

# Optimization Routing Model for Installation of Clustered Engineering Obstacles with Precedence Constraint

Dongkeun Yoo\* · Suhwan Kim\*\*†

\*Department of Business and Economics, Korea Army Academy at Yeongcheon

\*\*Department of National Defense Science, Korea National Defense University

## 선행제약을 고려한 권역단위 공병장애물 설치경로 최적화 모형

유동근\* · 김수환\*\*†

\*육군3사관학교 경제경영학과

\*\*국방대학교 국방과학학부

This paper presents a path planning optimization model for the engineering units to install obstacles in the shortest time during wartime. In a rapidly changing battlefield environment, engineering units operate various engineering obstacles to fix, bypass, and delay enemy maneuvers, and the success of the operation lies in efficiently planning the obstacle installation path in the shortest time. Existing studies have not reflected the existence of obstacle material storage that should be visited precedence before installing obstacles, and there is a problem that does not fit the reality of the operation in which the installation is continuously carried out on a regional basis. By presenting a Mixed Integer Programming optimization model reflecting various constraints suitable for the battlefield environment, this study attempted to promote the efficient mission performance of the engineering unit during wartime.

**Keywords :** Optimization model, Path Planning, Clustered VRP, Obstacle Installation

## 1. 서 론

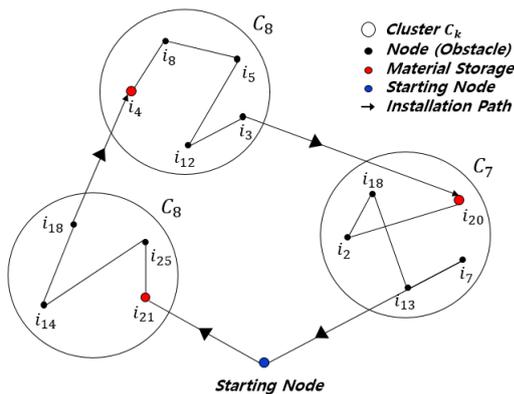
### 1.1 연구배경 및 목적

전쟁의 핵심은 누가 더 완전한 전투준비태세를 갖추느냐에 달려있다고 볼 수 있다. 국방백서(2022)에 따르면, 현재 북한군은 육군 전력의 70% 정도를 평양-원산 이남 지역에 배치하고 있으며, 언제든지 기습공격을 위한 태세를 갖추고 있다[6]. 이에 따라 공병부대는 적의 기동을 차단, 고착, 우회, 지연시키기 위해 다양한 대기동 장애물을 운

용하고 있는데, 서울을 중심으로 중·횡으로 산발적으로 발달한 도로교통은 유사시 적의 기동을 막기에 매우 제한된다. 또한 출산율을 비롯한 군 병력자원 감소 문제로 전방 군단 및 사단들이 통·폐합되고 있는 상황에서, 1개 부대(군단·사단)의 작전지역이 더욱 넓어질 것으로 예상되는바, 단위 공병부대별로 맡게되는 대기동지원 임무의 수도 덩달아 증가될 것으로 예상된다. 대기동지원임무는 통상 <Figure 1>과 같이 진행된다.

DEFCON이 발령되면, <Figure 1>에서 출발노드(Starting Node)에 있는 공병부대의 n개 소대는 각자 맡은 장애물들(검정색 점)을 설치하기 위해 이동한다. 이때 장애물 한 개당 적게는 수십 파운드에서 많게는 수백, 수천 파운드에 달하는 자재들(폭약, 회로, 전색용 모래자재 등)이 필요한데, 이를 원 소속부대에서 모두 보관하기가 제한된다. 이에

따라 한번에 적재할 수 있는 양을 고려하여 장애물들을 권역단위(Cluster)로 사전에 나누어났고, 해당 권역 장애물들을 설치하기에 앞서서 빨간색 점으로 표시된 권역별 장애물고(장애물 자체 보관소, 장벽고 라고도 불림)에 방문하여 설치에 필요한 자재들을 차량에 적재한다. 이후 해당 권역 장애물들을 순차적으로 방문하여 설치하고, 다음 권역으로 이동해서 적재 및 설치하는 것을 반복한다. 할당받은 임무가 모두 완료된 전투소대는 다시 원래 부대로 복귀하여 다음 임무를 준비한다. 이러한 대기동지원 임무는 촉각을 다투는 전시상황 속에서 언제 폭파명령이 하달될지 모르기 때문에 최단시간 내에 설치하는 것이 중요하다. 그중에서도 북쪽에 가까이 위치한 장애물, 상급부대가 통제하는 주요 장애물, 설치에 많은 시간이 소요되는 규모가 큰 장애물들은 우선적인 설치가 필요할 수도 있기 때문에 복합적인 판단을 보조하는 최적화 모형 개발의 필요성이 있다. 이러한 필요성이 반영된 최적화모형은 제3장에서 소개한다.



<Figure 1> Procedures for Performing Mission of Anti-Maneuvers Support

이에 따른 본 연구의 목적은 유사시 최단시간에 작전지역 내 장애물들을 설치 및 폭파하여 적의 기동을 저지· 지연·고착·우회시킴으로써 아군 주력부대의 성공적인 작전수행을 도모하는 것이다. 기존의 장애물 설치계획은 예상되는 적 상황과 여건을 종합적으로 고려하여 최선의 설치경로가 계획되어 있지만, 다음과 같은 여러 가지 전시상황 속에서 언제든지 수정될 여지가 있다. 예를 들어, 북한군의 주력 기동부대가 예상과는 다른 방향으로 접근하는 경우에는 최우선적으로 접근 도로를 중심으로 한 장애물 설치가 중요할 수 있고, 동원령이 선포되었지만 응소율이 예상보다 저조하여 장애물 설치에 필요한 시간이 크게 늘어날 수 있다. 또한 적군의 화학탄 공격으로 인해 아군의 부대이동이 있다면, 이동한 위치를 중심으로 한 최단시간 설치경로는 당연히 기존 계획과 크게 바뀌게 된다. 이외에도 다양한 전시상황으로 인해 사전에 계획된 장애물 설치

타임테이블이 계획대로 흘러가지 않을 가능성이 농후하다. 이러한 이유로 본 연구에서 제안하는 공병 장애물 설치 경로 최적화 모형을 이용하면 작전실시간에 보다 신속한 최적의 설치경로를 계획함으로써 성공적인 작전수행이 가능할 것으로 기대된다.

### 1.2 기존연구 고찰

본 연구에서 다루고자 하는 문제는 장애물과 전투소대 간의 최적의 할당을 찾음과 동시에 상호 할당된 장애물들 간에 최적의 설치경로를 계획하는 것이다. 이는 전통적인 산업공학의 조합 최적화 연구에서 오랜 기간 연구되어온 TSP(Traveling Salesman Problem)의 일종인 VRP(Vehicle Routing Problem)에 해당된다. 단일 소대가 임무수행 할 경우 TSP 문제로 볼 수 있지만, 소대가 n개로 늘어나면 MTSP(Multiple Traveling Salesman Problem)문제 혹은 VRP문제로 확장되며, 그중에서도 권역(Cluster)을 고려한 문제는 Clustered VRP(Clustered Vehicle Routing Problem)의 일종으로 볼 수 있다. 이에 따라 차량경로계획과 관련하여 다양한 국내외 연구들을 분석하고, 기존연구와의 차별성을 도출하고자 하였다. 그 결과, 본 연구주제와 관련된 기존연구들을 다음과 같이 확인하였다. Yang[8]은 차량용량제약을 고려한 최단시간 공병장애물 설치경로를 ACO(Ant Colony Optimization)알고리즘과 SA(Simulated Annealing) 알고리즘을 결합한 하이브리드 ACO 알고리즘을 제시하여 해결하였고, Jang and Lee[2]은 포병진지 구축을 위한 공병장비의 최적배정 문제를 장비 및 부대의 능력을 고려하여 임무수행시간을 최소화할 수 있는 모형을 제시하여 해결하였다. Kim and Lee[3]는 공병부대의 대기동지원임무에 있어서 협업을 고려한 일정계획을 통해 임무완료소대의 임무수행완료시간을 최소화하는 최적의 일정계획문제를 유전알고리즘 해법을 통해 해결하였다. Lu et al.[4]은 클러스터링이 이미 되어 있는 Instance를 활용하여 Clustered TSP문제를 일반적인 TSP 문제로 변형하여 다양한 TSP solver인 GA-EAX 등 4가지 방법을 통해 해결한 결과를 비교·분석하였다. Moon et al.[7]은 선행행 제약(Precedence relations)을 고려한 TSPPR(TSP Precedence Relations)문제를 구성하여 네트워크 모델에서의 최적경로를 구하는 문제를 위상정렬(Topological Sort) 개념에 기초한 알고리즘을 이용하여 해결하였다.

이처럼 다양한 방식의 경로계획 최적화 모형들이 제시되었지만 실제 작전상황과 맞지 않는 부분들이 있었다. 따라서 이번 연구에서는 장애물 설치 전에 자재 보관소를 먼저 방문해야 하는 선행제약과 권역단위로 임무수행이 연속적으로 이루어지는 현실성을 반영하여, 범용성이 높은 최적화 모형을 제시하였다는 점에 의의가 있다.

## 2. 연구설계 및 최적화 모형 구축

### 2.1 문제정의 및 가정 사항

본 연구의 성능측정지수(MOP, Measure Of Performance)는 ‘가장 마지막에 임무를 완료한 전투소대의 임무 완료시간 최소화’이며, 이를 수리 모형으로 구현하기 위한 가정사항은 다음과 같다.

- ① 차량은 주둔지(Depot)에서 출발해서 주둔지로 돌아온다.
- ② 최초 주둔지에서 출발할 때는 빈 차량으로 출발한다.
- ③ 폭약(TNT), 지뢰 등 장애물 설치에 필요한 자재들은 권역별 장애물 자재 보관소(장애물고)에 있으며, 해당 권역 장애물을 설치하기 이전에 가장 먼저 방문되어야 한다.
- ④ 장애물 설치의 권역 단위로 행해져야하며, 권역당 1개 소대씩 할당된다.
- ⑤ 모든 노드(수요지)는 1회 방문으로 수요가 충족된다. 즉, 한번씩만 방문되어야 한다.
- ⑥ 모든 장애물의 위치정보는 알려져 있으며, 장애물 간의 거리는 유클리드 거리이다.
- ⑦ 모든 경로는 양방향 대칭, 즉  $d_{ij} = d_{ji}$ 이다.
- ⑧ 장애물별 설치되어야 하는 폭약량은 다르며, 사전에 계산되어 있다.
- ⑨ 소대별 단위시간당 임무수행능력(=병력수)는 상황에 따라 조정가능하다.
- ⑩ 작전은 연속적으로 진행되어야 하며, 권역별 장애물은 권역 내에서 연속적으로 방문되어야 한다.
- ⑪ 각 장애물에 대한 중요도(가중치)는 폭과권한지휘관(여단, 사단, 군단, 군사령부급), 위치(북쪽으로 갈수록 중요도가 높음), 도로의 폭(넓을수록 중요도가 높음)등을 고려하여 사전에 산정되어 있다.

### 2.2 수리모형

앞의 가정사항을 반영하여 본 연구에 사용되는 용어의 정의 및 수리모형은 다음과 같다.

• 집합(SET)

- $I$  : 노드의 집합,  $I = \{1(Depot), 2, \dots, n\}$
- $C$  : 권역의 집합,  $C = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$
- $S$  : 각 권역( $c_k$ )별 장애물 자재보관소( $s_k$ )의 집합,  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$
- $P$  : 전투소대  $p$ 의 집합,  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_z\}$
- $A$  : 집합  $I$ 에 속한  $i, j$ 의 호(arc)

$$A = \{(i, j) : i, j \in I, i \neq j\}$$

$A_k$  : 권역 ( $c_k$ )에 속한  $i, j$ 의 호(arc)

$$A_k = \{(i, j) : i, j \in c_k, i \neq j, k = 1, 2, \dots, m\}$$

• 매개변수(Parameter)

- $d_{ij}$  : 노드  $i$ 에서  $j$ 까지 이동거리
- $v_p$  : 전투소대  $p$ 의 이동속도
- $a_p$  : 전투소대  $p$ 의 시간당 작업능력
- $Amt_j$  : 노드  $j$ 에 설치되어야하는 폭약량
- $Weight_j$  : 노드  $j$ 의 중요도
- $Weight_j = w_1 Command_j + w_2 Location_j + w_3 Width_j$
- $Command_j$  : 노드  $j$ 의 폭과권한지휘관
- $Location_j$  : 노드  $j$ 의 위도상 위치(남북 위치정도)
- $Width_j$  : 노드  $j$ 가 위치한 도로의 폭
- $w_{1,2,3}$  : 요소별 가중치 (1:폭과권한지휘관, 2:위치, 3:도로의폭)
- $n$  : 총 노드의 갯수
- $m$  : 총 권역의 갯수
- $Q$  : 임의의 큰 상수

• 결정변수(Variable)

- $x_{ij}^p$  : 전투소대  $p$ 가 노드  $i$ 에서  $j$ 까지 이동하면 1, 그렇지 않으면 0
- $y_i^p$  : 전투소대  $p$ 가 노드  $i$ 에 할당되면 1, 그렇지 않으면 0
- $w_k^p$  : 전투소대  $p$ 가 클러스터  $k$ 에 할당되면 1, 그렇지 않으면 0
- $u_i$  : 노드  $i$ 를 방문한 순서
- $h_p$  : 소대  $p$ 가 방문하는 노드의 갯수
- $T$  : 가장 마지막에 임무가 끝난 소대의 완료시간

$$\text{Minimize } T \tag{1}$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in I, i \neq j} \left( \frac{d_{ij}}{v_p} + \frac{Weight_j Amt_j}{a_p} \right) x_{ij}^p \leq T, \quad \forall p \in P \tag{2}$$

$$\sum_{p \in P} y_i^p = 1, \quad \forall i \in I \setminus \{1\} \tag{3}$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{i \in I \setminus \{1\}} y_i^p = n - 1 \tag{4}$$

$$y_i^p + y_j^p \geq 2x_{ij}^p, \quad \forall i, j \in I, i \neq j, p \in P \tag{5}$$

$$y_i^p + y_j^q \leq 1, \quad \begin{cases} \forall i \neq j \in C_k, k = 1, 2, \dots, m \\ p' \neq p'' \in P \end{cases} \tag{6}$$

$$y_1^p = 1, \quad \forall p \in P \tag{7}$$

$$\sum_{p \in P} w_k^p = 1, \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (8)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{k \in K} w_k^p = m \quad (9)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{i=1}^n x_{ij}^p = 1, \quad \forall j \in I \setminus \{1\} \quad (10)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{j=1}^n x_{ij}^p = 1, \quad \forall i \in I \setminus \{1\} \quad (11)$$

$$\sum_{j \in S} x_{1j}^p = 1, \quad \forall p \in P \quad (12)$$

$$\sum_{i \in I \setminus (S \cup \{1\})} x_{i1}^p = 1, \quad \forall p \in P \quad (13)$$

$$\sum_{j \in (S \cup \{1\}) \setminus S_k} x_{ij}^p = w_k^p, \quad (14)$$

$$\forall i \in C_k \setminus S_k, \quad k = 1, 2, \dots, m, \quad p \in P$$

$$\sum_{(i,j) \in A_k} x_{ij}^p = (|C_k| - 1) \forall p \in P, \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (15)$$

$$w_1^p = 1, \quad \forall p \in P \quad (16)$$

$$0 \leq u_i^p \leq h_p, \quad \forall p \in P, \quad i \in I \setminus \{1\} \quad (17)$$

$$u_j^p \geq u_i^p + 1 - Q(1 - x_{ij}^p), \quad \forall p \in P, \quad i, j \in I \setminus \{1\} \quad (18)$$

$$x_{ij}^p \in \{0, 1\}, \quad \forall (i, j) \in A, \quad p \in P \quad (19)$$

$$y_i^p \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I, \quad p \in P \quad (20)$$

$$w_k^p \in \{0, 1\}, \quad \forall p \in P, \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (21)$$

목적함수 (1)은 가장 늦게 임무를 완수하는 전투소대의 임무완료시간  $T$ 를 최소화하는 식이며, 제약식 (2)는 완료 시간  $T$ 에 대해서 정의하기 위해 구성되었다. ‘거리( $d$ ) = 시간( $t$ ) × 속도( $v$ )’이므로, 각 장애물간 거리( $d_{ij}$ )를 이동속도 ( $v_p$ )로 나누어 시간( $t$ )을 산정하였으며, 설치에 들어가는 폭약량( $Amt_j$ )은 단위시간당 설치량(=소대  $p$ 의 병력수)으로 나누어 시간을 산정한 뒤, 각각의 소요시간을 합산하여 구하였다. 각 소대별 완료시간이  $T$ 보다 같거나 작게함으로써 결과적으로 최종완료시간이 최소화된다. 다음으로 소대별 노드 할당과 동시에 할당된 노드들간에 경로가 형성되어야하므로 제약식을 크게 ① 할당, ② 경로로 나누고, 이를 동시에 작동시킬 수 있게 연결하는 제약식으로 구성하였다. 제약식 (3)은 노드  $i$ 에 매칭되는 소대는 1개임을 뜻하고, 제약식 (4)는 모든 노드와 모든 소대는 매칭되어야 함을 뜻한다. 제약식 (5)는 소대  $p$ 에 할당된 노드끼리만 경로(투어링)가 형성 되도록 하는 일종의 커플링 제약식(coupling constraint)이다. 이는 노드  $i$ 와  $j$ 가 같은 소대에 할당되었을 때만  $x_{ij}^p$ 가 1 또는 0이 될 수 있게 함으로써 서로 다른 소대에 할당될 경우 경로가 형성되지 않게 제한

한다. 제약식 (6)는 권역  $C_k$ 에 속한  $y_i$ 에 매칭되는 소대는 1개임을 뜻하는 제약식이다. 이 제약식은 특정 소대  $p'$ 이  $C_k$ 에 속한  $y_i$ 에 할당되는 순간, 다른 소대는  $y_j$ 에 할당될 수 없게 하는 제약식이다. 제약식 (7)은 모든 소대가 1번 노드인 주둔지(depot)를 할당받도록 하는 제약식이며, 이때 주둔지(depot)는 특정 권역에 소속되지 않으며 여러 소대에게 중복해서 할당되는 것이 허용된다. 제약식 (8)은 권역  $C_k$ 에 할당되는 소대는 오직 1개임을 나타내며, 이를 통해 권역별로 임무를 수행하는 공병작전의 현실성을 반영하였다. 제약식 (9)은 모든 권역과 모든 소대는 매칭될 수 있게 하는 제약으로서, 빠지는 권역없이 임무가 수행될 수 있게 한다.

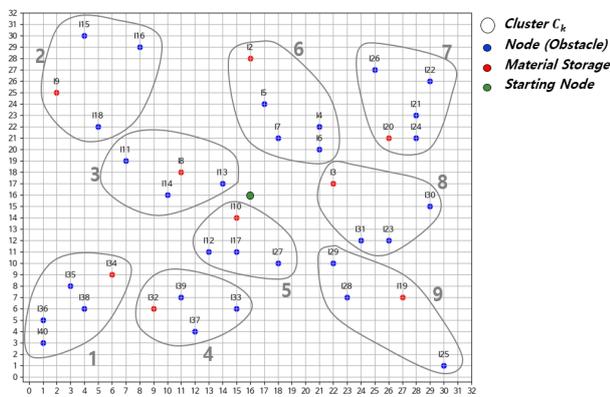
다음으로 최적경로를 생성하는 제약조건이다. 제약식 (10), (11)은 전형적인 최단경로문제의 중복방문제약조건으로, 모든 노드는 한번씩만 방문될 수 있게 한다. 제약식 (12)은 주둔지(depot)에서 출발한 모든 소대는 장애물고( $S_k$ ) 중 한곳을 최우선으로 방문하게 하며, 제약식 (13)은 장애물 설치를 마친 소대는 마지막에 권역  $C_k$  내부의 장애물 중 한 곳으로부터 주둔지(depot)로 돌아오게 하는 제약이다. 제약식 (14)는 소대  $p$ 가 특정 권역내 장애물을 모두 설치한 다음에는 다른 권역의 장애물고( $S_k$ ) 혹은 주둔지(depot)를 먼저 방문하게 만드는 제약식이다. 이때  $w_k^p$ 는 소대  $p$ 가 권역  $k$ 에 할당되었으면 1, 그렇지 않으면 0인 결정변수이므로, 할당되지 않은 권역에서는  $x_{ij}^p$ 의 값을 0으로 제한하여 경로를 형성하지 않게 만든다. 제약식 (15)는 각 권역 내에서 노드들이 연속적으로 방문되게 하는 제약식이다. 앞서 제약식 (10), (11)에서 노드  $i$ 에 들어가는 경로와 나가는 경로는 1개가 될 수 있게  $x_{ij}^p$ 를 정의했기 때문에  $C_1$  내부에 있는 노드 5개는 제약식 (15)에 의해서 연속적으로 연결될 수밖에 없게 만든다. 또한  $w_k^p$ 를 우변항(RHS, Right-hand-side)에 곱함으로써 할당되지 않은 권역( $w_k^p = 0$ 인 경우)에는  $C_1$  내부의 경로  $x_{ij}^p$ 는 모두 0이 되어야 하므로 경로를 형성할 수 없게 된다. 제약식 (16), (17), (18)은 전형적인 TSP의 부분순회방지(Sub-Tour Elimination) 조건인 MTZ 제약식이며[5], 나머지는 이진 결정 변수를 나타낸다.

### 3. 연구결과 및 분석

이번 장에서는 앞서 구축한 최적화 모형을 활용하여 실험한 결과를 나타낸다. 전시상황에는 화학탄 낙하로 인해 출발부대 위치가 바뀌거나, 병력동원이 계획처럼 되지 않는 등, 예상치 못한 다양한 상황이 생길 수 있다. 이에 따라 실험은 다양한 전시상황을 고려하여 ① 출발부대 위치가 바뀌는 경우, ② 특정 장애물에 폭약량이 과다하게 소

요되는 경우, ③ 병력 동원(보충)시 소대 인원할당 방안, ④ 60명 기준 인원할당 방안으로 진행하였으며, ⑤ 이를 통한 문제점 및 개선사항을 제시하였다.

모형은 GAMS(ver. 30.3.0)을 활용해 구축하였으며, SOLVER는 CPLEX, OPTCR(허용오차)은 3%, ITERLIM(반복횟수)은 1,000,000, RESLIM(시간제한)은 1,800초로 설정하였다. 모든 실험은 CPU i7-10750H@2.60GHz, RAM 16GB인 PC에서 실행하였으며, 실험에 사용된 Instance는 군사보안 문제로 <Figure 2>와 같이 노드 40개, 권역 9개로 이루어진 임의의 데이터로 실험하였다.



<Figure 2> Random Instance (node 40, cluster 9)

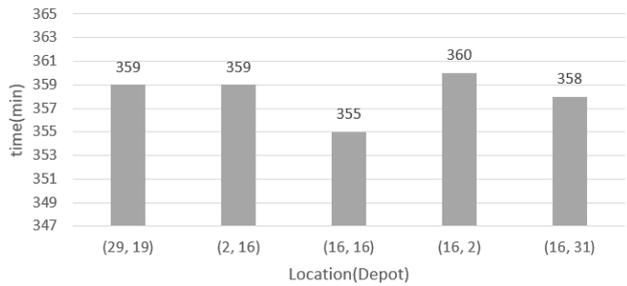
### 3.1 사례연구 1

첫 번째로 주둔지(depot) 위치별 실행결과이다. 작전실시 간에는 상황에 따라 부대위치가 수시로 바뀔 수 있다. 화학탄 낙하로 인한 예비지휘소가 이동하는 경우, 상급부대 지시에 의해 전진 배치되는 경우, 다른 임무(피해복구, 급수지원 등) 수행 중에 급하게 장애물 설치 임무에 투입되는 경우와 같이 주둔지(depot)의 위치가 매번 바뀔 수 있다. 통상적인 작전계획상에는 부대 위치별로 설치 Time-Table을 모두 고려하여 작성하는 것이 현실적으로 제한되기 때문에 기계화된 설치경로는 상황에 따라 얼마든지 수정될 여지가 있는 셈이다. 이에 따라 최초 부대 위치별 실행결과는 <Table 1>과 <Figure 3>과 같다.

<Table 1> Execution Results by Location

Number of Nodes(obstacle) / Cluster : 40 / 9					
location	(29, 19)	(2, 16)	(16, 16)	(16, 2)	(16, 31)
Mission time(min)	359	359	355	360	358
CPU Time(sec)	213	330	101	389	120

Mission completion time by location



<Figure 3> Mission Completion Time by Location

첫 번째 실험결과는 소대가 3개인 경우 최초 부대 위치별 임무수행 완료시간을 나타낸다. 장애물들의 중심부인 (16, 16)에서 출발할 경우 결과가 가장 좋게 나왔는데, 출발한 곳으로 다시 되돌아오는 순회문제의 특성에 따라 통상적으로 중앙에서 출발하는 것이 임무완료시간 최소화에 가장 효과적이라 판단된다. <Table 2>는 가장 결과가 좋았던 (16, 16)에서 소대가 출발한 경우 소대별 결과이다.

<Table 2> Execution Results by Platoon

Number of Nodes(obstacle) / Cluster : 40 / 9				
Category	total	Platoon 1	Platoon 2	Platoon 3
Node	42	14	15	13
Cluster	9	$C_1, C_4, C_5$	$C_2, C_6, C_7$	$C_3, C_8, C_9$
time(min)	-	355	348	352

실험결과 소대별로 할당되는 노드와 권역의 개수는 대동소이했고, 소대별로 설치에 소요되는 시간도 비슷했다. 이는 실험에 사용된 임의 데이터에서 장애물들 간의 소요 폭약량이 서로 차이가 크지 않았기 때문인데, 폭약량이 과도하게 소요되는 장애물들이 있을 경우 결과는 굉장히 다르게 나올 수 있다. 예를 들어, 교량이나 광대로(25m 이상 도로) 폭파장애물의 경우 필요한 폭약량이 1,000 파운드 이상씩 소요되는 경우가 많은데, 그러한 장애물들이 몇 개만 있어도 소대별 임무완료시간이나 경로계획에 큰 영향을 미친다. 이를 사례연구 2에서 다루었다.

### 3.2 사례연구 2

두 번째는 폭약량이 과도하게 소요되는 장애물들이 있는 경우에 대한 실험 결과이다. 광대로(25m)이상 도로에 설치되는 폭파장애물, 교량 등은 기본적으로 1,000 파운드 이상의 TNT 등의 자재들이 필요하다. 통상적으로 권역은 이동이 용이할 수 있게 도로를 중심으로 군집화 되어있는데, 때문에 특정 권역에 규모가 큰 장애물들이 몰아서 있

는 경우가 있다. <Table 3>은 권역  $C_9$ 에 있는 노드들의 소요 폭약량을 1,000파운드로 높였을 경우의 실행결과이다.

<Table 3> Execution Results by Platoon

Number of Nodes(obstacle) / Cluster : 40 / 9				
Category	total	Platoon 1	Platoon 2	Platoon 3
Node	42	16	9	17
Cluster	9	$C_1, C_6, C_7$	$C_8, C_9$	$C_2, C_3, C_4, C_5$
Mission time(min)	-	403	357	404

실험결과, 1소대는 노드 16개에 권역 3개, 3소대는 노드 17개에 권역 4개를 할당받은 반면, 2소대는 노드 9개에 권역 2개만 할당받았다. 소대별 임무완료시간은 1, 3소대가 각각 403분, 404분이 걸린 반면, 2소대는 357분이 소요되었다. 임무수행이 가장 오래 걸린 소대와 가장 빨리 끝난 소대의 시간 차이는 47분이었는데, 촉각을 다루는 전시상황 속에서 가장 빨리 끝난 소대가 부대 복귀후 막연히 대기하는 것은 효율적이지 못한 것으로 판단된다.

3.3 사례연구 3

세 번째는 동원병력 보충 시 할당방안별 실행결과이다. 급감하는 출산율 등으로 인해 상비사단의 인원 및 장비편제가 지속적으로 줄어들고 있는바, 동원예비군을 주력으로 한 작전수행이 불가피한 상황이다[6]. 이에 따라 동원령 선포 후 인원(병력) 및 물자동원 응소율에 따라서 대기동지원 임무수행의 여건이 달려있다. 폭파장애물 설치는 수백~수천 파운드의 폭약을 배열·부착·장전해야하고, 이외에도 도전선 회로구성, 전색작업(모래 등을 쌓아서 폭압을 원하는 방향으로 유도하는 것)등, 단순하고 반복적인 작업 기반이기 때문에 병력수가 임무수행속도에 큰 영향을 미친다. 따라서 대기동 장애물 설치임무 특성상 병력 응소율은 매우 중요하며, 이에 따른 병력자원의 효율적 배분이 필수적이다. <Table 4>은 병력 21명이 보충된 상황을 가정하여 소대 인원할당 방안별 실행결과를 나타낸다.

<Table 4> Results by Allocation when Mobilizing Reserve Troops

Number of Nodes(obstacle) / Cluster : 40 / 9															
Category	case 1			case 2			case 3			case 4			case 5		
	$p_1$	$p_2$	$p_3$												
Additional personnel	+21	+0	+0	+14	+7	+0	+7	+7	+7	+14	+0	+7	+41	-10	-10
troop number	41	20	20	34	27	20	27	27	27	34	20	27	61	10	10
Mission time(min)	278			274			272			274			334		
CPU Time(sec)	274			138			55			163			162		

실험결과는 Case3(동원된 21명을 7명씩 균일하게 할당한 경우)이 가장 좋은 결과가 나온 것을 알 수 있다. 추가 인원이 균등할수록 할당받는 권역 및 장애물의 개수가 비슷해져서 결과적으로는 가장 마지막에 임무가 완수되는 부대의 임무완료시간이 최소화된 것으로 판단되는데, 눈에 띄는 결과로는 우측의 61 / 10 / 10명으로 구성된 경우이다. 21명 모두 1소대에 몰아줬을 뿐만 아니라, 기존 2, 3소대의 병력 각 10명씩을 1소대에게 몰아주어 더 빠르고 신속한 임무수행을 기대하였는데, 결과는 정반대가 나왔다. 막연히 1개 소대에게 병력을 많이 할당하기 보다는 제한된 병력자원을 효율적으로 분배하는 것의 중요성을 알 수 있는 결과였다.

3.4 사례연구 4

네 번째로는 중대의 가용 병력을 60명이라 가정했을 때, 몇 개의 소대(팀)로 분산하여 임무수행 하는 것이 가장 효율적일지를 실험하였다. 1개 팀당 10명 이하로 분산할 경우 자체적인 생존성 보장이 제한되고, 지휘통제(폭파명령, 철수 등)를 위한 통신장비·가용차량 등이 부족할 것이라 판단되어 최소 12명이상으로 설정하였다. 이에 따라 60명에 대한 병력 분산 방안별 실험결과는 <Table 5>와 같다.

<Table 5> Results by Personnel Allocation

Number of Nodes(obstacle) / Cluster : 40 / 9					
Platoon number	1	2	3	4	5
Troops per platoon	60	30	20	15	12
Completion time(min)	456	362	355	384	387
CPU Time(sec)	1	3	101	1,144	7,200 ≤

실험은 총 5가지로 진행하였다. 60명이 One-team이 되어 단독임무를 수행하는 경우, 30명씩 2개 소대로 나누어 진행하는 경우, 이어서 20명씩, 15명씩, 12명씩 균등하게 분산하여 임무수행 하는 경우로 나누어서 진행했다. 팀을 더 많이 나눌수록 더 많은 권역의 장애물들이 동시 다발적으로 설치가 가능하기 때문에 더 빨리 임무가 완수될 것

로 기대하였는데, 결과는 20명씩 3개 팀으로 나누었을 때가 가장 빨랐다. 이는 소대를 여러 개로 나눌수록 동시에 설치가능한 장애물의 수는 늘어나지만, 장애물·권역 1개를 설치하는데 시간이 과도하게 소요되었기 때문에 판단된다. 또한 더 적은 소대로 나눌 경우 소대별 인원수가 많아져서 생존성 보장이나 작전통제(폭파명령 하달 등)가 수월해지는 것과 같은 장점들이 있으나, 동시에 설치가 진행되는 장애물이 적어서 결과적으로 임무완료시간이 오래 걸린 것으로 판단된다.

### 3.5 사례연구 5

소대별 인원수는 편제표에 나와 있는 대로 주특기와 입대일에 따라서 결정되기 때문에 이번 연구에서는 매개변수(Parameter)로 설정하였다. 하지만 전시상황에서는 지정된 대로의 병력운용을 할 수 없는 상황이 생길 수도 있고, 때에 따라 소대별로 ‘몇 명씩’ 할당해야 가장 효과적인지 고려될 수 있다. 이를 위해 다음과 같이 모형을 수정하여 실험하였다.

• 추가 집합(SET)

$Troop = \{t_1, t_2, \dots, t_b\}$ : 병력들의 집합

• 추가 결정변수(Variable)

$a_p^t$ :  $\begin{cases} 1 \text{ 병력 } t \text{가 전투소대 } p \text{에 할당된 경우} \\ 0 \text{ otherwise} \end{cases}$

$Troops_p$ : 소대  $p$ 의 병력수 ( $= \sum_{t \in T} a_p^t, \forall p \in P$ )

• 수정, 추가 제약식

$$\sum_{i \in I} \sum_{j | j \neq i, j \in I} \left( \frac{d_{ij}}{v_p} + \frac{weight_i \cdot Amt_i}{Troops_p} \right) x_{ij}^p \leq C_{max}, \quad (22)$$

$$\forall p \in P$$

$$\sum_{p \in P} a_p^t = 1, \quad \forall t \in T \quad (23)$$

$$\sum_{t \in T} a_p^t = Troops_p, \quad \forall p \in P \quad (24)$$

$$Troops_p \geq 1, \quad \forall p \in P \quad (25)$$

기준에 매개변수로 설정했던  $a_p$ (소대  $p$ 의 병력수)는 제거하고, 할당을 위한 집합, 결정변수, 제약조건을 수정, 추가한 모형이다. 제약식 (22)는 모든 병력은 3개 소대 중 한 곳에만 배정되게 하고, 제약식 (23)는 소대  $p$ 의 병력수를 나타낸다. 제약식 (24)은 제약식 (2)의 분모가 0이 되지 않게하기 위해 추가한 제약식이다. 실험결과는 <Table

6>과 같다.

<Table 6> Results by Revised Model

Number of Nodes(obstacle) / Cluster : 40 / 9				
Category	total	platoon1	platoon2	platoon3
Troops	60	21	18	21
Node	42	14	13	15
Clustere	9	$C_1, C_4, C_5$	$C_2, C_3, C_9$	$C_6, C_7, C_8$
Mission time(min)	-	336	363	365
CPU Time(sec)	7200 ≤			

자동 인원할당 모형의 경우 소대별 인원이 1소대 21명, 2소대 18명, 3소대 21명으로 비교적 균등하게 나왔는데, 이러한 결과가 사례연구 4에서의 결과를 뒷받침한다. 하지만 이 경우 목적식을 정의하기 위한 제약식 (2)가 <변수 ÷ 변수> 형태인 비선형(Non-linear Problem, NLP) 제약식이 되기 때문에 일반적으로 실현가능해(feasible solution)를 구하는 것조차 쉽지 않고, 구하더라도 전역 최적해(global optimal)를 보장할 수 없기 때문에 향후 적절한 휴리스틱 기법에 대한 연구가 필요하다.

### 3.6 분석결과

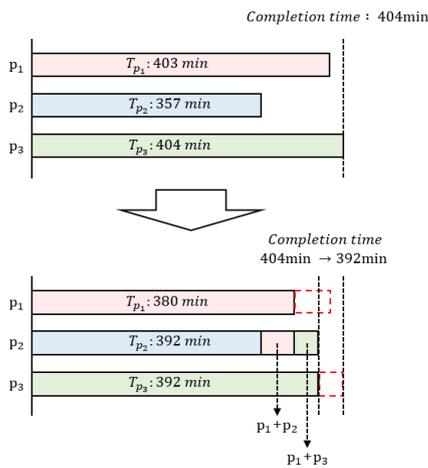
사례연구를 통해 최적화 모형의 유용성도 확인하였지만 한계점도 도출할 수 있었다. 본 연구는 제한된 가정사항 속에서 실험을 진행하였기 때문에 다음과 같은 몇 가지 한계점이 있었다.

첫 번째로, 사례연구 4에서 부대를 5개로 나눈 경우, 사례연구 5의 인원할당 모형과 같이 실행시간(CPU Time)이 급격하게 소요되는 점이다(7,200초 이상). 이는 할당 및 설치 경로계획 문제가 기본적으로 조합 최적화 문제이기 때문에 문제의 크기가 커질수록 다항시간 내 해결하는 것이 어렵기 때문이다. 이번 연구에서는 폭파장애물만 대상으로 하였지만, 장애물의 수가 더 늘어나거나 다양한 유형의 장애물이 반영되면 제한된 시간 내에 경로를 계획하기가 제한되기에 휴리스틱 알고리즘 개발의 필요성이 있었다.

두 번째로, 임무수행시간이 무한하지 않은 점이다. 실험 결과만 놓고 봤을 때는 6시간(360분) 내외로 임무가 완료되는 것으로 보이지만, 이는 임의 데이터를 생성했을 때 폭약량이 과도하게 소요되는 장애물들이 없었기 때문이다. 실제 폭파장애물 중에서는 교량과 같이 수천 파운드의 폭약이 필요한 경우가 있는데, 이런 경우 1개 폭파장애물을 설치하는 데만 6시간 이상이 걸릴 수 있다. 임무시간이 12시간을 넘어가면 현실적으로 휴식이 필요하거나 교대로 임무수행 해야 할 필요가 있는데, 본 모형에서는 제한시간

을 고려하지 않은 채 실험을 진행하였기 때문에 한계점이 있었다. 또한 작전상황에 따라 정해진 시간 안에 설치를 해야 하는 특수한 장애물들이 있을 수 있는데, 이런 경우 장애물별 시간제약(Time Window)을 고려한 Clustered VRPTW 모형의 연구가 필요하다.

세 번째로, 부대간 협동작전(Pair Mission)을 고려하지 않은 점이다. 임무가 빨리 끝난 소대가 늦게 끝나는 소대에 가서 협동을 하면 더 빠르게 임무를 완수할 수 있기 때문에 <Figure 4>와 같이 협동을 고려한 최적화 모형을 구축하면 임무수행 완료시간을 더욱 단축시킬 수 있을 것으로 기대된다[3].



<Figure 4> Completion Time by Pair Operation

네 번째로, 사례연구 4와 같이 인원을 어떻게 소대별로 할당해야 가장 효과적인지에 대해서 연구자가 임의로 인원을 할당한 점이다. 이를 보완하여 사례연구 5에서 인원 자동산정 모형을 제시하였지만, 해당 모형의 목적식은 비선형(Non-linear)이기 때문에 통상적으로 실현가능해(feasible solution)를 구하는 것조차 쉽지 않고, 실행시간도 과도하게 소요되었으며, 그렇게 나온 결과값이 직접 20명씩 할당한 모형보다 좋지 못한 결과가 나왔다. 일반적으로 소대별 인원수는 편제표에 나와 있는 대로 주특기와 입대일에 따라서 배분하기 때문에 사례연구 4에서와 같이 매개변수(parameter)로 설정해도 무방하지만, 전시상황에서는 때에 따라 소대별로 ‘몇 명씩’ 할당해야 가장 효과적인지에 대한 모형이 필요할 수 있기 때문에 추가적인 연구의 필요성이 있었다.

마지막으로, 본 연구에서는 성능측정지수(MOP, Measure Of Performance)가 “임무수행 완료시간” 한 가지인 점이다. 모형의 유효성을 높이기 위해서는 “소대별 임무완료시간 편차 최소화” 라던가 “마지막 장애물의 설치완료시간”과 같이 다양한 성능측정지수(MOP, Measure Of Performance)

를 선정하여 연구를 확장하는 것이 필요하다.

#### 4. 결론 및 향후 연구

적 위협양상이 변화함에 따라 새로운 작전계획을 발전시켜 나가는 것은 자연스러운 현상이다. 이중에서도 특히 급변하는 도로환경과 전장상황, 적 위협의 변화 등으로 인해 상황에 맞는 최적의 임무수행방안을 결정하는 것은 한국군의 작전수행여건 보장 측면에서 반드시 필요한 절차이다. 이를 위해 다양한 기존연구들이 있었지만, 권역단위 임무수행 제약이나 장애물고 우선방문 제약과 같은 공병작전의 현실성이 반영되지 않은 한계점이 있었다. 본 연구에서는 이러한 점을 보완하여 보다 현실적인 최적화 모형을 제시하였으며, 나아가 사용자가 직접 부대별 능력(인원수), 속도, 설치 대상 장애물, 전투소대의 수, 출발부대 위치 등을 조정할 수 있게 최적화 모형을 구축함으로써, 예측불가의 전장상황 속에서도 대기동지원 작전계획 수립에 유용적으로 적용할 수 있게 하였다는 점에서 의의가 있다.

하지만 본 연구는 제한된 가정사항 속에서 진행했기 때문에 몇 가지 한계점을 도출할 수 있었고, 이에 따른 향후 연구방향은 다음과 같다. 첫 번째로, 장애물의 수가 더 늘어날수록 최적화 모형의 계산시간(CPU Time)이 과도하게 길어지는 문제로 인해 휴리스틱 알고리즘 개발의 필요성이 있고, 두 번째로 장애물별 설치 소요시간(Time Window)이 요구될 수 있기 때문에 작전상황에 따라 장애물별 설치시간 제약(Time Window)을 고려한 VRPTW 모형연구가 필요하다. 세 번째로, 부대간 협동작전을 고려하지 않은 모형이기 때문에 향후에 협동작전을 고려한 모형이 구축될 필요가 있고, 네 번째로 소대별 인원을 몇 명씩 할당할지 매개변수(Parameter)로 설정하는 것이 아니라 전시상황에 따라서는 자동으로 인원을 할당하는 모형이 필요할 수 있다. 마지막으로, 성능측정지수(MOP, Measure Of Performance)가 “임무수행 완료시간” 한 가지인 점을 보완하여, “소대별 임무 완료시간 편차 최소화”, “마지막 장애물의 설치완료시간”과 같이 다양한 성능측정지수를 선정한다면, 보다 더 현실적이고 범용적으로 사용 가능한 최적화모형이 구축될 것으로 기대된다. 또한 연구에서 사용된 방법론들을 이용하여 무인기 탐색경로, 무인차량 수색정찰 알고리즘 개발 등 다양한 경로계획문제에 확장하여 적용한다면 전시상황 뿐만 아니라 군 내의 다양한 작전환경에 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

#### References

[1] Cho, Y.H. and Cho, N., Optimization Model for

- Determining an Observation Order of Scientific Surveillance Equipment, *Journal of The Korean Operations Research and Management Science Society*, 2023, Vol. 48, No. 3, pp. 15-28.
- [2] Jang, Y.C. and Lee, M.G., Optimum Allocation Model of Military Engineer Equipments for Artillery Position Development, *Journal of The Korean Operations Research and Management Science Society*, 2023, Vol. 48, No. 3, pp. 15-28.
- [3] Kim, S. C. and Lee, T.S., Study on Countermeasure Support Mission Scheduling Considering Cooperation, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, 2018, Vol. 44, No. 2, pp. 114-123.
- [4] Lu, L.Y., Hao, J.K., and Wu, Q., Solving the Clustered Traveling Salesman Problem via TSP methods, *Peer J Computer Science*, 2022, pp. 1-26, <https://arxiv.org/abs/2007.05254>.
- [5] Miller, C.E., Tucker, A.W., and Zemlin, R.A., Integer programming formulations and traveling salesman problems, *Journal of Association for Computing Machinery*, 1960, Vol. 7, pp. 326-329.
- [6] Ministry of National Defense, Defense White Paper, Republic of Korea, pp. 26-33, 2022.
- [7] Moon, C.U., Kim, G.U., Kim, J.S., and Heo, S., Traveling Salesman Problem with Precedence Relations based on Genetic Algorithm, *Korean Institute of Industrial Engineers, Spring Academic Conference*, Gyeongnam University, Republic of Korea, Apr., 2000, pp. 48-51.
- [8] Yang, S.H., A Vehicle Routing Planning for Efficient Engineering Obstacles Transporting by using HVRP, Master's degree, Korea National Defense University, pp.1-71 1-Dec. 2012.
- ORCID**  
 Dongkeun Yoo | <http://orcid.org/0009-0006-7537-4316>  
 Suhwan Kim | <http://orcid.org/0000-0003-4916-1713>