하는 필요규모의 산출이 가능하며, 위의 경우는 최소규모는 4개임을 보여준다.

5. 결론

본 연구에서는 탄도미사일 방어무기의 배치에 대한 규모와 위치결정문제를 기존의 배치규모가 결정이 된 후에 후보지를 결정하는 것이 아닌 최초의 소요제기시의 자료로 사용될 수 있는 방호시설별 방어요구수준을 충족하는 규모와 후보지의 수준을 고려한 최적의 위치를 결정하는 모형을 제시하였다. 또한 축소된 규모의 수치가 포함된 시나리오분석을 통해 현실적용의 가능성 및 방향성을 제시하였다. 위의 의사결정모델은 약간의 데이터 수정을 통해 다른 방공무기체계의 배치에도 효과적으로 사용할 수 있을 것이다.

향후 연구진행계획으로는, 항공기 방어를 동시에 고려하는 것이 필요하며, 후보지를 평가하는 기준과 그와 관련된 가중치의 결정 및 중요시설별 방어요구수준 등 주관적인 요소가 다소 포함되어 있으므로 보다 객관적으로 입증할 수 있는 연구가 필요하다고 판단된다.

참고 문헌

- 국방부.(2000), *국방백서*, 국방부.
- 공군방공포병학교.(2003), *패트리어트 운용*, 공군방공포병학교.
- 김선하.(2002), 목표계획법을 이용한 방어제공 임무의 항공기 최적할당에 관한 연구, *한국국방경영분석학회지*, 28(2), 20-33.
- 김승빈.(2004), 지역담당(Set Covering)모형을 이용한 차기유도무기의 최적배치에 관한 연구, *국방대학원 석사학위논문*.
- 남상억.(2000), 단거리 지대공 미사일의 최적배치에 관한 연구, *한국군사운영분석학회지*, 26(1), 34-45.
- 백장욱.(2005) Simulated Annealing 알고리즘을 이용한 SAM-X 추가전력의 배치, *IE interfaces*, 18(4), 370-381.
- 오원민.(1994), Patriot 미사일의 최적배치에 관한 연구, *고려대학원 석사학위논문*.
- 오제상.(1981), 신뢰도를 최대화하는 지역담당 모델, *한국군사운영분석학회지*, 8(1), 53-70.
- 이혁희.(2003), 북한의 탄도유도탄 위협에 대비한 군사적 대응방향, *국방대학교 안보대학원*.
- 정치영.(2006), IP모형을 이용한 패트리어트 미사일 최적배치 모형, *국방대학원 석사학위논문*.
- Milan Zeleny (1982), *Multiple Criteria Decision Making*, McGraw-Hill., Inc., New York.
- Reza, Z.F, Nasrin, A (2006), Combination of MCDM and covering techniques in a hierarchical model for facility location : A case study, *European Journal of Operational*

Research, available online 19.

- Shooman, M.I.(1968), *Probabilistic Reliability, An Engineering Approach*, McGraw-Hill Book Co., Inc., New York.
- S.I, Kim and Y.S(1985), Park, Models Maximizing Covering Reliability, *Journal of the Korean OR/MS Society*, 10(1).