

## 단거리 지대공 미사일의 최적배치에 관한 연구 (A Study on Optimal Allocation of Short Surface-to-Air Missile)

이 영해\*, 남 상억\*\*

### Abstract

The object of this study is to construct a model for an optimal allocation of short surface to air missile defending our targets most efficiently from hostile aircraft's attack.

For the purpose of this, we analyze and establish facility allocation concept of existing models, apply set covering theory appropriate to problem's properties, present the process of calculating the probability of target being protected, apply Sherali-Kim's branching variable selection strategy, and then construct the model.

As constructed model apply the reducing problem with application, we confirm that we can apply the large scale, real problem.

---

\* 한양대학교 산업경영대학원

\*\* 8 3 2 6 부 대

# 1. 서 론

## 1.1 연구 배경

현대 및 미래의 전쟁은 과거보다 훨씬 복잡하고 치열할 것이며 특히 전쟁초기의 제공권 장악과 적 공중공격에 대한 방어력이 전쟁의 승패를 좌우하는 가장 중요한 요인으로 인식되고 있다. 1991년 걸프전을 통해서 보더라도 세계 4위의 막강한 군사력을 가진 이라크가 다국적군의 정밀한 공중 폭격과 단 100시간의 전격적인 공중공격에 단 한번의 조직적인 저항도 못한채 괴멸되고 말았다. 최근 1999년 코소보 사태에서도 공중 공격에 대한 가공할 살상력 증가로 공중위협에 대한 중요성을 재인식 하였다. 이는 질적으로 우수한 항공 공격 능력이 전쟁의 승패에 어떠한 영향을 미치는가를 단적으로 보여준 예라 할 수 있으며 야전에서 지상군 부대가 적의 공중 위협으로부터 방어를 제공받지 못한다면 지상군 부대는 기동뿐만 아니라 생존 자체도 보장 받을 수 없다는 것을 여실히 증명하고 있는 것이다.

그러므로 세계 각국은 적의 공중 위협에 대처할 수 있는 방어수단을 확보하기 위해 각고의 노력을 기울이고 있으며 우리군도 적의 공중 공격 능력과 전투 중심이 짧고 산악지형이 많아 적의 저고도 침투 공격에 취약한 전장 환경을 고려, 적의 공중 위협에 효과적으로 대처할 수 있는 단거리 대공방어 체계를 구축하고 있으며, 최근 우리나라에서는 한국형 단거리 지대공 미사일을 개발, 생산하게 되었다.

단거리 지대공 미사일의 운용에 대해 산업공학 적 측면에서 체계적인 연구를 함으로써, 경제적인 군 운용에 이바지할 수 있으며, 이를 응용하여 보다 과학적인 분석으로 효율적인 부대 배치를 위한 의

사결정에 활용할 수 있다.

이에 본 연구의 목적은 적 항공기가 아군의 목표물을 공격할 때 아군의 단거리 지대공 미사일을 이용하여 이를 방어하는 상황에서 지역담당(Set Covering)이론을 적용, 가장 효과적으로 방어할 수 있는 배치 최적화를 결정하는 모델을 구축하는데 있다.

## 1.2 기존 모델

배치 모델은 1950년 Roth[13]가 교환설비의 설계(Switching Circuit Design)에 응용한 이후 Salvenson[14]의 생산비용 균형조절(Line and Capacity Balancing), Dantzig와 Ramser[5]의 주어진 창고를 최소거리로 담당할 트럭배치(Truck Delivery), Revelle, Mark와 Liebman[11]의 개인 혹은 공공사업의 설비위치 결정(Facility Location), Day[6]의 컴퓨터 정보처리(Information Retrieval), Garfinkle과 Nemhauser[8]의 정부의 행정구역 결정(Political Districting), Charnes와 Miller[2]의 철도 수송을 위한 철도 승무원 배치(Railroad Crew Scheduling)등 많은 분야에서 응용되고 있으며 기존 연구는 다음과 같다.

전체 지역담당 모델(Total Covering Model)은 모든 고객이 적어도 하나 이상의 설비로부터 담당되어야 하는 것을 제약식으로 하고 장비 배치에 소요되는 총비용의 최소화를 목적함수로 하는 설비의 수 및 위치결정 문제에 적용되는 것으로서 Francis와 White[7]가 다음과 같이 수식화했다.

$$\text{Min } Z = \sum_{j=1}^n c_j x_j \quad (1)$$

$$\text{subject to } \sum_{j=1}^n a_{ij} x_{ij} \geq 1$$

$$x_j = \begin{cases} 1, & \text{설비가 후보지 } j \text{에 설치될 때} \\ 0, & \text{Otherwise } j = 1, \dots, n \end{cases}$$

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{고객 } i \text{가 후보지 } j \text{에 의해 담당될 때} \\ 0, & \text{Otherwise } i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n \end{cases}$$

이 모델에서  $c_j$ 는 후보지  $j$ 에 설비를 1대 배치하는데 소요되는 비용이며  $a_{ij}$ 는 고객  $i$ 가 후보지  $j$ 에 배치되는 설비로부터 담당될 수 있으면 1, 그렇지 않으면 0이되며,  $i$ 와  $j$ 에 따라서 미리 결정되는 값이다. 결정변수  $x_j$ 도 설비가 후보지  $j$ 에 배치되면 1, 그렇지 않으면 0이되며, 제약식은 고객  $i$ 가 어떤 설비로부터든지 최소한 한번 이상은 담당되어야 함을 뜻한다.

이 모델의 응용에는 행정구역 설정[8], 승무원 배치[2], 개인 혹은 공공사업의 설비 위치 결정[11]등이 있으며 해법에는 정수계획법에 의한 평면절단기법[1]과 분지한계기법[10]이 있다.

부분담당모델(Partial Covering Model)은 Francis와 White[7]에 의해 전체지역담당의 반대 개념으로 개발되었다. 이 모델은 주어진 설비수  $B$ 개의 한도 내에서 가능한 많은 수의 고객을 담당할 수 있도록 설비위치를 결정하는 문제이며, 이 문제를 일반화하여 수식화하면 다음과 같다.

$$\text{Max } Z = \sum_{i=1}^m \max_j (a_{ij} x_j) \quad (2)$$

$$\text{subject to } \sum_{j=1}^n x_j \leq B$$

$$x_j = \begin{cases} 1, & \text{설비가 후보지 } j \text{에 설치될 때} \\ 0, & \text{Otherwise } j = 1, \dots, n \end{cases}$$

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{고객 } i \text{가 후보지 } j \text{에 의해 담당될 때} \\ 0, & \text{Otherwise } i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n \end{cases}$$

위에서 목적함수  $\max_j (a_{ij} x_j)$ 는 한 고객이 여러 개의 설비들로부터 중복담당되더라도 목적함수 값은 오직 1만 증가시킴을 의미한다.

이 모델의 응용에는 설비의 위치 및 할당[3], 창고 위치 결정[9], 중앙 설비 위치 결정[12] 등이 있으며 해법으로는 동적 계획법[3]과 분지 한계기법[16] 등이 있다.

Sherali-Kim은  $n$ 대의 설비로  $m$ 개의 고객을 담당하는 문제에서 가용예산의 제약하에 최적의 유형별 설비수를 결정하는 문제로 이를 확률적 부분담당 문제(Probabilistic Partial Covering Problem)로 정의하고 분지 한계기법으로 해를 구하였다.

이 문제에서 각 고객이 받는 담당확률은 두 설비이상에서 중복담당되면 고객의 담당확률이 높아진다는 병렬구조 신뢰도 개념(Reliability of Parallel System)을 적용하였으며 각 고객이 담당을 받지 못할 확률의 합을 최소화시키는 문제로 구성하여 다음과 같이 수식화하였다.

$$\text{Min } \sum_{i=1}^m \prod_{j=1}^n (1 - p_{ij})^{x_j} \quad (3)$$

$$\text{subject to } \sum_{j=1}^n c_j x_j \leq \bar{B}$$

$$x_j \geq 0 \text{ and integer for } j = 1, \dots, n$$

$$p_{ij} : \text{설비 } j \text{가 설치됨으로써 고객 } i \text{가 담당되는 확률}$$

$$0 \leq p_{ij} < 1, i = 1, \dots, m \text{ and } j = 1, \dots, n$$

위에서 목적식은 각 고객의 담당받지 못할 확률의 합을 최소화하는 것이고 제약식에서  $c_j$ 는 타입  $j$  설비 한대의 구입 및 설치 비용으로 총 비용은 가용예산( $\bar{B}$ )의 제약을 받으며 타입  $j$ 의 설비수를 결정하는 문제이다.

## 2. 모델구축

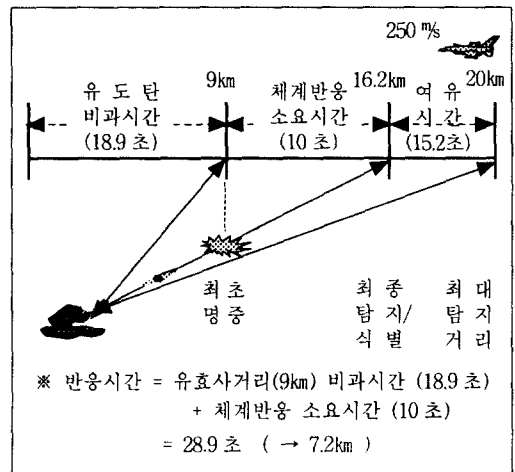
저고도로 기습 침투하여 아군의 시설(Target)에

대지공격을 시도하는 적 항공기에 대하여 대공방어에 사용되는 단거리 SAM(Surface to Air Missile)을 효과적으로 배치하여 적 항공기를 격추시킬 확률을 최대화(적 항공기가 생존하여 아군에게 피해를 줄 확률을 최소화)하기 위한 배치모형을 설정하는데 다음과 같은 가정을 한다.

- ① 적기의 공격목표(Target)는 크기나 높이를 갖고 있는 공간의 실체가 아닌 평면 좌표상의 한 점으로 설정한다.
  - ② 적기는 미리 설정해 놓은 접근로상으로만 공격한다.
  - ③ 적기는 속도 250%와 고도 (Kill Height) 1.3km로 공격한다.
  - ④ 적기 공격에 대하여 아군은 단일 무기체계로 지대공 미사일만을 배치 운영하고, 단거리 지대공 미사일의 위치는 미리 후보지로 주어진다.
  - ⑤ 적기는 단거리 지대공 미사일의 레이더 탐지 범위인 20km내에서 100% 조기탐지 된다.
- 배치모형 설정에 사용되는 기호는 다음과 같다.

- Target  $k$  : 적기의 공격 목표지. ( $k=1, \dots, K$ )
- AttackPoint  $i$  : 적기의 예상 접근로상의 한 점. ( $i=1, \dots, J$ ), Target에 대한  $index(k)$ 를 갖고 있어 하나의 직선을 이룰 수 있으므로 AttackPoint  $i$ 가 하나의 접근로를 나타낼 수 있다.
- SAM  $j$  : 가용 설비수( $N$ ) 내에서 배치될 SAM의 위치. ( $j=1, \dots, J$ )
- NormalPoint : SAM에서 접근로상으로의 수선과 접근로와의 교점. 법점.
- BombPoint : 적기가 접근로상으로 공격을 해오면서 폭탄을 투하하리라고 예상되는 지점. Target으로부터 BombDistance(1.5km)만큼 떨어져 있다.

- FirstPoint : 접근로상에서 SAM과의 거리가 유효사거리(KillDistance, 9km)인 점(FirstPoint')의 x-y 평면 투영점(projection).
  - LastPoint : 격추구간에서의 하한점. (상한점은 FirstPoint), ※ 격추구간은 <그림 2-2>에서 빗금친 부분
- 우선 아군의 시설(Target)에 공격을 감행하는 적 항공기와 그에 대응하는 단거리 지대공 미사일의 대공방어 행태를 살펴보자.



<그림 2-1> 전술기 속도 250%시 교전시간 / 거리분석

<그림 2-1>에서 보는 바와 같이, 적 항공기가 250%의 속도로 접근해 올 때, 단거리 SAM은 20km (단거리 SAM의 탐지거리)되는 지점에서 최초 탐지한 후, 총 28.9초 뒤에 단거리 SAM으로부터 9km되는 지점에 격추된다.

<그림 2-1>과 같은 단거리 SAM 대공방어행태를 가지고 전투실험을 실시하였다.

실험방법은 방공시물레이션을 이용하였고, 상황은 방어작전간 단거리 SAM에 대한 군단지역 방어 지원임무를 부여하였으며, 전술기 36대가 1일 3쏘티

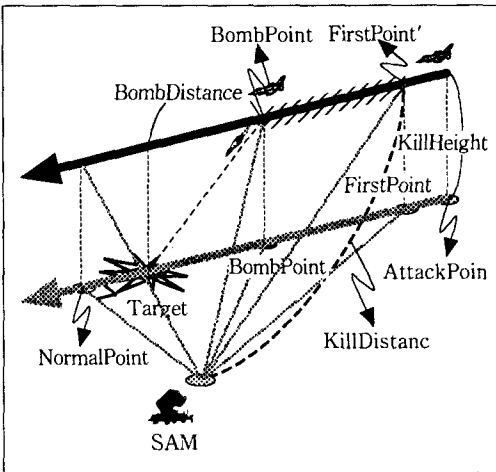
(108대) 공격하는 사함을 가정하여 실험을 실시하였다. 실험결과 표적거리별 격추대수는 <표 2-1>과 같다.

<표 2-1> 표적거리별 격추대수

총 공격 대수 (1일 3포터)	교전 대수 (비율)	표적거리별 격추대수 (비율)					
		계	2km 이내	3~ 4km	5~ 6km	7~ 8km	9km 이상
108대 (36×3)	88대 (82%)	54대 (61.3%)	2대	20대	25대	5대	2대

<표 2-1>과 같이 SAM과 접근로(AttackPoint)의 위치에 따라 격추될 확률은 61.3%로 격추비율이 표적거리별로 다음을 알 수 있다.

그러므로, 아래 <그림 2-2>에서 접근로상의 적기를 격추시킬 수 있는 구간(격추구간)을 알아보고, 그에 따른 격추확률을 구하기로 하자.



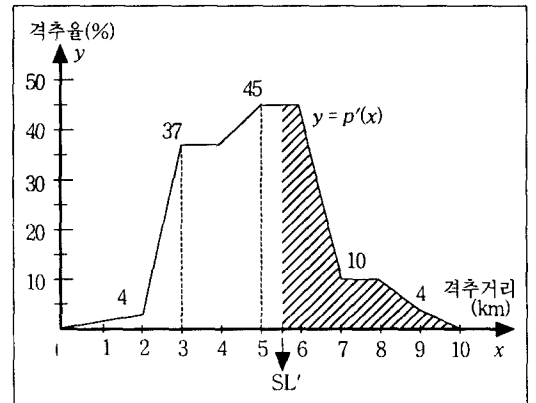
<그림 2-2> 적 항공기 예상접근로와 격추구간

<그림 2-2>에서, AttackPoint와 Target을 잇는 직선은 지면상의 예상 접근로이므로, 이로부터 일정한 높이(KillHeight)를 가진 그 위의 직선은 공중 접근로로 볼 수 있다.

또, 적기가 Target을 향해 진행하는 경로에서 FirstPoint'부터—SAM의 유효사격거리(KillDistance,

9km)가 되는 지점—LastPoint'까지가—Target으로부터 폭탄을 투하하기 위해 필요한 거리(BombDistance, 1.5km)만큼 떨어진 지점, <그림 2-2>에서는BombPoint'—바로 격추구간(위 그림에서 빗금친 부분)이다.

여기서 SAM과 접근로(AttackPoint)의 위치에 따라 격추구간의 길이도 달라지므로 <그림 2-3>에서의 격추거리 대 격추율 함수를 구간에 따라 정적분하면 가장 합리적인 격추확률을 부여할 수 있다



<그림 2-3> 격추구간에 따른 격추확률

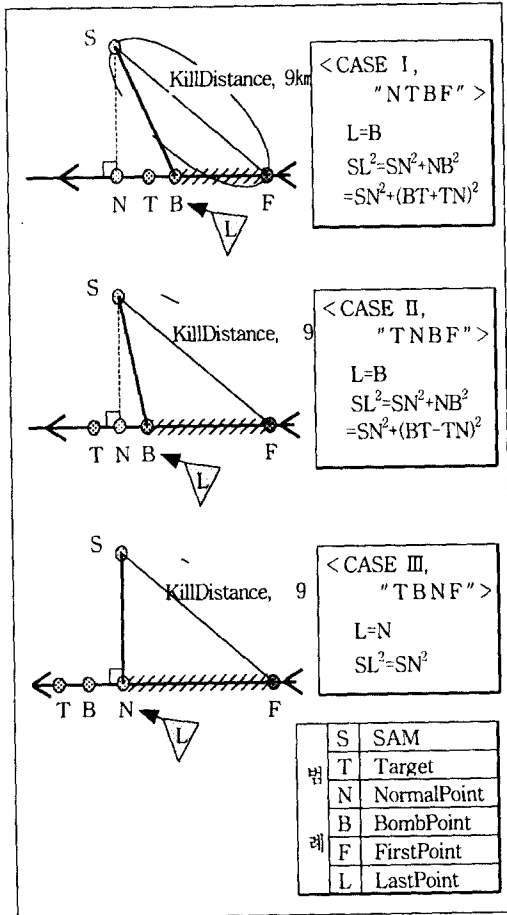
따라서, SAM으로부터 LastPoint'까지의 거리를 SL'이라고 하면 격추구간([SL',10])에서의 격추율을 다음 식에서 구할 수 있다. (0 ≤ SL' ≤ 10)

$$p(SL') = \frac{\int_{SL'}^{10} p'(x) dx}{\int_0^{10} p'(x) dx} \times \text{KillProbability}(0.613) \quad (4)$$

(0 ≤ SL' ≤ 10)

그런데, <그림 2-4>를 보면 격추구간(빗금친 부분)을 구하기 위한 LastPoint가 항상 Bombpoint와 같지 않고 접근로와 SAM의 위치에 따라 NormalPoint가 LastPoint가 되는 것을 알 수 있다 따라서, SAM과 접근로의 위치, 그리고 이에 따른 NormalPoint와 Bombpoint의 위치를 살펴본 뒤, <그림 2-4>에서 그 경우에 해당하는 SL을 구하면

된다. ( $SL'^2 = SL^2 + \text{KillHeight}^2$ )



<그림 2-4> SAM과 접근로에 따른 격추구간(SL)의 변화

본 연구는 적 항공기가 예상 접근로(AttackPoint ~ Target)상으로 공격해 온다고 가정할 때, 접근로 상의 적기를 격추시키는 아군의 SAM을 최적으로 배치하기 위한 SAM의 위치와 설비수를 결정하는 문제이다.

SAM $_j$ 가 설치됨으로써, AttackPoint  $i$ 가 격추될 확률을  $p_{ij}$ 라고 하면 격추되지 않고 생존해서 아군에게 위협을 줄 확률(생존확률)은  $1-p_{ij}$ 라고 할 수 있다.

그리고 본 모델에서는 한 고객(AttackPoint)이

둘 이상의 설비(SAM)로부터 담당된다면(격추당한다면) 그 고객의 보호확률(격추확률)이 향상된다는 신뢰도 개념을 적용하므로, SAM $_j$ 의 설비수를  $x_j$ 라고 하면 생존확률은  $(1-p_{ij})^{x_j}$ 라고 할 수 있다.

또한, 한 개의 AttackPoint  $i$ 상의 적기가 모든 SAM $_j$ 의 공격으로부터 격추되지 않고 살아남을 확률(생존확률)은 (SAM1이 AttackPoint  $i$ 를 격추하지 못할 확률)  $\times$  (SAM2가 AttackPoint  $i$ 를 격추하지 못할 확률)  $\times \dots \times$  (SAM $_j$ 가 AttackPoint  $i$ 를 격추하지 못할 확률)이고 이를 수식화 하면

$$\prod_{j=1}^J (1-p_{ij})^{x_j} \text{이다.}$$

그리고 모든 AttackPoint  $i$ 의 생존확률은 각각의 AttackPoint  $i$ 의 생존확률의 합이다.

모든 AttackPoint  $i$ 에 대해서 이 생존확률의 합을 최소화(격추확률의 합을 최대화)하여야 하므로 이상을 종합해 보면 본 모델은 다음과 같이 수식화할 수 있다.

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^I \prod_{j=1}^J (1-p_{ij})^{x_j} \quad (5)$$

$$\text{subject to } \sum_{j=1}^J x_j \leq N$$

$$x_j \geq 0 \text{ and integer for } j = 1, \dots, J$$

$p_{ij}$  : SAM $_j$ 가 설치됨으로써

AttackPoint  $i$ 가 격추되는 확률

$$0 \leq p_{ij} < 1 \quad i = 1, \dots, I \text{ and } j = 1, \dots, J$$

이상의 (5)식은 (3)식에서 제약식의  $c_j$ 를 1로 하고 예산제약( $\bar{B}$ )을 설비수로( $N$ )로 바꾼 것과 같은 형태이므로 Sherali-Kim[15]에서 제시한 분지 및 한계기법으로 해를 구할 수 있다. 이를 정리하면 다음과 같다.

위의 (5)식은  $q_{ij} = 1-p_{ij}$ 로 대치하면 Dakin[4]의 tree enumeration 방법을 기초로 다음과 같은 노드

부문제(node subproblem)로 수식화 할 수 있다.

$$v(NP) = \text{minimum} \sum_{i=1}^J \prod_{j=1}^I (q_{ij})^{x_j} \quad (6)$$

$$\text{subject to} \sum_{j=1}^I x_j \leq N$$

$$\bar{l}_j \leq x_j \leq \bar{u}_j \text{ and integer } j = 1, \dots, J$$

여기에서  $F = \{j: \bar{u}_j > \bar{l}_j\}$ ,  $u_j = \bar{u}_j - \bar{l}_j$  for  $j \in F$ .

$N' = N - \sum_{j=1}^J \bar{l}_j$  라고 정의하고,  $r_i = \prod_{j=1}^I q_{ij}^{\bar{l}_j}$ ,

$y_j = x_j - \bar{l}_j$ 로 대치하면 위식은 다음과 같이 정리

된다.

$$v(NP) = \text{minimum} \sum_{i=1}^I r_i \prod_{j \in F} (q_{ij})^{y_j} \quad (7)$$

$$\text{subject to} \sum_{j \in F} y_j \leq N'$$

$$0 \leq y_j \leq u_j \text{ and integer, } j \in F$$

### Lower Bound LB1

분지끝(fathom)을 시켜 보다 빨리 해를 찾기 위해 하한전략 기법을 사용한다.

산술·기하평균 관계에서 다음 식이 성립한다.

$$\frac{\sum_{i=1}^m t_i}{m} \geq \left( \prod_{i=1}^m t_i \right)^{\frac{1}{m}} \text{ 에 } t_i = \beta_i \prod_{j \in F} (q_{ij})^{y_j} \text{ 을 대입하면}$$

$$\sum_{i=1}^I r_i \prod_{j \in F} (q_{ij})^{y_j} \geq I \left( \prod_{i=1}^I r_i \prod_{j \in F} (q_{ij})^{y_j} \right)^{\frac{1}{I}} \quad (8)$$

따라서 Lower Bound LB1은 다음과 같은 노드 부문제에서 구할 수 있다.

$$\text{LB1} = \text{minimum} I \left( \prod_{i=1}^I r_i \prod_{j \in F} (q_{ij})^{y_j} \right)^{\frac{1}{I}} \quad (9)$$

$$\text{subject to} \sum_{j \in F} y_j \leq N'$$

$$0 \leq y_j \leq u_j \text{ and integer, } j \in F$$

$$\text{위 (9)식의 우변 } I \left( \prod_{i=1}^I r_i \right)^{\frac{1}{I}} \prod_{j \in F} \left( \prod_{i=1}^I (q_{ij})^{\frac{1}{I}} \right)^{y_j}$$

에서  $K = I \left( \prod_{i=1}^I r_i \right)^{\frac{1}{I}}$  이라고 하면 K는 상수이고,

$\lambda_j = -\frac{1}{I} \ln \left( \prod_{i=1}^I q_{ij} \right)$ 라고 하면 (9)식은 다음과

같이 정리할 수 있다.

$$\text{LB1} = \text{minimum} K \cdot e^{-\sum_{j \in F} \lambda_j y_j} \quad (10)$$

$x_1 > x_2$  이면  $e^{-x_1} < e^{-x_2}$ 이므로 다음 (11)식과 같은 선형 정수 배낭 문제(linear integer knapsack problem)로 풀어서 LB1을 구할 수 있다.

$$\text{LB1} = K \cdot e^{-(\text{Max} \sum_{j \in F} \lambda_j y_j)} \quad (11)$$

$$\text{subject to} \sum_{j \in F} y_j \leq N'$$

$$0 \leq y_j \leq u_j \text{ and integer, } j \in F$$

### Branching Variable Selection Strategy

$$S_1 = \{j \in F : 0 < y_j < u_j\}, S_2 = \{j \in F : y_j = u_j\}$$

라 정의하고, 모든  $j$ 에 대해  $\lambda_j$ 를 내림차순으로 정렬하였을 때의 순위를  $\rho_j$ 라 한다. 또한  $j \in F$ 에 대해 현 노드에 오기까지 분지되었던 변수에 대해서는 1, 아니면 0으로 하는 지정자(indicator)를  $\Delta_j$ 라 할 때, 분지변수의 index  $k$ 는 다음과 같이 선정된다.

$$k = \begin{cases} \arg \text{lexmin}_{j \in S_1} (\Delta_j, \rho_j) & \text{if } S_1 \neq \emptyset \\ \arg \text{lexmin}_{j \in S_2} (\Delta_j, \rho_j) & \text{if } S_1 = \emptyset \end{cases}$$

where  $\text{lexmin}(\cdot) = \text{lexicographically smallest vector}(\cdot)$

이는 다시  $x_k \leq \bar{l}_k + \left(\frac{u_k}{2}\right)$ 와  $x_k \geq \bar{l}_k + \left(\frac{u_k}{2}\right) + 1$ 로 분할된다.

이상을 정리해서 본 모델의 해법절차를 제시해 보면 다음과 같다.

1 단계) AttackPoint  $i$ , Target  $k$ , SAM  $j$ 의 위치로부터 NormalPoint  $ij$ 를 구한다.

2 단계) NormalPoint, BombPoint, Target의 위치에 따라 <그림 2-4>에서 그에 해당하는 격추구간의 SL을 구한다.

3 단계) 격추구간  $[SL', 10]$ 을 정적분해서 SAM  $j$ 에 의한 AttackPoint  $i$ 의 격추확률  $p_{ij}$ 를 구한다.

4 단계)  $\lambda_j$ 를 계산하고 이를 내림차순으로 정렬하여  $\rho_j$ 를 구한다.

$\bar{l}_j = 0, \bar{u}_j = N, j = 1, \dots, J$ 부터 시작한다.

5 단계) 각 마디에 대해 (4)식을 풀어 LB1값을 계산한다.  $LB1 > Z'$ 이면 그 마디 이후는 분지끝시키고,  $LB1 \leq Z'$ 이면  $Z$ 값을 계산하고  $Z'$ 와 비교하여 둘 중 작은 값을  $Z$ 로 개선한다.

6 단계) 분지 변수 선택 전략(Branching Variable Selection Strategy)에 의해 분지한다. 더 이상 분지할 마디가 없으면 현재까지의 최적해  $Z^*$ 가 문제의 최적해가 된다. 그렇지 않으면  $\bar{l}_j, \bar{u}_j$  for  $j \in F$ 를 개선하고 5 단계)로 돌아간다.

### 3. 사례 연구

#### 3.1 적용 사례

<그림 3-1>에서 보는 바와 같이 12개( $J$ , NumberOfSAM)의 SAM 배치후보지, 10개( $I$ , NumberOfAttackPoint)의 공격시작점, 2개( $K$ ,

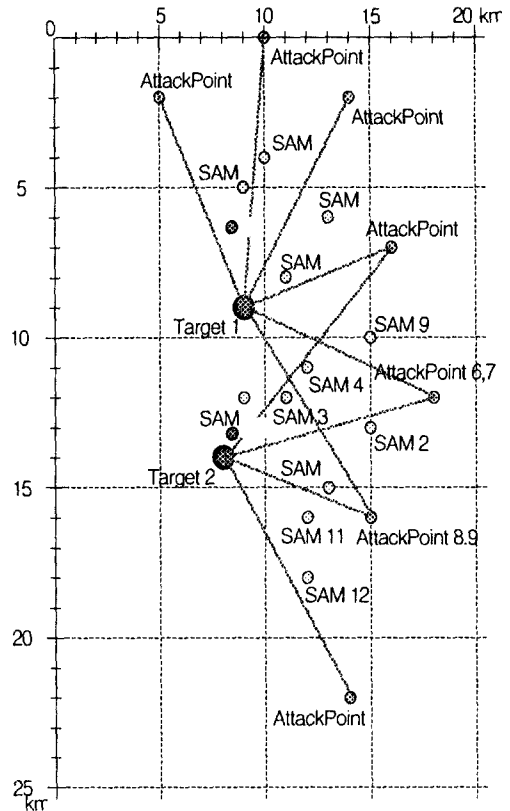
NumberOfTarget)의 공격목표지점이 있다.

그리고 가용 설비수( $N$ )는 3개로 한다.

이들의 좌표를 아래 <표 3-1>에 나타냈다.

<표 3-1> SAM  $j$ , Target  $k$ , AttackPoint  $i$ 의 위치좌표 (단위 km)

$j$	SAM $j$	$i$	AttackPoint $i$	$k$	Target $k$
1	(8, 12)	1	(5, 2) to 1	1	(9, 9)
2	(15, 13)	2	(10, 0) to 1	2	(8, 14)
3	(11, 12)	3	(14, 2) to 1		
4	(12, 11)	4	(16, 7) to 1		
5	(11, 8)	5	(16, 7) to 2		
6	(8, 5)	6	(18, 12) to 1		
7	(10, 4)	7	(18, 12) to 2		
8	(13, 6)	8	(15, 16) to 1		
9	(15, 10)	9	(15, 16) to 2		
10	(13, 15)	10	(14, 22) to 2		
11	(12, 16)	to $k$			
12	(12, 18)	= to Target index $k$			



<그림 3-1> SAM, AttackPoint, Target의 위치



### 3.2 단거리 지대공 미사일의 격추확률 및 해법절차

1 단계) AttackPoint  $i$ , Target  $k$ , SAM  $j$ 의 위치로부터 NormalPoint  $ij$ 를 구한다.

<표 3-2> NormalPoint  $ij$ 의 좌표 (Target 1, 2)

$i \setminus j$	1	2	3	4	5	6
1	(10.1,10.8)	(12.2,14.6)	(10.8,12.1)	(10.6,11.8)	( 9.1, 9.1)	( 7.0, 5.6)
2	( 8.7,12.1)	( 8.6,12.3)	( 8.7,11.7)	( 8.8,10.7)	( 9.1, 7.8)	( 9.4, 5.2)
3	( 7.2,11.5)	( 9.1, 8.8)	( 8.3,10.0)	( 9.1, 8.9)	(10.2, 7.4)	(10.6, 6.8)
4	( 7.3, 9.5)	(13.5, 7.2)	(10.0, 8.7)	(11.3, 8.4)	(11.1, 8.4)	( 9.1, 9.0)
5	( 9.0,13.1)	(12.5,10.1)	(10.7,11.7)	(11.8,10.7)	(12.7, 9.9)	(12.5,10.1)
6	( 9.0, 9.0)	(15.6,11.2)	(11.7, 9.9)	(12.3,10.1)	(10.5, 9.5)	( 6.9, 8.3)
7	( 8.4,13.9)	(14.9,12.6)	(11.3,13.4)	(12.4,13.1)	(12.0,13.2)	( 9.7,13.7)
8	(10.0,10.2)	(13.5,14.3)	(11.3,11.7)	(11.3,11.6)	( 9.4, 9.4)	( 6.6, 6.2)
9	( 7.5,13.9)	(14.2,15.8)	(10.3,14.6)	(10.9,14.8)	( 9.2,14.3)	( 5.6,13.3)
10	( 7.0,12.7)	(10.0,16.7)	( 8.1,14.2)	( 8.0,14.0)	( 6.2,11.6)	( 3.7, 8.2)

$i \setminus j$	7	8	9	10	11	12
1	( 7.1, 5.7)	( 8.7, 8.5)	(10.9,12.3)	(12.6,15.3)	(12.8,15.6)	(13.6,17.1)
2	( 9.6, 4.0)	( 9.4, 5.6)	( 9.0, 9.3)	( 8.4,14.5)	( 8.3,15.6)	( 8.1,17.6)
3	(11.7, 5.2)	(11.8, 5.1)	(10.6, 6.8)	( 7.5,11.0)	( 6.7,12.2)	( 5.8,13.5)
4	(11.3, 8.4)	(13.5, 7.7)	(14.3, 7.5)	(11.1, 8.4)	( 9.9, 8.7)	( 9.4, 8.9)
5	(14.1, 8.7)	(14.8, 8.1)	(14.0, 8.8)	(10.3,12.0)	( 9.3,12.9)	( 8.3,13.8)
6	( 8.4, 8.8)	(11.7, 9.9)	(14.7,10.9)	(14.4,10.8)	(13.8,10.6)	(14.4,10.8)
7	(11.9,13.2)	(14.4,12.7)	(15.5,12.5)	(12.6,13.1)	(11.5,13.3)	(11.1,13.4)
8	( 7.0, 6.6)	( 9.2, 9.3)	(12.0,12.5)	(13.7,14.4)	(13.7,14.5)	(14.7,15.7)
9	( 7.2,13.8)	(10.5,14.7)	(13.4,15.6)	(12.9,15.4)	(12.2,15.2)	(12.8,15.4)
10	( 3.9, 8.6)	( 6.0,11.3)	( 8.6,14.8)	(10.3,17.0)	(10.4,17.2)	(11.4,18.5)

2 단계) NormalPoint, BombPoint, Target의 위치에 따라 <그림 2-4>에서 그에 해당하는 격추구간의 SL을 구한다.

<표 3-2>의 NormalPoint  $ij$ 를 <그림 2-4>의 각 경우에 해당하는 식으로 SL을 구해보면 <표3-3>과 같다.

3 단계) 격추구간 [SL',10]을 정적분해서 SAM  $j$

에 의한 AttackPoint  $i$ 의 격추확률  $p_{ij}$ 를 구한다.  
2 단계) <표 3-3>의 SL $_{ij}$ 로 SL' $_{ij}$ 를 구한다.

$$(SL')^2 = (SL)^2 + (\text{KillHeight})^2$$

<표 3-3>에서 SL $_{ij}$ 가 10(KillDistance+1, 격추구간의 상한, <그림 2-3>)이상일 경우는 SL' $_{ij}$ 를 구할 필요가 없다. (Over)

<표 3-3> SL $_{ij}$  (Target 1, 2)

( 경우(CASE) / SL )

$i \setminus j$	1	2	3	4	5	6
1	I / 4.31	I / 8.58	I / 5.10	I / 4.99	I / 2.76	III / 1.12
2	I / 4.64	I / 8.01	I / 4.85	I / 4.50	II / 1.90	III / 1.44
3	I / 4.62	II / 7.32	I / 4.37	II / 3.86	III / 1.05	III / 3.14
4	I / 4.20	III / 5.49	II / 3.46	III / 2.75	III / 0.41	II / 4.34
5	II / 1.52	III / 3.86	III / 0.47	III / 0.38	III / 2.54	III / 6.77
6	II / 3.50	III / 1.90	III / 2.21	III / 0.95	III / 1.58	I / 5.09
7	II / 2.25	III / 0.39	III / 1.37	III / 2.16	III / 5.30	III / 8.83
8	III / 2.71	III / 1.95	III / 0.43	III / 0.98	II / 2.37	I / 5.51
9	I / 2.81	III / 2.88	III / 2.75	III / 3.98	II / 6.60	I / 9.52
10	I / 3.32	III / 6.20	II / 3.83	I / 5.22	I / 7.50	I / 10.24

$i \setminus j$	7	8	9	10	11	12
1	III / 3.35	II / 5.04	I / 7.13	I / 8.71	I / 9.11	I / 10.96
2	III / 0.44	III / 3.64	I / 6.34	I / 8.42	I / 8.95	I / 10.87
3	III / 2.09	III / 1.51	III / 5.46	I / 7.87	I / 8.49	I / 10.44
4	III / 4.53	III / 1.79	III / 2.61	III / 6.87	II / 7.57	II / 9.54
5	III / 6.21	III / 2.73	III / 1.60	III / 4.05	III / 4.14	II / 5.76
6	I / 5.49	III / 4.11	III / 0.95	III / 4.43	III / 5.69	III / 7.59
7	III / 9.41	III / 6.86	III / 2.55	III / 1.96	III / 2.75	III / 4.71
8	I / 6.14	II / 5.13	III / 3.90	III / 0.87	III / 2.28	III / 3.58
9	I / 10.43	III / 9.07	III / 5.77	III / 0.41	III / 0.82	III / 2.75
10	I / 11.23	I / 10.07	II / 8.02	III / 3.40	III / 2.00	III / 0.80

<표 3-4> SL' $_{ij}$

$i \setminus j$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	4.50	8.68	5.27	5.16	3.05	1.71	3.59	5.20	7.24	8.80	9.20	Over
2	4.82	8.12	5.02	4.68	2.30	1.94	1.37	3.87	6.48	8.51	9.05	Over
3	4.80	7.43	4.56	4.07	1.67	3.40	2.46	1.99	5.62	7.98	8.59	Over
4	4.39	5.65	3.69	3.04	1.36	4.53	4.72	2.21	2.92	6.99	7.68	9.63
5	2.00	4.07	1.38	1.35	2.85	6.90	6.34	3.02	2.06	4.25	4.34	5.90
6	3.73	2.30	2.57	1.61	2.05	5.25	5.64	4.31	1.61	4.61	5.84	7.70
7	2.60	1.36	1.89	2.52	5.45	8.92	9.50	6.99	2.86	2.35	3.04	4.88
8	3.01	2.35	1.37	1.63	2.70	5.66	6.28	5.29	4.12	1.56	2.62	3.81
9	3.10	3.16	3.04	4.19	6.73	9.61	Over	9.16	5.91	1.36	1.54	3.04
10	3.57	6.33	4.04	5.38	7.61	Over	Over	Over	8.12	3.64	2.39	1.53

이제 (4)식에 의해 구간 [SL',10]에서 함수  $y=p'(x)$ 를 정적분하면 된다. 그런데, <그림 2-3>을 잘 살펴보면  $y=p'(x)$ 는 정의역에서 정수구간에서 1차함수이므로 보간법(interpolation)을 사용해서 실수인 SL'의 함수값을 얻고, 정적분은 그래프의 아래부분(<그림 2-3>에서 빗금친 부분)의 넓이를 구해서 얻도록 하자. 이상의 방법으로  $p_{ij}$ 를 구하면  $q_{ij}(=1-p_{ij})$ 는 <표 3-5>와 같다.

<표 3-5> 생존확률  $q_{ij} (=1-p_{ij})$  ( $i=1, \dots, 10, j=1, \dots, 12$ )

i \ j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	.643	.989	.749	.733	.470	.396	.534	.740	.948	.991	.996	1.00
2	.685	.975	.714	.667	.408	.399	.393	.566	.908	.985	.994	1.00
3	.682	.954	.651	.590	.396	.511	.417	.400	.798	.971	.987	1.00
4	.629	.803	.546	.469	.393	.647	.671	.405	.455	.940	.962	.999
5	.400	.590	.393	.393	.448	.936	.895	.467	.401	.611	.622	.839
6	.550	.408	.424	.395	.400	.747	.802	.619	.395	.658	.830	.962
7	.426	.393	.398	.420	.775	.993	.998	.940	.449	.411	.469	.694
8	.465	.410	.393	.395	.434	.804	.888	.752	.595	.395	.428	.559
9	.476	.484	.469	.604	.927	.999	1.00	.996	.841	.393	.394	.469
10	.531	.894	.586	.765	.959	1.00	1.00	1.00	.975	.539	.412	.394

4 단계)  $\lambda_j$ 를 계산하고 이를 내림차순으로 정렬하여  $\rho_j$ 를 구한다.

$$\lambda_j \left( = -\frac{1}{12} \ln \left( \prod_{i=1}^{10} q_{ij} \right) \text{ for } j=1, \dots, 12 \right) \text{를}$$

구하고 이를 내림차순으로 정렬하였을 때의 순위  $\rho_j$ 를 구해보면 <표 3-6>과 같다.

<표 3-6>  $\lambda_j$ 와  $\rho_j$

index	$\lambda_j$	$\rho_j$	index	$\lambda_j$	$\rho_j$
1	0.61735	4	7	0.32869	11
2	0.43918	7	8	0.42860	8
3	0.66009	1	9	0.45237	5
4	0.64302	3	10	0.43985	6
5	0.64344	2	11	0.41456	9
6	0.35362	10	12	0.28493	12

$\bar{t}_j=0, \bar{u}_j=3$  이고 따라서  $u_j=3$ 이다. ( $j=1, \dots, 12$ )

$$F=\{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12\}$$

5 단계) 각 마디에 대해 LB1 값을 계산하고  $Z^*$  값을 개선한다.

$$(11) \text{식을 풀면 } y_3=3, y_j=0 \text{ for } j \neq 3.$$

$$K=10 \left\{ \prod_{i=1}^{10} \prod_{j=1}^{12} (q_{ij})^{\bar{t}_j} \right\}^{\frac{1}{10}} \text{에서 } \bar{t}_j=0 \text{ 이므로}$$

$$\text{이때 } K=10, L=\lambda_3 y_3=1.98027 \text{ 이므로 } LB1=Ke^{-L}=1.3803 \text{ 또, (7)식으로부터}$$

$$Z=Z^* = \sum_{i=1}^{10} \left( \prod_{j=1}^{12} (q_{ij})^{\bar{t}_j} \right) \left( \prod_{j \in F} (q_{ij})^{y_j} \right) = \sum_{i=1}^{10} \prod_{j \in F} (q_{ij})^{y_j} = 1.7866$$

6 단계) 분지 변수 선택 전략에 의해 분지한다.

$x_3 \leq 2$  과  $x_3 = 3$  로 분지한다.  $x_3 \leq 2$  의 경우  $\bar{t}_3=0, \bar{u}_3=2$  이고 다른 변수들의  $\bar{t}_j, \bar{u}_j$ 는 변화없다.

다시 5 단계) 에서

$$y_3=2, y_5=1, L=\lambda_3 y_3 + \lambda_5 y_5=1.96362 \text{에서}$$

$LB1=Ke^{-L}=1.403494$  현행 최적해 1.7866보다 작으므로 이 때의 목적함수 값  $Z$ 를 계산한다.

$$Z = \sum_{i=1}^{10} \prod_{j \in F} (q_{ij})^{y_j} = 1.6210 \text{ 이고 } 1.7866(Z^*) \text{보다 작으므로 현행 최적해가 된다. 즉 } Z^*=1.6210$$

5 단계)

$$y_3=2, y_4=1, L=\lambda_3 y_3 + \lambda_4 y_4=1.96362 \text{에서}$$

$LB1=Ke^{-L}=1.404084$  현행 최적해 1.6210보다 작으므로 이 때의 목적함수 값  $Z$ 를 계산한다.

$$Z = \sum_{i=1}^{10} \prod_{j \in F} (q_{ij})^{y_j} = 1.7954 \text{ 이고 } 1.6210(Z^*) \text{보다 크므로 최적해는 계속 유지된다. 즉 } Z^*=1.6210$$

이후 5 단계) 를 반복하면 5번 노드에서  $LB1=1.6990$ 로 현행해 1.6210보다 크므로 분지끝이 가능하다.

**다시 6 단계) 에서**

$x_3 \leq 1$  과  $x_3 = 2$  로 분지한다.  $x_3 \leq 1$  의 경우  $\bar{v}_3 = 0, \bar{u}_3 = 1$  이고 다른 변수들의  $\bar{v}_j, \bar{u}_j$  는 변  
화없다.

이후 5 단계) 에서 6 단계) 를 반복하면 8번 노드  
에서  $Z=1.6171$ 로 현행 최적해 1.6210보다 작으므로  
개선한다. ( $Z^*=1.6171$ ) 이후 9번 노드에서  $LB1=1.7275$   
로 현행해 1.6171보다 크므로 분지끝이 가능하고, 마  
찬가지로 12, 14, 15, 19, 22, 24, 25, 28, 30, 31, 33,  
34, 35번 노드에서 분지끝이 가능하다.

더 이상 분지할 마디가 없으므로 현재까지의 최  
적해  $Z^*=1.6171$ 가 이 문제의 최적해이다. 이때  
 $x_3 = 1, x_5 = 1, x_1 = 1$  이므로 SAM3 에 1대, SAM  
5 에 1대, SAM 1 에 1대를 설치하는 것이 적기 격  
추울의 합을 최대화한다.

이상의 해법 절차를 다음 <표 3-7>에 도표로  
나타냈다.

<표 3-7> 분지 변수 선택 및 하한 기법에 의한 해법 과정

번 호	분 지 변수												LB1	Z	Z'	비 고
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$x_8$	$x_9$	$x_{10}$	$x_{11}$	$x_{12}$				
1			3										1.380	1.787	1.787	
2			2		1								1.404	1.621	1.621	Optimal
3			2	1									1.404	1.793	"	
4	1		2										1.441	1.773	"	
5			2						1				1.699	>2.284	"	fathom
6			1		2								1.427	1.874	"	
7			1	1	1								1.428	1.731	"	
8	1		1		1								1.465	1.617	1.617	Optimal
9			1		1				1				1.728	>2.194	"	fathom
10			1		2								1.428	1.839	"	
11	1		1	1									1.465	1.773	"	
12			1	1					1				1.728	>2.347	"	fathom
13	2		1										1.504	1.784	"	
14	1		1						1				1.773	>2.243	"	fathom
15			1						2				2.091	>3.027	"	fathom
16					3								1.451	2.677	"	
17			1	2									1.452	2.131	"	

18	1												1.489	1.870	"	
19									1				1.757	>2.703	"	fathom
20									2	1			1.452	1.895	"	
21	1			1	1								1.490	1.716	"	
22				1	1					1			1.757	>2.413	"	fathom
23	2				1								1.529	1.634	"	
24	1				1					1			1.803	>2.164	"	fathom
25										2			2.126	>3.105	"	fathom
26					3								1.453	1.926	"	
27	1				2								1.491	1.806	"	
28					2					1			1.758	>2.465	"	fathom
29	2				1								1.529	1.774	"	
30	1				1					1			1.804	>2.294	"	fathom
31										2			2.121	>3.186	"	fathom
32	3												1.569	1.821	"	
33	2									1			1.851	>2.230	"	fathom
34	1									2			2.183	>2.950	"	fathom
35										3			2.574	>4.153	"	fathom

**3.3 결과 분석**

본 적용사례의 SAM 설비수 1~11에 대하여 최적  
해 및 그 때의 각 예상접근로의 적기에 대한 실제  
격추확률  $\left\{1 - \prod_{i=1}^{10} (1 - p_{ij})^{x_j}\right\}$  은 <표 3-8>과 같다.

<표 3-8> 최적해 및 적기 격추확률

설 비 수	최 적 해	AttackPoint i의 적기를 격추시킬 확률										평 균 격 추 확 률
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	$x_3=1$	.251	.286	.350	.455	.607	.576	.602	.607	.531	.414	0.468
2	$x_3=1$ $x_5=1$	.648	.709	.743	.786	.824	.830	.691	.829	.565	.438	0.706
3	$x_3=1$ $x_5=1$ $x_1=1$	.774	.800	.824	.865	.930	.907	.869	.921	.793	.701	0.838
4	$x_3=1$ $x_5=1$ $x_1=2$	.854	.863	.880	.915	.972	.949	.944	.963	.902	.841	0.908
5	$x_3=1$ $x_5=1$ $x_1=3$	.906	.906	.918	.947	.989	.972	.976	.983	.953	.916	0.947
6	$x_5=2$ $x_1=4$	.962	.963	.966	.976	.995	.985	.980	.991	.956	.927	0.970
7	$x_5=2$ $x_1=5$	.976	.975	.977	.985	.998	.993	.992	.996	.979	.961	0.983
8	$x_5=2$ $x_1=6$	.984	.983	.984	.990	.999	.996	.996	.998	.990	.979	0.990
9	$x_5=3$ $x_1=6$	.993	.993	.994	.996	.999	.998	.997	.999	.991	.980	0.994
10	$x_5=3$ $x_1=7$	.995	.995	.996	.998	.999	.999	.999	.999	.996	.990	0.996
11	$x_5=3$ $x_1=8$	.997	.997	.997	.999	.999	.999	.999	.999	.998	.994	0.998

## 4. 결 론

본 연구는 적 항공기가 아군지역을 공격하는 상황에서 이를 단거리 지대공 미사일을 이용하여 적 항공기를 격추시키기 위한 단거리 지대공 미사일의 최적 배치를 지역담당(Set Covering)이론을 적용하여 연구하였다.

기존 지역담당 모델에서는 어떤 설비로부터 일정한 거리내의 목표물이라면 설비의 특성에 관계없이 일정한 확률로 담당된다고 본다.

그러나 본 모델의 대상이 되는 단거리 지대공 미사일은 무기 체계의 특성상 지대공 미사일 담당 여부면에서 SAM과 접근로 (AttackPoint)의 위치에 따라 격추거리가 달라지며, 담당 확률 산출과정에서 표적거리에 따라 차별적인 격추확률을 부여하는 차이점이 있다.

본 문제의 해법으로는 Sherali-Kim[15]의 분지 및 한계 기법을 이용하였는데 이를 축소된 문제에 적용시켜 본 결과, 상당히 효율적으로 최적해를 구할 수 있었다. 이렇게 구해진 해에 대해 각 목표물의 보호 수준을 결정할 수 있으므로 단거리 지대공 미사일 설비수에 따른 비용대 효과 분석이 가능할 것이다.

본 연구에서는 축소된 문제에 적용시켜 보았는데 실제 상황에 맞는 규모가 큰 문제까지도 적용할 수 있다.

본 모델은 단거리 지대공 미사일의 배치문제와 일정한 범위내로 담당영역이 제한되는 모든 설비의 배치 문제에 적용이 가능할 것이다. 또한, 본 연구에서는 한종류의 설비배치만 고려하였는데 예산의 제약하에서 성능과 비용이 상이한 여러종류의 설비배

치에 관한 모델에서도 본 모델과 마찬가지로 적용이 가능하다.

## 참 고 문 헌

- [1] Bellmore, M., and Ratliff, H.D. "Set Covering and Involutory Bases," Management Science, Vol. 18, No. 3, 1971, pp. 194~206.
- [2] Charnes, A. and Miller, M.H. "A Model for Optional Programming of Railway Freight Train Movements," Management Science, Vol. 18.
- [3] Curry, G.L., and Skeith, R.W. "A Dynamic Programming Algorithm for Facility Location and Allocation," AIIE Transactions, Vol. 1, No. 2, 1969, pp. 133~138.
- [4] Dakin, R., "A Tree Search Algorithm for Mixed Integer Programming Problems," Computer Journal, NJ, 1974.
- [5] Dantzig, G.B., and Ramser, J.H. "The Truck Dispatching Problem," Management Science, Vol. 6, 1960, pp. 80~91.
- [6] Day, R.H., "On Optimal Extracting from a Multiple File Data Storage: An Application of Integer Programming," Operations Research, Vol. 13, No. 3, pp. 489~494.
- [7] Francis, R.L. and White, J.A., Facility Layout and Location : An Analytical Approach, Prentice-hall Inc., 1974.
- [8] Garfinkel, R.S. and Nemhauser, G.L., "Optimal Political Districting by Implicit Enumeration Techniques"

- Management Science, Vol. 16 pp. B495-B508.
- [9] Ignizio, J.P., "A Heuristic Solution to Generalized Covering Problem," Unpublished Ph. D. Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Va., 1971.
- [10] Lawer, L.E., and Wood, D.E. "Branch and Bound Method : A Survey," Operations Research, Vol. 14, No. 4, pp. 699~719.
- [11] Revelle, C., Marks, D. and Liebman, J.C. "Analysis of Private and Public Sector Location Models," Management Science, Vol. 16, No. 12, 1970, pp. 692~707.
- [12] Revelle, C., and Swain, R. "Central Facilities Location," Geogr.Anal., Vol. 2, No. 1, 1970, pp. 30~42.
- [13] Roth, J.P., "Algebraic Topological Methods for the Synthesis of Switching Systems-1," Trans. Amer. Math Soc., Vol. 88.
- [14] Salvenson, M.E. "The Assembly Line Balancing Problem," Journal of Industrial Engineering, Vol. 6, No. 3, pp. 519~526.
- [15] Sherali, H.D and Kim, S.I., "Probabilistic Partial Set Covering Problems," Naval Research Logistics, Vol. 38, 1991, pp. 41~51.
- [16] Sherali, H.D and Myers, D.C., "The Design of Branch and Bound Algorithms for a Class of Nonlinear Integer Problems," Annals of Operations Research, Vol. 5, 1986, pp.463~484.
- [17] 공군 작전사령부, "킬프전 분석," 에이스 51호 특집, Vol. 61~65, pp. 86~88.
- [18] 국방부, 『국방백서(1991-1992)』, 1991. 11.
- [19] 김성인, "군사시설의 최적위치결정을 위한 지역 담당(Set Covering)모델 및 해법의 개발," 제 4 회 화랑대 심포지움 논문집, 육군사관학교, 1987.
- [20] 방공포병학교, 방공포병자료집(95-4호), 1995
- [21] 오원민, "Patriot 미사일의 최적배치에 관한 연구", 고려대학원, 석사학위논문, 1993
- [22] 오제상, "신뢰도를 최대화하는 지역담당 모델," 고려대학교 석사학위논문, 1982.
- [23] 육군본부, "단거리 지대공 유도무기 운용", 야전교범 44-37, 1998, p.1-2