

# Simulated Annealing 알고리즘을 이용한 SAM-X 추가전력의 최적배치

이상현<sup>†</sup> · 백장욱

국방대학교 운영분석학과

## Efficient Simulated Annealing Algorithm for Optimal Allocation of Additive SAM-X Weapon System

Sang-Heon Lee · Jang-Uk Baek

Department of Operations Research, Korea National Defense University, Seoul, 122-875

This study is concerned with seeking the optimal allocation(disposition) for maximizing utility of consolidating old fashioned and new air defense weapon system like SAM-X(Patriot missile) and developing efficient solution algorithm based on simulated annealing(SA) algorithm. The SED(selection by effectiveness degree) procedure is implemented with an enhanced SA algorithm in which neighboring solutions could be generated only within the optimal feasible region by using a specially designed PERTURB function. Computational results conducted on the problem sets with a variety of size and parameters shows the significant efficiency of our SED algorithm over existing methods in terms of both the computation time and the solution quality.

**Keywords:** set covering, simulated annealing, selection by effectiveness degree, SAM-X

### 1. 서론

지역담당(Set Covering)모형이란 설비의 도입 및 배치 시 수학적 분석방법을 이용하여 적정 수량과 최적의 배치를 판단할 수 있는 기법으로 여러 형태의 배치문제에 폭넓게 적용되어 왔으며 특히 무기체계 배치와 같이 보다 체계적인 분석노력이 필요한 군사설비분야에서 그 활용도가 더욱 높다.

본 연구에서는 신규 무기체계 설비배치 시 기존 전력 기반 위에 신·구 전력의 전체 능력을 통합적으로 평가하여 최적의 설비배치를 결정할 수 있는 새로운 지역담당모형을 개발하였고, 이 모형을 이용하여 한국공군에서 추진중인 SAM-X 사업의 패트리엇 배치문제에 적용함으로써 그 활용방안을 제시한다.

지역담당문제는 NP-Complete 문제로 그 해를 구하기 위해

상당한 계산노력이 필요하다(Garey and Johnson, 1979). 또한 본 연구에서처럼 여러 유형의 장비들을 모형 내에 동시에 구성하고 장비별 고유능력뿐만 아니라 패트리엇과 같이 설치방향에 따라 영향을 받는 장비특성을 반영하여 문제를 구성한다면 엄청난 규모의 조합최적화 문제(large scale combinational optimization problem)가 될 것이다.

따라서 본 연구에서는 새로운 지역담당모형의 개발과 더불어 다양한 형태의 조합최적화 문제들에서 이미 그 활용도를 인정받은 SA(Simulated Annealing) 알고리즘을 활용하여 대규모 설비배치 문제에 대한 해 유도과정으로 구성하고 이 과정에서 야기되는 부분적인 제한사항들을 보완하였으며 여러 형태의 실험과 비교분석을 통해 메타휴리스틱 기법이 지역담당문제에 대한 일반 해법절차가 될 수 있음을 제안하고자 한다.

본 연구는 2005년도 국방대학교 안보문제연구소 학술연구과제사업의 연구비 지원으로 수행되었음.

<sup>†</sup>연락처 : 이상현 교수, 122-875 서울시 은평구 수색동 205번지 국방대학교 운영분석학과, Fax : 02-309-6233,

E-mail : leesangh@kndu.ac.kr

2005년 2월 접수, 1회 수정 후 2005년 10월 게재 확정.

## 2. 기존 연구 고찰

### 2.1 지역담당(Set Covering) 모형

지역담당문제는 주어진 지역 내 모든 고객을 담당할 수 있는 최소의 설비 수와 위치를 결정하기 위한 전체담당문제와 가용한 예산한도 내에서 가능한 많은 수의 고객을 담당할 수 있는 설비배치를 결정하기 위한 부분담당문제로 구분된다 (Francis and White, 1974). 그리고 설비의 고객에 대한 담당 여부에 확률개념을 도입하고 중복담당효과를 고려할 수 있는 신뢰도 모형(Oh, 1981)이 있다.

#### 2.1.1 전체지역담당(Total Set Covering) 모형

전체지역담당 모형이란 모든 고객이 최소한 하나 이상의 설비로부터 담당되면서 설비배치에 드는 총 비용을 최소화하기 위한 것으로 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Min } Z &= \sum_{j=1}^n C_j X_j & (1) \\ \text{s.t. } \sum_{j=1}^n A_{ij} X_j &\geq 1, \quad \text{for } 1 \leq i \leq m \\ X_j &= 0 \text{ or } 1, \quad \text{for } 1 \leq j \leq n \\ A_{ij} &= 0 \text{ or } 1, \quad \text{for } 1 \leq i \leq m, \\ & \quad 1 \leq j \leq n \end{aligned}$$

위의 식 (1)에서  $C_j$ 는 설비를 후보지  $j$ 에 1대 배치하는 비용이고  $A_{ij}$ 는 고객담당 여부로 고객  $i$ 가 후보지  $j$ 에 배치되는 설비로부터 담당될 수 있으면 1, 그렇지 않으면 0이 되며  $i, j$ 의 관계에 따라 미리 결정되는 값이다.  $x_j$ 는 결정변수로 설비  $j$ 에 배치되면 1, 그렇지 않으면 0으로 표현된다. 만약, 각 후보지별로 설비배치비용( $C_j$ )이 일정하다면 총 배치수량의 최소화 문제  $\text{Min } Z = \sum_{j=1}^n X_j$ 로 변형하여 적용할 수 있다.

전체담당문제의 해를 구하는 방법으로는 정수계획법에 의한 평면절단기법(Bellmore and Ratliff, 1971)과 분지한계법(Lawer and Wood, 1996) 등이 있는데, 이들 기법은 항상 최적해를 구할 수는 있으나 문제의 규모가 조금만 커져도 해를 찾는 데 제한이 따른다.

#### 2.1.2 부분지역담당(Partial Set Covering) 모형

부분지역담당 모형은 가용예산 등의 제한사항으로 인해 주어진 자원(비용, 설비 수 등) 한도 내에서 고객담당을 최대화시킬 수 있는 설비배치를 판단하기 위한 것으로 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Max } Z &= \sum_{j=1}^m \left( \max_j A_{ij} X_j \right) & (2) \\ \text{s.t. } \sum_{j=1}^n X_j &\leq Y \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_j &= 0 \text{ or } 1, & \text{for } 1 \leq j \leq n \\ A_{ij} &= 0 \text{ or } 1, & \text{for } 1 \leq i \leq m, \\ & & 1 \leq j \leq n \end{aligned}$$

위의 식 (2)에서 목적함수 내  $\max A_{ij} X_j$ 는 고객담당규모를 판단하기 위한 것으로 한 고객( $i$ )이 여러 설비들( $j$ )로부터 중복 담당되더라도 목적함수 값에는 오직 1만 증가시킴을 의미하며, 제약식  $\sum_{j=1}^n X_j \leq Y$ 는 총 배치수량이 가용량( $Y$ )을 초과할 수 없다는 것이고 주어진 자원이 전체예산( $C$ )이라면  $\sum_{j=1}^n C_j X_j \leq C$ 로 변경하여 적용할 수 있다.

부분지역담당 문제의 해를 구하기 위한 방법으로는 분지한계법(Lawer and Wood, 1996)과 Ignizio(1971)가 개발한 휴리스틱 기법 등이 있다.

#### 2.1.3 신뢰도(Reliability Set Covering) 모형

앞에서 살펴본 두 모형 식 (1)과 식 (2)는 설비의 고객담당 여부를 평가함에 있어 설치후보지로부터 담당되는나(1)와 안 되느냐(0)의 두 상태로만 구분하였고 하나의 설비가 특정고객을 담당하는 것과 여러 설비가 동시에 담당하는 것을 동일하게 취급하였다. 그러나 현실세계에서 이러한 확정적인 상황은 거의 있을 수 없고 하나의 설비로부터 고객이 담당되는 것보다는 동시에 여러 설비들로부터 중복하여 담당되는 것이 훨씬 더 효과적일 것이다. 기존 모형의 이러한 제한사항을 보완하기 위해 Oh(1981)는 고객담당 여부에 확률개념을 도입하고 중복담당효과를 고려할 수 있는 병렬구조의 신뢰도모형을 개발하였다.

신뢰도모형은 부분담당문제를 보다 일반화시킨 형태로 식 (3)과 같이 표현할 수 있으며 주어진 자원한도를 초과할 수 없다는 제약하에 모든 설비들이 각 고객을 담당할 수 있는 전체 확률을 최대화시키는 것을 목적으로 한다.

$$\begin{aligned} \text{Max } Z &= \sum_{i=1}^m W_i \{1 - \prod_{j=1}^n (1 - p_{ij})^{X_j}\} & (3) \\ \text{s.t. } \sum_{j=1}^n X_j &\leq Y \\ X_j &= 0 \text{ or } 1, & \text{for } 1 \leq j \leq n \\ W_i &\geq 0, & \text{for } 1 \leq i \leq m \\ 0 \leq P_{ij} &\leq 1, & \text{for } 1 \leq i \leq m, \\ & & 1 \leq j \leq n \end{aligned}$$

위의 식 (3)에서  $Y$ 는 제한된 설비수이고,  $P_{ij}$ 는 고객  $i$ 가 설비  $j$ 로부터 담당될 수 있는 확률이며,  $W_i$ 는 고객의 중요도를 구분하기 위한 가중치로 모든 고객의 여건이 동일하다면  $W_i = 1$ 이 되어 수식에서 생략할 수 있다.

신뢰도모형에 대한 해법으로는 비선형의 수식을 단순한 선형문제로 재구성한 후 분지한계법을 적용한 Kim(1987)의 해법과 Yoshiaki(1975)의 휴리스틱 기법을 변형한 효과도법(Oh,

1981) 등이 있다.

### 2.2 기존 모형 분석

Oh(1981)의 신뢰도모형이 개발된 이후 레이더기지, 포병진지, 패트리엇 배치 등 여러 군사 분야에서 이 모형을 적용한 많은 연구들이 이루어졌고, 군사설비 배치를 위한 모형개발에서 만큼은 외국보다 오히려 국내에서 그 연구가 활발하게 진행되고 있다(Kim, 1987; Kim, 2003).

또한 지역담당모형은 단일유형의 설비배치뿐만 아니라 여러 형태의 설비들을 각각의 능력과 수준을 고려하여 최적의 배치를 판단할 수 있는 모형에 대해서도 연구되었다. 이러한 연구로 Kim(1983)은 각 설비별 능력과 배치비용이 서로 다른 상황에서 신뢰도모형을 적용한 배치모형을 구성하고 예산을 최소로 사용하면서 전체고객의 담당신뢰도를 최대화시킬 수 있는 식 (4)와 같은 모형을 제시하였다. 여기서 결정변수  $X_{jk}$ 는  $k$  후보지에  $j$  유형 설비의 배치를 의미하고,  $C_{jk}$ 는 이때의 비용이며  $Y$ 는 총 가용예산이 된다.

$$\begin{aligned}
 \text{Max } Z &= \sum_{i=1}^m W_i \left\{ 1 - \prod_{j=1K \in K(j)} (1 - p_{ijk})^{X_{jk}} \right\} & (4) \\
 \text{s.t. } & \sum_{j=1K \in K(j)} C_{jk} X_{jk} \leq Y \\
 & \sum_{j=1}^n X_{jk} \leq 1, \quad \text{for } 1 \leq k \leq K \\
 & X_{jk} = 0 \text{ or } 1, \quad \text{for } 1 \leq j \leq n, \\
 & \quad \quad \quad 1 \leq k \leq K
 \end{aligned}$$

상기 연구에서는 모형 자체에 설비의 종류를 구분할 수 있는 장치는 마련하였으나 각 설비별 성능과 특성을 어떻게 구현시킬 수 있는가에 대한 실질적인 방법론은 제시하지 못하였다. 이러한 분야는 군사설비 배치문제에서 많은 연구가 이루어졌고 한 예로 Lee(1989)는 설비별 배치효과를 구체화시키기 위해 표적정보, 화기특성, 진지정보와 합동무기효과교범(JMEM)에서 인용한 계수 등을 통해 표적제압확률, 즉 고객담당확률을 산출하여 포병화기 배치문제에 적용하였다.

고객담당확률 산출에 대한 변형은 다양한 종류의 무기체계 배치문제 연구가 확대되었다. PATRIOT와 같은 무기체계는 자체의 성능뿐만 아니라 설치방향에 따라 좌우 60도 범위로만 사격이 가능한 고유의 설치특성을 지니는데, Oh(1994)와 Kim(2003)은 이러한 장비특성을 반영하고 고객과 설비 간 거리, 각 후보지별 여건 및 설비의 설치방향, 적 위협 등을 종합적으로 고려하여 고객담당확률을 유도하고 제한된 배치수량으로 영역 내 모든 중요 시설들의 담당확률을 최대화시킬 수 있는 식 (5)의 배치모형을 제시하였다. 이 수리모형에서 결정변수  $x_{kl}$ 은  $k$  위치에  $l$  방향으로 설치된 장비의 수이고 고객담당확률  $P_{ijkl}$ 은 적 위협  $j$ 에 대해  $k$  위치에  $l$  방향으로 설치된 장비로부터 고객  $i$ 가 보호받을 수 있는 확률을 의미한다.

$$\text{Max } Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left\{ 1 - \prod_{k=1}^K \prod_{l=1}^L (1 - p_{ijkl})^{x_{kl}} \right\} \quad (5)$$

$$\begin{aligned}
 \text{s.t. } & \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L x_{kl} \leq N \\
 & x_{kl} \geq 0, \quad 1 \leq k \leq K, 1 \leq l \leq L
 \end{aligned}$$

그러나 식 (5)는 수리모형 구성에 있어 단일유형 배치문제뿐만 아니라 기존부터 운용중인 기반전력과 연계성에 의한 실질적인 배치효과를 판단하기에는 제한되고 제약조건 또한 미흡하여 배치효과가 큰 후보지에만 전력을 집중배치함으로써 전 고객에 대한 균형적인 서비스제공이 제한된다. 따라서 호크, 천마, 주한미군 유도탄전력 등의 기반하에 최적의 배치효과를 평가해야 하는 SAM-X 배치계획 등의 실제 군사문제에 적용하기에는 어렵다고 판단된다.

### 2.3 기존 해법 분석

지역담당모형의 해를 구하기 위한 방법으로는 크게 정수계획법에 의한 방법(Bellmore and Ratliff, 1971; Garfinkel and Nemhauser, 1969; Lawer and Wood, 1996)과 휴리스틱 기법에 의한 방법(Ignizio, 1971; Yoshiaki, 1975) 등을 주로 활용하였다.

일반적으로 지역담당문제는 NP-Complete 문제로 정수계획법에 의한 해법들을 이용할 경우 정확한 해를 구할 수 있는 반면 문제의 크기가 커질수록 계산시간도 지수적으로 증가하게 된다(Garey and Johnson, 1979). 또한 최근의 지역담당모형에 대한 연구들은 모형구조가 매우 복잡하고 문제의 규모 역시 방대하게 모델링되는 추세이다. 따라서 대규모 지역담당모형에 대한 해법으로는 합리적인 시간 내에 근사 최적해를 제공할 수 있는 휴리스틱 접근방법이 효율적이라 판단된다.

지역담당문제에 대한 기존의 휴리스틱 해법으로는 Ignizio (1971) 알고리즘을 많이 활용하였고 신뢰도모형이 개발된 이후에는 비선형의 수식을 계산하기 위하여 Yoshiaki(1975) 알고리즘을 변형한 효과도법(Oh, 1981)이 주 해법으로 사용되어왔다. 이들 해법은 비교적 짧은 계산시간에 상대적으로 우수한 근사해를 구할 수 있는 반면, 그 기본구조(<Figure 1>)가 그리디 기법(greedy algorithm)을 근간으로 하기 때문에 국부최적해에 빠질 위험성을 많이 내재하고 있다.

최근 들어서는 지역담당문제에 범용의 휴리스틱 기법을 도입한 다양한 연구들이 발표되었다. Jacobs and Brusco(1994)는 SA에 기반을 둔 해 유도과정을 제안하였고, Beasley and Chu(1996)는 GA(Genetic Algorithm)에 기반을 둔 방법을, Lee and Han(1999)은 SA와 GA 두 방법을 결합한 알고리즘을 제안한 바 있다. 이러한 연구들은 메타휴리스틱 기법을 이용하여 기존의 그리디 기법에서 갖는 국부탐색(local search)의 단점을 극복하고 전역 최적해를 유도해냄으로써 이들 기법이 지역담당문제에 대한 효율적인 해법절차가 될 수 있음을 제시하였다. 그러나 연구에

적용된 배치문제 자체가 지역담당모형에서 가장 단순한 형태의 전체담당문제 식 (1)로 한정되었고 부분담당문제 식 (2)나 수리모형 구조 자체가 전혀 다른 신뢰도모형 식 (3)~식 (5)를 적용하여 그 효율성을 검토해본 사례는 매우 드물다.

신뢰도모형이 개발된 이후 군사설비 배치문제들은 배치상황을 보다 현실적으로 구현하기 위해 복잡한 구조의 대규모 비선형문제로 확대되고 있다. 하지만 모형의 해법에 관한 연구들(Jacobs and Brusco, 1994; Beasley and Chu, 1996; Lee and Han, 1999)은 신뢰도모형에 비해 현실성이 떨어지고 활용도가 낮은 전체담당모형을 기반으로 연구되었기 때문에 부분담당모형이나 신뢰도모형을 포함한 전반적인 배치문제들에 적용 가능한 해법으로 단정하기 어렵고 이를 위해서는 모형의 개발추세에 상응하도록 보다 일반화된 신뢰도모형으로 그 연구범위를 확대시켜야 할 것이다.

따라서 본 연구에서는 신뢰도모형을 적용한 대규모 배치문제에 SA를 도입하여 해 유도과정을 구성하고 그 효율성을 평가함으로써 메타휴리스틱 기법이 대규모 군사설비 배치문제를 위한 일반해법이 될 수 있는가를 판단하고자 한다.

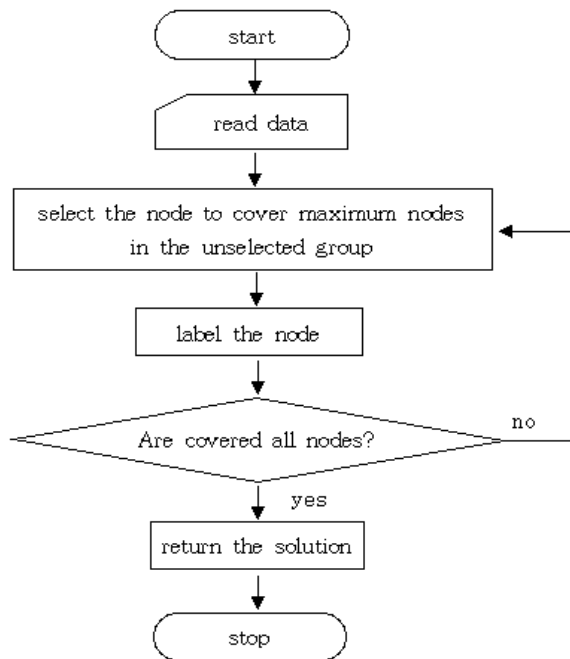


Figure 1. Basic structure of greedy algorithm.

지닌 신규전력의 추가배치 시 신·구 전력이 함께 발휘하게 될 통합방공능력을 최대화할 수 있는 지역담당문제를 구상하였다.

본 연구의 배치상황 <Figure 2>에서 기반전력인 호크는 기존부터 운용해온 자산이기 때문에 그 배치규모가 이미 고정되어 있다. 그리고 SAM-X 전력 규모 역시 사업추진 시부터 확정된 상태로 정해진 수량의 장비가 도입될 것이며, 각 후보지별로 설치비용이 다를 수는 있겠지만 이 비용차이로 인해 도입수량이 변경되지는 않을 것으로 예상된다. 따라서 이 문제는 여러 형태의 설비들을 제한된 수량만큼 배치하여 전체적인 고객담당을 최대화시키기 위한 조합최적화문제로 구성할 수 있다. 추가적으로 배치상황을 보다 세부적으로 구현하기 위해 유도탄의 설비특성을 반영한다면, 고객은 담당영역 내 인원과 시설이 되고 서비스의 대상은 적 공중위협이며 서비스 주체는 여러 유형의 유도탄 무기체계로 이중 일부 장비(패트리엇)는 설치방향에 영향을 받는 고유의 설치특성을 갖는다.

3.1.2 최적배치모형 설계

앞에 서술한 상황을 종합하여 배치모형을 구상하면, 각 장비별 운용규모가 확정된 상태에서 주어진 고객들에게 제공할 전체 서비스를 최대화시키는 배치방안을 연구하기 위해 부분담당모형을 구간으로 하며 신·구 전력이 함께 발휘하게 될 전체 능력을 비교하고 각 고객들이 여러 설비들로부터 동시에 서비스되는 중복효과를 판단할 수 있도록 병렬구조의 신뢰도모형을 적용하여 수리모형을 설계하였다.

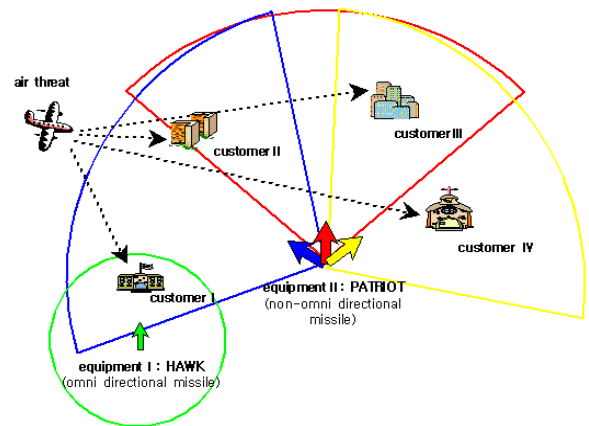


Figure 2. Definition of problem situation.

3. 최적배치모형 설계와 해유도과정

3.1 최적배치모형 설계

3.1.1 문제 정의

본 연구에서는 기존 전력(호크)의 운용환경에서 패트리엇과 같이 설치방향에 따라 서비스영역이 변경되는 설치특성을

고객담당 여부는 적 공중위협  $j$ 에 대해 중요시설  $i$ 가  $k$  후보지에  $\theta$  방향으로 설치된  $l$  유형 장비로부터 보호받을 수 있는 확률  $p_{ijkl\theta}$ 로 구분하였을 때, 중요시설  $i$ 가  $j$  위협으로부터 모든 장비들에게 보호받을 수 있는 확률은 식 (6)과 같은 병렬구조의 신뢰도 수식으로 표현할 수 있다.

$$1 - \prod_{k \in K} \prod_{l=1}^L \prod_{\theta \in \Theta(k,l)} (1 - p_{ijkl\theta})^{x_{kl}} = 1 - \prod_{k \in K} \prod_{l=1}^L \prod_{\theta \in \Theta(k,l)} q_{ijkl\theta}^{x_{kl}} \quad (6)$$

위의 식 (6)에서  $k \in k(l)$ 은 장비유형별로 가용한 입지 후보지를 의미하고  $\theta \in \Theta(k, l)$ 은 설치방향에 영향을 받는 장비의 각 입지후보지별 가용한 설치방향을 나타낸다.

본 연구에서는 기반전력 및 신규전력의 운용규모가 확정된 상태의 배치문제를 고려해야 하기 때문에 제약조건은 유형별 전력의 가용량( $B_l$ )이 되고 추가적으로 방호목표들에 대한 균형적인 서비스 제공과 설비 자체의 생존성 보장도 함께 고려해야 한다. 본 배치모형은 이러한 제약조건을 만족시키면서 배치될 전력들이 서비스 대상이 되는 적 공중위협들로부터 방호 목표들에게 제공할 수 있는 전체적인 서비스 규모를 산출해낼 수 있어야 하며 이를 종합하면 식 (7)과 같은 수리모형으로 표현할 수 있다. 이 모형은 유형별 배치수량( $B_l$ )과 부지별 설치 허용량을 초과하지 않으면서 적 공중위협( $j$ )으로부터 지역 내 중요시설( $i$ )들을 최대로 보호할 수 있는 설비배치를 판단할 수 있다. 여기서 결정변수( $x_{kl\theta}$ )는 각 후보지별 장비배치 여부로 장비유형과 설치방향이 함께 산출된다.

$$\begin{aligned} \text{Max } Z = & \sum_{l=1}^m \sum_{j=1}^n \{1 - \prod_{k \in K(l)} \prod_{l=1}^L \prod_{\theta \in \Theta(k, l)} (1 - p_{ijkl\theta})^{x_{kl\theta}}\} \quad (7) \\ \text{s.t. } & \sum_{k \in K(l)} \sum_{\theta \in \Theta(k, l)} x_{kl\theta} \leq B_l, \text{ for } 1 \leq l \leq L \\ & \sum_{l=1}^L \sum_{\theta \in \Theta(k, l)} x_{kl\theta} \leq 1, \text{ for } 1 \leq k \leq K \\ & x_{kl\theta} = 0 \text{ or } 1, \text{ for } 1 \leq k \leq K, \\ & \quad 1 \leq l \leq L, 1 \leq \theta \leq \Theta \end{aligned}$$

배치모형 식 (7)은 신·구 전력이 동일한 임무를 수행한다는 전제하에 기존의 호크전력 기반에서 설치방향에 영향을 받는 패트리엇라는 신규전력을 추가배치하기 위해 개발된 것이지만 모형 내에 설비유형을 구분하고 각각의 장비특성과 배치여건을 반영할 수 있도록 보다 일반화된 구조를 이루고 있기 때문에 모형의 활용에 있어 신규설비의 초도배치문제뿐만 아니라 다양한 상황변화에 따라 탄력적인 운용이 가능하다. 실제로 호크전력은 평시 현진지에서 임무를 수행하지만 긴급상황 시 이동전개가 가능하도록 수개씩의 예비진지를 보유하고 있다. 그리고 새로 도입될 패트리엇 역시 전개능력을 보유한 무기체계로 당연히 공군구성군사령부 예하 전시 이동전력으로 운용될 것이기 때문에 극단적인 경우에는 호크 및 패트리엇 전력전체를 전면 재배치시켜야 하는 상황도 발생할 수 있다.

따라서 본 연구는 평시 신규전력에 대한 초도배치문제뿐만 아니라 전시나 긴급상태 등의 긴박한 환경에서 신속한 의사결정을 필요로 하는 극단적인 배치문제들에 오히려 그 활용도가 높을 것으로 판단된다. 그리고 이러한 의사결정과정에서 본 연구가 광범위하게 활용되기 위해서는 현실적인 모형구성뿐만 아니라 모형에 대한 신속한 계산체계가 구축되어야 할 것이며 이를 위해 본 연구에서는 복잡한 구조로 이루어진 비선

형의 배치모형들에 대한 효율적인 해법절차에 대해 추가 연구하였다.

### 3.2 Simulated Annealing 알고리즘을 이용한 해 유도과정

신뢰도모형이 개발된 이후 최근 군사설비 배치에 대한 연구는 대부분 병렬신뢰도구조를 적용하고 있기 때문에 단순한 조합최적화 문제가 아닌 복잡한 구조의 비선형문제로 변형되었고 모형 내에 설비유형을 구분하여 여러 설비들을 동시에 구성한다면 문제의 규모 역시 설비종류에 비례하여 증가하게 되고 또한 이 문제는 조합(combination)문제에서 순열(permutation)문제로 전환하게 된다. 뿐만 아니라 패트리엇과 같이 설치방향에 영향을 받는 설비특성을 모형에 반영한다면 동일후보지상에서도 무수히 많은 경우의 수가 생기게 되고 이 모든 상황을 고려할 경우 엄청난 규모의 조합최적화 문제(large scale combinatorial optimization problem)로 확대될 것이며 해공간 역시 매우 넓고 복잡한 구조로 형성될 것이다.

본 연구에서는 새로 제시한 병렬 신뢰도구조의 수리모형 식 (7)에 대한 해법으로 그 구조가 단순하면서도 전역탐색(global search)능력이 우수한 SA를 이용하여 기본적인 해법 알고리즘을 구성하고 이 과정에서 야기될 수 있는 부수적인 제한사항들을 파악하여 보완함으로써 대규모 배치문제에 대한 일반해법으로 제시하고자 한다.

Kirkpatrick *et al.*(1983) 등이 제안한 SA는 기존의 반복적인 개선(iterative improvement)에 근거한 휴리스틱 기법들이 국부최적해(local optimal solution)에 빠져버리는 단점을 보완한 최적화 기법으로 현재까지 CAD를 비롯한 여러 분야에서 응용되고 있다. 일반적으로 사용되고 있는 SA 알고리즘의 기본형태는 <Figure 3>과 같고 목적함수를 최소화(또는 최대화)하는 조합최적화 문제에서 현재해  $X$ 를 선택하고,  $X$ 의 이웃해  $Y$ 를 얻어 이동하는 과정을 반복함으로써 전체 해공간을 탐색하며, 이 탐색 결과 근사최적해를 얻을 수 있게 된다. 이웃해로의 이동은 현재해보다 목적함수를 개선시킬 수 있는 경우에 허용되는데, 이 과정을 반복하다보면 국부최적해에 빠지는 결과를 가져올 수 있기 때문에 온도  $T$ 에 대한 에너지변화에 따른 확률  $\exp(-\frac{\Delta C}{T})$  (metropolis criterion)에 의해 목적함수 개선이 없는 이웃해로의 이동도 허용함으로써 SA가 국부최적해에 빠졌을 경우, hill climbing 방법을 통해 이를 탈피할 수 있도록 하여준다.

SA는 기본개념이 단순하여 쉽게 사용이 가능하고 전역최적해(global optimal solution)로의 수렴성이 이론적으로 증명된 바 있으며 많은 실험결과들에서도 그 타당성이 확인되었다(Kim *et al.*, 2000). 하지만 이러한 적용결과들에서 거의 일치된 결론으로 SA는 충분한 계산시간이 주어진다면 최적해로 수렴할 수 있는 반면 규모가 큰 문제에서는 전체 해공간을 탐색하는 데 너무나 많은 시간이 걸린다는 단점이 있다(Yeun and Cho, 1996).

```

Algorithm SA
begin;
INITIALIZE(X, T, L);
repeat;
for i=1 to L do
Y=PERTURB(X);
if (C(Y)≤C(X)) or
(exp((C(X)-C(Y))/T)>random(0,1))
then X=Y; {accept the movement}
endif;
end for;
UPDATE(T, L);
until (Stop-criterion)
end
    
```

Figure 3. SA algorithm.

따라서 본 연구와 같은 대규모 배치문제나 상황이 긴박한 전력 재배치상황에 SA를 활용하기 위해서는 해의 질을 떨어뜨리지 않으면서 계산시간을 단축시킬 수 있도록 SA의 변형이 필요하였고 이를 위해 Yeun and Cho(1996)가 제안한 ASA (Accelerated Simulated Annealing) 알고리즘을 적용하여 대규모 배치문제에 대한 해유도과정을 구성하였다. 또한 군사설비 배치문제의 특성상 세밀하게 구성된 제약조건들을 구현시킴에 따라 크고 복잡해진 해공간 내에서도 이웃해 선별과정을 효과적으로 수행할 수 있는 방안에 대해 추가 제시하였다.

3.2.1 ASA(Accelerated Simulated Annealing)를 이용한 해유도과정

본 연구에서는 수렴시간 단축을 위해 ASA를 적용하고 해의 변동공간을 비가능해(infeasible solution) 영역까지 포함할 수 있도록 해유도과정<Figure 4>을 구성하였다. ASA는 SA의 기본 구조를 변화시키지 않으면서 내부 루프에서 마코프 체인의 평형성을 더욱 강화시켰기 때문에 SA의 장점과 이론적 조건은 그대로 유지하면서도 수렴속도가 매우 빨라질 수 있다(Yeun and Cho, 1996). 비가능해를 포함한 해공간의 탐색은 이웃해의 선별이 보다 빠르고 간단하게 이루어질 수 있고 해가 국부최소점에서 빠져 나올 수 있는 가능성도 높여준다(Kim et al., 2000).

<Figure 4>의 해 유도과정은 SA의 기본특성을 그대로 유지하면서 수렴속도를 개선시키기 위해 다음과 같은 사항들을 보완하였다.

- (1) 초기 컨트롤 파라미터( $T$ ) 설정 시 해를 받아들이는 비율을 이용하여 결정함으로써 과도하게 높은 온도로 설정하는 것을 피하였다. 신뢰도모형은 일련의 담당확률들을 병렬구조로 계산하기 때문에 목적함수 값들이 매우 작다. 따라서 초기온도를 목적함수 값에 근거하여 적당히 낮은 수치로 지정하지 않는다면 지나치게 많은 시간 동안 hill climbing을 허용하게 되어 자칫 임의탐색과정으로 전락할 수 있다.

- (2) 내부 루프( $L$ )를 최소값으로 지정하고 필요한 때만 수행 횟수를 늘려주는 방식을 취하였고 대신에 내부 루프 동안 목적함수 값이 떨어지지 않는 경우 그  $T$ 에서 안정상태에 도달하지 못한 것으로 간주하여 일정한도의 내부 루프를 증가시켜 주는 방식을 적용함으로써 불필요한 내부 루프들을 생략할 수 있다.
- (3) 냉각 스케줄은 기하형태를 적용하였고 현재까지의 가장 좋은 해를 계속 기억해 나가면서 그 값을 개선시킨  $T$ 에서는 내부 루프를 한번 더 돌리는 방식을 수용함으로써 좋은 해를 찾을 가능성을 보다 높일 수 있다.

```

Algorithm ASA
INITIALIZE(X, T, L);
X_best=X;, Counter1=0;, Counter2=0;
repeat;
Costold=C(X);, Check=0;
for i=1 to L do
Y=PERTURB(X);
if (C(Y)≤C(X)) or
(exp((C(X)-C(Y))/T)>random(0,1))
then X=Y; {accept the movement}
if (C(X)≤C(X_best))
then X_best=X;, Counter2=0;, Check=1;,
L=L+L;
else Counter2=Counter2+1;
end for;
Costnew=C(X);
UPDATE(T, Costnew, Costold, Check);
if (Costnew=Costold)
then Counter1=Counter1+1;
else Counter1=0;
until (Counter1>M or Counter2>N);
UPDATE(T, Costnew, Costold, Check)
if(Check=1 or Costnew<Costold)
then T=a×T;
C(X): C(X)+C×Penalty; // C: the # of
infeasible components
    
```

Figure 4. ASA algorithm.

- (4) 종료조건은 정해진 외부 루프 동안 목적함수의 변화가 없거나 내부 루프 안에서 최소점을 갱신하는 간격을 이용하여 두 조건 중 하나가 먼저 만족되면 알고리즘을 종료시킴으로써 해의 개선 없는 낮은  $T$ 에서 헛되이 보내는 시간을 줄일 수 있다.

3.2.2 효과도에 의한 이웃해 선별과정(SED)

ASA를 이용한 해유도과정(<Figure 4>)은 내부 루프를 최소한으로 줄여줌으로써 수렴시간을 상당히 단축시키면서 수렴

성능 또한 향상시킬 수 있었다. 하지만 배치문제에 대한 전체 계산시간은 알고리즘의 수렴성능뿐만 아니라 이웃해 생성과정( $Y = PERTURB(X)$ )에 의해서도 많은 영향을 받는다.

식 (8)은 본 연구의 배치모형을 이용하여 호크와 패트리엇의 배치상황을 구성한 예로 가용한 설치후보지에 각 장비들을 주어진 수량만큼 배치하고 추가적으로 패트리엇은 후보지별 설치방향도 함께 판단해야 한다. <Figure 5>는 식 (8) 문제의 제약조건에 근거하여 생성될 수 있는 해의 한 형태를 보여 주고 있다. 이웃해 생성과정을 수리모형 내 제약식의 구성요소와 연계하여 살펴보면 일련의 이웃해들은 각 설비별 제한수량을 만족해야 하고 아울러 각 부지별 제약조건도 만족하면서 목적함수를 개선시켜 나가야 한다.

$$\begin{aligned}
 &Max Z = \sum_{i=1}^{10} \sum_{j=1}^5 \{1 - \prod_{k=1}^{10} \prod_{l=1}^2 \prod_{\theta \in \Theta(l=2)} (1 - p_{ijk\theta})^{x_{i\theta}}\} \quad (8) \\
 &s.t \sum_{k=1}^{10} x_{k1} \leq 4, \quad l = 1 (\text{호크}) \\
 &\quad \sum_{k=1}^{10} \sum_{\theta=1}^4 x_{k2\theta} \leq 4, \quad l = 2 (\text{패트리엇}) \\
 &\quad \sum_{l=1}^2 \sum_{\theta \in \Theta(l=2)} x_{k\theta} \leq 1, \\
 &\quad \text{for } 1 \leq k \leq K (\text{각 후보지})
 \end{aligned}$$

호크	패트리엇 1	패트리엇 2	패트리엇 3	패트리엇 4
x[0][0]=0	x[0][1]=0	x[0][2]=0	x[0][3]=0	x[0][4]=1
x[1][0]=0	x[1][1]=0	x[1][2]=0	x[1][3]=0	x[1][4]=0
x[2][0]=1	x[2][1]=0	x[2][2]=0	x[2][3]=0	x[2][4]=0
x[3][0]=0	x[3][1]=0	x[3][2]=0	x[3][3]=0	x[3][4]=0
x[4][0]=1	x[4][1]=0	x[4][2]=0	x[4][3]=0	x[4][4]=0
x[5][0]=0	x[5][1]=0	x[5][2]=0	x[5][3]=1	x[5][4]=0
x[6][0]=1	x[6][1]=0	x[6][2]=0	x[6][3]=0	x[6][4]=0
x[7][0]=0	x[7][1]=0	x[7][2]=0	x[7][3]=0	x[7][4]=1
x[8][0]=0	x[8][1]=0	x[8][2]=1	x[8][3]=0	x[8][4]=0
x[9][0]=1	x[9][1]=0	x[9][2]=0	x[9][3]=0	x[9][4]=0

Figure 5. An example of SC model's solution.

위의 예에서 알 수 있듯이 지역담당문제는 문제의 규모가 커질수록 해공간도 확장되고 모형이 세밀하고 구체적으로 구현될수록 제약조건 또한 증가하게 되어, 보다 복잡한 해의 구조를 형성하게 된다. 따라서 SA를 적용한 해법이 지역담당모형에 대한 효율적인 알고리즘이 되기 위해서는 크고 복잡한 해 공간에서도 일련의 이웃해 선별과정을 효과적으로 수행해 낼 수 있어야 한다.

<Figure 6>은 배치문제의 해공간을 이해하기 쉽게 2차원으로 간단하게 나타낸 것이다. 본 연구에서는 이웃해 생성을 비가능해 영역까지 확대시켜주었기 때문에 전체 해공간이 매우 넓다. 그리고 배치규모가 큰 문제에서는 그 규모에 비례하여 해공간도 확장되므로 이웃해 생성과정이 최적해와는 거리가 먼 영역에서 지나치게 많은 시간을 낭비하게 된다. 왜냐하면

대부분의 배치문제의 경우 제한된 범위 내에서 가능한 많은 설비를 배치하는 것이 목적함수 값이 높을 것이고 최적해란 이 영역 중 한 곳에 위치하고 있을 것이기 때문이다. 그런데 만약 SA의 PERTURB 함수에만 의존하여 최적해 영역의 이웃해가 생성되기만을 기다린다면 SA의 구조상 상당한 시간이 걸릴 것이고, 반면 이를 보완하기 위해 이웃해 생성영역을 최적해 영역으로만 고정시킬 경우 PERTURB 함수 내에 추가적인 조치들이 필요하게 되고 이 과정에서 자칫 SA의 고유특성을 상실할 수도 있다.

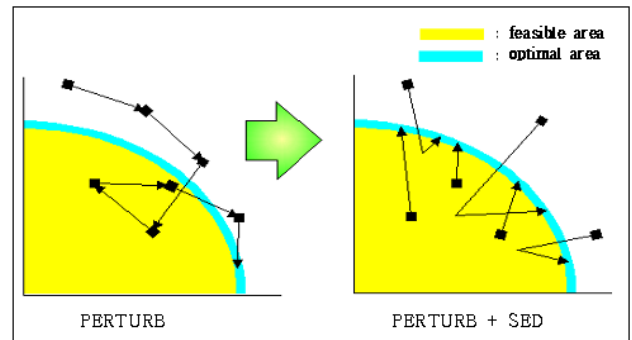


Figure 6. Process of reproducing neighborhoods.

따라서 본 연구에서는 효율적인 이웃해 선별과정을 위해 비가능해를 포함한 전 영역에서 이웃해를 생성하고 이 해가 최적해 영역으로 자연스럽게 전이될 수 있도록 새로운 절차를 구상하였으며 이 절차를 ‘효과도에 의한 이웃해 선별과정’이라 명하고 이후부터는 약어로 ‘효과도선별(SED; Selection by Effectiveness Degree)’이라 표기한다.

효과도선별(SED)이란 SA 알고리즘을 지역담당문제에 효과적으로 적용시키기 위해 고안한 방법으로 일련의 이웃해들이 최적해 가능 영역에서만 생성될 수 있도록 SA의 PERTURB 함수에 Yoshiaki(1975) 휴리스틱 기법을 결합하였고 이러한 일련의 전이과정들이 보다 신속하게 이루어지도록 Dijkstra 알고리즘의 표지(label)법을 이용하여 보완하였으며 그 기본구조는 <Figure 7>과 같다.

먼저 PERTURB 함수에 의해 현재해 X로부터 이웃해 Y를 생성하고 MODIFY 함수를 통해 Y를 가능해 영역으로 전이시키며 전이된 해의 구성요소를 분석하여 해에 추가 가능한 요소들을 표지(label)하고 이 표지된 요소들에 대해 현재의 목적함수 개선 여부와 제약식 위반 여부에 대조하여 Y의 구성요소에 포함시킨다.

이 과정을 이웃해(Y) 내에 배치된 요소(Mod)와 최대허용량(TOTAL)이 같아질 때까지 반복하게 되면 전체적으로 모든 이웃해들이 최적해 가능 영역에서만 생성된 것과 같은 효과를 내게 되며 이들 해에 대해서만 비교연산을 수행하므로 전체 계산시간을 획기적으로 줄일 수 있다.

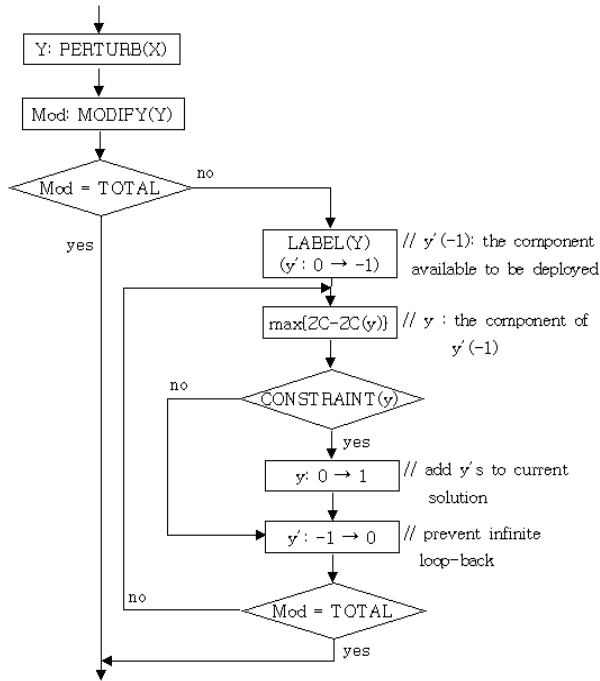


Figure 7. SED's reproducing process.

#### 4. 실험 및 결과분석

실험은 크게 축소실험과 확대실험으로 구분할 수 있다. 먼저 축소실험에서는 가상의 SAM-X 전력 배치상황을 설정하고 본 연구의 수리모형과 해법을 적용하여 최적배치방안을 유도함으로써 모형과 해법의 운용개념을 이해시키고 연구의 활용방안을 제시하였다. 확대실험에서는 새 해법인 효과도선별(SED)이 대규모 설비배치문제에 대하여 폭넓게 활용이 가능한 일반적인 해법절차가 될 수 있음을 증명하기 위해 현실적인 규모로 문제를 확대하고 기존 해법들과의 비교실험을 통해 새 해법의 효율성 및 개선 가능성을 판단하였다.

##### 4.1 축소실험

###### 4.1.1 상황설정

축소실험에서의 배치상황은 다음과 같다.

- (1) 주어진 지역 내에 유도탄전력이 보호해야 할 방호목표(고객)는 총 10개소가 있다.
- (2) 유도탄전력이 주어진 방호목표(고객)를 방어(서비스)해야 할 공중위협(서비스 대상)은 5개가 된다.
- (3) 배치할 전력은 2개 유형으로 구분되고 배치규모는 호크 4개 포대(설비 I)와 패트리엇 4개 포대(설비 II)가 있다. 이중 패트리엇은 설치방향에 영향을 받는 설비이기 때문에 배치위치뿐만 아니라 설치방향도 함께 고려해야 한다.

- (4) 유도탄전력을 배치할 수 있는 후보지는 10개소이고 각 후보지별로 4개씩 설치방위각이 가능하다.
- (5) 각 고객별, 위협별, 설비별, 후보지별, 방위각별 여건과 중요도는 모두 동일한 것으로 가정한다.
- (6) 이 배치문제에 있어 평가척도는 배치할 유도탄(설비)들이 적 공중위협(서비스 대상)으로부터 주어진 방호목표(고객)들을 전체적으로 얼마나 많이 보호(서비스)할 수 있는지가 될 것이다.

이상의 배치상황을 종합한다면 다음과 같은 배치문제 식 (9)와 같이 구성할 수 있다.

$$Max Z = \sum_{i=1}^{10} \sum_{j=1}^5 \left\{ 1 - \prod_{k=1}^{10} \prod_{l=10}^2 \prod_{\theta \in \Theta(l=2)} (1 - p_{ijkl\theta})^{x_{i\theta}} \right\} \quad (9)$$

$$s.t \sum_{k=1}^{10} x_{k1} \leq 4, \quad l = 1 (\text{호크})$$

$$\sum_{k=1}^{10} \sum_{\theta=1}^4 x_{k2\theta} \leq 4, \quad l = 2 (\text{패트리엇})$$

$$\sum_{i=1}^2 \sum_{\theta \in \Theta(l=2)} x_{k\theta} \leq 1,$$

for  $1 \leq k \leq K$  (각 후보지)

이 문제에서 고객담당확률( $p_{ijkl\theta}$ )은 중요시설(10개), 적 공중위협(5개), 설비유형(2개 유형), 가용후보지(10개)와 각 후보지별 설치방향(4개 방향)을 고려한다면  $10 \times 5 \times 10 \times 2 \times 4$ 의 5차원배열로 구성되고 호크는 전 방향으로 사격이 가능한 장비로 설치방향에 영향을 받지 않기 때문에  $10 \times 5 \times 10 \times 5$ 처럼 4차원으로 변형이 가능하여 총 2,500개의 수치가 필요하고 실험의 객관성을 기하기 위해 균등(uniform)분포에 의한 난수를 생성하여 구하였다.

###### 4.1.2 실험결과

본 실험의 목적함수 식 (9)는 최대화 문제이나 전체적인 계산량을 줄여주기 위해 식 (10)과 같이 최소화 문제로 전환할 수 있다.

$$Min Z = \sum_{i=1}^{10} \sum_{j=1}^5 \prod_{k=1}^{10} \prod_{l=10}^2 \prod_{\theta \in \Theta(l=2)} (1 - p_{ijkl\theta})^{x_{i\theta}} \quad (10)$$

<Figure 8>은 축소실험 배치문제에 대해 새 해법을 적용해서 얻은 계산결과로 호크는 I, V, VI, X의 후보지와 패트리엇은 II, III의 첫 번째 방위각, IV의 두 번째 방위각, VIII의 세 번째 방위각으로 최적위치가 선정되었다. 이 계산과정에서 전체 계산시간은 289초가 소요되었고 5,320번의 비교연산을 수행하였으며 컨트롤 파라미터  $T$ 는 0.002576°C까지 떨어졌고 해의 구성요소 중 제약조건을 위반한 항목은 없었다.

참고로 <Figure 9>는 그리디 기법을 적용한 계산결과로 새 해법의 계산결과에 비해 약 73%정도 해의 질이 떨어진다.



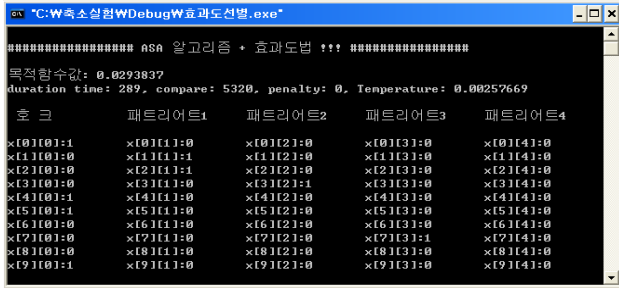


Figure 8. Results of the small-scale test.

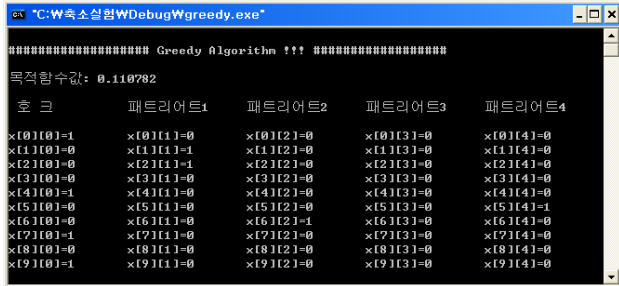


Figure 9. Result of the Greedy algorithm.

4.2 확대실험 및 결과분석

본 절에서는 SA 기법을 응용한 효과도선별(SED) 기법이 단순한 전체담당문제뿐만 아니라 신뢰도모형을 적용한 대규모의 배치문제에 대해서도 우수한 해법이 될 수 있음을 입증하기 위하여 본 연구에서 개발한 지역담당모형 식 (7)을 이용하여 현실적인 규모의 배치문제를 구성하고 이에 대한 반복실험을 실시하여 기존 해법에 의한 결과들과 비교분석하였다.

4.2.1 확대실험

확대실험에서는 먼저 새 해법이 기존의 그리디 기법이나 단순한 형태의 SA 기법들에 비해 최적해가 얼마나 향상될 수 있는가를 측정하였고, 다음으로 수렴성능을 평가하기 위해 비슷한 수준의 결과를 얻는 데 소요되는 계산시간을 SA와 ASA의 결과들과 비교분석하였다.

각 실험의 규모는 <Table 1>과 같이 구성하였고 객관적인 비교분석이 될 수 있도록 동일한 문제를 같은 조건에서 10번씩

Table 1. Configuration of the large-scale test

	Problem ( $i \times j \times k \times l \times \theta$ )	Available equipment	Direction
Test 1	20×10×20×2×4	Type I : 10, Type II : 8	Type II
Test 2	20×10×25×2×4	Type I : 15, Type II : 10	Type II
Test 3	20×10×25×3×4	Type I : 10, Type II : 7, Type III : 8	Type III

※  $i$  : customer,  $j$  : air threat,  $k$  : available point,  
 $l$  : equipment type,  $\theta$  : available direction

수행하였으며 같은 방식으로 점차 문제의 규모를 확대하였다. 이 과정에서 매우 많은 반복실험이 필요하였기 때문에 각 실험별 종료조건은 최적해에 약간의 유격을 두고 허용구간에도 달하는 시간으로 정했으며 종료시간에 대한 한계치를 설정함으로써 실험시간이 무한히 길어지는 것을 방지하였다.

실험을 실시함에 있어 각 문제별로 초기온도, 냉각 스케줄, 내부 루프에 따라 그 결과가 다양하게 바뀌었다. 본 실험에서는 일반적으로 기하형태의 냉각 스케줄을 적용하였고  $a$ 와  $L$  값은 문제의 규모별로 모의실험을 실시하여 가장 좋은 값을 추출하였으며 초기온도( $T$ )는 모의실험결과에서 얻은 목적함수 값에 근거하여 SA의 수렴성능이 보장될 수 있도록 적당한 수치를 지정해주었다. 그리고 고객보호확률은 0과 1 사이의 소수 난수를 생성하여 사용하였고 신뢰도모형의 특성상 실험규모가 커질수록 목적함수 값이 지나치게 작아지기 때문에 각 결과들에 대한 변별력을 높여주기 위해 문제의 형태별로 난수 생성범위를 조정해주었다. <Table 2>는 각 실험에서 지정한 파라미터들의 초기치와 사용한 난수들의 생성범위를 종합한 자료이다.

<Table 3>은 각 알고리즘별 최적해 비교를 위해 실험결과들 중 가장 좋은 측정치를 기록한 것으로, 효과도선별(SED)기법이 전반적으로 가장 우수한 최적해를 계산해내었다. SA와 ASA는 문제의 규모가 커짐에 따라 최적해의 질이 떨어지는 양상을 보였고 일부 실험에서는 주어진 시간 동안 그리디의 계산결과에도 도달하지 못하였다. 이는 3장에서 언급하였듯이 지역담당문제의 특성상 문제의 규모가 커질수록 해공간이 넓

Table 2. Initial parameters

		$L$	$T$ (°C)	$a$	Random range
Test 1	SA	200	100	0.95	0.1~1.0
	ASA	50	100		
	ASA+SED	50	100		
Test 2	SA	200	100	0.95	0.2~1.0
	ASA	50	100		
	ASA+SED	50	50		
Test 3	SA	200	100	0.95	0.3~1.0
	ASA	50	50		
	ASA+SED	50	10		

Table 3. Comparison of optimal solutions

	Greedy algorithm	SA algorithm		
		SA	ASA	ASA + SED
Test 1	0.0019	0.0017	0.0011	0.0009
Test 2	0.00041	0.00027	0.0002	0.00015
Test 3	0.00236	-	0.00178	0.0016

어지고 이에 따라 이웃해 생성과정에서 최적해 영역까지 도달하는 데 지나치게 많은 시간이 소요되기 때문이다.

<Figure 10>은 수렴성능평가를 위해 확대실험 1의 각 기법별 계산결과를 나타냈다. figure에서 알 수 있듯이 효과도선별(SED)은 약 100초 정도의 짧은 시간으로도 평균 0.0011이라는 가장 우수한 해를 계산하였다. ASA는 비교적 우수한 해를 계산하긴 하였으나 효과도선별(SED)에 비해 약 30배나 되는 계산시간이 소요되었다. SA는 대부분의 실험에서 제한된 실험시간을 초과하였고 해의 결과 역시 가장 나빴으며 10회의 실험중 단 2번만 그리디 결과를 갱신할 수 있었다.

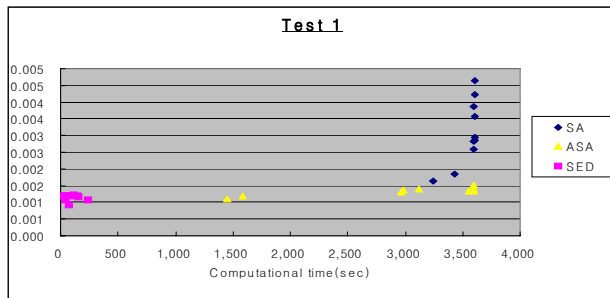


Figure 10. Results of the large-scale test 1.

확대실험 2와 3은 확대실험 1에 비해 약  $10^{16} \sim 10^{18}$ 배 정도 해공간이 더 넓어진 문제로 특히 실험3은 설비유형이 하나 더 증가하였기 때문에 해의 구조가 훨씬 더 복잡하다. 각각의 결과 <Figure 11>은 실험 1과 유사한 양상을 보였고 효과도선별(SED)은 문제의 규모가 커져도 여전히 좋은 결과가 나타났지만 SA와 ASA는 그 성능이 급격히 둔화되는 것을 확인할 수 있

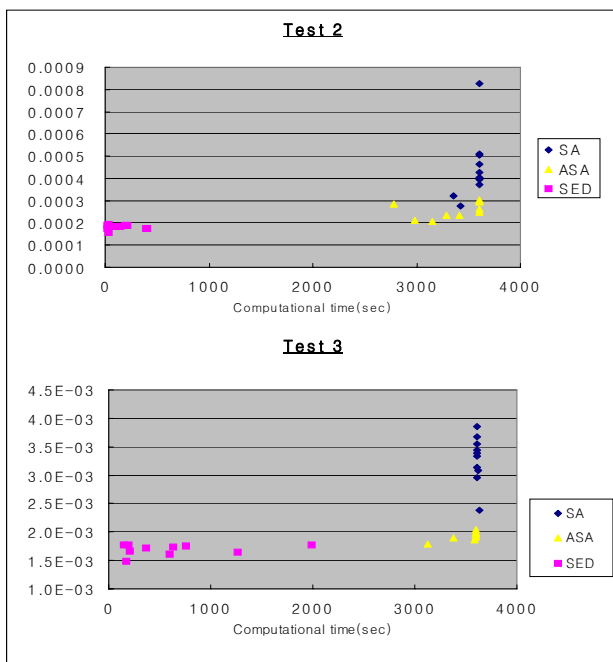


Figure 11. Results of the large-scale test 2 and test 3.

다. 특히, SA의 경우 실험 3에서는 주어진 시간은 모두 소비하면서 한 번도 그리디 결과를 갱신하지 못하였다.

<Table 4>는 각 알고리즘별 수렴성능을 평가하기 위해 확대실험결과를 종합한 자료로 계산시간 비교에 추가하여 식 (11)을 이용하여 수렴성능의 효율성을 추가로 측정하였다. 이는 제한된 시간 내에 주어진 해를 구하지 못한 경우 가중치를 부여하기 위함이고 낮은 값일수록 좋은 결과가 되며 동일규모의 실험에서 각 알고리즘에 대한 비교적으로 한정되며 규모가 다른 실험 간에 상호연관성은 없다.

$$\text{수렴성능 값} = \text{소요시간} \times \text{계산결과} \quad (11)$$

4.2.2 결과분석

확대실험에서는 본 연구에서 제시한 해유도과정의 효율성을 입증하기 위해 다양한 형태로 문제를 구분하여 반복실험을 수행하였고 실험결과 <Table 3>과 <Table 4>에 나타내었듯이 효과도선별(SED) 기법이 최적해의 질과 수렴성능에 있어 가장 우수한 결과를 얻을 수 있었다. 본 절에서는 보다 객관적인 비교분석을 위해 이들 결과에 대한 각각의 향상도를 측정하였다.

Table 4. Evaluation of computational time and convergency value (10 time's average) (time unit: sec)

	SA		ASA		ASA +SED	
	Comp. time	Conv. value	Comp. time	Conv. value	Comp. time	Conv. value
Test 1	3,549	11.02	3,007	4.02	96	0.11
Test 2	3,565	1.606	3,362	0.866	155	0.028
Test 3	3,611	11.85	3,531	6.81	632	1.07

2장에서 살펴보았듯이 군사설비 배치문제에 대한 연구들은 신뢰도모형을 적용하여 수리모형을 구성하였고 대규모배치 문제의 경우 해유도과정으로 Yoshiaki (1975) 알고리즘을 응용한 그리디 기법을 주로 적용하였다. 따라서 대규모 신뢰도문제에 대한 새 해법들의 향상도를 측정하기 위해 기존의 그리디 기법에 의한 최적해에 비해 얼마나 개선시킬 수 있는가를 비교하였고 새 해법들 간의 수렴성능을 평가하기 위해 각각의 수렴시간과 수렴성능 값을 상호 비교하였다. 향상도측정은 <Table 3>과 <Table 4>의 결과를 식 (12)에 대입하여 각각의 개선 정도를 산출하였다.

$$\text{향상도} = \frac{\text{기존해법 결과} - \text{새해법결과}}{\text{기존해법 결과}} \times 100 (\%) \quad (12)$$

식 (12)를 이용하여 새 해법들의 향상도를 측정한 결과 <Table 5>에 나타낸 바와 같이 효과도선별(SED) 기법이 모든 문제에 걸쳐 그리디 기법보다 좋은 해를 구할 수 있었고, 최적해의 개선 정도도 가장 크며 <Table 6>에서 알 수 있듯이 SA나 ASA에

비해 수렴성능 역시 가장 우수하였다. 반면 SA와 ASA는 문제가 커짐에 따라 그 효율성이 점차 감소하였는데, 이는 각 실험에서 종료시간에 대한 한계치를 설정해 놓았기 때문이고 결론적으로 SA와 ASA는 대규모문제에서 짧은 시간 내에 최적해까지 수렴하기 어렵지만 효과도선택(SED) 기법은 적은 연산과정으로도 양질의 해를 얻을 수 있음을 의미한다.

Table 5. Improvement of the solution (unit: %)

	Greedy vs. SA	Greedy vs. ASA	Greedy vs. ASA +SED
Test 1	15.9	43.7	52.3
Test 2	33.5	49.9	62.3
Test 3	-0.98	24.4	59.0

Table 6. Improvement of the convergency (unit: %)

	SA vs. ASA +SED		ASA vs. ASA +SED	
	Comp. time	Conv. value	Comp. time	Conv. value
Test 1	97.2	99.0	96.8	97.2
Test 2	95.6	98.2	95.3	96.7
Test 3	82.4	91	82.0	84.2

### 5. 결론

본 연구에서는 신규전력 배치 시 기반전력과 연계하여 신·구 전력이 발휘하게 될 전체 능력을 통합적으로 평가하여 설비배치를 결정할 수 있는 최적배치모형을 개발하였고 이 모형과 같은 대규모 군사설비 배치문제를 효과적으로 계산해내기 위해 SA를 응용한 새로운 해유도과정을 구성하였으며 이 연구를 이용하여 현재 한국공군에서 추진중인 SAM-X 사업의 배치문제에 적용함으로써 새로 도입할 패트리어트 전력배치를 체계적으로 판단할 수 있는 방법론을 제시하였다. 또한 추가적으로 지역담당모형의 개발과 효율적인 해법의 적용으로 양분화되어 있는 기존 연구분야를 통합하여 연구 분석함으로써 SA와 같은 범용의 메타휴리스틱 기법이 신뢰도모형을 포함한 대규모 설비 배치문제에 대한 일반적인 해법이 될 수 있음을 입증하였다.

본 연구는 매우 일반화된 모형구성으로 다양한 분야에서 탄력적인 활용이 가능하고 해유도과정 또한 신속 정확한 계산체계를 구축하고 있어 신규설비의 초도배치뿐만 아니라 국가나 전군규모의 방대한 배치문제 또는 긴급상황 시 신속한 전력재구성 등의 의사결정과정에서도 널리 활용이 가능할 것으로 판단된다.

### 참고문헌

Beasley, J. E. and Chu, P. C. (1996), Genetic Algorithm for the Set Covering Problem, *European Journal of Operational Research*, 94, 392-404.

Bellmore, M. and Ratliff, H.D.(1971), Set Covering and Involute Bases, *Management Science*, 18(3), 194-206.

Francis, R. L. and White, J. A.(1974)., *Facility Layout and Location*, Prentice-Hall Inc., New Jersey.

Garey, M. R. and Johnson, D. S.(1979), *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness*, W. H. Freeman and Co., New York, 222.

Garfinkel, R.S., and Nemhauser, G.L. (1969), The Partitioning Problem: Set Covering with Equality Constraints, *Operations Research*, 17(5), 840-856.

George C. Moors and Charles Revelle(1982), The Hierarchical Service Location Problem, *Management Science*, 28(7), 775-780.

Ignizio, J. P.(1971), A Heuristic Solution to Generalized Covering Problems, *Unpublished ph. D. Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University*.

Jacobs, L. W. and Brusco, M. J.(1994), A Simulated Annealing-Based Heuristic for the Set Covering Problem, *Proceeding Decision Sciences Institute, 1994 Annual meeting*, 12, 1189-1191.

Kim, S. B, (2003), A Study on the Optimal Disposition Model for the Future Missile System by Set Covering, *Master Thesis, Korea National Defense University*.

Kim, S. I, (1987), Development of the Set Covering Model and Its Solution of Optimal Location for the Military Facilities, *Proceeding of Hwarangdae Symposium*.

Kim, T, R, (1983), Set Covering Model for the Facility Having Different Capacity by Reliability, *Master Thesis, Korea University*.

Kim, Y. G, Yeun, B. S, Lee, S. B, (2000), *Meta-heuristic*, Yeongji Moonhwsa, Seoul, Korea.

Kirkpatrick, S., C.D. Gelatt Jr. M.P.Vecchi(1983), Optimization by Simulated Annealing, *Science*, 220, 671-680.

Lawer, E. L., and Wood, D. E. (1996), Branch-and -Bound Method: A Survey, *Operations Research*, 14(4), 699-719.

Lee, D. H, (1989), A Study on the Position Allocation for Artillery Weapon, *Master Thesis, Korea National Defense University*.

Lee, H. L, Han C. G, (1999), An Enhance Simulated Annealing Algorithm for the Set Covering Problem, *IE Interface*, 12(1), 94-101.

Norbert Dee and John C. Liebman(1972), Optimal Location of Public Facilities, *Naval Research Logistics Quarterly*, 19, 753-759.

Oh, J. S, (1981), Set Covering Model for Maximizing Reliability, *Master Thesis, Korea University*.

Oh, W. M, Kim, S. I, (1994), A Study on the Optimal Disposition fo the PATRIOT Missile, *Proceedings of 1994 Spring Conference of the Korean Institute of Industrial Engineers*.

Revelle, C., and R. Swain(1970), Central Facilities Location, *Geogr. Analysis*, 2(1), 30-42.

Yeun, B. S, Cho, G. Y, (1996), Acceleration of Simulated Annealing and Its Application for Virtual Path Management in ATM Network, *Journal of the Korean Operations Research and Management Science Society*, 21(2), 125-140.

Yoshiaki Toyoda(1975), A Simplified Algorithm for Obtaining Approximate Solutions to 0-1 Programming Problems, *Management Science*, 21(12), 1417-1427.



**이상현**

육군사관학교 전자공학과 학사  
Naval Postgraduate School OR 석사  
Georgia Institute of Technology 산업공학 박사  
현재: 국방대학교 운영분석학과 교수  
관심분야: 네트워크, 메타 휴리스틱,  
로지스틱스, SCM, 시뮬레이션



**백장욱**

공군사관학교 항공공학과 학사  
국방대학교 OR 석사  
현재: 공군 항공사업단 근무  
관심분야: 네트워크, 메타 휴리스틱,  
시뮬레이션