

포병진지 구축을 위한 공병장비 최적배정 모형

장영초 · 이문걸[†]
국방대학교 운영분석학과

Optimum Allocation Model of Military Engineer Equipments for Artillery Position Development

Jang Young Cho · Lee Moon Gul[†]
Department of Military Operations Research, Korea National Defense University

■ Abstract ■

The artillery is a key element of the ground forces operation during wartime, and the military engineers support the artillery position development operation to support the smooth operation of the artillery. In establishing the artillery position development operation plan, the commander requires more than his intuition to find the best option reflecting a number of elements of the battlefield situation which changes every minute. Moreover, the number of available equipment is smaller than the number of required position developments, and the effective equipment operation becomes essential element of this issue. This study quantified the capability of the available engineering equipment, organized a number of teams enabling equipment to put out the maximum capacity based on the quantified figures, and formed the model which allocates the team to the developing points to minimize the developing time. The goal programming method was applied to resolve the problem. The developed model was applied to compare the total mission duration following the number of teams, the variable for commander's decision, and the result of this study can be used as the quantitative data for commander's decision making process in establishing the artillery position development support operation through effective equipment management.

Keywords : Military Engineer, Artillery Position Development, Engineering Equipment, Goal Programming

1. 서 론

육군의 공병은 다른 부대와는 달리 다양한 종류의 토공장비들을 보유하고 있으며 이를 활용하여 과거 정책사업의 일환으로 시행된 국가 고속도로 구축 사업에서부터 현재의 피해복구 지원 및 G.O.P.(General Out Post)지역 지뢰제거 작전까지 민·관·군의 다양한 분야에서 수많은 임무를 수행하고 있다. 이러한 임무중 군사작전 분야에서 공병은 전시 포병의 원활한 작전수행을 위해 포병진지 구축지원 임무를 수행하고 있다. 전시 포병진지 구축은 북한과 마주하고 있는 접적지역 대부분의 공병부대가 임무로 가지고 있을 정도로 그 중요성이 강조되고 있다.

진지 구축을 지원받는 포병은 아군의 후방에서 화력으로 적의 중심을 타격하는 임무를 수행하는 부대이다. 전술적으로 포병은 사격위치 노출 방지를 위해 한 장소에서 수회 사격 후 진지를 이동하며, 진지 이동은 포대 단위로 이루어진다. 포대는 부대의 규모를 나타내는 군사용어로 0문의 포가 1개의 포대를 구성하고 0개의 포대가 하나의 포병대대를 구성한다. 본 연구의 기준이 되는 사단급 부대는 공병대대와 0개의 포병대대를 보유하고 있다. 따라서 총 00개의 포대가 사단급 부대 예하에 운영되고 이러한 포대들은 전시 수차례 진지이동을 해야 하기 때문에 수 개의 진지 구축 지점들이 요구된다. 따라서 이러한 다수의 구축지점 들을 사단예하 공병대대가 제한된 장비로 지원해야 하기 때문에 의사결정권자는 선택과 집중의 문제에 직면하게 된다.

현재 공병의 포병진지 구축작전 계획은 평시 보유한 장비들로 계획되어 있으며 전시에 동원되는 장비들은 그 수의 불확실성으로 인해 반영되어 있지 않다. 이로 인해 전시 계획되어 있던 구축지점이 제외되거나 추가되는 우발상황에 탄력적으로 대응하지 못하는 한계를 가지고 있다. 의사결정권자의 직관으로는 이러한 다양한 변수가 고려되는 문제에서 최적의 해를 찾기 어렵다. 따라서 본 연구의 목적은 공병장비들로 팀을 구성하여 각 팀을 구축지점에 배정하는 문제를 면밀히 고려하고 이를 수리모델링과 결과

분석을 통해 의사결정권자에게 정량적인 자료를 제공하는 데 있다.

2. 이론적 배경 및 유사 연구 고찰

본 연구와 관련된 할당문제, 토공장비의 조합과 관련된 연구는 다양한 분야에서 이루어졌다. 이상원[4]은 정수계획법을 사용하여 복층숙소의 최적 방 배정과 관련된 할당 문제를 연구하였고, 김연민[1]은 조선소에서 n 개의 다른 도크에 선박을 가능한 한 많이 할당하여 도크의 활용을 최대화 하는 선박 건조 혼합 문제를 정수계획법으로 모델링하였다.

토공장비의 조합과 관련된 연구로 Shah[7]는 도로공사에 투입되는 토공 장비들과 토공량을 기준으로 하는 일정계획 문제를 Cut/fill Optimisation 기반의 정수계획법으로 해결하였고, 원서경[2]은 토공사에서 굴삭기, 로더, 덤프트럭의 최적 조합 모형을 시스템 다이내믹스 기법을 적용하였다. 최재휘[5]는 토공장비의 선정과 조합을 위한 영향요인을 분석하여 굴착기, 로더, 덤프트럭의 조합에서 중요한 결정요인이 무엇인가에 대하여 연구하였다. 토공장비를 조합하는 연구와 작업을 할당하는 연구 각각에 대해서는 다양하게 연구되었으나 본 논문에서 다루는 토공장비의 조합과 작업 할당을 종합적으로 고려한 연구는 활발하게 이루어지지 않았다.

본 연구에서는 공병 대대급 부대에서 가용한 n 종의 토공장비를 조합하여 m 개의 구축 팀을 구성하고 구성된 팀을 다시 구축해야할 지점들에 배정하여 가장 짧은 시간 안에 임무를 완료하는 문제를 정수계획법으로 해결한다. 또한 문제해결 과정에서 구성된 팀들의 능력 편차와 팀별 임무수행시간의 편차를 줄이기 위해 목표계획법을 활용한다.

3. 문제정의 및 수리모형

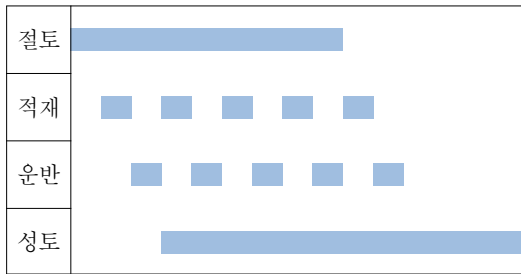
3.1 문제정의 및 해결절차

3.1.1 문제정의 및 가정사항

포진지는 포의 종류에 따라 견인포 진지와 자주포

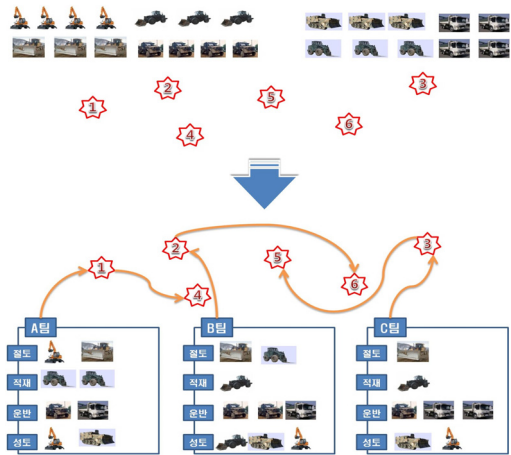
진지로 구분되며, 구축지점별 방호도에 따라 진지의 크기가 달라지기 때문에 토공 작업량은 구축지점별로 각각 상이하다. 진지 구축은 절토, 적재, 운반, 성토의 4개 작업으로 구성되고 구축 팀 또한 장비별 가능 작업에 따라 4개 작업그룹으로 장비를 조합하여 편성한다.

편성된 구축 팀은 배정된 진지 구축지점에서 구축 임무를 수행한다. 최초 구축 팀이 구축지점에 도착하면 작업 그룹별로 위치하여 작업을 준비한다. 준비가 완료되면 성토장비가 자연 상태의 토사를 작업이 가능한 호트러진 상태의 토사로 절개해주고 이를 적재장비가 운반 장비에 적재해 준다. 적재 완료된 토사는 운반 장비에 의해 성토장비가 있는 장소까지 운반되고 이 토사를 이용해서 성토장비가 진지를 구축한다. <그림 1>은 진지 구축작업의 작업절차를 나타낸 그림이다.



<그림 1> 진지 구축 Time Table

이러한 포병진지 구축 임무에서 공병 의사결정권자는 보유하고 있는 가용장비로 몇 개의 구축 팀을 어떤 장비조합으로 구성하고, 구성된 구축 팀을 우선순위가 있는 구축지점들에 어떻게 배정할 것인가 하는 고민을 갖게 된다. 문제의 전체적인 개념은 <그림 2>와 같다. 군 작전의 중요한 요소는 시간을 절약하는 것이다. 이러한 특성을 고려하여 가장 짧은 시간 안에 임무를 완료하기 위해서 보유한 장비들의 최대 능력으로 임무를 수행한다는 것이 본 연구의 핵심개념이다. 문제해결을 위해 각 구축지점별 완료시간은 각 팀의 성토작업 그룹이 작업을 완료한 시간으로 가정한다.



<그림 2> 문제 개념도

3.1.2 전반적인 문제해결 절차

본 연구에서는 두 단계로 문제를 구분하여 해결한다. 최초 각 장비별 작업능력을 수치화한 뒤 1단계에서 능력을 최대화하는 장비의 조합으로 팀을 구성하는 문제를 해결하고 2단계에서는 1단계의 결과 값을 기초로 임무수행 시간을 최소로 하는 팀별 구축지점 배정 문제를 해결한다. 몇 개의 팀을 구성하여 임무수행 할지는 공병 의사결정권자가 결정하는 고유 변수이다. 본 문제에서는 다양한 팀 수에 따른 결과를 의사결정권자에게 제공하는 것 또한 중요한 결과 값이기 때문에 1단계에서 팀 수에 따른 장비들의 능력을 최대화 하는 문제를 해결하여 1차 결과 값을 제공하고 이 결과 값을 바탕으로 2단계 문제를 해결하여 최종 목표를 달성하는 결과 값을 산출하고자 하였다.

3.2 장비 능력별 수치화

장비 능력의 수치화를 위해 절토와 성토, 적재작업은 <표 1>의 공식으로 산출하였고 운반작업은 덤프트럭 적재함의 용적에 따른 작업량으로 산출하였다. 모든 장비들의 능력은 시간당 작업량(m³/hr)으로 산출하였다. 수식의 상수값 들은 작전지역의 특성을 고려한 값으로 반영 하였으며 장비제원은 육군 야전교범 공병야전제원(34-0-2)을 참고하였다[3]. 산출된 수치는 <표 3>과 같다.

〈표 1〉 작업능력 산출공식

구분	굴삭기, 다목적 굴착기	도자, 로우더, 장갑전투도자
작업량	$Q = \frac{3600 \times q \times k \times f \times E}{C_m}$	$Q = \frac{60 \times q \times f \times E}{C_m}, q = q^0 \times e$
	Q : 시간당 작업량(m ³ /hr) q : 버킷 용량(m ³) k : 버킷 계수 f : 토량환산계수 E : 작업효율 Cm : 사이클 타임(sec)	Q : 시간당 작업량(m ³ /hr) q : 삽날의 용량(m ³) q ₀ : 거리를 고려하지 않은 삽날의 용량(m ³) e : 운반거리 계수 f : 토량 환산계수 E : 작업효율
산정		

〈표 2〉 장비별 가능작업

구분	절토 (cut)	적재 (load)	운반 (canvey)	성토 (build)
굴삭기	1	1	0	1
로우더	1	1	0	1
도자	1	0	0	1
다목적굴착기	1	1	0	1
장갑전투도자	1	0	0	1
5톤 덤프	0	0	1	0
15톤 덤프	0	0	1	0

〈표 3〉 장비별 작업능력

구분	절토 (cut)	적재 (load)	운반 (canvey)	성토 (build)
굴삭기	65	65	0	65
로우더	202	202	0	202
도자	270	0	0	270
다목적굴착기	132	132	0	132
장갑전투도자	230	0	0	230
5톤 덤프	0	0	60	0
15톤 덤프	0	0	153	0

3.3 1단계, 진지 구축능력 최대화

진지 구축 능력을 최대화 하는 팀을 구성하기 위해 장비를 조합하는 문제에서 고려해야할 사항으로 첫째, 구성되는 각 팀의 성토장비 작업그룹에는 1대

이상의 굴삭기가 포함되어야 한다. 진지 구축은 별도의 재료가 없이 작업현장의 토사로만 구축되고, 성토작업에는 토사를 쌓아서 형태를 잡아주고 경사면을 다져주는 세밀한 토공작업이 요구 된다. 이러한 작업은 굴삭기만 가능하기 때문에 굴삭기는 1대 이상 각 팀의 성토장비 작업그룹에 편성되어야 한다.

둘째, 각 팀의 성토장비 작업그룹은 2대 이상의 장비 조합으로 장비를 구성해야 한다. 작전의 장기화를 막기 위해 팀별 성토작업 능력의 최소규모를 제한하는 것이다.

셋째, 구성된 팀의 절토, 적재, 운반 작업 그룹의 작업능력은 성토 작업그룹의 작업능력보다 커야한다. 이는 토사의 부피변화를 고려한 것으로 성토된 토사는 장비에 의해 다져진 상태의 흙 이므로 그 부피가 가장 작다. 반면에 자연 상태의 토사와 흐트러진 상태의 토사는 장비에 의해 다져진 상태가 아니므로 성토된 토사에 토량환산계수를 곱해서 그 부피를 산출한다. 따라서 구성된 팀별 절토, 적재, 운반 작업능력 각각의 합은 성토작업 그룹에 배정된 장비 능력의 합을 기준으로 토량환산 계수를 고려하여 각각의 작업그룹에 장비를 배정해야 한다.

넷째, 작업팀별 성토능력의 편차는 최소가 되어야 한다. 가장 빨리 임무 종료된 팀과 가장 늦게 임무 종료된 팀의 수행시간 편차를 줄여 발생할 수 있는 구축 팀의 유휴시간을 최소화함으로써 장비사용의 효율성을 최대화 하는 것이다. 이와 같은 고려사항을 반영한 1단계의 문제는 다음과 같이 모델링될 수 있다.

3.3.1 인덱스(Indices)와 집합(Set)

T : 팀의 집합, $t \in T$

※ 팀 수는 의사결정자의 판단에 따라 사전에 지정(예 : 2~5개 팀)

W : 작업의 집합, $w \in W$

I : 가용 장비의 집합, $i \in I$

I_{excl} : 집합 I 의 하위집합, 굴삭기

3.3.2 입력 데이터(Parameter)

- $possible_{iw}$: 장비별 작업 가능여부,
가능하면 1, 불가능하면 0
- $ability_{iw}$: 장비별 작업능력(m^3/hr)
- $con_coefficient_w$: 작업별 토량환산계수
- $convey_limit$: 운반장비 제한계수
- $build_ability_limit$: 성토장비 능력계수
- $weight1$: 성토능력 최대화 가중치
- $weight2$: 팀 능력편차 최소화 가중치
- $weight1 + weight2 = 1$

3.3.3 결정변수(Decision Variable)

- x_{tiw} : 팀 t 에 장비 i 가 w 작업에 편성되면 1,
아니면 0인 이진변수 $t \in T, i \in I, w \in W$
- $d_ability_t^+$: 팀별 목표 성토능력에 대한 양의 편차
를 나타내는 비음실수
- $d_ability_t^-$: 팀별 목표 성토능력에 대한 음의 편차
를 나타내는 비음실수

3.3.4 목적함수 및 제약식

- 목적함수

$$\begin{aligned} Max \ Z = & \quad (1) \\ & weight1 \times \left(\sum_{t \in T} \sum_{i \in I} ability_{i'build'} \times x_{ti'build'} \right) \\ & - weight2 \times \sum_{t \in T} (d_ability_t^+ + d_ability_t^-) \end{aligned}$$

- 목표제약식

$$\begin{aligned} \sum_{i \in I} (ability_{i'build'} \times x_{ti'build'}) & \quad \forall t \in T \quad (2) \\ d_ability_t^+ - d_ability_t^- & \\ = (\sum_{i \in I} \sum_{t \in T} ability_{i'build'} \times x_{ti'build'}) / |T| & \end{aligned}$$

- 일반제약식

$$\sum_{t \in T} \sum_{w \in W} x_{tiw} \leq 1 \quad \forall i \in I \quad (3)$$

$$\sum_{i \in I_{can}} x_{ti'build'} \geq 1 \quad \forall t \in T \quad (4)$$

$$x_{tiw} \leq possible_{iw} \quad \forall t \in T, i \in I, w \in W \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \sum_{i \in I} ability_{i'build'} \times x_{ti'build'} & \quad (6) \\ \geq build_ability_limit & \quad \forall t \in T \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} con_coefficient_w \times \sum_{i \in I} ability_{i'build'} \times x_{ti'build'} & \quad (7) \\ - \sum_{i \in I} ability_{i,w} \times x_{tiw} \leq 0 & \quad \forall t \in T, w \in W \setminus \{build\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} convey_limit \times \sum_{w \in W_{abd} \in I} \sum_{i \in I} ability_{i'build'} \times x_{ti'build'} & \quad (8) \\ - \sum_{i \in I} ability_{i'convey'} \times x_{ti'convey'} \geq 0 & \quad \forall t \in T \end{aligned}$$

식 (1)은 가중치에 따라 각 팀의 성토능력을 최대화 하면서 팀별 성토능력의 편차는 최소화 하는 목적식이다. 식 (2)는 목표 성토능력을 기준으로 구성되는 팀들의 능력편차를 산출하는 목표제약식이다. 식 (2)의 우변은 목표성토 능력 값으로 최대화된 팀별 성토능력의 합을 팀 수로 나누어준 값이다.

식 (3)는 가용장비를 1회만 사용하는 제약식이다. 동일한 종류의 장비는 여러대 동시사용이 가능하나 장비 각각은 1회만 사용하도록 제한하여 여러개의 팀 및 작업에 하나의 장비가 동시에 사용될 수 없도록 하는 식이다.

식 (4)는 모든 팀의 성토작업에 1대 이상의 굴삭기를 배정하는 제약식이다. 각 팀의 성토장비 작업그룹에 굴삭기의 대수는 1대 이상이 되어야 한다는 조건을 만족시키는 제약식이다.

식 (5)는 장비가 특정 팀의 특정 작업에 배정되더라도 장비가 해당 작업 수행이 불가능 하면 배정되지 않도록 하는 제약식이다. 특정 팀의 작업그룹에 장비가 배정이 되어 결정변수가 1의 값을 갖더라도 <표 2>의 값이 0이면 해당 팀의 작업그룹에는 배정되지 않도록 제한한다.

식 (6)은 각 팀의 성토작업 능력의 최소값을 제한하는 제약식 으로 굴삭기를 포함한 2대 이상의 장비가 성토작업 그룹에 편성되도록 매개변수 값을 설정하였다.

식 (7)은 각 팀의 성토작업 능력을 기준으로 절토, 적재, 운반 작업그룹의 장비 배정시 토량환산계수에 따른 토공량의 부피차이를 고려해주는 제약식이다. 절토작업을 예로 들면, 구성된 팀의 절토장비 작업그룹의 능력 합은 성토장비 작업그룹의 능력 합에 토량환산계수를 곱한 값보다 커야한다는 제한을 통해 처리해야할 절대적인 토사량의 부피차이를 고려하여

각 팀의 장비배정이 이루어지도록 한다. 동일한 방법으로 적재, 운반 작업그룹의 작업능력을 고려한다.

식 (8)은 운반 장비의 초과사용을 제한하는 제약식이다. 여타의 장비들은 절토, 적재, 성토 작업그룹에 고르게 분배되는 반면, 덤프트럭의 경우 운반 작업에만 배정되기 때문에 팀 내에서 능력이 초과사용 되면 이를 제어해 줄 수 없다. 따라서 성토능력을 기준으로 운반능력이 성토능력의 일정수준 이상이 되면 이를 제어해 주는 다음과 같은 매개변수 값을 적용한다.

3.4 2단계, 진지 구축시간 최소화

2단계의 진지 구축시간을 최소화하는 문제는 1단계에서의 산출된 결과값인 팀별 성토 작업능력을 활용하여 주어진 구축지점들을 각각의 팀이 수행 하였을 때의 소요시간을 산출하고, 팀별 임무수행 시간의 편차와 목표종료 시간과의 편차가 최소화 되도록 구축지점을 배정한다.

팀별 임무수행 시간편차의 최소화를 위해 매개변수인 목표 종료시간 값을 도입하였다. 목표 종료시간 값은 모든 구축지점들의 작업량의 합을 구성된 모든 팀의 성토능력의 합으로 나누어준 값이다. 이는 구성된 모든 팀의 성토능력을 합한 1개의 팀이 임무수행을 하였을 때 소요되는 시간이다. 즉, 구성된 장비들의 최대능력으로 임무수행 하였을 때 소요되는 가장 짧은 시간으로 이 값이 목표 종료시간이 된다. 각 팀의 완료시간과 목표 종료시간의 편차가 최소가 되도록 구축지점에 팀을 배정함으로써 각 팀별 임무수행 시간의 편차를 줄이면서 최소 시간에 임무가 종료 되도록 한다. 이와 같은 고려사항들이 반영된 2단계의 문제는 다음과 같이 모델링 된다.

3.4.1 인덱스(Indices)와 집합(Set)

T : 팀의 집합, $t \in T$

P : 구축지점의 집합, $p \in P$

$P_{priority1}$: 1순위 구축지점 집합

$P_{priority2}$: 2순위 구축지점 집합

* $P_{priority1}$ 과 $P_{priority2}$ 는 긴급 우선순위 구축지점을 나타내는 것으로 옵션으로 사용될 수 있음

3.4.2 입력 데이터(Parameter)

$team_ability_t$: 팀별 성토 작업능력(m^3/hr)

$amount_p$: 진지별 작업량(m^3)

$time_{tp}$: 팀 t 가 구축지점 p 에 투입되었을 때의 소요시간

$$time_{tp} = amount_p / team_ability_t$$

$goal_time$: 팀별 목표임무 종료시간

$$goal_time = \sum_{p \in P} amount_p / \sum_{t \in T} team_ability_t$$

$operation_time$: 연속작전 가능시간

3.4.3 결정변수(Decision Variable)

y_{tp} : 팀 t 가 구축지점 p 에 편성되면 1, 아니면 0인 이진변수 $t \in T, p \in P$

$d_time_t^+$: 팀별 목표 완료시간에 대한 양의 편차를 나타내는 비음실수

3.4.4 목적함수 및 제약식

- 목적함수

$$Min Z = \sum_{t \in T} d_time_t^+ \quad (9)$$

- 목표제약식

$$\sum_{p \in P} (time_{tp} \times y_{tp}) + d_time_t^+ \geq goal_time \quad \forall t \in T \quad (10)$$

- 일반제약식

$$\sum_{t \in T} y_{tp} = 1 \quad \forall p \in P \quad (11)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{t \in T} y_{tp} \geq |P| \quad (12)$$

$$\sum_{p \in P} time_{tp} \times y_{tp} \leq operation_time \quad \forall t \in T \quad (13)$$

$$\sum_{p \in P_{priority1}} y_{tp} = 1 \quad \forall t \in T \quad (14)$$

$$\sum_{p \in P_{priority2}} y_{tp} = 1 \quad \forall t \in T \quad (15)$$

식 (9)와 식 (10)은 각 팀별 임무종료시간과 목표 종료시간의 편차를 최소화 하여 팀별 임무수행 시간의 편차를 최소화 하면서 총 임무수행 시간을 최소화 하는 목적식과 목표 제약식이다.

식 (11)은 1개의 구축지점에 1개 팀만 배정하는 제약식이다. 작업의 효율성과 원활한 통제를 위해 1개 팀이 1개 구축지점에 투입되어 임무를 수행한다.

식 (12)는 최소 구축지점 요구량을 만족시키는 제약식이다. 적어도 주어진 지점 수만큼은 구축해야 한다는 제한사항으로 임무수행 시간을 최소화 할 때 팀에 구축지점을 배정하지 않는 문제를 해결하여 주어진 모든 구축지점에 1개 이상의 팀을 배정한다.

식 (13)은 팀별 연속작전 가능시간을 고려한 제약식이다. 장비운영은 인력에 의해 이루어지기 때문에 조작인원의 피로도와 작전상황, 그리고 지휘관의 의도를 고려하여 설정한다.

식 (14)와 식 (15)는 1순위 구축지점과 2순위 구축지점에 각각 모든 팀을 배정하는 제약식이다. 구축지점들의 우선순위에 따라 구축지점 집합을 설정하고 각 구축지점에 1개씩 팀을 배정토록 하여 우선순위를 고려한다. 예를 들어 3개 팀이 임무수행을 한다고 가정했을 때, 우선순위 1, 2, 3번 구축지점이 1순위 구축지점 집합이 되고 4, 5, 6번 구축지점이 2순위 구축지점 집합이 된다. 각각의 집합에 팀을 무조건 배정하여 초기 구축지점들의 우선순위를 고려한다.

4. 실험 및 결과분석

본 연구의 실험은 GAMS 최적화 프로그램 패키지 와[6] Excel 2010을 활용하며, Intel(R) Core(TM) i5-3470 CPU@3.20GHz, 3.41GB RAM의 Windows 환경의 컴퓨터에서 실시한다.

4.1 실험계획

실험은 전시 1개 공병대대 보유 장비 수준의 가용장비를 판단하였고 총 78대의 장비를 가지고 실험하였다. 장비별 가용대수는 <표 4>와 같다. 포병으로부터 18개 구축지점을 요청받은 상황으로 가정하였고 구축지점별 우선순위와 토공량은 <표 5>와 같다.

<표 4> 장비별 가용대수

구 분	굴삭기	로우더	도 자	다목적 굴착기
가용대수	20	6	6	8
구 분	장갑 전투도자	5톤 덤프	15톤 덤프	계
가용대수	6	26	6	78

<표 5> 구축지점별 우선순위 및 토공량

우선순위	1	2	3	4	5	6
토공량(m³)	2,800	1,100	3,200	1,600	2,200	2,900
우선순위	7	8	9	10	11	12
토공량(m³)	1,200	2,700	1,300	2,200	2,500	3,000
우선순위	13	14	15	16	17	18
토공량(m³)	1,000	1,500	2,300	3,200	1,800	1,600

이러한 조건에서 팀별 능력의 최대화와 편차의 최소화를 위한 적절한 가중치 값을 찾고, 공병 지휘관의 의사결정 변수인 팀 수를 변화시켜 가며 임무수행 시간을 비교한다. 또한 구성된 팀별 진지를 배정하는 2단계 문제의 실험은 구축지점의 긴급 우선순위 제약이 있는 경우(Case 1)와 우선순위를 고려하지 않고 임무수행시간 최소화를 고려한 문제(Case 2)로 구분하여 수행한다. 또한, 이 두 모델의 타당성을 확인하기 위해 그리디 작업 스케줄링 알고리즘을 적용한 경우(Case 3)의 결과를 비교한다. 즉, Case 2는 Case 1과 비교하여 진지 구축지점의 우선순위보다 구축시간을 단축시키는 것에 목적을 두고 팀을 배정하는 분석모델이며 Case 3은 단순히 구축지점들의 우선순위에 따른 팀별 임무수행시간을 최소화하는 그리디 알고리즘을 적용하여 Case 1과 Case 2 모델의 타당성을 검증하기 위한 분석모델이다. 여기서 Case 3에 적용한 그리디 알고리즘은 다음과 같다.

- ① 우선순위에 따라 팀별 구축지점의 수행시간 비교
- ② 소요시간이 가장 짧은 팀에 배정
- ③ 누적 소요시간이 가장 짧은 팀에 배정
- ④ 더 이상 고려할 구축지점이 없을 때 까지 반복

4.2 실험결과 및 분석

주어진 실험값으로 수리모델을 실행하였을 때 조건을 충족하면서 구성된 팀 수는 최대 5개 팀이었고 2~5개 팀을 구성하였을 때 가중치에 따른 팀별 성토능력의 합과 능력의 편차는 <표 6>과 같다.

<표 6> 가중치에 따른 팀별 작업능력

2개 팀							
Weight 1값	0.50	0.60	0.70	0.80	0.85	0.90	0.95
성토능력합	1,987	1,987	1,987	1,987	1,922	1,922	1,947
능력편차	157	157	157	157	222	222	507
3개 팀							
Weight 1값	0.50	0.60	0.70	0.80	0.85	0.90	0.95
성토능력합	1885	1885	1756	1756	1885	1885	1885
능력편차	510	510	352	352	510	510	510
4개 팀							
Weight 1값	0.50	0.60	0.70	0.80	0.85	0.90	0.95
성토능력합	1820	1755	1912	1885	1912	1885	1754
능력편차	120	345	372	345	175	280	202
5개 팀							
Weight 1값	0.50	0.60	0.70	0.80	0.85	0.90	0.95
성토능력합	1887	1912	1912	1887	1912	1754	
능력편차	120	263	263	345	175	202	

<표 6>은 Weight 1값에 따라 구성된 팀의 성토능력 총 합과, 팀 중에서 가장 큰 능력을 가진 팀과 가장 작은 능력을 가진 팀의 능력편차를 보여준다. 2개 팀일 경우를 제외한 나머지 경우모두 Weight 1값이 0.85일 때 가장 큰 성토능력이 산출되었고, 2개 팀일 경우 Weight 1값이 0.8일 때 가장 큰 성토능력이 산출되었다. 4가지 경우 모두 Weight 1값이 0.5 미만이면 능력의 최대화 보다 성토능력의 편차를 줄이는 가중치가 더 커지게 되어 가용장비 중 일부를 배정하지 않는 결과가 산출되었다. 따라서 2개 팀의 경우에는 Weight 1값을 0.8로, 3개, 4개, 5개 팀의 경우에는 Weight 1값을 0.85로 하여 팀별 성토능력의 합이 최대가 되도록 1단계 모델을 실행하였고 산출 결과는 <표 7>과 같다. <표 7>은 4개 팀으로 구축 팀을 구성하였을 때의 팀별 장비구성 세부내용이며 2개, 3개, 5개 팀 모두 같은 원리로 팀별 장비 구성이 이루어진다.

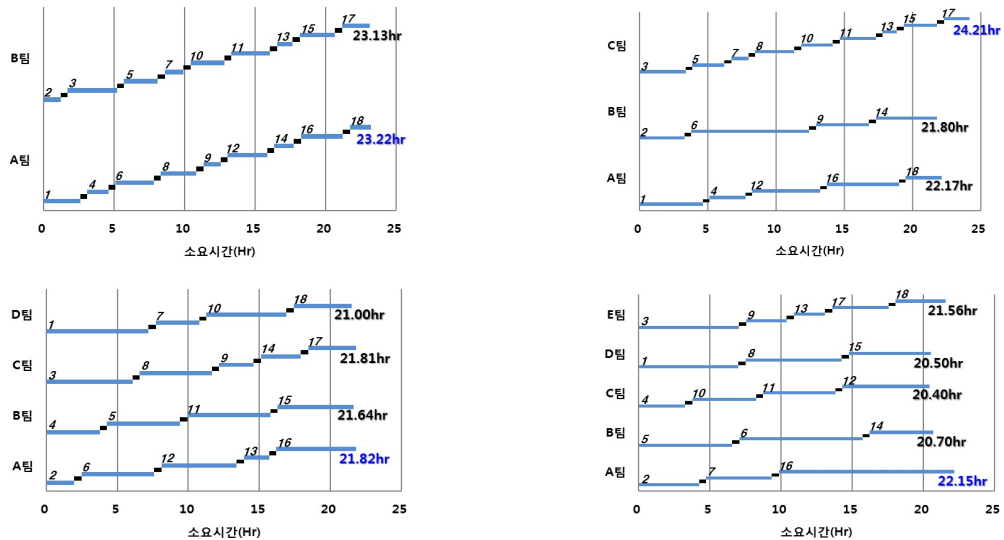
<표 7> 1단계 모형 실행결과(4개팀)

구분	A팀 장비명(대수)	B팀 장비명(대수)
절토	도자(1) 다목적굴착기(1) 장갑전투도자(1)	도자(2)
적재	굴삭기(3) 로우더(1) 다목적굴착기(2)	로우더(2) 다목적굴착기(1)
운반	5톤 덤프(9) 15톤 덤프(1)	5톤 덤프(1) 15톤 덤프(3)
성토	굴삭기(1) 도자(1) 장갑전투도자(1)	굴삭기(1) 다목적굴착기(1) 장갑전투도자(1)
구분	C팀 장비명(대수)	D팀 장비명(대수)
절토	굴삭기(2) 장갑전투도자(2)	도자(1) 장갑전투도자(1)
적재	굴삭기(1) 로우더(3)	굴삭기(2) 다목적굴착기(3)
운반	5톤 덤프(8) 15톤 덤프(1)	5톤 덤프(8)
성토	굴삭기(4) 도자(1)	굴삭기(6)

<표 8> 팀 수에 따른 팀별 작업능력(m³/hr)

2개 팀					
구분	절토	적재	운반	성토	
A팀	1,202	1,247	1,338	1,072	
B팀	1,064	1,068	1,140	915	
3개 팀					
구분	절토	적재	운반	성토	
A팀	727	721	759	605	
B팀	432	396	393	335	
C팀	1,270	1,137	1,173	945	
4개 팀					
구분	절토	적재	운반	성토	
A팀	632	661	693	565	
B팀	540	536	519	427	
C팀	590	671	633	530	
D팀	500	526	480	390	
5개 팀					
구분	절토	적재	운반	성토	
A팀	295	297	300	260	
B팀	365	399	393	335	
C팀	520	536	513	492	
D팀	500	404	426	400	
E팀	598	595	480	455	

1단계 모델 실행간 토량환산계수는 성토량 1을 기준으로 절토량을 1.1, 적재와 운반량을 1.15로 부여하였다. 팀별 장비구성은 덤프트럭 일부를 제외한 모든 가용장비를 활용하여 팀을 구성하였다. 구성된 팀별 작업능력은 <표 8>과 같다.



〈그림 3〉 팀별 소요시간

3개 팀을 구성했을 때의 C팀과 5개 팀을 구성했을 때의 D, E팀의 절토능력이 과다하게 편성되었는데 이는 장비 자체의 능력이 대부분 100m³/hr 이상의 능력을 가지고 있고 이러한 장비들로 요구조건이 충족 되도록 정수단위로 장비를 배정하는 데에 따른 오차값으로 판단된다. 팀별 성능 능력의 편차는 3개 팀을 구성했을 때 610m³/hr으로 가장 컸고 2개 팀을 구성했을 때 157m³/hr로 가장 작았다.

위와 같은 결과를 가지고 2단계 모델을 실행하였다. 1단계 모델의 실행 결과값인 팀별 성능능력 데이터를 가지고 3가지 경우로 나누어 2단계 모델을 실험하였고 가정사항으로 각 구축지점 간 이동시간은 0.5시간을 적용하였다. Case 1의 실행 결과는 <그림 3>과 같다.

그림의 가로축은 소요시간을 세로축은 각 팀을 의미한다. 파란색 막대는 각 지점별 소요시간이며 검은색 막대는 지점 간 이동시간이다. 또한 파란색 막대 위의 이탤릭체 숫자는 구축지점의 우선순위이며 연속된 막대의 마지막에 표시된 숫자는 각 팀의 최종 임무완료 시간이다. 실험결과 4개 팀으로 임무수행 한 경우 21.82시간으로 가장 짧은 시간이 소요되었고 3개 팀으로 임무수행 한 경우 24.21시간으로 가장 긴 시간이 소요되었다. 최종 완료시간과 팀별 중

료시간의 편차를 비교했을 때 4개 팀으로 구성하여 임무수행 할 경우 가장 효과적이라는 결론이 도출되었다.

Case 2의 경우 4개 팀으로 임무수행 한 경우 가장 짧은 시간이, 3개 팀으로 임무수행 한 경우 가장 긴 시간이 소요되었다. Case 1과 비교해 보면 4가지 경우 모두 0.1~0.2시간 가량 단축되었으나 전체적으로 우선순위가 고려되지 않았음을 알 수 있다. 5개 팀으로 임무수행 한 경우를 보면 최초 A~E팀이 각각 1~5번 구축지점 중 한곳에 배정되어야 하나 각각 6, 1, 7, 8, 2번 지점에 최초 투입되어 우선순위가 고려되지 않았다. 이는 2개 팀, 3개 팀, 4개 팀의 경우도 동일하게 발생되어 Case 2의 경우 총 수행시간은 Case 1과 비교하여 약간 단축되었으나 우선순위가 전혀 고려되지 않았음을 알 수 있다.

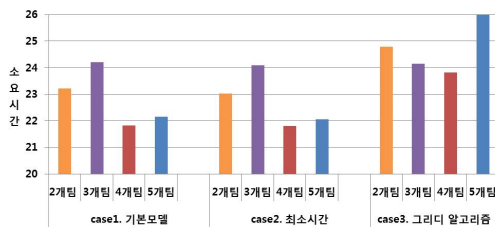
그리디 알고리즘을 적용하였을 때는 4개 팀으로 임무수행 한 경우 가장 짧은 시간이, 5개 팀으로 임무수행 한 경우 가장 긴 시간이 소요되었다. Case 1, 2와 비교해 완료시간이 늘어났음을 알 수 있다. 또한 팀별 종료시간의 편차도 증가하였는데, 이는 수행시간보다 구축지점들의 우선순위를 먼저 고려함에 따라 구축지점 배정 시 지점 간 이동시간의 길이가 감소됨에 따른 결과이다.

<표 9> Case 2 실험결과(최단시간 임무수행)

2개 팀			
구 분	능력 (m ³ /hr)	구축순서	완료시간 (hr)
A팀	1,072	2, 3, 4, 6, 7, 9, 12, 14, 16, 18	23.02
B팀	915	1, 5, 8, 10, 11, 13, 15, 17	22.63
3개 팀			
구 분	능력 (m ³ /hr)	구축순서	완료시간 (hr)
A팀	605	1, 5, 6, 9, 12	22.17
B팀	335	3, 13, 16	23.09
C팀	945	2, 4, 7, 8, 10, 11, 14, 15, 17, 18	24.08
4개 팀			
구 분	능력 (m ³ /hr)	구축순서	완료시간 (hr)
A팀	565	1, 7, 12, 13, 16	21.82
B팀	427	6, 8, 9, 18	21.41
C팀	530	2, 3, 4, 10, 11	21.80
D팀	390	5, 14, 15, 17	21.50
5개 팀			
구 분	능력 (m ³ /hr)	구축순서	완료시간 (hr)
A팀	260	6, 12	22.05
B팀	335	1, 3	18.41
C팀	492	7, 9, 10, 13, 15, 18	22.01
D팀	400	8, 16, 17	20.25
E팀	455	2, 4, 5, 11, 14	21.56

<표 10> Case 3 실험결과(그리디 알고리즘)

2개 팀			
구 분	능력 (m ³ /hr)	구축순서	완료시간 (hr)
A팀	1,072	1, 4, 5, 7, 8, 11, 13, 14, 15, 17, 18	24.78
B팀	915	2, 3, 6, 9, 10, 12, 16	21.47
3개 팀			
구 분	능력 (m ³ /hr)	구축순서	완료시간 (hr)
A팀	605	2, 4, 6, 9, 12, 16	24.15
B팀	335	3, 11, 18	22.79
C팀	945	1, 5, 7, 8, 10, 13, 14, 15, 17	22.73
4개 팀			
구 분	능력 (m ³ /hr)	구축순서	완료시간 (hr)
A팀	565	1, 7, 9, 11, 15	19.88
B팀	427	3, 10, 14, 17	21.87
C팀	530	2, 5, 8, 12, 18	22.00
D팀	390	4, 6, 13, 16	23.81
5개 팀			
구 분	능력 (m ³ /hr)	구축순서	완료시간 (hr)
A팀	260	5, 11	18.58
B팀	335	4, 7, 10, 16	25.98
C팀	492	1, 8, 13, 15	19.39
D팀	400	3, 9, 14, 17	21.00
E팀	455	2, 6, 12, 18	20.40



<그림 4> Case별 비교

결과를 종합 비교한 <그림 4>에서 가장 짧은 임무수행시간이 산출된 4개 팀을 구성한 경우가 본 실험값에서 가장 효과적임을 알 수 있다. 하지만 실험값의 영향요소 즉, 장비의 수와 능력, 구축지점의 작업량 및 우선순위에 따라 결과는 다르게 결정될 것이다. 이러한 분석결과가 최적의 답이라고 단정 할

수는 없으나 본 연구의 결과에 대한 다양한 분석을 바탕으로 의사결정권자의 의도와 상황을 종합적으로 고려한다면 최선의 해를 찾을 수 있다고 생각한다.

5. 결론 및 향후 연구방향

본 연구는 공병에서 수행하는 포병진지 구축 작전에서 제한된 장비를 효과적으로 운용하여 최단시간 내에 임무를 완료하기 위해 장비의 최대 능력으로 구축 팀을 편성하고 이를 구축지점에 배정해 주는 모델을 구성하였으며 지휘관의 의사결정 변수인 팀 수의 변화에 따른 총 수행시간을 비교하였다. 이러한 모델의 실험 결과는 현재의 가용장비 수에 따른 적정 팀 수를 판단할 수 있게 해주고 작전상황과 지휘관의 의

도에 따라 구축지점을 배정해주는 조건을 다르게 적용하여 효과적인 팀별 작업일정을 제시해 준다.

본 논문의 수리모형을 활용하면 가용장비의 변화와 구축지점의 변경에 따라 다양한 결과값을 비교하여 상황에 맞는 최적의 팀 구성 및 작업일정을 산출할 수 있기 때문에 시시각각 변화하는 전장상황에서 탄력적인 계획수립에 효과적인 의사결정에 기여할 수 있을 것이다.

좀 더 현실적인 문제의 고려사항들을 반영하기 위한 추후 연구과제로는 구축 지점별 이동시간과 완료 시간을 동시에 고려한 구축팀을 배정하는 문제를 적용하는 것도 흥미로운 연구 주제가 될 것이다

참 고 문 헌

- [1] 김연민, “N개의 다른 도크를 고려한 선박 건조 혼합의 최적화”, 『산업공학(IE interfaces)』, 제22권, 제1호(2009), pp.38-43.
- [2] 원서경, 김선국, 한충희, “시스템 다이내믹스를 활용한 토공장비의 조합 모형 연구”, 『한국건설관리학회 학술발표대회 논문집』, 제10권, 제1호(2010), pp.210-205.
- [3] 육군교육사령부 편, 야전교범 34-0-2 공병야전제원, 대전 : 국군인쇄창, 2013.
- [4] 이상원, 임석철, “이진정수계획법을 사용한 복층숙소의 최적 방 배정문제”, 『산업공학(IE interfaces)』, 제21권, 제2호(2008), pp.170-176.
- [5] 최재희, 이동훈, 김선형, 김선국, “토공장비 선정 및 조합을 위한 영향요인 연구”, 『한국건설관리학회 학술발표대회 논문집』, 제10권, 제1호(2010), pp.210-205.
- [6] Kalvelgen, E., *Solving Multi-Objective Models with GAMS*, The War, New York : Knopf, 2007.
- [7] Shah, R.K., “A New Approach for Automation of Location-based Earthwork Scheduling in Road Construction Projects,” *Automation in Construction*, Vol.43(2014), pp.156-169.
- [8] Stanley Zionts, *Linear and Integer Programming*, Prentice-Hall, 1997.