

모듈러 건축의 타워크레인 배치계획 수립을 위한 다중 최적화 모델 개발

윤성부¹ · 박문서^{2*} · 정민혁³ · 현호상⁴ · 안수호⁵

¹서울대학교 건축학과 석사과정 · ²서울대학교 건축학과 교수 · ³서울대학교 건축학과 연구교수 ·
⁴서울주택도시공사 SH도시연구원 책임연구원 · ⁵서울대학교 건축학과 박사과정

Multi-objective Optimization Model for Tower Crane Layout Planning in Modular Construction

Yoon, Sungboo¹, Park, Moonseo^{2*}, Jung, Minhyuk³, Hyun, Hosang⁴, Ahn, Suho⁵

¹Researcher, Department of Architecture and Architectural Engineering, Seoul National University

²Professor, Department of Architecture and Architectural Engineering, Seoul National University

³Research Professor, Department of Architecture and Architectural Engineering, Seoul National University

⁴Senior Researcher, SH Urban Research Center, Seoul Housing & Communities Corporation

⁵Researcher, Department of Architecture and Architectural Engineering, Seoul National University

Abstract : With an increasing trend toward high-rise modular construction, the simultaneous use of tower cranes at a modular construction site has recently been observed. Tower crane layout planning (TCLP) has a significant effect on cost, duration, safety and productivity of a project. In a modular construction project, particularly, poor decision about the layout of tower cranes is likely to have negative effects like additional employment of cranes and redesign, which will lead to additional costs and possible delays. It is, therefore, crucial to conduct thorough inspection of field conditions, lifting materials, tower crane capacity to make decisions on the layout of tower cranes. However, several challenges exist in planning for a multi-crane construction site in terms of safety and collaboration, which makes planning with experience and intuition complicated. This paper suggests a multi-objective optimization model for selection of the number of tower cranes, their models and locations, which minimizes cost and conflict. The proposed model contributes to the body of knowledge by showing the feasibility of using multi-objective optimization for TCLP decision-making process with consideration of trade-offs between cost and conflict.

Keywords : Modular Construction, Tower Crane, Layout Planning, Multi-objective Optimization

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

타워크레인(Tower crane, 이하 T/C)은 건설현장에서 중하물의 적재, 이동, 적하 등의 작업을 수행하는 건설장비다(Shapira et al., 2007). 건설 프로젝트에서 T/C 배치계획(Tower Crane Layout Planning, 이하 TCLP)은 프로젝트의 공사비용, 공사기간, 안전, 생산성에 큰 영향을 미치는 중

요한 요소이다(AI-Hussein et al., 2006; Hasan et al., 2013; Han et al., 2018; Briskorn et al., 2019; Huang et al., 2019). 따라서 현장관리자는 정확한 양중작업 예측에 의해 프로젝트에 적합한 TCLP를 수립해야 한다. 특히 모듈러 건축은 단일 양중물이 중량(重量)(25톤)으로 다른 양중장비 사용 혹은 양중부하 레벨링이 불가능하다. 이에 모듈러 건축 프로젝트에서 조건에 부합하지 않는 TCLP는 추가 장비 투입, 재설계 등의 작업으로 이어져 공사기간과 공사비 증가가 발생할 수 있다(Lee et al., 2016).

하지만 실제 TCLP 수립에는 수많은 어려움이 있으며, 다중 T/C를 사용하는 건설현장에서는 문제가 더 복잡하다. 이는 T/C 제원 및 위치, 위치에 따른 T/C와 양중/설치 위치(supply point/demand point)와의 관계, 양중대상, 출입구 및 진입 도로 등의 현장조건 등 단일 T/C를 사용하는 건

* **Corresponding author:** Park, Moonseo, Department of Architecture and Architectural Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea
E-mail: mspark@snu.ac.kr
Received October 29, 2020; **revised** -
accepted December 4, 2020

설현장에서 고려해야 하는 제약과 더불어 T/C 간 작업분배, 양중범위가 겹치는 영역에서의 작업간섭 등 추가적인 고려사항이 존재하기 때문이다(Zhang et al., 1999; Kang & Miranda, 2008; Marzouk & Abubakr, 2016). 이에 다중 TCLP를 수립하기 위한 연구가 활발히 수행되고 있다. 수학적 모델링 혹은 시뮬레이션을 통해 비용을 최소화하는 최적의 T/C 위치를 찾는 데 초점을 맞추고 있다.

이러한 단일 최적화(single-objective optimization) 방식은 T/C 비용을 최소화할 수 있으나 작업간섭을 배제한 최적화는 비용 및 간섭면적의 최소화와 같이 상충되는 목적을 만족하는 최적의 해를 찾는 것이 불가능하다. T/C 간 작업간섭의 증가는 작업 생산성 감소, 충돌 확률 증가로 이어지게 되며, 특히 모듈러 유닛 양중 시 충돌로 인한 유닛 파손, 낙하물 발생은 모듈러 건축 안전사고의 주요 원인이다(Jeong et al., 2019; Khodabandelu et al., 2020). 따라서 이러한 한계점들을 보완하기 위해 T/C 비용 및 간섭면적의 trade-off를 고려한 최적화 모델을 개발할 필요가 있다.

이를 위해 본 연구에서는 비용 및 간섭면적의 최소화를 목적으로 하는 다중 최적화(multi-objective optimization) 알고리즘을 개발하고, 이를 활용하여 T/C 대수, 제원 및 위치를 선정하는 모델을 제안한다. 본 연구의 결과는 향후 모듈러 건축 프로젝트 수행 시 현장관리자의 다중 TCLP 수립 의사결정을 위한 도구로서 비용 및 운용기간 예측, 운용계획 수립을 위한 기초 자료로 활용될 수 있다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구는 모듈러 건축 프로젝트 중 T/C 사용이 불가피한 중고층 모듈러 건축현장을 대상으로 한다. 양중작업은 T/C가 활용되는 유닛 설치 및 외장 마감공사로 한정하였으며, 토공사, 기초공사 및 내장 마감공사는 연구 범위에 포함하지 않는다. 다중 T/C의 운용은 모든 T/C가 설치되어 동시에 양중작업을 시작하고 할당된 작업 완료 즉시 해체한다고 가정한다.

연구 절차는 다음과 같다.

- (1) TCLP 관련 기존 문헌을 고찰하여 기술 개발 현황을 분석하고 시사점을 도출한다.
- (2) 모듈러 건축의 TCLP 수립을 위한 최적화 문제를 정의하고 T/C 운용에 영향을 주는 변수들을 도출한다.
- (3) 도출된 변수들을 바탕으로 최적화 모델을 개발하고 성능을 평가한다.
- (4) 사례 적용을 통해 모델의 효용성을 검증하고 결과를 분석한다.

2. 문헌고찰

2.1 TCLP 관련 선행연구

선행연구에서는 크레인 제원 및 위치 선정을 위해 다양한 최적화 목적함수 및 방법론을 사용하였다. 크레인의 제원은 크레인의 용량, 치수, 무게 등을 나타낸 수치적 지표를 말한다. 선행연구에서는 최적의 크레인 제원을 선정하기 위해 생산성 및 이산화탄소 배출량(Hasan et al., 2013), 비용 및 안전(Shapira & Goldenberg, 2005) 등의 요소를 정량화하여 비교하였다.

크레인의 위치는 크레인고양이 위치(supply point/demand point)의 관계를 결정하게 되고 이는 양중시간과 운용비용에 영향을 준다. 크레인의 위치를 최적화하기 위한 연구는 1990년대부터 본격적으로 수행되어 왔다(Zhang et al., 1996). 이후 수많은 크레인 위치 선정 관련 연구에서 크레인의 양중 프로세스를 수학적으로 모델링하기 위해 Zhang et al. (1999)이 제시한 모델을 활용하였다(Huang et al., 2011; Irizarry & Karan, 2012; Olearczyk et al., 2014).

최근 크레인 제원 및 위치 선정을 함께 고려하기 위한 연구가 활발히 진행되었다. 그러나 선행연구의 크레인 제원 및 위치 선정 모델은 위치 선정을 위한 최적화 과정에 제원을 반영하는 데 한계가 있다. Abdelmegid et al. (2015)은 기존의 최적화 모델에 후속 이동 속도, 양중 사이클 횟수 등의 변수를 추가로 고려하여 개선된 단일 크레인 최적화 모델을 개발하였으나 미리 선정된 크레인 제원을 이용하였다는 한계가 있다. 이렇게 위치 선정을 위한 최적화 수행 시 크레인 제원을 미리 선정하여 최대 양중범위로 최적화를 수행하는 접근 방식은, 용량이 큰 크레인을 사용해야 하는 모듈러 건축현장에서 임대료 감소를 위해 양중범위를 줄이는 선택을 할 수 없다. 반면 Lee et al. (2016)은 크레인 제원을 변수로 설정하고 유전자 알고리즘을 이용하여 모듈러 건축에서 단일 크레인의 운용비용을 최소화하는 최적 제원 및 위치를 선정하였으나, 제원에 관계없이 위치 최적화를 수행한 다음 결과에 맞추어 제원을 선택하는 접근 방식을 이용하였다. 이러한 방식은 크레인 대수, 제원, 양중범위에 대한 선택이 자유로우나 제원에 따른 양중시간, 임대료 등 위치 최적화에 필수적인 요소들을 반영하기 어렵다.

또한, 선행연구의 최적화 모델은 주로 비용 최소화만을 목적으로 하였다. 이러한 방식은 비용 감소를 실현하기 위해 크레인 대수의 증가, 양중범위의 중첩이 발생할 수 있으며 이로 인한 작업간섭은 최적화 모델에 반영하기 어렵다. 이에 크레인 간 작업간섭, 충돌을 최소화하는 양중계획을 수립하기 위한 연구가 진행되었다(Han et al., 2017; Taghaddos et al., 2018; Younes & Marzouk 2018; Khodabandelu et al.,

2020). 그러나 반대로 이러한 방식은 용량이 큰 크레인을 분산배치하여 전체 비용이 증가할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 크레인 대수, 제원 및 위치를 변수로 고려하여, 상충되는 비용 및 간섭면적의 최소화를 위한 다중 최적화 모델을 제시하여 선행연구의 한계점을 극복하고자 한다.

2.2 유전 알고리즘

유전 알고리즘(Genetic Algorithm; GA)은 Holland (1975)에 의해 제안된 유전자들의 진화 개념을 응용한 전역 최적화 기법이다. 유전 알고리즘은 이산형 변수와 복잡한 비용 및 제약조건을 갖는 최적화 문제를 해결하는 데 탁월한 능력이 있는 것으로 밝혀졌다. 유전 알고리즘은 유전자형을 결정하여(encoding) 초기 모집단(initial population)을 선정하고, 각 개체(chromosome)들에 대해 적합도(fitness)를 산출한다. 이후 선택(selection), 교배(crossover), 돌연변이(mutation)의 유전 과정을 통해 다음 세대(generation)를 생성하며, 이 과정을 세대 수만큼 반복하여 최적해를 찾는다(Kim & Park, 2008).

다중 최적화는 서로 상충되는 목적들의 최적화를 진행할 때 유일 최적해를 찾는 것이 거의 불가능한 상황에서 복수의 최적해 집합, 즉 파레토 최적 집합을 찾는 것을 목표로 한다(Yoon et al., 2012). 파레토 최적 집합이란 다른 어떤 해에 의해서도 지배되지 않는 지배 파레토 개체(nondominated pareto)의 집합을 의미하며, 이들의 함수적인 표현을 파레토 최적 선(pareto-optimal front)이라고 표현한다.

여러 선행연구에서 다중 최적화를 효율적으로 수행하기 위한 다수의 알고리즘이 제안되었으며 그 중 Deb et al. (2002)에 의해 제안된 비지배 정렬을 기반으로 하는 유전 알고리즘인 NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic

Algorithm-II)는 뛰어난 성능으로 인해 다중 최적화에 널리 사용되어왔다. NSGA-II는 다음 세대 선택을 위하여 비지배 순위(nondominated sorting)과 과밀 거리(crowding distance, <Fig. 1> cuboid의 평균 길이)를 사용한다. 개체에 비지배 순위를 부여한 뒤 순위가 높은 개체들이 다음 세대의 부모 개체로 선택된다. 동일한 비지배 순서에 대해서는 다양성을 높이기 위해 과밀 거리가 높은 개체 순으로 선택된다(Deb et al., 2002).

본 연구에서 해결하려 하는 다중 T/C 제원 및 위치 최적화 문제는 여러 제약조건과 변수들의 상호관계를 고려하기 위해 최적화 방법론을 사용해야 하며, 현장관리자의 TCLP를 지원하기 위해 다중 최적화를 통해 복수의 최적해를 제공하는데 목적이 있으므로 NSGA-II 방법을 이용하였다.

3. 모듈러 건축 TCLP 모델

3.1 모델 프로세스

<Fig. 2>는 최적 T/C 대수, 제원 및 위치를 선정하기 위해 본 연구에서 제시하는 TCLP 수립 모델 프로세스이다. 먼저 부지를 그리드화하여 직교 좌표계를 생성한다. 이후 T/C 대수를 생성하여 최적화 모델의 고정변수로 설정한다. 그 다음 각 T/C의 제원 및 위치를 NSGA-II 알고리즘을 통해 최적화한다. 이를 통해 특정 대수에 대한 최적해가 도출되면 최적해를 저장하고 미리 설정한 최대 대수를 만족시킬 때까지 대수를 변화시키면서 같은 과정을 반복한다. 대수가 최대가 되면 최적화를 멈추고 저장된 최적해들을 보여준다. 마지막으로 최적해들을 비교하여 TCLP를 수립한다.

3.2 부지 그리드화

대상 부지를 최적화 문제로 변환하기 위해 부지를 10m 간격의 그리드로 변환하여 직교 좌표계를 생성한다. 10m의 그리드 간격은 T/C 기초, 최소 양중 범위 등을 고려하여 T/C 위치를 이산적으로 설정하였을 때 유의미한 차이를 확인할 수 있는 최소 간격으로 가정한 것이며, 본 모델을 통해 도출된 T/C 위치의 5m 범위 내 이동은 의사결정자에 의해 유동적으로 이루어질 수 있다. 유닛 설치 위치는 정확한 계산을 위해 직교 좌표계에서의 실제 위치로 설정하였다.

3.3 T/C 제원 및 위치 최적화

3.3.1 문제 정의, 속성 및 상태변수 선정

모듈러 건축의 TCLP를 위해 총비용 및 간섭면적을 최소화하는 T/C 제원 및 위치를 선정하고자 한다<식 (1)-(3)>. 총비용은 운용비용과 고정비용으로 이루어져 있다. 각 T/C의 운용비용 $c_{o,k}$ 는 임대료 $c_{r,k}$ 와 운용시간 $t_{o,k}$ 의 곱으로 나타

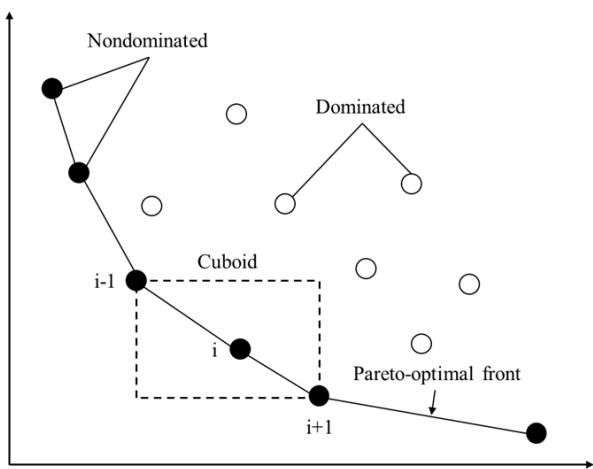


Fig. 1. Schematic diagram of Pareto optimality and crowding-distance calculation

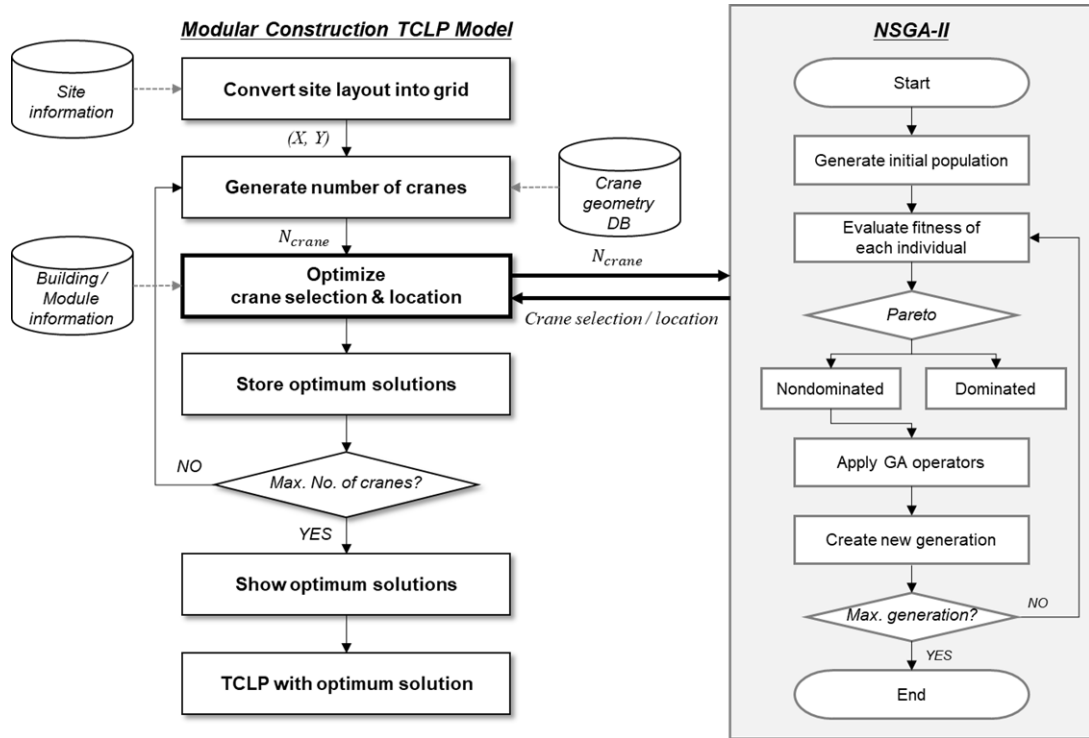


Fig. 2. Process of modular construction TCLP model

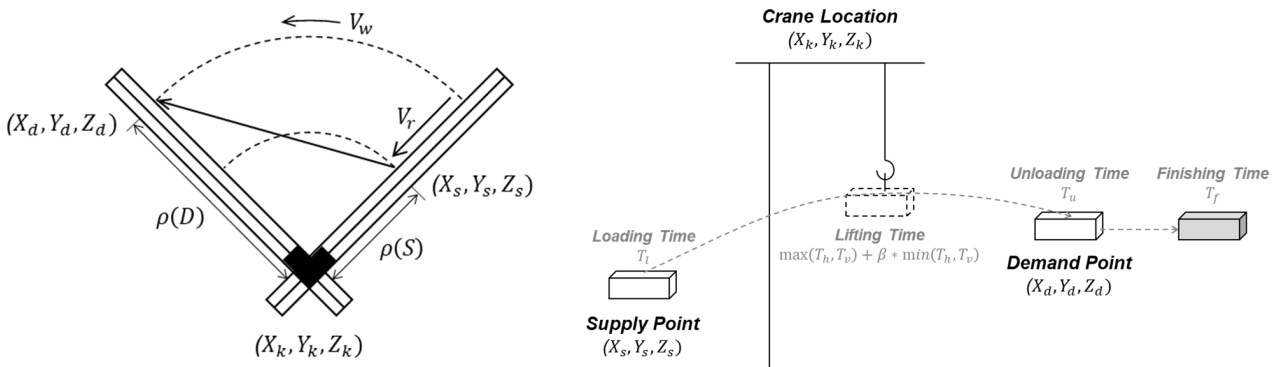


Fig. 3. Horizontal and vertical movement of a tower crane

내며<식 (4)>, 고정비용 $c_{f,k}$ 은 T/C 설치, 운송, 해체에 드는 비용으로, 임대료와 더불어 모델의 고정변수로 설정한다. 간섭면적 $A_{s,k}$ 는 T/C 간 양중범위가 겹치는 면적으로 설정한다.

$$\min F(X) = F(f_1, f_2) \quad (1)$$

$$f_1 = TC = \sum_{k=1}^K C_{o,k} + \sum_{k=1}^K C_{f,k} \quad (2)$$

$$f_2 = CA = \sum_{k=1}^K A_{s,k} \quad (3)$$

$$C_{o,k} = C_{r,k} \cdot T_{o,k} \quad (4)$$

Zhang et al. (1999)은 T/C 양중 프로세스를 수학적으로 모델링하기 위해 T/C 훅(hook) 움직임을 수직이동과 수평이동의 조합으로 정의하고 수평 이동을 다시 방사형이동과 회전(선회)이동으로 구분하였다(Fig. 3). 훅의 수직이동과

수평이동 시간은 각각 식 (5), (6)과 같이 표현할 수 있으며, 수평이동 중 방사형이동과 회전이동 시간은 각각 식 (7), (8)으로 표현할 수 있다. 여기서 α 는 방사형이동-회전이동 보정계수로, T/C 기사의 숙련도에 따라 결정된다. α 는 0과 1 사이의 값을 가지며, 0과 1의 값은 각각 완전 동시이동, 완전 연속이동을 뜻한다.

$$T_v = \frac{|(Z_d - Z_s)|}{V_v} \quad (5)$$

$$T_h = \max(T_r, T_w) + \alpha \cdot \min(T_r, T_w) \quad (6)$$

$$T_r = \frac{|(\rho(D) - \rho(S))|}{V_r} \quad (7)$$

$$T_w = \frac{1}{V_w} \cdot \arccos \frac{-L_k^2 + \rho(D)^2 + \rho(S)^2}{2\rho(D)\rho(S)} \quad (0 \leq \arccos \theta \leq \pi) \quad (8)$$

$\rho(S)$ 와 $\rho(D)$ 는 각각 T/C로부터 유닛 양중 위치, 설치 위치 까지의 거리를 뜻하며 L_k 은 유닛 양중 위치와 설치 위치 사이의 거리를 뜻한다(식 (9)-(11)).

$$\rho(S) = \sqrt{(X_s - X_k)^2 + (Y_s - Y_k)^2} \quad (9)$$

$$\rho(D) = \sqrt{(X_d - X_k)^2 + (Y_d - Y_k)^2} \quad (10)$$

$$L_k = \sqrt{(X_s - X_d)^2 + (Y_s - Y_d)^2} \quad (11)$$

각 유닛에 대한 T/C 운용 사이클은 트레일러를 통해 현장에 반입되는 시점부터 양중 준비-양중-설치-마감 순으로 구성된다(Fig. 4). 앞서 구한 양중시간과 양중 준비, 설치, 마감 시간을 합하면 한 유닛에 대한 T/C 운용시간을 구할 수 있으며, 이를 각 T/C별로 작업이 할당된 유닛 수만큼 반복하면 총 운용시간을 도출할 수 있다(식 (12)). 여기서 β 는 수직이동-수평이동 보정계수이며 α 와 같이 0과 1사이의 값을 갖고, 0과 1의 값은 각각 완전 동시이동(full simultaneous movement), 완전 연속이동(full consecutive movement)을 뜻한다.

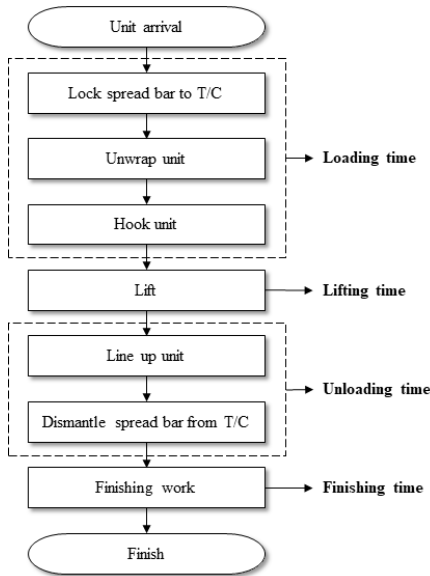


Fig. 4. Lifting cycle of modular construction

$$T_{o,k} = \sum^N \max(T_h, T_v) + \beta \cdot \min(T_h, T_v) + T_l + T_u + T_f \quad (12)$$

(Table 1)은 본 모델의 입력 및 출력 정보이다. 먼저, 현장 조건을 고려하기 위하여 대상 건물의 높이 및 코어벽의 위치 정보, 부지 면적, 그리고 현장 시설물, 저장고, 진입로, 출입구의 위치 정보를 입력한다. 또한, T/C 설치 위치, 제원 및 비용에 대한 정보를 입력한다. T/C 설치 위치는 (1) 유닛 설치 위치로부터의 최소 양중범위, (2) 부지 밖 인접 건물과의

Table 1. Model inputs and outputs

Input/Output	Type	Information
Input	Building	Height, location of core walls
	Site	Layout (facilities, storage, access road, entrances, etc.), dimensions
	Crane	Number of cranes, candidate location of cranes, min. distance b/w cranes max. hook height, movement velocities, max. radius, rental cost, fixed cost
	Supply point	Candidate location of trailers
	Demand point	Set location of modular units
	Modular unit	Dimensions, weight
Output	Crane	Optimum number of cranes, optimum location, optimum selection, total cost, conflict area, task allocation, operating time
	Supply point	Optimum Location of trailers

충돌, (3) 현장 출입구 (4) 인접 도로 및 진입로를 포함한 현장 제약조건을 고려하여 위치를 한정한다. T/C 제원 및 비용 데이터베이스는 T/C 제조사에서 제공하는 제원표를 참고하여 도출한다(Table 2). 마지막으로 유닛 양중 위치 및 설치 위치, 유닛 크기 및 무게 정보를 입력한다. 모듈러 건축의 경우 일반 공사와는 달리 유닛을 운송하는 트레일러에서 바로 양중하기 때문에, 양중 위치는 트레일러가 정차하는 위치로 설정한다(Lee et al., 2016).

본 모델의 출력 정보는 최적화 결과인 T/C 대수, 제원 및 위치가 있으며, 그에 따른 T/C 비용 및 간섭면적, 각 T/C의 작업 할당량 및 운용시간, 트레일러의 최적 위치에 대한 정보를 도출할 수 있다.

3.3.2 최적화 모델 구축

먼저 T/C 대수, 제원 및 위치를 나타내는 변수들을 유전 알고리즘에 적용하기 위해 염색체 코딩(chromosome coding)을 진행한다. 표현형(phenotype)의 T/C 제원, 위치, 대수는 각각 유전자형(genotype)의 T/C 모델 번호, 유전자(gene)의 위치, T/C 모델 번호가 있는 유전자 개수로 정의한다. 이때 염색체의 길이(P)는 T/C를 설치가능한 위치의 수(이며, 각 유전자는 해당 위치에 T/C가 있다면 모델 번호로, 없다면 0으로 코딩된다.

예를 들어 3번 T/C 모델이 좌표상에서 (5, 12)에 위치한다

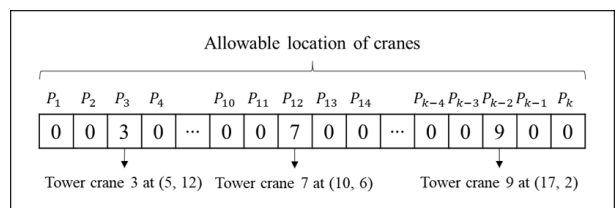


Fig. 5. Example of chromosome coding

Table 2. Types of cranes

Index	Max. hook height, H_{max} (m)	Radial velocity, V_r (m/min)	Slewing velocity, V_{ω} (rad/min)	Hoisting velocity, V_h (m/min)	Radius, R (m)	Radius at max., R_{max} (m)	Rental cost, C_r (1,000KRW)	Fixed cost, C_f (1,000KRW)
T1	82.4	66.0	4.4	15.0	80.0	30.0	527	15000
T2	94.5	66.0	5.0	15.0	80.0	20.0	527	15000
T3	81.5	66.0	5.0	15.0	80.0	20.0	527	15000
T4	84.2	66.0	4.4	15.0	80.0	27.0	527	15000
T5	85.9	66.0	4.4	15.0	80.0	20.0	527	15000
T6	82.4	43.0	4.4	22.0	80.0	33.3	851	19000
T7	80.9	42.9	4.4	22.4	80.0	24.2	851	19000
T8	85.5	68.0	3.8	15.5	80.0	26.7	1436	25000
T9	80.0	68.0	3.8	15.5	80.0	27.3	1436	25000
T10	88.4	68.0	3.8	15.5	80.0	43.2	1436	25000
T11	80.7	45.8	4.4	29.5	80.0	33.3	1436	25000
T12	90.0	45.8	4.4	29.5	80.0	27.1	1436	25000
T13	80.0	70.0	3.8	13.0	80.0	26.2	2811	35000
T14	85.5	70.0	3.8	13.0	80.0	42.1	2811	35000
T15	98.9	45.8	3.8	41.3	80.0	44.0	2811	35000
T16	135.8	45.8	3.8	41.3	80.0	63.7	4736	45000
T17	101.0	45.8	3.8	41.3	80.0	70.8	4736	45000

면 염색체에서 해당 위치를 표현하는 유전자, 즉 P_3 이 3으로 표기되며, 7번 모델이 (10, 6)에 위치한다면 염색체에서 P_{12} 가 7로 표기된다(Fig. 5). 이렇게 염색체 코딩이 완료되면 <Fig. 6>의 알고리즘에 따라 제약조건을 모두 만족시키는 염색체에 대해 초기 인구집단을 형성하게 된다. 염색체의 제약 조건에는 현장 제약조건과 양중 제약조건이 있다. 현장 제약조건 중 T/C 설치 위치는 염색체 코딩 단계에서 고려되며 추가로 T/C 자립고에 대한 조건을 포함한다. 다음으로 양중 제약조건은 T/C의 최대 유닛 양중 범위와 T/C 간 작업 할당량, 최소 이격거리에 대한 조건을 포함한다. <Fig. 6>의 알고리즘은 염색체 내의 모든 T/C에 대해

- (1) T/C와 유닛 양중 위치, T/C와 유닛 설치 위치 사이 거리가 모두 해당 T/C의 최대 유닛 양중 범위 내에 있는가?
- (2) T/C 자립고가 건물의 높이보다 높은가?
- (3) 작업이 할당되지 않은 T/C가 있는가?
- (4) T/C 간 최소 이격거리를 만족하는가?

를 확인하고, 설정한 초기 인구집단 수가 만족될 때까지 적합한 염색체를 무작위로 생성하는 과정을 나타낸 것이다.

초기 인구집단이 형성되면 목적함수에 따라 적합도 평가를 진행한다. 본 모델은 총비용 및 간섭면적을 기준으로 적합도를 평가하였으며, NSGA-II 방법에 따라 비 지배 순위, 과밀 거리를 계산하여 부모 개체를 선택하였다. 선택된 부모 개체는 교배, 돌연변이를 거쳐 다음 세대를 생성한다. 이때 교배, 돌연변이를 거친 모든 개체가 현장 제약조건과 양중 제약조건을 만족시키는 해가 되는 것은 아니기 때문에,

<Fig. 6>의 알고리즘에서와 같은 방식으로 다음 세대의 인구 수가 될 때까지 제약조건을 모두 만족시키는 개체를 생성한다. 마지막으로 세대수가 최대에 도달하면 목적함수의 최적해, 즉 총비용 및 간섭면적을 최소화하는 T/C 제원 및 위치를 최적해로 저장한다.

Algorithm PopulationGenerator (Chromosome): Generate initial population with chromosomes that meets site constraints and operational constraints.

```

1: repeat
2:   repeat
3:     if  $R_{max} \geq \text{Max}(\rho(D), \rho(S))$  and  $H_{building} \leq H_{crane}$  :
4:       pass (Check other cranes)
5:     else:
6:       break (Generate a new chromosome)
7:   until all cranes meet the constraints
8:   if no task allocation = 0 and  $D_{min} \geq (\rho(Cr_n), \rho(Cr_{n+1}))$  :
9:     Population ← Population + Chromosome
10:  else:
11:    break (Generate a new chromosome)
12: until Population reaches its maximum population
    
```

Fig. 6. Algorithm for generating population

3.4 최적해 비교 및 TCLP 수립

최적화 모델은 고정변수인 T/C 대수에 따른 최적 T/C 제원 및 위치를 선정하는 모델이다. 이후 대수를 변화시키면서 동일한 과정을 반복하고, 최종 도출된 최적해를 비교하여 최적 T/C 대수, 제원 및 위치를 선정한다. 이렇게 도출된 비용과 운용 시간을 최소화하는 T/C 대수, 제원 및 위치는 본 연구의 목적인 모듈러 건축의 TCLP 수립에 활용될 수 있다.

4. Case Study

4.1 Case Study 환경 설정

본 연구에서 제시한 모듈러 건축 TCLP 모델의 효용성 검증 위해 용인 영덕 행복주택(2021년 착공 예정)의 기획설계도면을 바탕으로 15층 규모의 건물 6개동이 있는 주택단지 를 모의 현장으로 설계하고 사례 연구를 진행하였다(Fig. 7). 프로젝트 개요는 <Table 3>과 같다. 이 프로젝트에 사용되는 모듈러 유닛은 총 1,170개로, 단일 유닛의 크기는 발코니 포함 3.2m x 7.4m x 2.8m이며, 무게는 25톤으로 가정한다.

Table 3. Summary of the case project

Category	Content
Project name	Yongin Yeongdeok public rental housing
Site location	751-3, Yeongdeok-dong, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do
Building type	Apartment complex
Size	B2 / 15 stories
Structure	RC, Steel (Modular construction)
Site area	30,235.39㎡
Total floor area	50,723.58㎡
Building area	4,324.80㎡
Max. height	42.42m

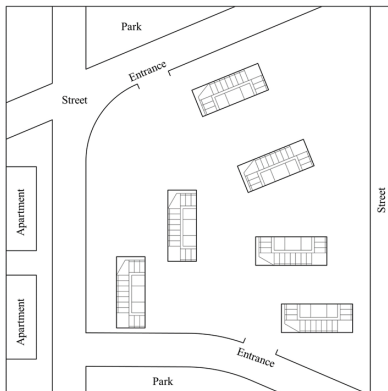


Fig. 7. Illustrative site layout

본 연구에 사용될 T/C 제원은 국내에서 가장 많이 사용되는 두 주요 제조사(Potain, Liebherr社)의 T형 T/C 제원표를 참조하여 총 17개의 모델을 선정하고 데이터베이스를 구축하였다. 이 제원을 바탕으로 임대료는 국토교통부에서 제시한 T/C렌탈단가(제2012-148호)를, 고정비용은 선행연구를 참조하여 도출하였다(Yeoh et al., 2017)<Table 2>. 월임대료를 분당 임대료로 변환하기 위해 한 달은 30일, 일일 작업시간은 8시간으로 가정하였다.

4.2 최적화 수행

모의 현장 부지를 10m 간격의 그리드로 변환하여 23 x 23 직교 좌표계를 생성하였다(Fig. 8). 부지 내 그리드 중 인접도로, 진입로, 출입구를 제외한 167개의 T/C 설치 가능 위치, 그리고 좌표계 상 실제 위치에 있는 78개의 유닛 설치 위치가 도출되었다. 유닛 설치 위치의 경우 정확히는 설치 높이를 나타내는 z 좌표까지 포함하여 총 1,170개이다. 트레일러 정차 위치는 T/C 설치 가능 위치와 동일한 범위 내로 설정하였다.

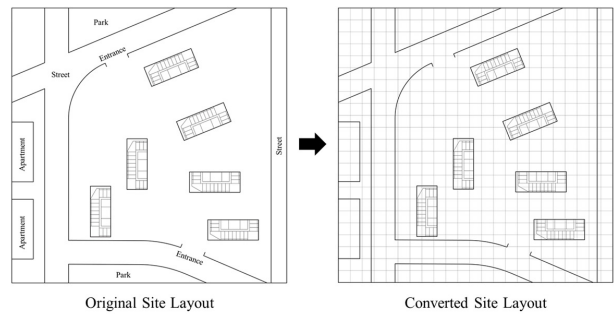


Fig. 8. Converting the original site layout to a grid

최적화에 앞서 목적함수의 계산을 위한 조건을 설정하였다(Table 4). 본 모델은 정확한 운용시간 예측보다는 T/C 대수, 세원 및 위치에 따른 비용 및 간섭면적을 파악하여 최적의 조합을 찾는 데 그 목적이 있다. 따라서 유닛 양중 준비, 양중, 설치, 마감 시간은 선행연구를 참고하여 설정하였다(Kim et al., 2018). 또한 T/C 방사형이동-회전이동 보정계수 α 값은 0.25로, 수직이동-수평이동 보정계수 β 값은 1.0으로 설정하였다(Zhang et al., 1999).

Table 4. Variables for crane operation

Variable	Value
Time for loading unit	7min/unit
Time for unload unit	7min/unit
Time for finishing work	61.7min/unit
Jib simultaneous movement parameter, α	0.25
Hook simultaneous movement parameter, β	1.0

T/C 대수는 3대에서 8대의 범위 내에서 각 T/C의 세원 및 위치를 최적화하였으며, 최적화 알고리즘인 NSGA-II는 Python3.6으로 구현하였다. 유전 알고리즘의 파라미터(parameter)는 그리디 탐색(greedy search)을 이용하여 초기 인구집단 100, 세대수 200으로 설정하였다. 선택은 순위선택방법을, 교배는 균등교배, 변이는 전형적 돌연변이(p=0.1)를 적용하였다. 이때, 특정 개체는 다음 세대로 그대로 전달된다(elitism).

각 T/C 간 작업분배는 (1) 해당 유닛을 설치 가능한 T/C 를 나열하고(여기서 설치 가능하다는 것은 자립고와 양중범 위, 용량에 대한 조건을 만족한다는 것을 의미한다), (2) 가 능한 T/C 중 현재 작업 할당량이 가장 적은 T/C를 선택하는 방식으로, 각 T/C 간 작업 할당량이 최대한 고르게 분포하도 록 하였다. 아울러 T/C 간 최소 이격거리는 균형주의 이동 반경, 기초 크기 등을 고려하여 20m로 가정하였다.

4.3 결과 분석

NSGA-II 최적화 알고리즘을 통한 최적화 결과, 다중 T/C 의 제원 및 위치를 포함하는 전제 최적해(총 13,501개) 중 상 호 우월을 가릴 수 없는 95개의 파레토 최적해를 선정하고 대수별 파레토 최적 선으로 표현하였다(Fig. 9). 그래프를 통해 T/C 대수가 증가함에 따라 파레토 최적 선이 비용은 감소하지만, 간섭면적은 증가하는 방향으로 이동함을 확인 할 수 있다. 따라서 다시 비용 및 간섭면적의 trade-off를 고 려하여 대수별 파레토 집단을 비교하였고 22개의 파레토 최 적해를 선정하였다.

〈Table 5〉는 선정된 22개의 파레토 최적해 중 대표적인 세 결과의 세부 정보이며, 세 결과에 대한 배치도는 〈Fig. 10〉과 같다. 먼저 T/C 8대를 배치하는 9번 계획안은, 총비 용 671,892,854원으로 비용을 최소화할 수 있으나, 간섭면 적은 194.54㎡으로 가장 높은 값을 보였다. 반면 4대를 배

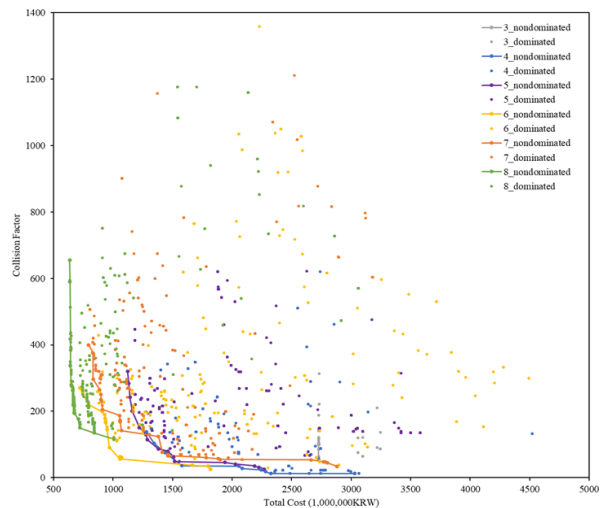


Fig. 9. Dominated and nondominated solutions

치하는 16번 계획안은 총비용 1,578,180,168원이 소요되 지만, 간섭면적은 36.26㎡으로, 간섭 및 충돌로 인한 공기지연, 공사비 증가는 9번 계획안보다 적을 것으로 예상할 수 있 다. 이때 일반적인 경험과 직관에 의한 TCLP, 즉 6대의 T/C 를 각각 6개동의 코어 부근에 설치하는 계획안은 총비용이 719,775,000원, 간섭면적은 269.40㎡으로, 9번 계획안은 이 와 대비 총비용 약 7%, 간섭면적 약 28%의 감소 효과가 있 다. 이는 대상 프로젝트의 규모가 증가할수록 그 효과가 증 대될 것으로 예상할 수 있다.

Table 5. Optimization results with various number of cranes

Results index	Tower Crane No.							
	1	2	3	4	5	6	7	8
R9								
Location	7,10	10,14	12,10	19,6	14,17	9,6	15,7	17,12
Crane index	T3	T5	T4	T1	T4	T1	T3	T6
Tasks	23	23	180	270	180	180	68	248
Operating time (min)	1057.42	1059.30	8468.02	12700.52	8473.68	8472.16	3176.28	10948.74
Total cost (KRW)	671,892,854							
Conflict area (㎡)	194.54							
R14								
Location	8,9	19,6	14,17	6,8	15,7	17,12		
Crane index	T10	T1	T1	T2	T3	T6		
Tasks	338	270	180	68	68	248		
Operating time (min)	15784.62	12699.71	8470.79	3176.19	3175.70	10950.11		
Total cost (KRW)	969,704,548							
Conflict area (㎡)	91.26							
R16								
Location	8,9	15,16	14,9	20,7				
Crane index	T10	T10	T3	T10				
Tasks	405	360	68	338				
Operating time (min)	18939.45	16833.51	3175.74	15786.59				
Total cost (KRW)	1,578,180,168							
Conflict area (㎡)	36.26							

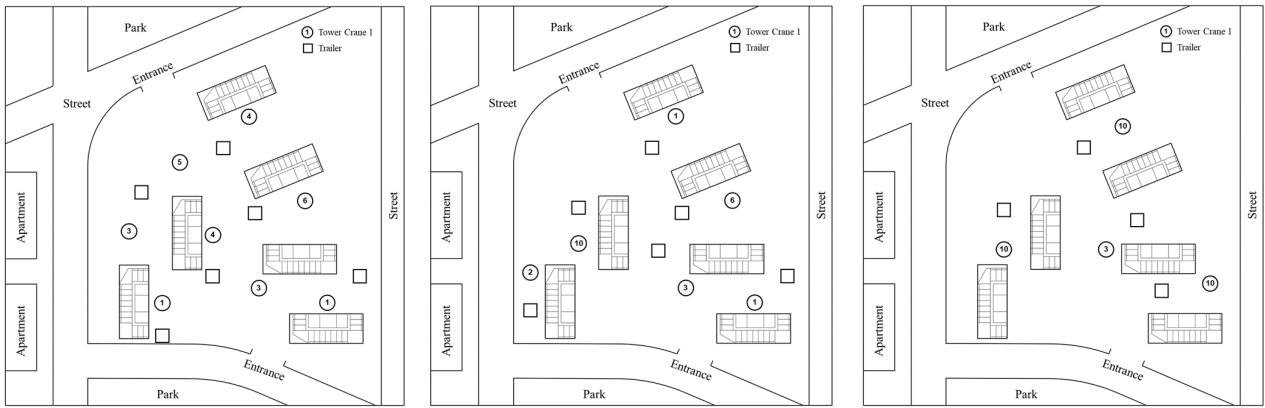


Fig. 10. Layout of selected tower crane models and locations: R9(left), R14(center), R16(right)

결론적으로 본 연구에서 제시하는 모델을 통한 최적화 결과를 바탕으로 모듈러 건축의 TCLP를 수립한다면, 비용 및 간섭면적의 감소로 인해 보다 경제적이고 효율적인 T/C 운영을 기대할 수 있으며, T/C 대수, 제원 및 위치의 수많은 조합을 고려해야 하는 다중 TCLP 수립을 위한 과학적인 근거를 마련할 수 있다. 이때 최적화 결과로서 제시되는 T/C 제원은 특정 모델을 지칭하는 것이 아니라 현장관리자가 현장 여건에 맞게 비슷한 용량의 T/C를 선정할 수 있도록 함에 목적이 있다.

5. 결론

최근 모듈러 건축의 고층화와 함께 현장에서의 T/C 사용도 증가하였다. 이러한 T/C의 대수, 제원 및 위치를 결정하는 TCLP는 프로젝트의 공사비용, 공사기간, 안전, 생산성에 큰 영향을 미친다. 특히 모듈러 건축 프로젝트에서 조건에 부합하지 않는 TCLP는 추가 장비 투입, 재설계 등의 작업으로 이어져 공사기간과 공사비 증가가 발생할 수 있다. 따라서 현장관리자는 현장조건, 양중대상, T/C 제원 등 수많은 제약을 고려하여 프로젝트에 적합한 TCLP를 수립해야 한다. 하지만 다중 T/C를 사용하는 건설현장의 경우 추가적인 고려사항과 변수들로 인해 경험과 직관을 통해 TCLP를 수립하는데 어려움이 있다.

따라서 본 연구는 모듈러 건축의 다중 TCLP를 수립하기 위해 최적화 문제를 정의하고, T/C 운영과 관련된 상태변수들을 설정하였다. 이를 바탕으로 NSGA-II 최적화 알고리즘을 이용하여 다중 T/C 제원 및 위치 선정 모델을 개발하였으며, 사례연구를 통해 복잡한 다중 T/C를 사용하는 건설현장에서 본 연구에서 제시한 모델을 이용하여 비용 및 간섭면적을 최소화하는 TCLP를 수립할 수 있음을 확인하였다.

본 연구에서는 기존의 단일 최적화 방식과 달리 다중 최적화를 통한 T/C 대수, 제원 및 위치 선정 프로세스를 제안

함으로써, 비용 및 간섭면적의 trade-off를 고려한 경제적이고 효율적인 프로젝트 완료를 기대할 수 있음을 보여주었다.

다만 본 연구에서는 각 T/C의 운영을 독립적인 프로세스로 가정하였고 시간에 따른 유닛 설치 과정은 배제하였기 때문에, 향후 연구에서는 T/C 운영과 현장시공의 동적 프로세스를 추가적으로 고려한 TCLP에 관한 연구로 발전시킬 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 2020년도 국토교통부 주거환경연구사업 모듈러 건축 중고층화 및 생산성 향상 기술 개발의 연구비 지원에 의한 결과의 일부임(과제번호: 20RERP-B082884-07).

Notation

List of symbols

TC = Total cost (KRW)

CA = Conflict area (m^2)

$A_{s,k}$ = Shared work zone between tower cranes (m^2)

K = Number of Cranes

N = Number of Units

$T_{o,k}$ = Operating time for tower crane k (min)

$C_{o,k}$ = Operating cost for tower crane k (KRW)

$C_{r,k}$ = Rental cost for tower crane k (KRW)

$C_{f,k}$ = Fixed cost for tower crane k (KRW)

T_h = Horizontal hook traversal time (min)

T_v = Vertical hook traversal time (min)

T_l = Loading time (min)

T_u = Unloading time (min)

T_f = Finishing time (min)

T_r = Hook radial movement time (min)

T_w = Hook slewing movement time (min)

V_r = Radial velocity of trolley (m/min)

V_w = Slewing velocity of jib (rad/min)

V_v = Hoisting vertical velocity (m/min)
 L_k = Distance from the supply point to the demand point(m)
 $\rho(D)$ = Distance from the crane location to demand point (m)
 $\rho(S)$ = Distance from the crane location to supply point (m)
 α = Degree of coordination of hook movement in radial and tangential directions (0~1)
 β = degree of coordination of hook movement in vertical and horizontal planes (0~1)

References

- Abdelmegid, M.A., Shawki, K.M., and Abdel-Khalek, H. (2015). "GA optimization model for solving tower crane location problem in construction sites." *Alexandria Engineering Journal*, 54(3), pp. 519-526.
- Al-Hussein, M., Niaz, M.A., Yu, H., and Kim, H. (2006). "Integrating 3D visualization and simulation for tower crane operations on construction sites." *Automation in construction*, 15(5), pp. 554-562.
- Briskorn, D., and Dienstknecht, M. (2019). "Mixed-integer programming models for tower crane selection and positioning with respect to mutual interference." *European Journal of Operational Research*, 273(1), pp. 160-174.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., and Meyarivan, T.A.M.T. (2002). "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II." *IEEE transactions on evolutionary computation*, 6(2), pp. 182-197.
- Han, S., Bouferguene, A., Al-Hussein, M., and Hermann, U. (2017). "3D-based crane evaluation system for mobile crane operation selection on modular-based heavy construction sites." *Journal of Construction Engineering and Management*, 143(9), 04017060.
- Han, S., Hasan, S., Bouferguene, A., Al-Hussein, M., and Kosa, J. (2018). "An integrated decision support model for selecting the most feasible crane at heavy construction sites." *Automation in Construction*, 87, pp. 188-200.
- Hasan, S., Bouferguene, A., Al-Hussein, M., Gillis, P., and Telyas, A. (2013). "Productivity and CO2 emission analysis for tower crane utilization on high-rise building projects." *Automation in Construction*, 31, pp. 255-264.
- Huang, C., Wong, C.K., and Tam, C.M. (2011). "Optimization of tower crane and material supply locations in a high-rise building site by mixed-integer linear programming." *Automation in Construction*, 20(5), pp. 571-580.
- Huang, C., Li, R., Fu, Y., and Ireland, V. (2019). Optimal Selection and Location of Tower Crane for the Construction of Prefabricated Buildings with Different Prefabrication Ratios. *Journal of Engineering Science & Technology Review*, 12(6).
- Irizarry, J., and Karan, E.P. (2012). "Optimizing location of tower cranes on construction sites through GIS and BIM integration." *Journal of information technology in construction (ITcon)*, 17(23), pp. 351-366.
- Jeong, G., Lee, H., Park, M., Hyun, H., Kim, H. (2019). "Cause Analysis and Reduction of Safety Accident in Modular Construction - Focusing on Manufacturing and Construction Process -." *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, 35(8), pp. 157-168.
- Ji, Y., and Leite, F. (2020). "Optimized Planning Approach for Multiple Tower Cranes and Material Supply Points Using Mixed-Integer Programming." *Journal of Construction Engineering and Management*, 146(3), 04020007.
- Kang, S.C., and Miranda, E. (2008). "Computational methods for coordinating multiple construction cranes." *Journal of Computing in Civil Engineering*, 22(4), pp. 252-263.
- Khodabandelu, A., Park, J., and Arteaga, C. (2020). "Crane operation planning in overlapping areas through dynamic supply selection." *Automation in Construction*, 117, 103253.
- Kim, Y., and Park, C. (2008). "Optimal Design of Residential Ventilation Systems using Integration of Genetic Algorithm, Pareto Optimality and CONTAMW 2.4." *Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design*, 24(1), pp. 237-245.
- Kim, J.H., Park, M., Lee, H.S., and Hyun, H. (2018). "Alternative evaluation model for tower crane operation plan in modular construction-focusing on modular unit installation and finishing works." *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, 19(2), pp. 50-60.
- Lee, D., Hyun, H., Park, M., and Lee, H. (2016). "Tower Crane Location and Capacity Selection Model for the Mid-to-high-rise Modular Construction." *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, 32(11), pp. 27-36.
- Marzouk, M., and Abubakr, A. (2016). "Decision support for tower crane selection with building information models and genetic algorithms." *Automation in Construction*, 61, pp. 1-15.
- Moussavi Nadoushani, Z.S., Hammad, A.W., and Akbarnezhad, A. (2017). "Location optimization of tower crane and allocation of material supply points in a construction site considering operating and rental costs." *Journal of Construction Engineering and Management*, 143(1), 04016089.

- Olearczyk, J., Al-Hussein, M., and Bouferguène, A. (2014). "Evolution of the crane selection and on-site utilization process for modular construction multilifts." *Automation in construction*, 43, pp. 59-72.
- Shapira, A., and Goldenberg, M. (2005). "AHP-based equipment selection model for construction projects." *Journal of construction engineering and management*, 131(12), pp. 1263-1273.
- Shapira, A., and Goldenberg, M. (2007). "Soft" considerations in equipment selection for building construction projects. *Journal of construction engineering and management*, 133(10), pp. 749-760.
- Taghaddos, H., Hermann, U., and Abbasi, A. (2018). "Automated Crane Planning and Optimization for modular construction." *Automation in Construction*, 95, pp. 219-232.
- Yeoh, J.K., and Chua, D.K. (2017). "Optimizing crane selection and location for multistage construction using a four-dimensional set cover approach." *Journal of Construction Engineering and Management*, 143(8), 04017029.
- Yoon, J., Lee, J., and Kim, D. (2013). "Feature Selection in Multi-label Classification using NSGA-II Algorithm." *Journal of KISS : Software and Applications*, 40(3), pp. 133-140
- Younes, A., and Marzouk, M. (2018). "Tower cranes layout planning using agent-based simulation considering activity conflicts." *Automation in construction*, 93, pp. 348-360.
- Zhang, P., Harris, F.C., and Olomolaiye, P.O. (1996). "A computer - based model for optimizing the location of a single tower crane: Authors claim 20 - 40% of hook horizontal travelling time can be saved if located at the position recommended by the model." *Building research and information*, 24(2), pp. 113-123.
- Zhang, P., Harris, F.C., Olomolaiye, P.O., and Holt, G.D. (1999). "Location optimization for a group of tower cranes." *Journal of construction engineering and management*, 125(2), pp. 115-122.

요약 : 최근 모듈러 건축의 고층화와 함께 현장에서의 T/C 사용도 증가하였다. 이러한 T/C의 대수, 제원 및 위치를 결정하는 TCLP는 프로젝트의 공사비용, 공사기간, 안전, 생산성에 큰 영향을 미친다. 특히 모듈러 건축 프로젝트에서 조건에 부합하지 않는 TCLP는 추가 장비 투입, 재설계 등의 작업으로 이어져 공사기간과 공사비 증가가 발생할 수 있다. 따라서 현장관리자는 현장조건, 양중대상, T/C 제원 등 수많은 제약을 고려하여 프로젝트에 적합한 TCLP를 수립해야 한다. 하지만 다중 T/C를 사용하는 건설현장의 경우 추가적인 고려사항과 변수들로 인해 경험과 직관을 통해 TCLP를 수립하는데 어려움이 있다. 이를 위해 본 연구에서는 비용과 간섭면적의 최소화를 목적으로 하는 다중 최적화(multi-objective optimization) 알고리즘을 개발하고, 이를 활용하여 T/C 대수, 제원 및 위치를 선정하는 모델을 제안한다. 본 연구에서는 기존의 단일 최적화 방식과 달리 다중 최적화를 통한 TCLP 수립 프로세스를 제안함으로써, 비용과 간섭면적의 trade-off를 고려한 경제적이고 효율적인 프로젝트 완료를 기대할 수 있음을 보여주었다.

키워드 : 모듈러 건축, 타워크레인, 배치계획, 다중 최적화
