

# 다중 양중장비와 자재 야적 위치의 최적 결정을 위한 모델 개발

## Optimization of Multiple Tower Cranes and Material Stockyards Layout

김 경 주\*                      김 경 민\*\*                      이 상 규\*\*\*  
Kim, Kyong Ju              Kim, Kyoungmin              Lee, Sang-kyu

### 요 약

본 연구에서는 여러 대의 타워 크레인이 다양한 후보지점을 갖고, 자재 역시 다양한 야적 후보지점을 가질 때 자재 운반 최적화를 지원하기 위한 유전자 알고리즘 기반의 모델을 제시하고자 한다. 대형 건축공사에서 타워 크레인의 위치와 자재 야적 위치의 변화는 자재 운반시간의 변화를 가져온다. 또한 여러 대의 타워 크레인을 사용하는 경우 각 자재의 운반에 어떠한 타워 크레인을 배정하느냐에 따라 작업의 효율성이 변화한다. 따라서 본 연구에서는 다중의 타워 크레인 설치 후보지, 여러 종류의 자재, 자재 야적 후보지점간의 다양하고 복잡한 상관관계를 다루기 위하여 유전자 알고리즘을 적용한 다중 양중장비 및 자재 야적 위치 최적화 모델을 제시하였다. 또한, 제시된 모델을 사례에 적용하여 적용 과정을 예시하고 활용성을 검증하였다.

**키워드 :** 타워 크레인, 양중장비, 최적화, 유전자 알고리즘, 현장배치계획

## 1. 서론

국내의 초고층 빌딩 수요의 증가와 함께, 공기 및 비용 측면에서의 최적화에 대한 관심도 증가하고 있다. 따라서 본 연구에서는 다양한 설치 후보지점을 갖는 다중 타워 크레인과 자재 야적 위치의 현장 배치계획(Layout)을 지원하는 의사결정 모델을 제시하고자 한다. 대형 건축공사에서 타워 크레인의 다양한 위치 변화와 자재 야적의 다양한 위치변화에 따라 자재 운반시간은 변화한다.

또한 여러 대의 타워 크레인을 사용하는 경우 각 자재의 운반에 어떠한 타워 크레인을 배정하느냐에 따라 작업의 효율성이 변화한다. 기존에 타워 크레인 위치선정 모델들이 다양하게 제시되어왔으나 각 크레인에 배정된 자재의 운반을 최적화하는 모델로 제한되었다. 여러 대의 타워 크레인 위치와 함께 자재 야적 위치 간의 상호관계를 고려한 최적화 모델제시에는 한계가 있었다. 따라서 본 연구에서는 다중의 타워 크레인 설치 후보지, 여

러 종류의 자재, 자재 야적 후보지점간의 다양하고 복잡한 상관관계를 다루기 위하여 유전자 알고리즘을 적용한 양중장비 및 자재 야적의 위치를 동시에 최적화 하기 위한 모델을 제시하고자 한다. 또한 제시된 모델을 위한 사례를 구성한 후, 적용 과정을 예시하고 활용성 및 효과를 검증하고자 한다.

## 2. 기존연구 고찰

일반적으로 양중 계획은 공정표에 의한 개략적인 양중부하계산, 개략 타워 크레인 기중 결정 및 타워 크레인 대수 산정, 타워 크레인 위치 결정 등의 작업에 의해 수행된다(김정진, 2002). 양중 계획 중 선행 분석과정, 즉 구조물의 특성 및 공정 계획, 현장 특성 등에 따른 양중 부하계산, 타워 크레인 기중 및 대수 산정 등에 대해서 다양한 연구결과 및 시스템이 제시되고 있다. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 선행 분석 작업이 완료되어 타워 크레인 기중 및 대수가 산정된 후 크레인과 자재의 최적 위치를 결

\* 중신회원, 중앙대학교 건설환경공학과 교수, 공학박사 kjkim@cau.ac.kr

\*\* 일반회원, 중앙대학교 토목공학과, 공학박사(교신저자) kmkim@wm.cau.ac.kr

\*\*\* 일반회원, 중앙대학교 토목공학과, 석사과정 mengtes@naver.com

정하기 위한 최적화 모델 구축을 연구범위로 한다.

타워 크레인의 위치 최적화를 위한 연구는 다양하게 수행되어 왔다. Choi and Harris(1991)는 자재 운반시간을 최소화함으로써 타워 크레인의 위치를 최적화하고자 하였다. 이를 위해 하나의 타워 크레인에 대한 최적 위치를 결정하기 위한 수학 모델을 제시한바 있으며, Rodriguea-Ramos and Francis(1983)는 크레인 후크의 정박위치를 찾는 모델을 제시하기도 하였다. Gray and Little(1985)은 불규칙한 형상을 갖는 건물을 위한 타워 크레인 최적위치를 선정하기 위하여 의사결정 흐름도를 이용한 컴퓨터 시스템을 개발하였다.

Zhang et al.(1999)은 타워크레인 여러 대의 위치를 최적화하기 위한 3단계 작업수행 모델을 제시하였다. 자재의 야적 위치가 주어졌을 때 타워 크레인 간의 작업 부하에 균형을 맞추고, 상호 간의 충돌 가능성을 최소화하면서 작업의 효율을 고려하기 위한 현장 배치계획(Layout)을 표 1과 같이 3단계로 제시하였다.

표 1. 현장 배치계획(Layout)

단계	내용
1	수행하여야 할 공종을 분류하고, 기하학적(Geometric) 근접성을 바탕으로 각 크레인의 적정 위치를 파악
2	이전 단계에서 결정한 공종 그룹은 업무 부하의 균형과 상호 충돌 최소화를 고려하여 조정
3	최소 후크(Hook) 이동 시간을 활용한 개별 타워 크레인의 위치 최적화 모델 개발

이러한 기존의 연구들은 타워 크레인의 위치와 자재 야적지점, 자재 야적지점간의 다양한 경쟁관계를 무시했던 한계를 가지고 있었다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 Tam et al (2001)은 한대의 타워 크레인에 대한 타워크레인 위치 및 주변의 자재 야적지점을 최적화하는 유전자 알고리즘을 제시하였다. Tam et al (2001)은 기존 연구와 달리 1 대의 타워크레인의 위치와 자재 야적위치 간의 상호 관계와 자재 야적위치 간의 우위를 반영한 양중장비와 자재 야적 위치의 최적 결정을 위한 가장 최근의 연구 결과로 평가된다.

타워 크레인의 최적위치 결정은 현장 내에 존재하는 자재 종류별 다양한 야적 후보지점과 기자재가 설치될 지점, 다수의 타워 크레인 설치 후보지점, 타워 크레인 간 충돌예방을 위한 최소간격 등 다양하고 복잡한 관계에 의해 영향을 받는다. 본 연구에서는 타워 크레인을 설치할 수 있는 다양한 후보지점의 위치에 따른 다양한 자재 야적 후보지로부터 자재 설치지점까지의 운반시간 최소화를 지원하는 여러 대의 타워 크레인 위치를 동시에 최적화하는 모델을 제시하고자 한다.

### 3. 연구 방법

타워 크레인, 자재 야적 후보지, 설치 지점간의 다양하고 복잡

한 상관관계를 다루기 위하여 엑셀 기반의 유전자 알고리즘을 활용하고자 한다. 유전자 알고리즘은 자연의 유전학 및 적자생존의 원리(The genetics and natural selection)에 근거한 최적화 기법의 일종이다. 유전자 알고리즘은 비선형문제의 최적화에 특히 유용하며, 선형 계획법에 의한 지역 최적화(Local optima)에 부딪혔을 때의 한계를 극복할 수 있는 방안을 제공한다. 유전자 알고리즘에서 하나의 주어진 문제에 대한 해는 하나의 유전자 (또는 염색체)로 표현되며, 문제의 후보 해(Candidate solution)를 위한 유전자들로 구성되는 모집단(Population)의 생성으로부터 해의 탐색이 시작된다.

이러한 초기 유전자의 모집단을 구성하는 방법에 대한 정의와 함께, 후보해의 적합도를 평가할 수 있는 기능, 주어진 해로부터 다음 세대(Next generation)의 새로운 해를 만들어 낼 수 있는 연산자가 정의되어야 한다. 새로운 해를 재생산하기 위해서는 모집단에서 유전자들을 선택(Selection)하며, 이때 최적화에 더 적합한 결과를 제공하는 염색체는 더 많이 선택되어 다음 세대로 재생산될 가능성이 높아지게 된다. 또한 유전자 알고리즘은 돌연변이(Mutation)와 염색체의 교차(Crossover)를 통하여 해들을 급격히 진화시켜나간다. 이러한 과정을 통하여 유전자 알고리즘은 발전과 최적 해를 발견해나간다. 이러한 유전자 알고리즘의 연과과정은 그림1과 같이 정리할 수 있다.

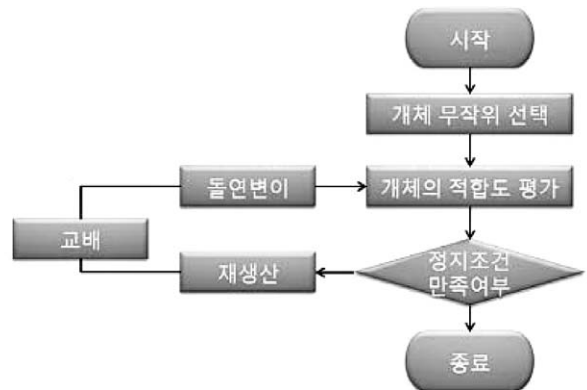


그림 1. 연산자 적용과정

- ① 초기 모집단(Initial population)안의 후보 해(염색체)들은 무작위로 구성된다.
- ② 현재 모집단 안의 각 후보 해들의 적합도(Fitness function)를 계산한다.
- ③ 다음 세대의 새로운 모집단을 구성하기 위하여 적합도가 높은 개체들을 선택한다. 일반적으로 적합도가 좋을수록 후손을 남길 확률이 높아지고 나쁠수록 확률이 낮아지는 적자생존의 법칙이 적용된다.
- ④ 기존 해집단 중에서 선택된 한 쌍의 염색체로 부터 교차점을

무작위로 선택하여 두 염색체들 사이에 그 이전과 이후의 배열의 일부분을 교환하여 두 개의 자손(Offspring chromosome)을 생성하는 그림 2 (1)과 같은 교차연산을 수행한다.

- ⑤ 지역 최적화(Local optimum)가 되는 것을 막기 위하여 각각의 개체에서 무작위로 돌연변이를 시킨다. 특정 세대의 각 염색체에서 돌연변이 확률에 따라 랜덤하게 선택된 돌연변이점(Mutation point)의 특정 비트를 그림 2 (2)와 같이 반전시키는 기능을 말한다. 이러한 기능은 교차에 의하여 발생할 수 있는 염색체 이외의 새로운 염색체를 생성시킴으로써 탐색해의 범위를 변화시킨다.
- ⑥ 염색체에 대한 적합도 평가를 다시 수행하고, 정지조건을 만족하면 결과를 도출하고 만족하지 않는다면 위와 같은 과정을 반복하여 새롭게 모집단을 다시 생성하고, 최적의 해가 발견될 때까지 앞서 수행한 일련의 연산과정을 반복하게 된다.

이러한 유전자 알고리즘은 건설 분야의 최적화 문제를 해결하는데 있어 효과적임을 다양한 연구에서 입증되어 왔다. 제약조건 속에서의 공정계획(Leu et al., 1999), 이산(Koumoussis et al., 1994) 또는 합성 이산 비선형 최적화(Jenkins, 1997), 현장 레이아웃(Li et al., 1988), 1대의 타워 크레인과 자재 야적 위치 최적화(Tam et al., 2001) 등 다양한 분야에서 활용되고 있다.

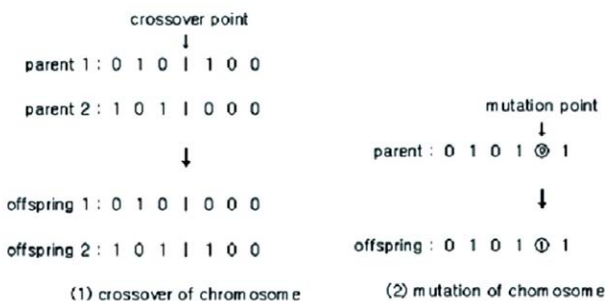


그림 2. 최적 해를 찾기 위한 연산과정

## 4. Model 구성

양중 계획을 위한 기본적인 작업의 구성은 다음과 같다. 여러 종류의 자재를 현장의 여러 지점에 야적한 후 공사 단계에 따라 타워 크레인을 이용하여 필요한 위치에 자재를 운반하는데 있어 최저의 비용으로 운반할 수 있는 자재 야적 및 타워 크레인의 위치를 선정하여야 한다. 이때 다수의 활용 가능한 자재 야적위치(S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, S<sub>3</sub>, ..., S<sub>i</sub>)가 존재하며, 자재가 설치되는 다수의 지점(D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub>, D<sub>3</sub>, ..., D<sub>i</sub>)이 존재한다. 또한 타워 크레인을 설치 할 수 있는 다수의 후보지(Cr<sub>1</sub>, Cr<sub>2</sub>, Cr<sub>3</sub>, ..., Cr<sub>n</sub>)가 존재한다. 운반되

어야 하는 자재의 물량은 자재의 종류마다 상이한 경우를 반영하여 모델을 구축하여야 하며, 운반되어야 하는 자재의 수량(자재 수요처당 운반 횟수)은 설치지점 마다 상이한 경우를 반영하여야 한다. 하나의 자재는 여러 개의 야적 후보지점을 가질 수 있으며, 하나의 자재는 동일한 야적 지점에 적치하거나 여러 야적지점에 나누어 적치할 수 있다. 이러한 작업특성을 지원하는 모델을 제시하여야 하며 그 구성은 다음과 같다.

### 4.1 목적함수

각 야적장에서 타워 크레인에 의해 각 공구별(자재 소요처)로 운반하는데 필요한 시간의 총 합계를 최소화한다.

$$\text{Minimize } c_{11}x_{11} + c_{12}x_{12} + \dots + c_{ij}x_{ij} \quad (1)$$

- $c_{ij}$  : 야적장  $i$ 로부터 공구  $j$ 로의 자재 운반량(운반 횟수)
- $x_{ij}$  : 지점  $i$ 로부터 지점  $j$ 로 운반하는데 드는 단위비용(운반시간)

### 4.2 자재 야적장 선정에 대한 제약조건

야적장 후보지 중에서 자재 종류( $i$ )별로 최적의 야적장( $j$ )을 결정하여야 하며, 이것을 미지의 변수(Changing cell)  $x_{ij}$ 로 설정한다. 이를 위해 (사전 분석을 통해 파악된) 자재야적 후보지점(S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, S<sub>3</sub>, ..., S<sub>i</sub>)과 자재의 종류(M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub>, M<sub>3</sub>, ..., M<sub>m</sub>)를 설정한다.

한 종류의 자재가 모든 야적장에 야적된 총량은 1(or 100%)이어야 하며, 하나의 야적장에 야적된 물량은 야적장의 용량을 초과할 수 없다. 하나의 야적장( $j$ )에 야적한 자재의 종류를 1 이하로 제한하고, 한 종류의 자재를 동일한 야적장에 야적하는 경우에 대한 자재별 야적장( $x_{ij}$ )선정에 있어서 제약조건은 다음 식(2)와 같다. 이때 변수는 0 또는 1을 가진다. 또한 한 종류의 자재를 여러 야적장에 나누어 야적 가능한 경우 변수는 소수 값을 갖는다. 즉, 하나의 자재를 여러 위치에 나누어 야적하는 방식에 대한 모델의 경우, 자재 야적 여부에 대한 변수(Changing cell)를 정수(Integer)가 아닌 소수(%)로 변경함으로 반영가능하다.

$$\begin{aligned} \text{s.t. } & x_{11} + x_{12} + \dots + x_{1n} = 1 \\ & \dots \\ & x_{m1} + x_{m2} + \dots + x_{mn} = 1 \\ & x_{11} + x_{21} + \dots + x_{m1} \leq 1 \\ & \dots \\ & x_{1n} + x_{2n} + \dots + x_{mn} \leq 1 \\ & x_{ij} \geq 0, x_{ij} \leq 1, x_{ij} = \text{int}, \forall i, j \end{aligned} \quad (2)$$

- $x_{ij}$  : 자재  $i$ 를 야적장  $j$ 에 야적한 경우(= 1)
- $m$  : 자재 종류의 숫자
- $n$  : 야적장 후보지의 숫자

### 4.3 여러 대의 타워 크레인에 대한 위치 선정 제약 조건

사전 조사를 통하여 파악된 다수의 타워 크레인 설치 후보지점 ( $h$ ) 중에서 각 타워 크레인을 설치할 최적 설치지점을 선정하기 위하여 각 타워 크레인의 최적 설치지점을 결정하여야 한다. 이것을 미지의 변수(Changing cell),  $c_{ij}$ 로 설정한다. 이를 위해 고려 중인 크레인 대수( $g$ )와 먼저 사전 조사를 통해 파악된 크레인 설치 후보지점( $h$ )에 대한 정보를 입력 받는다.

하나의 타워 크레인( $g$ )은 최소한 한 곳의 설치 후보지( $Cr_1, Cr_2, \dots, Cr_h$ )에 설치되어야 하며, 각 크레인 설치 후보지에는 하나 이하의 타워 크레인이 설치될 수 있다. 이러한 여러 대의 타워 크레인 설치 후보지에 대한 제약조건은 다음과 같이 표현된다. 이때 각 타워 크레인에 대한 최적위치 선정여부에 대한 변수( $c_{ij}$ )는 0 또는 1을 가진다.

$$\begin{aligned}
 \text{s.t.} \quad & c_{11} + c_{12} + \dots + c_{1h} = 1 \\
 & \dots \\
 & c_{g1} + c_{g2} + \dots + c_{gh} = 1 \\
 & c_{11} + c_{21} + \dots + c_{g1} \leq 1 \\
 & \dots \\
 & c_{1h} + c_{2h} + \dots + c_{gh} \leq 1 \\
 & c_{ij} \geq 0, c_{ij} \leq 1, c_{ij} = \text{int}, \forall i, j
 \end{aligned} \tag{3}$$

- $c_{ij}$  : 타워 크레인  $i$ 를 크레인 설치 후보지  $j$ 에 설치 (= 0 or 1)
- $h$  : 타워 크레인 설치 후보지의 숫자
- $g$  : 타워 크레인의 숫자

### 4.4 각 자재를 운반할 타워 크레인 선정 제약조건

야적장에 적재되어 있는 각 자재를 운반할 최적의 타워 크레인 ( $g$ )을 선정하기 위하여 각 타워 크레인에 대한 최적 자재종류 ( $m$ )를 결정하여야 한다. 이것을 미지의 변수(Changing cell)  $d_{ij}$ 로 설정한다. 각 자재를 운반하는데 최소한 하나의 타워 크레인이 필요하며, 하나의 타워 크레인에 배정된 자재의 종류는 전체 자재 종류의 숫자( $m$ )를 초과할 수 없다. 따라서 이에 대한 제약조건은 다음과 같다. 이때 타워 크레인에 대한 자재의 배정 여부를 미지의 변수로 설정한다.

$$\begin{aligned}
 \text{s.t.} \quad & d_{11} + d_{12} + \dots + d_{1m} \leq m \\
 & \dots \\
 & d_{g1} + d_{g2} + \dots + d_{gm} \leq m \\
 & d_{11} + d_{21} + \dots + d_{g1} = 1 \\
 & \dots \\
 & d_{1m} + d_{2m} + \dots + d_{gm} = 1 \\
 & d_{ij} \geq 0, d_{ij} \leq 1, d_{ij} = \text{int}, \forall i, j
 \end{aligned} \tag{4}$$

- $d_{ij}$  : 타워 크레인  $i$ 으로 자재  $j$ 를 운반(= 0 or 1)
- $m$  : 자재종류의 수
- $g$  : 타워 크레인의 숫자

### 4.5 타워 크레인 설치 위치 간에 거리의 제약조건

타워 크레인을 설치함에 있어 최소 간격의 확보를 필요로 하며, 이에 따라 하나의 후보지에 크레인을 설치하는 경우 다른 크레인을 일부 후보지에 설치할 수 없는 경우가 발생한다. 이에 대한 제약조건을 다음과 같이 설정하여야 한다.

$$\sum v \leq 1 \tag{5}$$

- $v$  : 타워 크레인을 동시에 설치하는 경우 상호 제약이 있는 지점들

### 4.6 타워 크레인의 위치 및 자재 야적위치에 따른 총 운반시간 산정

선정된 자재 야적위치로부터 타워 크레인의 위치에 따라 각 자재별 설치지점에 대한 운반시간을 산정한다. 각 자재별 설치지점에 대한 운반시간에 대하여 각 자재별 설치지점에 대한 운반횟수를 곱하여 각 자재 야적위치 및 타워 크레인의 위치에 따른 운반비용을 산정한다. 운반 시간의 산정을 위해서는 기존 연구결과인 Hook Travel Time (Zang et al. 1999) 산정공식인 다음 식들을 활용하였다.

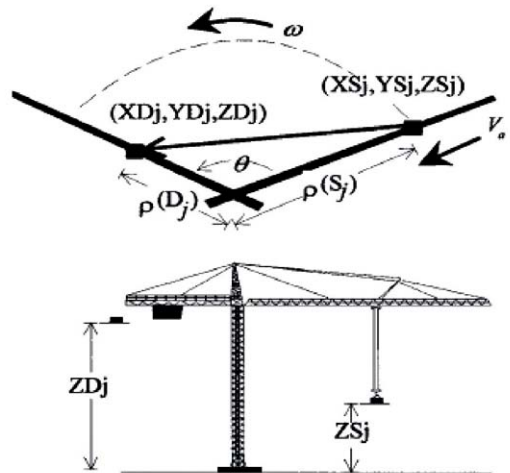


그림 3. Hook Travel Time (Zang et al. 1999)

$$T = \max(T_h, T_v) + \beta \cdot \min(T_h, T_v) \tag{6}$$

$$T_v = \frac{|ZS_i - ZD_i|}{V_h} \tag{7}$$

$$T_h = \max(T_a, T_w) + \alpha \cdot \min(T_a, T_w) \quad (8)$$

Times for trolley radial movement :

$$T_a = \frac{|\rho(D_i) - \rho(S_i)|}{V_a} \quad (9)$$

Time for trolley tangent movement :

$$T_w = \frac{1}{V_w} \cdot \arccos\left(\frac{l_i^2 - \rho(D_i)^2 - \rho(S_i)^2}{2 \cdot \rho(D_i) \cdot \rho(S_i)}\right) \quad (10)$$

$(0 \leq \arccos(\theta) \leq \pi)$

$$\rho(D_i) = \sqrt{(XD_i - XCr_i)^2 + (YD_i - YCr_i)^2} \quad (11)$$

$$\rho(S_i) = \sqrt{(XS_i - XCr_i)^2 + (YS_i - YCr_i)^2} \quad (12)$$

$$l_i = \sqrt{(XD_i - XS_i)^2 + (YD_i - YS_i)^2} \quad (13)$$

$D_i$  : 자재 설치지점

$S_i$  : 자재 야적지점

$Cr_i$  : 타워크레인 설치지점

$\rho(D_i)$  : 자재 설치지점과 타워크레인 설치지점 사이의 거리

$\rho(S_i)$  : 자재 야적지점과 타워크레인 설치지점 사이의 거리

$l_i$  : 자재 야적지점과 설치지점 사이의 거리

$\alpha, \beta$  : 0~1

먼저 식 (11)을 이용하여 각 크레인 설치 후보지점에서 자재 설치지점까지의 거리를 산정하며, 식 (12)를 활용하여 자재 야적지로부터 크레인까지의 위치를 계산한다. 식 (13)을 이용하여 자재 야적지로부터 설치지점까지의 거리를 계산한다.

다음은 식 (9)을 적용하여 각 크레인 설치 후보지에 대한 자재 야적지점에서 설치지점간의 이동할차(Trolley)의 방사상 이동 시간을 계산한다. 또한 식 (10)을 적용하여 각 크레인 설치 후보지점이 선정되었을 경우에 대한 자재 야적지점에서 설치지점까지의 접선이동 시간을 계산한다. 식 (8)을 적용하여 각 크레인 설치 후보지점이 선정되었을 경우에 대한 자재 각 야적지점에서 설치지점까지의 수평이동 시간을 산출한다. 식 (7)을 적용하여 자재 각 야적지점에서 설치지점까지의 수직이동에 대한 시간을 계산한다.

최종적으로 식 (6)을 이용하여 각 크레인에 대하여 타워 크레인이 해당 후보지점(Cr)에 설치되었을 경우 각 자재 야적지점으로부터 각 자재의 설치지점까지의 운반시간을 계산한다. 이러한 기초 계산을 바탕으로 각 크레인 설치 위치에서 자재 야적지에

자재가 야적된 경우 자재 설치지점으로의 운반시간을 계산한다. 이러한 과정을 모든 크레인 설치 위치에 대하여 반복하여 최소의 운반시간이 소요되는 자재 야적 및 크레인 설치 지점을 찾는다.

또한 본 연구에서는 기초 특성치로서 일반적으로 권장되는 다음 표 2의 값을 사용하였다.  $\alpha, \beta$ 는 0~1의 값을 갖는 계수이다.  $\alpha$ 는 현장의 넓이에 따른 타워크레인 운용 제약이나 운전자의 숙련도에 따라 결정할 수 있고, '0' 일 경우는 접선과 라디얼 방향으로 후크가 동시에 움직임을 의미하며 '1' 일 경우는 각 방향으로 연속적으로 움직임을 의미한다.  $\beta$ 는 작업층의 높이에 따라 결정되며 높을수록 큰 값을 갖는다. '0' 일 경우 수평과 수직면 상에서 동시에 움직임을 의미하고 '1' 일 경우는 각 평면별로 연속적으로 움직임을 의미한다. 현장 조건에 따라 측정 자료를 근거로 두 계수를 조정할 필요가 있다. 본 연구에서  $\alpha$ 는 '1',  $\beta$ 는 '0.25' 로 가정하였다.

표 2. 기초 특성치

항목	값
$\alpha$	1
$\beta$	0.25
후크 수직 속도 ( $V_h$ )	60(m/min)
라디얼 속도 ( $V_a$ )	53.3(m/min)
회전 속도 ( $V_w$ )	7.57(rad/min)

#### 4.7 유전자 알고리즘 기반 자재 및 크레인 위치 최적화 알고리즘

본 연구에서는 타워 크레인 설치지점 및 자재 야적지점, 자재 설치지점간의 복잡한 상호관계를 고려한 현장 배치계획 최적화를 지원하기 위하여 엑셀 기반의 유전자 알고리즘 활용을 지원하는 Frontline System (<http://www.frontsys.com>)을 이용하였다. 최소의 운반비용이 소요되는 자재 야적위치 및 타워 크레인의 위치를 산정을 위한 알고리즘은 그림 4와 같다.

먼저 미지의 입력 변수를 (유전자 알고리즘을 이용하여) 임의로 설정한 후 모든 크레인에 대하여 각 크레인의 설치 지점을 확인한다. 크레인이 설치된 후보지에 대하여 해당 크레인이 어떠한 자재를 운반하는지 확인한다. 다음 각 크레인이 담당하는 자재의 야적지점을 검색하여 확인한다. 각 자재 야적지점으로부터 전체 설치지점까지의 운반시간을 산정한다. 즉, 각 크레인의 크레인 설치 위치에 따른 자재 야적지점으로부터 자재 설치지점까지의 단위운반시간을 산정한다. 이를 기반으로 각 자재별 각 설치지점에 대한 운반물량을 반영한 운반시간을 산정한다. 또한 각 자재 별로 모든 설치지점에 대한 누계 운반시간을 산정한다. 위의 과정을 모든 자재에 대하여 반복함으로써 각 크레인에 대한 누계 운반시간을 계산한다. 각 크레인에 대한 설치 지점별 누계 운반

시간에 대한 계산과 함께 이러한 과정의 반복을 통하여 모든 크레인에 대한 누계 운반시간을 계산한다. 유전자 알고리즘을 바탕으로 목적함수에 대한 적합도를 검토하며, 연산의 종료기준을 충족하는 경우 여러 대의 크레인 설치 및 자재의 야적에 대한 최적 위치정보를 제공한다.

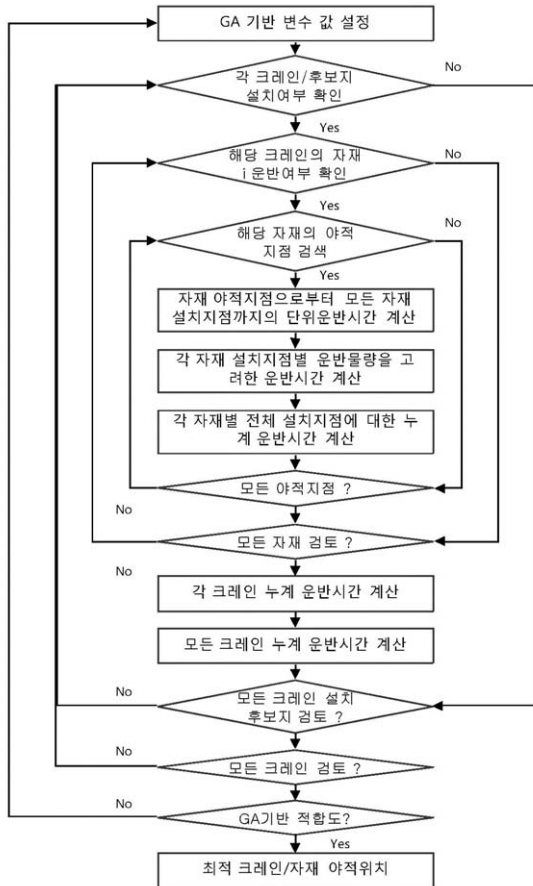


그림 4. 최적화 알고리즘

## 5. 사례 분석

제안된 모델의 적용과정을 예시하고, 그 적용성 및 기대효과를 분석하기 위하여 하나의 적용사례를 구성하였으며, 그 과정은 다음과 같다.

### 5.1 입력 데이터

타워 크레인을 설치 할 수 있는 다수의 후보지가 존재( $Cr_1, Cr_2, Cr_3, \dots, Cr_n$ )하며, 타워 크레인 설치 각 후보지에 대한 3차원 좌표( $x, y, z$ )를 입력한다. 본 사례에서는 표 3과 같이 가정하였다. 다수의 활용 가능한 자재 야적 후보지가 존재( $S_1, S_2, S_3, \dots, S_7$ )하며 자재야적 후보지에 대한 3차원 좌표를 입력한다. 본 사례에서는 표 4와 같다.

표 3. 타워크레인 설치 후보위치 입력

타워크레인 설치 지점	x	y	z
$Cr_1$	60	20	45
$Cr_2$	90	20	45
$Cr_3$	90	40	45
$Cr_4$	60	40	45
$Cr_5$	40	30	45
$Cr_6$	60	30	45

표 4. 자재야적 후보지점 위치 입력

자재 야적 지점	x	y	z
$S_1$	73	26	1.00
$S_2$	83	31	1.00
$S_3$	87	45	1.25
$S_4$	73	67	1.25
$S_5$	55	73	1.25
$S_6$	35	67	0.00
$S_7$	22	46	0.00

또한 자재가 최종 설치되는 지점 ( $D_1, D_2, D_3, \dots, D_9$ )에 대한 3차원 좌표( $x, y, z$ )를 입력한다. 모든 층에 대하여 반복하여 계산하기보다 고층 건물의 기준층을 대상으로 분석함으로써  $z$  좌표는 동일한 값을 이용하였다. 본 사례에서는 20층 건물을 가정하여 기준층의 높이를 10층(30m)으로 하였으며, 표 5와 같이 설정하였다. 자재 설치지점과 타워크레인의 높이차를 15m로 설정하고 계산한 예이다.

표 5. 자재 설치지점 위치입력

자재 설치 지점	x	y	z
$D_1$	34	41	30
$D_2$	34	51	30
$D_3$	51	65	30
$D_4$	60	65	30
$D_5$	76	51	30
$D_6$	76	41	30
$D_7$	60	26	30
$D_8$	51	25	30
$D_9$	43	44	30

운반되어야 하는 자재의 물량은 자재의 종류마다 상이한 경우를 반영하여야 한다. 또한 운반되어야 하는 자재의 수량이 설치지점마다 상이한 경우를 반영하여야 한다. 이를 위해 자재 설치위치별 필요로 하는 자재 종류별 소요수량(운반 횟수)을 입력한다. 본 사례에서는 표 6과 같이 설정하였다. 각 설치지점별 필요로 하는 자재의 수량이 동일한 경우는 입력 값을 1로 사용가능하며 최종 운반시간을 산정할 때 횟수를 곱하여 산출 할 수 있다.

하나의 자재는 여러 개의 야적 후보지를 가질 수 있으며, 하나

의 자재는 동일한 야적지점에 적치하는 경우의 모델을 제시하였다. 하나의 자재를 여러 위치에 나누어 야적하는 방식에 대한 모델의 경우, 자재 야적 여부에 대한 변수를 정수(Integer)가 아닌 소수(%)로 변경함으로 반영가능하다.

표 6. 설치 지점별 자재 소요수량 입력

자재종류	M1	M2	M3
D	10	20	30
D	10	20	30
D	10	20	30
D	10	20	30
D	20	30	40
D	20	30	40
D	20	30	40
D	30	40	50
D	30	40	50

### 5.2 실행 결과 및 분석

주어진 사례의 조건에 대하여 엑셀기반 유전자 알고리즘을 이용하여 모델을 구축하고, 4.7절에 제시된 알고리즘에 의하여 수행한 최적화의 결과는 다음 그림5와 같다. 두 대의 크레인 간의 최소간격에 대한 크레인 설치위치에 대한 제약조건을 주었으며, 자재 야적지점 선정은 Material 1의 경우 야적지 2에, Material 2는 야적지 4에, Material 3은 야적지 5에 배정되었음을 보여준다. 1번 크레인의 경우 크레인 설치 후보지점 3에, 2번 크레인은 후보지점 6에 설치되고, 자재 2와 자재 3은 크레인 1이, 자재 1은 크레인 2에 의해 운반되는 것이 가장 효율적임을 보여준다. 이때 최저 운반거리는 162.09로 최소가 됨을 보여준다.

The screenshot shows an Excel spreadsheet titled 'crane optimization-여러대의 크레인 최적화-최소간격 유지 [호환 모드]'. It contains several tables and constraints. Key data points include:
 

- Material Locations (Table 16-21):** Shows the distribution of materials 1, 2, and 3 across various supply points.
- Crane Locations (Table 23-28):** Shows the optimal positions for Crane 1 and Crane 2 across different crane sites.
- Crane Movement Constraints (Table 29-31):** Defines the movement paths and constraints for each crane.
- Crane Movement Constraints (Table 33-36):** Shows the movement of materials from their storage locations to the cranes.
- Objective Function (Row 44):** 'Total travel time: 162.09 Minimize this value optimal point of the crane'.

그림 5. 여러 대의 크레인 최적화

또한 제시된 모델을 이용하여 각 자재의 야적위치, 크레인의 설치 지점, 각 크레인의 담당 자재에 대한 변수를 변화시키면서 총

운반시간의 변화를 검토할 수 있다. 이를 통하여 동일한 타워 크레인의 위치에서도 자재 야적위치에 따라 운반시간의 차이가 크게 나타나는 것을 알 수 있으며, 동일한 자재 야적위치에서도 타워 크레인의 위치에 따른 운반시간의 차이가 나타남을 알 수 있다. 이러한 분석결과 표 7과 같다. 몇 개의 변수 변화에 따라 운반 시간에 있어 최고 283.7%의 차이가 발생함을 알 수 있다. 이처럼 크레인 및 자재의 현장 배치계획은 양중작업의 효율성에 큰 영향을 미칠 수 있음을 분석할 수 있었다.

표 7. 타워 크레인의 위치에 따른 운반시간의 변화

타워 크레인 위치		자재 야적위치			운반 시간	Comparison
Crane1	Crane2	M1	M2	M3		
3	6	1	4	5	162.09	100.0%
1	6	1	4	5	459.91	283.7%
2	6	1	4	5	178.81	110.3%
4	6	1	4	5	173.31	106.9%
5	6	1	4	5	230.69	142.3%
5	6	2	3	6	429.40	264.9%
4	6	2	3	6	372.87	230.0%
3	6	2	3	6	323.13	199.4%

### 6. 결론

본 연구에서는 여러 대의 타워 크레인이 다양한 후보지점을 갖고, 자재 역시 다양한 야적 후보지점을 가질 때 자재 운반시간 최적화를 지원하기 위한 모델을 제시하고자 하였다. 이를 위하여 유전자 알고리즘 기반의 최적화 프로세스를 제시하였으며, 사례적용을 통하여 제시된 모델의 적용과정을 예시하고 최적화에 따른 자재 운반시간의 효율성 개선 효과를 분석하였다.

본 연구에서는 엑셀기반의 유전자 알고리즘 지원 시스템을 사용하였다. 그러나 향후 제시된 알고리즘을 활용하여 독립된 시스템으로의 개발과 함께, 사전분석 작업 지원 시스템과의 연계를 통한 초고층 빌딩 현장 배치계획(Layout) 자동화를 지원할 수 있는 시스템 개발의 기반이 될 수 있을 것으로 기대된다.

### 감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설기술교통평가원에서 위탁시행한 건설기술혁신사업(과제번호 : 05기반기구축 D05-01)에 의해 수행한 결과의 일부임

### 참고문헌

김정진 (2002), 초고층 건축공사의 양중계획 시스템에 관한 연

- 구, 명지대학교 박사학위논문  
최인성 (1985), 초고층 건축의 양중계획에 관한 연구, 중앙대학교 박사학위논문
- Choi, C. W., and Harris, F. C. (1991). "A model for determining optimum crane position." *Proceedings, Institution of Civil Engineers*, 90(June), pp. 627 ~ 634.
- Gray, C., and Little, J. (1985). "A systematic approach to the selection of an appropriate crane for a construction site." *Construction Management and Economics*, 3, pp. 121~144.
- Jenkins, W. M. (1997). "On the application of natural algorithm to structural design optimization." *Engineering Structures*, 19(4), pp. 302~308.
- Koumoussis, V. K., and Georgiou, P. G. (1994). "Genetic algorithms in discrete optimization of steel truss roofs." *Journal of Computing in Civil Engineering*, ASCE, 8(3), pp. 309~325.
- Leu, S. S., and Yang, C. H. (1999). "A genetic-algorithm-based resource constrained construction scheduling system." *Construction Management and Economics*, 17(6), pp. 767~776.
- Li, H., and Love, P. E. D. (1988). "Site-level facilities layout using genetic algorithms." *Journal of Computing in Civil Engineering*, ASCE, 12(4), pp. 227~231.
- Rodriguez-Ramos, W. E., and Francis, R. L. (1983). "Single crane location optimization." *Journal of Construction Engineering and Management*, ASCE, 109(4), pp. 387~397.
- Tam, B. M., Tong, Thomas K. L., and Chan, Wilson K.W. (2001) "Genetic Algorithm for Optimizing Supply Locations around Tower Crane." *Journal of Construction Engineering and Management*, ASCE, 127(4), pp. 315~321.
- Zhang et al. (1999). "Location Optimization for a Group of Tower Cranes." *Journal of Construction Engineering and Management*, ASCE, 125(2), pp. 115~122.

논문제출일: 2009.06.29

논문심사일: 2009.07.03

심사완료일: 2009.08.10

---

## Abstract

This study aims to provide an optimal model for the layout of multiple tower cranes and material stockyards which have multiple candidate positions. In a high-rise building construction, the positional allocation of tower cranes and material stockyard has an effect on the travel time of material hauling. In addition, in case of using multiple tower cranes, specific location of a tower crane allocated to each material determines the efficiency of the works. Current optimal model limited to the optimization of position of single tower crane and material stockyards. This study suggests optimal model both for the positions of multiple tower cranes and material stockyards. Layout of multiple tower cranes requires additional allocation of each crane to each material hauling and control on the minimum distance between tower cranes. This optimization model utilizes genetic algorithm to deal with complex interaction on the candidate positions of multiple tower cranes, material stockyards, and types of materials. In order to identify its utility, case study was performed.

**Keywords :** *Tower Crane, Multiple tower crane, Optimization, Genetic algorithm, Layout*

---