

유전자 알고리즘 기반 다중 모듈러 건축 프로젝트 수행 시 모듈러 유닛 공장생산계획수립 모델 개발

김민정¹ · 박문서¹ · 이현수¹ · 이정훈* · 이광표¹

¹서울대학교 건축학과

Development of Manufacturing Planning for Multi Modular Construction Project based on Genetic-Algorithm

Kim, Minjung¹, Park, Moonseo¹, Lee, Hyun-soo¹, Lee, Jeonghoon*, Lee, Kwang-Pyo¹

¹Department of Architecture & Architectural Engineering, Seoul National University

Abstract : The modular construction has several advantages such as high quality of product, safe work condition and short construction duration. The manufacturing planning of modular construction should consider time frame of manufacturing, transport and erection process with limited resources (e.g., modular units, transporter and workers). The manufacturing planning of multi modular construction project manages the modular construction's characteristics and diversity of projects, as a type of modular unit, modular unit quantities, and date for delivery. However, current modular manufacturing planning techniques are weak in dealing with resource interactions and each project requirement in multi modular construction project environments. Inefficient allocation of resources during multi modular construction project may cause delays and cost overruns to construction operation. In this circumstance, this research suggest a manufacturing planning model for schedule optimization of multi project of modular construction, using genetic algorithm as one of the powerful method for schedule optimization with multiple constrained resources. Comparing to the result of the existed schedule of case study, setting optimized scheduling for multi project decrease the total factory producing schedule. By using proposed optimization tool, efficient allocation of resource and saving project time is expected.

Keywords : Modular construction, Modular Unit, Multi Project, Factory Scheduling, Genetic-Algorithm(GA)

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

모듈러 건축은 모듈러 유닛을 제작하는 공장 작업과 현장에 설치하는 현장공사로 분류한다(Mohsen et al, 2008). 공장 작업은 현장공사와 동시에 진행되기 때문에 현장 건축 공사 일정을 고려하여 계획해야 한다(Alvanchi et al, 2011). 이를 위해서는 모듈러 유닛 공장 생산에서 운송 및 현장 조립과정까지 걸리는 시간 예측이 필요하다. 이와 더불어 모듈러 유닛 제작공장은 동시에 여러 프로젝트에 모듈러 유닛을 공급해야 한다. 이에 모듈러 유닛 공장 생산 계획은 현장 생산성

과 밀접한 연관성을 지니며, 각 프로젝트에 따라 모듈러 유닛 크기, 수량, 납기일에 대한 다양한 요구사항이 고려되어야 한다(Noh 2005). 이러한 다중 프로젝트 공정관리가 원활하게 이루어지지 않으면 모듈러 건축의 최대 장점인 공기 단축을 완벽히 구현해 내지 못하므로 이에 따른 수익성 저하가 발생할 수 있다.

현재 모듈러 유닛 제작공장의 공정계획은 건설 공정계획 방법을 적용한다(Mansooreh et al, 2012). 이는 건설 프로젝트를 위해 만든 공정계획 방법이기 때문에 모듈러 유닛 공장 생산에 따른 물량 야적과 개별 프로젝트 현장 설치 순서 및 모듈러 유닛 규격을 충분히 고려하지 못한다. 이로 인해, 조립 순서에 맞지 않는 운반 차량이 장시간 대기하여 시공 현장 작업이 지연되고, 모듈러 유닛 제작공장 내 야적 공간 부족으로 공장 생산 라인 가동이 중단되기도 하였다(Kang 2007).

이를 해결하기 위해 연구자들은 모듈러 건축물 공정계

* Corresponding author: Lee, jeonghoon, Department of Architecture, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea
E-mail: di5555@naver.com
Received June 2, 2015; revised July 28, 2015
accepted August 10, 2015

획을 효율적으로 수립하는 연구를 진행해왔다(Park 2007, Hammad et al, 2008, Mohsen et al, 2008, Mansooreh et al, 2012). 하지만 모듈러 건축물 공정계획 연구는 주로 단일 현장의 공정관리 최적화 방안에 집중되었다. 단일 현장에 대한 공정관리 최적화 방안은 모듈러 유닛 제작공장이 다수의 프로젝트에 모듈러 유닛을 제작 및 운송하는 상황에서 구현되기 어렵다. 따라서 모듈러 건축물의 다중 프로젝트 공정계획은 모듈러 유닛 공장 생산, 운송, 조립의 전체적인 과정을 고려하고 개별 프로젝트의 특성을 반영하여 수립해야 한다.

본 연구는 다중 프로젝트를 지원하는 모듈러 유닛 생산 공정계획 알고리즘 모델을 구축하고, 한정된 자원(예: 작업자, 야적장, 모듈러 유닛 운송 트레일러)이 주어진 상황에서 공정계획 최적화 모델 개발을 목적으로 한다. 이를 통해 모듈러 유닛의 공장 생산 순서 및 운송 순서를 도출한다. 본 연구의 결과는 향후 다중 프로젝트를 수행하는 모듈러 생산 공정계획 수립 시 모듈러 유닛 제작공장 생산 및 운송 계획을 위한 기초 자료로 활용될 수 있다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구는 모듈러 유닛의 공장제작, 운송 및 현장조립 프로세스와 연계한 모듈러 유닛 공장 생산 공정계획 수립이 가능한 모델을 제시한다. 모듈러 건축의 현장 공사 중 모듈러 유닛 설치 이외의 건축공사는 제외하였고 공장에서 생산되는 모듈러 유닛은 다중 프로젝트를 지원할 때 생산 라인을 변경하거나 추가로 설치하지 않는 것으로 제약 조건을 설정하였다.

국내의 경우 국방부에서 병영생활관, 독신자 숙소 등을 다중 프로젝트로 발주하여 공사를 진행해왔다. 본 연구에서는 위의 상황과 같이 수행되는 다중 프로젝트가 동종인 것으로 연구의 범위를 제한하였다.

본 연구의 순서는 아래와 같다.

- 1) 기존 다중 프로젝트 수행 시 모듈러 유닛 생산 공정 계획의 문제점을 분석하고, 문제 해결을 위한 연구 방법론을 선정한다.
- 2) 최적화 방법론인 유전자 알고리즘의 원리를 고찰하며 본 연구의 적용 방안을 제시한다.
- 3) 모듈러 유닛 공장제작, 운송, 시공 과정에서 다중 프로젝트를 지원하는 모듈러 유닛 공장 생산 공정 계획에 영향을 끼치는 변수들을 도출한다.
- 4) 도출된 변수를 바탕으로 유전자 알고리즘을 이용한 공장 생산 최적화 모델을 개발한다.
- 5) 사례 적용을 통해 모델의 활용성을 검증하고 결과를 분석한다.

2. 관련 문헌 이론 고찰

2.1 모듈러 건축물 개요 및 특징

모듈러 건축은 공업화 건축의 일종으로 모듈러 유닛의 조합을 통해 단일 구조물을 완성하는 공법이며(Lawson 2008), 모듈러 유닛은 3차원 형상인 하나의 완성된 공간을 형성하는 구조체를 말한다. 각 모듈러 유닛은 모듈러 유닛 제작 공장에서 내부 설비 시설, 마감 등의 구성 요소를 갖춘 상태로 제작된 후 트레일러를 통해 운송되며 최종 설치 현장에서 조립된다(Kim et al, 2013).

모듈러 건축물은 기존의 건축물과 달리 현장에서 모듈러 유닛 조립을 통해 최소한의 공기를 확보할 수 있으므로 현장 공기를 단축할 수 있는 장점이 있다(Kim et al, 2014). 또한 모듈러 건축은 공장 생산 방식에 의해 일정한 품질을 얻을 수 있으며, 반복 작업을 통해 대량 생산이 가능하다(Kim & Lee 2014). 모듈러 건축은 이러한 특징을 바탕으로 동일한 평면을 반복적으로 이용하는 군시설, 교육시설, 주거시설 등에 이용되고 있다.

2.2 다중 프로젝트 모듈러 유닛 공장 생산 공정 계획

현재 모듈러 건축물의 공정계획은 일반 건설에서 쓰이는 공정계획 방법을 적용하고 있다(Mansooreh et al, 2012). 일반 건설의 공정계획이란 정해진 작업의 선후행 관계 및 작업소요 시간에 중점을 두어 총 공정시간을 예측하는 데에 사용된다(Kim 2014). 이는 단일 모듈러 건축 프로젝트에 적용한다면 공정계획상 고려요소에서 차이가 없기 때문에 문제가 없다. 하지만 다중 프로젝트 수행 시 모듈러 건축물과 일반 건축물은 고려해야하는 자원이 다르다. 예를 들어 일반 건설은 각각의 현장에 쓰이는 자원을 공유하지 않고 현장별로 관리한다. 하지만 모듈러 건축물의 경우 하나의 공장에서 생산하는 모듈러 유닛을 다중 프로젝트에 지원하게 된다. 그러므로 모듈러 유닛 제작공장은 동시에 수행되는 다수의 프로젝트에 공장의 자원(예: 작업자, 야적장, 모듈러 유닛 운송 트레일러)을 공유하게 된다.

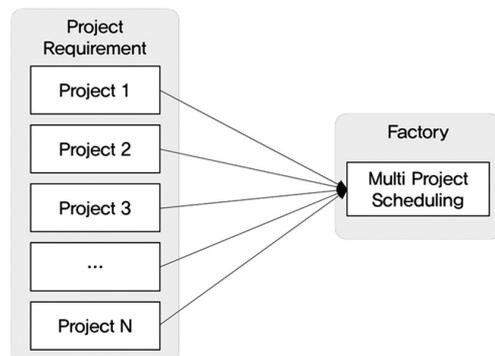


Fig. 1. Multi Project of Modular Construction Concept

Fig. 1은 모듈러 건축의 다중 프로젝트 개념도이다. 모듈러 유닛 제작공장은 1차적으로 개별 프로젝트의 정보를 파악한 후, 이를 바탕으로 종합적인 공정 계획을 수립하여 각 프로젝트에 제공한다. 따라서 모듈러 건축물의 공장 생산 공정 계획 시 한정된 자원과 더불어 각 프로젝트의 요구조건들을 고려해야 한다. 예를 들어, 모듈러 유닛은 발주자의 요구와 현장 설치 진행상황에 따라 정해진 날짜에 운송되어야 하며 (Hosein et al, 2014), 각각의 모듈러 유닛은 평면과 양중 크레인의 위치에 따라 현장 설치 순서가 정해져있다. 이는 이전의 모듈러 유닛이 설치되기 전까지 다음 모듈러 유닛은 설치를 진행할 수 없으며, 따라서 모듈러 유닛은 일일 설치 가능 개수가 한정되어 있다.

현재 이용되는 공정계획은 전체 생산 일정을 표현하지만 특정 모듈러 유닛의 타입별 세부 작업을 표현하는데 한계가 있다. 따라서 일별 생산 계획에 대한 구체적인 정보는 2차 가공이 요구된다. 또한 이는 모듈러 유닛 제작공장 자원의 분배나 모듈러 건축의 특징인 운송 시점의 최적값을 제공하지 못하기 때문에(Mohamed et al, 2007) 제약 조건들의 상호 정보 연계성이 낮다. 뿐만 아니라 공기지연이나 부족한 자원에 따른 스케줄 재조정이 어려워(Hosein et al, 2014) 이를 반영하는 효율적인 공정계획 방법이 필요하다.

2.3 다중 공정계획 선행 연구

Payne(1995)에 의하면 모든 사업 프로젝트들의 90%는 다중 프로젝트의 맥락에 따른다고 한다. 프로젝트들은 제한된 자원을 공유하며 개별적으로 계획된 공정을 진행한다. 이와 같은 개념으로 모듈러 건축의 다중 프로젝트들도 모듈러 유닛 제작공장의 한정된 자원을 바탕으로 계획을 수립해야 한다 (Resource Constrained Multi Project Scheduling Problem; RCMPSP). 자원 한정된 다중 프로젝트 공정계획 문제는 다양한 방법론을 통해 연구되어 왔다. 연구되어온 방법론은 수학적 접근, 휴리스틱방법, 메타휴리스틱 방법이 있다.

수학적 접근으로는 선형 계획법(Linear programming: Kelly and Walker 1995), 정수 계획법(Integer programming: Meyer and Shaffer 1963) 및 동적 계획법(Dynamic programming: Robinson 1975)으로 구분된다. 이는 국소적 탐색지역에서 최적해(optima)를 찾는데 사용되며, 지역 극한값(local extrema)에 수렴하게 쉬워 규모가 큰 공정 계획 문제는 최적해 도출이 어렵다(Oguz and Bala 1994). 또한 공사 관리자 등은 이 방법을 이용하기 위해 굳이 수학적 개념을 배우려 하지 않는다(Vincent 2009).

휴리스틱 기법은 전문가의 견해를 통해 공정계획의 원칙이 정해지는 방법으로 계산적인 요소가 적고 적용하기 쉽다는 장점이 있다. 하지만 이는 완전한 최적해가 아닌 근사-최적치를 제공하고 최적 해를 여러 방향으로 제시하지 못한다는

단점이 있다(Kumanan et al, 2006, Goncalves et al, 2008).

최근 많이 사용되고 있는 메타휴리스틱 방법에는 대표적인 방법으로 유전자 알고리즘이 있다. 유전자 알고리즘은 공정 문제에 관련하여 구현이 쉽고 신뢰도가 높아 실무에 많이 사용되고 있다(Seren Tasan 2008). 특히 자원 한정 다중 프로젝트에서 유전자 알고리즘 방법론은 그 효율성을 인정받고 있다(M, Gen et al, 2008)

본 연구의 대상인 모듈러 유닛 공장 생산 계획도 다중 프로젝트 상황에서 모듈러 유닛 제작, 운송, 조립의 과정에서 영향을 미치는 변수들이 다양하므로 이를 상호 연계하여 최적화 할 수 있는 유전 알고리즘 방법론을 이용하여 효과적으로 분석할 수 있다.

2.4 유전자 알고리즘

유전자 알고리즘은 진화의 원리를 적용하여 최적화 문제를 해결하기 위한 탐색 알고리즘이다. 이는 자연 세계에서 환경에 가장 적합한 개체만 살아남는 진화 과정을 공학적 알고리즘으로 적용한 것이다(J. Holland 1992). 유전자 알고리즘은 1975년 Holland에 의해 소개된 이래로 traveling salesman problem 문제, 조합 최적화 문제, 스케줄링 문제, 운송 문제 등에 활발히 적용되어 왔다.

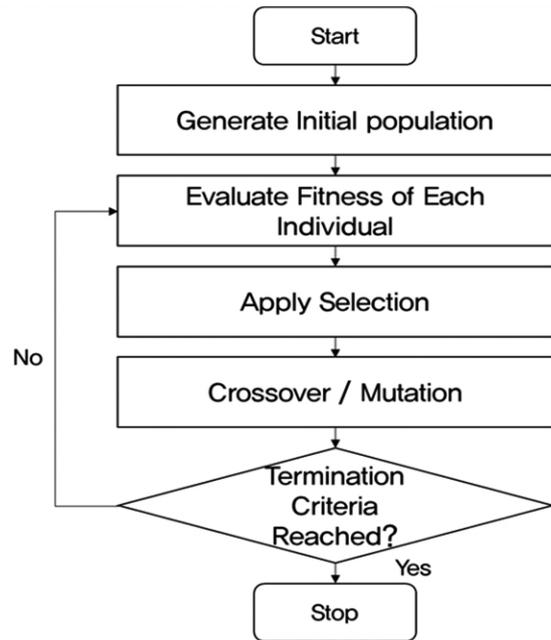


Fig. 2. Genetic Algorithm Flow Chart (Gilberto C. 2013)

알고리즘에 의한 문제해결 방식은 Fig. 2와 같다. 첫째, 함수의 적용성을 고려하여 문제를 효과적으로 해결할 수 있는 유전자 형태를 결정한다. 둘째, 해의 품질과 수행시간에 중요한 영향을 미치는 매개변수값(교배율, 세대수, 돌연변이율, 정지조건)을 결정한다. 셋째, 초기 객체군(population)

이 무작위 확률에 의해 생성 되도록 한다. 이렇게 생성된 개체는 함수와 제약 조건에 의해 선택되어야 한다(Kim 2004). 마지막으로, 유전자 알고리즘의 기본 알고리즘인 '선택(selection), 교배(crossover), 돌연변이(mutation)' 연산을 수행한다. 교배 연산자는 교배율에 따라 랜덤으로 두 개체를 선택한 후 선택된 개체의 일정 부분을 서로 교환하여 새로운 두 개의 개체를 생성하게 되며, 돌연변이는 한 개의 개체에서 특정 인자를 바꾸는 것으로 탐색 공간을 넓혀 해가 부분 최적점에 빠지는 것을 방지한다. 각 조합은 교배율에 따라 서로 간의 유전자 정보를 교환하여 새로운 개체를 생성하고 정지조건에 의해 최적값을 도출한다.

3. 다중 프로젝트 모듈러 생산 최적화 모델

3.1 다중 프로젝트 모듈러 생산 영향 인자 분석

본 연구는 유전자 알고리즘을 활용한 공장 생산 계획 최적화 모델 구축을 위해 다중 프로젝트 상황에서 모듈러 유닛 공장 생산 공정계획에 영향을 미치는 요인을 우선 분석하였다. 모듈러 다중 프로젝트 영향 인자는 선행 연구 및 전문가 자문을 통해 도출되었다. 전문가 면담은 모듈러 유닛 시공업체 2개사의 실무 전문가 6인을 대상으로 2014년 11월, 2015월 02월에 면담조사를 실시하였다. 이를 정리한 내용은 Table 1과 같다.

Table 1. Impact factors of Multi project Modular Construction

	Variable	Relationship
Factory	Productivity of factory	- Productivity is different depending on modular unit type and number of workers - Scheduling has to reflect each productivity
	A sequence of producing modular unit	- Productivity is different depending on modular unit type and number of workers
	Storage yard	- Size of storage yard affects to scheduling of shipping
Transport	Number of Trailer	- Number of trailers for modular unit transport per day
	Transit Time (Limited speed, Distance)	- Calculate with distance from factory to site and limited speed - When performing multi project of modular construction, distance to the site will be different with each project
Construction	Duration	- Construction must be done by due date of owner's request
	Erection Sequence of on-site construction	- Factory producing sequence is affected by the installation sequence of on-site construction
	Modular unit type	- Depending on the modular unit type, required installation time is different
	Number of workers	- Calculating constructability of on-site installation based on workers
	Modular unit quantity	- Depending on the project size, required quantity of modular units are different

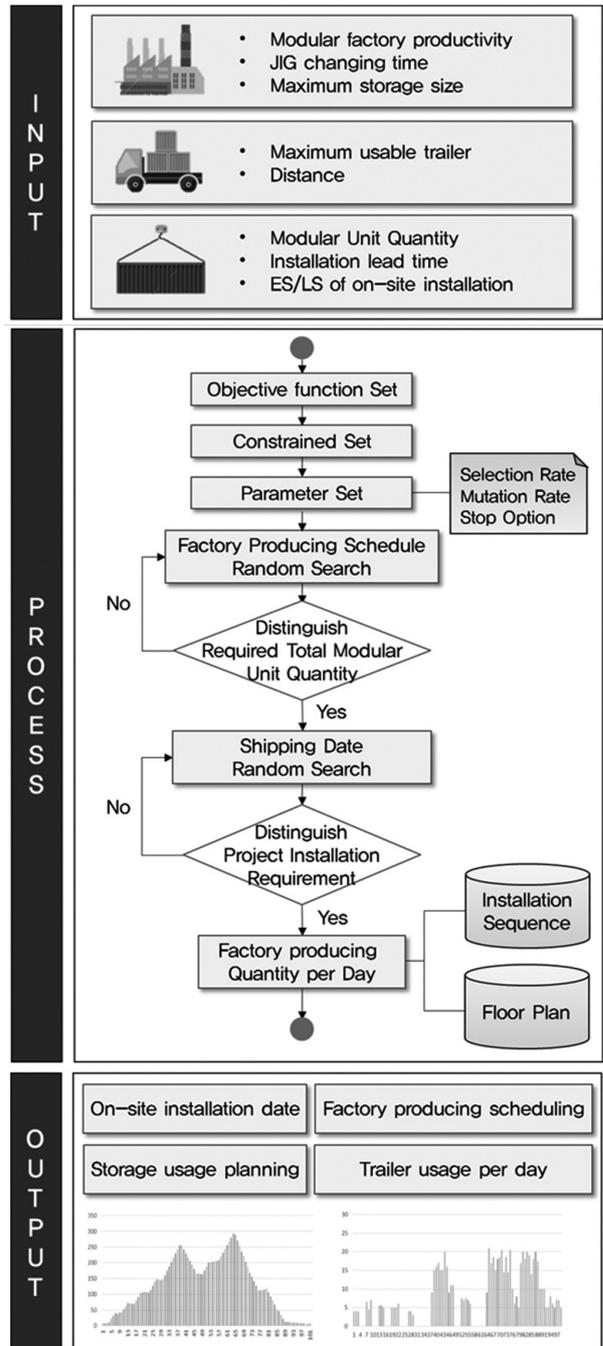


Fig. 3. Modular Construction Multi Project Factory Producing Scheduling Model process

다중 프로젝트의 경우 모듈러 유닛의 공장 생산 순서는 어떤 모듈러 유닛을 어느 현장에 언제 운송할 것인가에 대한 공장의 공정계획과 밀접한 관련이 있다. 이러한 모듈러 유닛의 생산 순서는 모듈러 유닛의 공장 생산량, 야적장의 규모, 실제 시공 현장의 조립 순서를 고려하여야 한다(Park 2007, Abu Hammad et al, 2008). 모듈러 유닛의 공장 생산량은 각 프로젝트 및 모듈러 유닛 타입 별로 진행되는 공종이 다르고 규

격에 차이가 있기 때문에 이에 따라 다르게 산정된다.

공장 제작이 완성된 모듈러 유닛은 공장 내 야적장으로 이동하게 되고, 야적장의 규모에 따라 야적 가능한 모듈러 유닛의 수가 산출된다. 야적장으로 이동되는 모듈러 유닛은 야적장의 규모와 현장 조립 순서를 바탕으로 계획된 출하 순서에 따라 야적된다. 제작공장에서 완성된 모듈러 유닛은 보양이 필요한 경우 야적하여 보양시키고, 보양이 불필요하거나 야적장이 가득 차있을 경우 야적하지 않고 현장으로 운송하기도 한다.

설치현장으로 운송 준비가 된 모듈러 유닛은 유닛의 규격과 무게에 맞는 트레일러에 상차한다(Kim et al, 2014). 하루에 운송할 수 있는 최대 모듈러 유닛의 수는 운송 소요 시간과 하루 최대 이용 가능 트레일러 수 등을 고려하여 설정된다(Park 2007, Mansooreh et al, 2012). 모듈러 유닛은 이동속도 제한 규정을 준수하여 운송되어야 하며 현장에 도착한 모듈러 유닛은 자체 탈락 여부를 확인하고 현장에 하차하거나 트레일러 위에서 바로 양중 되기도 한다.

모듈러 유닛 현장 설치의 현장에서 기초공사가 끝난 이후 모듈러 유닛을 조립할 수 있는 단계에서 시작된다. 각각의 프로젝트는 규모에 차이가 있기 때문에 요구되는 모듈러 유닛 수가 다르며, 평면이 다르기 때문에 이에 해당되는 조립 순서가 다르다(M, Mohsen et al, 2008). 각 현장은 모듈러 유닛의 규격과 양중 장비의 능력, 작업자 인원 등을 고려하여 1일 모듈 설치 개수를 바탕으로 공정 계획을 수립한다(Park 2007). 현장 설치의 첫 번째 모듈러 유닛을 먼저 설치하고 이후부터 양중 되는 모듈러 유닛을 유닛끼리 연결하는 공사로 진행되며, 1층의 경우 기초와 모듈러 유닛간의 접합 공사도 진행해야 한다.

3.2 다중 프로젝트 모듈러 유닛 공장 생산 계획 모델

본 연구에서 제안하는 다중 프로젝트 모듈러 유닛 공장 생산 계획 모델의 프로세스는 Fig. 3과 같다. 첫째, 도출된 다중 프로젝트 모듈러 유닛 공장 생산 영향 인자를 바탕으로 공장 생산 계획 모델에 필요한 정보를 입력한다. 둘째, 유전자 알고리즘을 이용하여 제약 조건을 만족하는 공장 생산 계획과 운송계획을 도출한다. 마지막으로 현장 설치 순서와 도출된 공장 생산 계획을 바탕으로 공장 생산 순서를 도출한다.

본 연구에서 제안하는 모델의 목적은 주어진 자원의 제약 조건을 만족하면서 공장 제작 및 운송, 현장 시공을 고려하여 공장 제작 생산 계획을 최적화하는 것이다. 또한 모델에서 최소화 하고자 하는 값은 최대한 야적을 줄이고 생산과 동시에 운송하여 설치할 수 있도록 1일 야적 개수(S_i)의 총 합을 줄이는 것이며, 이에 따른 목적함수(Objective Function)는 다음과 같다.

$$\min \sum_{i=1}^n S_i$$

본 연구에서 모듈러 유닛 타입은 염색체(Chromosome)로 표현되며(Fig. 4), 염색체를 구성하는 개별 유전자에 기입된 숫자는 모듈러 유닛 1일 생산 개수 P_i 를 나타낸다.

A	B	C	D	E	→ Type of Modular Unit (Type A, Type B...)
3	1	2	1	3	→ Modular unit production of day 1
...					
3	1	2	1	3	→ Modular unit production of day N

Fig. 4. Gene Combination

염색체는 공장의 생산 라인 개수, 총 공사 기간, JIG 변경이 필요한 모듈러 유닛 타입의 개수에 따라 조합이 늘어나게 된다. JIG는 모듈러 유닛 공장 생산 시 동일한 제품 생산을 위해 모듈러 유닛을 고정시키는 보조용 기구로 변경 시 일정 시간이 소요된다. 염색체의 조합은 공장의 모듈러 유닛 타입 별 하루 생산량을 바탕으로 모듈러 유닛 공장 생산 순서 도출을 목적으로 한다. 예를 들어 개별 유전자의 숫자가 3, 1, 0, 0, 3이라면 A타입과 B타입, E타입을 하루에 3개, 1개, 3개씩 생산하는 것이다. A타입, B타입, E타입은 사용되는 JIG가 각기 다른 모듈러 유닛이기 때문에 이에 따른 JIG 변경 시간을 추가 하여야 한다. 또한 각 타입에 따라 모듈러 유닛은 생산 시간이나 시간당 소요 작업자 수가 다를 수 있기 때문에 이를 적용하여 총 공장 생산 시간을 계산하여야 하며, 일별 생산 시간은 8시간으로 설정하였다. 공장에서 총 생산하는 모듈러 유닛은 공장 공정표를 작성하는 시점에서 결정되어 있는 모든 프로젝트에 필요한 유닛 개수와 같아야 한다.

Fig. 4의 염색체는 다중 프로젝트 수행 시 각 프로젝트의 요구 사항에 맞추어 생산량이 정해지게 된다. 공장에서 생산된 모듈러 유닛은 현장에서 요구하는 일정에 맞추어 운송되어야 하기 때문에 각 현장별로 기초 공사가 끝나는 시점에 맞추어 운송되도록 설정한다. 따라서 운송 가능 일자 이전에 생산된 모듈러 유닛은 공장 내 야적장에 적재하여 운송을 대기한다. 야적장에 야적되는 모듈러 유닛 개수(S_i)는 이전에 야적장에 있던 모듈러 유닛 개수(S_{i-1})와 당일 생산량(P_i)의 합에 설치 개수(E_i)을 뺀 값이다.

$$S_i = S_{i-1} + P_i - E_i$$

설치현장으로 운송되는 모듈러 유닛은 각 프로젝트의 건물 평면에 따라 정해진 순서로 야적장에서 출하하게 된다. 각 현장에서 조립되는 전체 모듈러 유닛은 요구되는 모듈러 유닛 타입 정보와 타입에 따른 현장 시공 시간 정보를 가지게 된다. 예를 들어 모듈러 유닛 타입 별 시공 시간은 8명으로 구성된 한 팀이 3x6m 모듈러 유닛을 설치할 때와 3x9m 모듈러 유닛을 설치할 때 소요되는 타입 별 시간 정보를 말한다.

4. 사례 연구

본 연구에서 제안한 모듈러 다중 프로젝트 공장 생산 최적화 모델의 활용성을 검증하기 위해 2013년 진행된 국방부 병영생활관을 적용 사례로 선정하였다. 프로젝트 건축 개요는 Table 2와 같다. 대상 프로젝트는 13개의 현장에 모듈러 유닛을 운송시키는 다중 프로젝트이며, 각 현장의 위치는 Fig. 5와 같다. 13개의 현장으로 운송되는 모든 모듈러 유닛은 화성에 위치한 단일 공장에서 제작되었으며, 총 공사는 6개월의 공사 기간으로 진행되었다.

Table 2. Construction Outline

Section	Contents
Title of the project	12 Military Barracks(Modular Construction)
Duration	2013. 06. 24 ~ 2013. 12. 21.
Total Cost	27.31 Billion dollars (Exclude VAT)
Client	Defence Intelligence Agency
Architect	Haenglim Architecture & Engineering CO.
Location	Seoul Gwanak-gu Namhyun-dong 663 and 12 sites
Site Area	53,779.0 m ²
Principal use	Military facilities
Structure	Steel frame construction (Modular construction)
Number of stories	1~3 Stories (Maximum height : 13.2M)
Modular unit Quantity	3x6m 445 EA 3x9m 550 EA / Total 995 EA

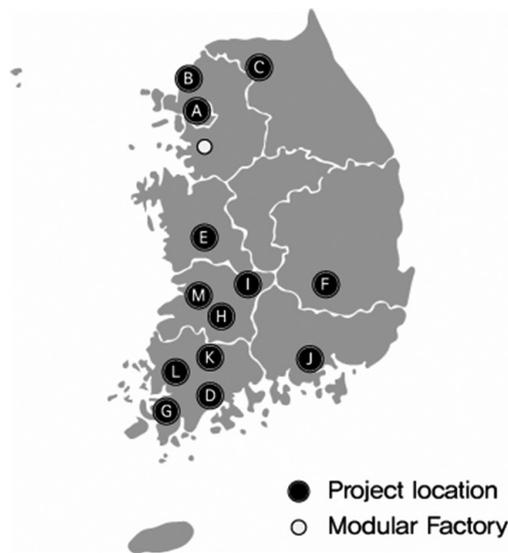


Fig. 5. Project Location

검증 방법은 기존의 다중 프로젝트 공사에 사용된 공정계획을 분석하고, 주어진 제약 자원을 적용하여 모델을 통해 다중 프로젝트의 최적화된 공정을 도출하여 비교하는 것이다.

4.1 기존의 모듈러 유닛 공장 생산 계획

기존의 공장 생산 계획은 프로젝트 별 모듈러 유닛 개수와 생산량을 바탕으로 생산 날짜를 계획하였다. 각 현장별 모듈러 생산 계획과 설치 착수일은 Table 3과 같다. 기존의 공장 생산 계획 중 L, E, D, M, J 지역은 각 현장에 필요한 모듈러 유닛을 생산하고 2~3주간 모듈러 야적장에 야적을 실시하였다. E지역의 경우 건물을 두 부분으로 나누어 공사를 진행하였고 따라서 E-1과 E-2로 분류하였다. K, A, G, I, F, C, B 지역은 필요한 모듈러 유닛을 야적을 시행하지 않고 생산 후 바로 운송하였다. 특히 M지역과 I지역은 설치되는 모듈러 유닛이 각각 168개, 159개로 다른 지역에 비해 많은 모듈러 유닛을 필요로 하였다.

프로젝트 별로 상이하지만 모듈러 유닛 제작 공장은 1일 평균 9.79개의 모듈러 유닛을 생산하였다. 모듈러 유닛의 규격은 3x6m와 3x9m 두 가지이고, 각 규격을 위한 개별 라인이 존재하기 때문에 모듈러 유닛 생산 시 JIG를 따로 변경하지 않고 생산을 진행하였다.

Table 3. Modular Units Producing and Installation Plan

Site	Unit Quantity		Producing Modular unit / day	On-site Installation
	3x6	3x9		
Site K	24	-	13/08/01 ~ 13/08/03	13/08/02
Site L	32	-	13/08/04 ~ 13/08/06	13/08/14
Site A	16	10	13/08/07 ~ 13/08/09	13/08/08
Site E-1	38	2	13/08/10 ~ 13/08/13	13/08/20
Site E-2	52	28	13/08/14 ~ 13/08/21	13/09/08
Site D	22	24	13/08/22 ~ 13/08/26	13/09/22
Site G	22	-	13/08/27 ~ 13/08/29	13/08/28
Site H	8	96	13/08/30 ~ 13/09/08	13/09/09
Site M	95	73	13/09/09 ~ 13/09/24	13/10/05
Site J	12	76	13/09/25 ~ 13/10/03	13/10/21
Site I	75	84	13/10/04 ~ 13/10/19	13/10/05
Site F	-	44	13/10/20 ~ 13/10/24	13/10/21
Site C	-	60	13/10/25 ~ 13/10/30	13/10/26
Site B	72	24	13/10/31 ~ 13/11/09	13/11/01
Total	468	521	13/08/01 ~ 13/11/09	-

4.2 모델 적용 공장 생산 계획

본 연구의 다중 프로젝트 공장 생산 계획 모델은 해당 사례에서 공정 계획을 작성할 때 이용한 자원을 바탕으로 적용하였다. 도출한 제약 자원 및 유전자 알고리즘 적용 내용은 다음과 같다.

모듈러 유닛 타입 별 공장 생산량()과 개별 프로젝트의 운송 및 시공 날짜를 유전자로 설정하였고 이는 Fig. 7의 검은 셀로 표현하였다.

건을 설정하였다. 모듈러 유닛 설치 프로세스는 Fig. 8과 같다. 또한 한 프로젝트에 최초의 모듈러 유닛이 운송되면 해당 프로젝트는 주어진 현장 설치 개수에 따라 공사 기간 연장 없이 프로젝트를 완료하도록 설정하였다. 각 프로젝트 별 모듈러 설치 순서는 층별 도면과 양중 장비의 위치에 기초하여 설정하였으며 모델의 매개변수 값은 초기 개체 집단 100, 교배 확률 0.5, 돌연변이 확률 0.1로 설정하였다.

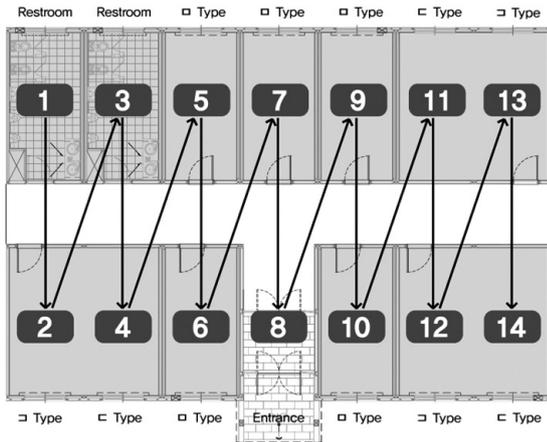


Fig. 8. Modular Unit Installation Sequence

4.3 적용 결과 및 분석

기존의 경우 프로젝트 단위로 생산 계획을 제시하였지만 본 연구에서 도출된 생산 계획은 프로젝트에서 필요한 모듈러 유닛의 크기별로 생산 계획을 제시하였다. 모델 적용 결과 공장 생산 계획과 운송 시작 날짜는 Table 4와 같으며, 이를 바탕으로 작성한 공장 생산 순서는 Fig. 9와 같다.

Table 4. Derived Modular Units Producing and Installation Plan

Site	3X6 Modular unit Producing / day	3X9 Modular unit Producing / day	On-site Installation
Site K	13/09/26 ~ 13/10/01	-	13/09/30
Site L	13/08/06 ~ 13/08/10	-	13/08/14
Site A	13/08/04 ~ 13/08/06	13/08/04 ~ 13/08/07	13/08/05
Site E-1	13/08/10 ~ 13/08/17	13/08/14 ~ 13/08/14	13/08/20
Site E-2	13/08/30 ~ 13/09/15	13/09/01 ~ 13/09/04	13/09/08
Site D	13/09/18 ~ 13/09/25	13/09/18 ~ 13/09/22	13/09/22
Site G	13/08/17 ~ 13/08/20	-	13/08/28
Site H	13/09/15 ~ 13/09/18	13/09/04 ~ 13/09/18	13/09/09
Site M	13/10/01 ~ 13/10/16	13/09/28 ~ 13/10/12	13/10/04
Site J	13/10/17 ~ 13/10/24	13/10/12 ~ 13/10/24	13/10/17
Site I	13/08/20 ~ 13/08/30	13/08/14 ~ 13/09/01	13/09/07
Site F	-	13/09/22 ~ 13/09/27	13/09/23
Site C	-	13/10/25 ~ 13/10/31	13/10/26
Site B	13/10/26 ~ 13/11/09	13/10/26 ~ 13/11/09	13/11/01
Total	13/08/04 ~ 13/11/09	13/08/04 ~ 13/11/09	-

모듈러 유닛 운송 시작 시점은 A현장, J현장, I현장, F현장이 각각 3일, 5일, 28일, 28일 만큼 당겨졌다. K현장의 경우 59일이 밀렸고, 그 외의 현장은 기존 계획과 동일하게 진행되는 것으로 나타났다. 현장 공사 날짜는 기존 계획에 비해 전체적으로 7.9% 빨리 공사가 마감되었다.

본 연구에서 개발된 모델을 통해 기존의 공정 계획을 분석한 결과 야적장에 최대 293개(3x6m 모듈러 유닛 기준) 야적을 시행한 것으로 나타났다. 이는 실제 화성 공장에 계획된 야적장의 크기를 초과하여 야적 된 것을 알 수 있었으며, 공장 관계자의 인터뷰를 통해 실제 공장 야적장 이외의 임야 대지를 임시로 빌려 추가적으로 야적한 것을 확인할 수 있었다. 하지만 본 모델을 통해 도출된 공장 생산 및 운송 계획을 적용시키면 공장 야적 규모는 최대 165개(3x6m 모듈러 유닛 기준)로 기존 대비 야적장 이용을 43% 감소시킬 수 있다. 기존 야적장 이용 계획과 본 모델을 통해 도출된 결과값을 비교한 내용은 Fig. 10, 11과 같다. 또한 본 모델을 통해 도출된 생산 계획을 적용한 공장 가동률은 기존 계획에 비해 일별로 고르게 분포되어 있는 것을 확인할 수 있다(Fig. 12, 13). 기존의 공정계획은 다중 프로젝트 수행 시 개별 프로젝트 특성을 상호 연계하여 반영하지 못했기 때문에 공장 생산성이 개별 프로젝트를 수행할 때마다 차이를 보였음을 알 수 있다. 공장 생산성이 일정하게 유지된다면 균일한 인력을 지속적으로 투입할 수 있기 때문에 현장에서 시간별 공장 생산 계획 수립 시 생산성 단위의 인력 계획을 수립할 수 있도록 할 것이다.

5. 결론

모듈러 건축은 공장 생산과 현장 공사를 동시에 진행하기 때문에 공사 기간 단축이 가능하다는 장점이 있다. 증가하는 모듈러 건축의 수요와 더불어 모듈러 유닛 제작 공장의 공정은 여러 개의 프로젝트를 수행하는 상황에서 현장 상황을 고려하여 효율적으로 계획해야 한다.

다중 프로젝트 상황의 최적화된 공정계획을 위해 본 연구에서는 모듈러 생산 공정과 관련한 변수들을 찾고, 이 변수들을 바탕으로 유전자 알고리즘을 이용하여 최적화 공정계획을 도출하기 위한 모델을 제시하였다. 모델에서는 프로젝트 요구 사항, 프로젝트 개수, 야적장 크기 등을 설정하여 최적화 분석을 시행하고, 최적화된 공장생산계획을 도출하였다.

본 연구결과는 제약 조건들을 고려하여 모듈러 공장 생산 계획을 도출할 경우 기존 공정계획에 비해 공장의 제작 기간과 현장의 공사 기간 단축이 가능함을 제시한다. 도출된 생산 계획을 바탕으로 생산과 운송 계획을 수립하면 모듈러 유닛의 야적을 줄이고 일정한 공장 생산성을 유지할 수 있음을 확인하였다. 따라서 본 연구에서 제안하는 다중 프로젝트 공장 생산 계획 모델을 활용한다면, 모듈러 유닛 제작공장의 관리

Modular Factory Manufacturing Schedule																								
Date	Modular Unit Size		LINE1										LINE2											
	3x6	3x9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2013-08-04	5	4	A4	A4	A5	A5	A4								A11	A9	A9	A8						
2013-08-05	8	0	A3	A1	A1	A3	A7	A1	A3	A1														
2013-08-06	4	4	A2	A3	A7	L1									A10	A9	A9	A9						
2013-08-07	8	2	L3	L2	L2	L3	L1	L1	L7	L3					A9	A8								
2013-08-08	8	0	L5	L1	L5	L3	L6	L4	L7	L1														
2013-08-09	8	0	L3	L3	L1	L1	L4	L3	L5	L1														
2013-08-10	9	0	L4	L3	L5	L1	L6	L3	L4	E1	E3													
2013-08-11	9	0	E1	E2	E3	E3	E2	E1	E1	E2	E4													
2013-08-12	8	0	E3	E2	E4	E1	E2	E4	E3	E2														
2013-08-13	9	0	E4	E1	E2	E4	E3	E5	E4	E6	E1													
2013-08-14	2	8	E2	E2											E12	E12								
2013-08-15	0	10													I8	I10	I9	I9	I10	I9	I11	I9	I8	I9
2013-08-16	6	5	E2	E3	E1	E3	E5	E6							I9	I9	I9	I9	I10					
2013-08-17	8	3	E6	E7	G1	G3	G3	G1	G1	G3					I8	I10	I8							
2013-08-18	9	2	G3	G1	G4	G4	G7	G4	G4	G5	G1				I10	I9								
2013-08-19	6	5	G5	G3	G5	G1	G3	G3							I9	I8	I10	I8	I10					
2013-08-20	7	4	G1	I7	I6	I4	I7	I6	I4						I8	I8	I8	I10						
2013-08-21	7	4	I5	I5	I5	I5	I4	I4	I6						I10	I8	I8	I10						
2013-08-22	7	4	I7	I6	I7	I5	I4	I5	I4						I10	I8	I8	I10						
2013-08-23	5	6	I4	I6	I1	I3	I7								I10	I8	I8	I10	I10	I8				
2013-08-24	7	4	I4	I6	I4	I4	I6	I1	I3						I10	I8	I10	I8						
2013-08-25	6	5	I4	I5	I5	I5	I4	I6							I10	I8	I10	I8	I10					
2013-08-26	5	6	I3	I6	I1	I5	I4								I8	I10	I8	I8	I10	I10				
2013-08-27	7	4	I5	I5	I5	I6	I4	I4	I4						I8	I8	I10	I10						
2013-08-28	9	2	I6	I4	I4	I6	I1	I3	I4	I5	I5				I8	I8								
2013-08-29	10	2	I5	I4	I6	I3	I6	I1	I5	I4	I5	I5			I10	I10								
2013-08-30	8	3	I5	I6	I4	I4	E4	E3	E4	E2					I8	I8	I10							
2013-08-31	3	7	E1	E4	E4										I10	I8	I10	I8	I10	I8	I10			

Fig. 9. Modular Unit Manufacturing Sequence Chart

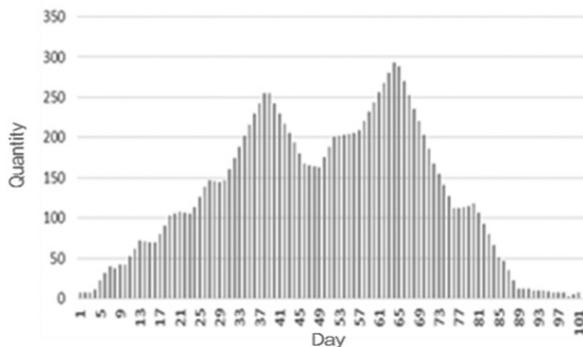


Fig. 10. Storage Usage (Existing Plan)

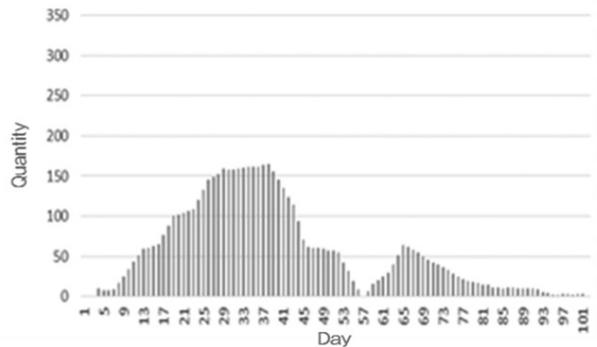


Fig. 11. Storage Usage (Model Result)

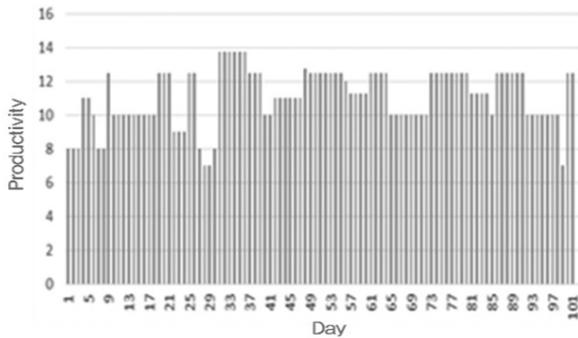


Fig. 12. Factory Productivity (Existing Plan)

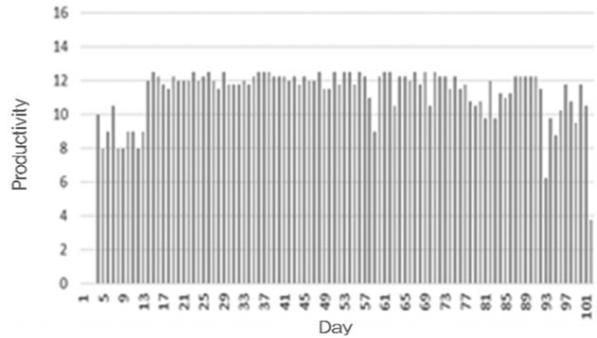


Fig. 13. Factory Productivity (Model Result)

자는 여러 개의 프로젝트를 효율적으로 관리하고 각 타입 별 모듈러 유닛을 언제 생산하고 어떤 프로젝트에 언제 보내야 하는지에 대한 생산 및 운송 계획을 수립할 수 있다. 이를 통해 야적 공간을 최대한 활용하며, 모듈러 유닛 공장 생산 계획에 대한 신뢰도를 높일 수 있을 것이다.

본 연구의 한계는 현장에서 진행되는 건축공사에 대한 반영이 되지 않았고, 각 프로젝트에서 진행할 수 있는 현장의 야적을 고려하지 않았기 때문에 향후 연구에서는 이를 반영한 공정계획 최적화 연구가 필요할 것이다. 추후 연구로는 이 종의 다중 프로젝트에 관한 연구로 발전시켜 나갈 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통과학기술진흥원 주거환경연구사업 (14RERP-B082884-01) 결과의 일부임.

References

- Alvanchi, Reza Azimi, SangHyun Lee, Simaan M. AbouRizk, Paul Zubick. (2011). "Off-site construction planning using discrete event simulation", *J. Archit. Eng.*, 18, pp. 114-122.
- Gilberto C. Pereira, Marilia M. F. de Oliveira*, Nelson F. F. Ebecken. (2013). "Genetic Optimization of Artificial Neural Networks to Forecast Virioplankton Abundance from Cytometric Data", *Journal of Intelligent Learning Systems and Applications*, 5(1).
- Goncalves, J. F., Mendes, J. J. M., and Resende, M. G. C. (2008). "A genetic algorithm for the resource constrained multi-project scheduling problem." *Eur. J. Oper. Res.*, 189(3), pp. 1171-1190.
- Hammad, A. A., Salem, O., Hastak, M., and Syal, M. (2008). "Decision support system for manufactured housing facility layout.", *J. Arcit. Eng.*, 14(2), pp. 36-46.
- Hosein Taghaddos, Ulrich Hermann, Simaan AbouRizk, Yasser Mohamed. (2014). "Simulation based multiagent approach for scheduling modular construction", *J. Comput. Civ. Eng.*, 28, pp. 263-274.
- Jeong, J. G., Hastak, M., and Syal, M. (2006). "Supply chain simulation modelling for the manufactured housing industry." *J. Urban Plann. Dev.*, 132(4), pp. 217-225.
- J. Holland. (1992). "Adaptation in Nature and Artificial Systems." MIT Press.
- Kang, Sung-O. (2007). "A Study on the process analysis and setting up normal duration of Large scale military modular building.", MS thesis, Mokwon University, Korea.
- Kelly, J. E., and Walker, M. R. (1959). "Critical path planning and scheduling." *Proc. Of the Eastern Joint Computer Conference*, Dec., pp. 160-173.
- Kim, D., Kim, K., Cha, H., Shin, D. (2013). "A Study on the Strategy for Creating Demand of Modular Construction through Case Analysis by Building Type." *Korean journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, 14(5), pp. 164-174.
- Kim, H., Hwang, Y., Kim, K. (2014). "Study on the application of Multi-skilled labors to Factory Production Process for Securing Economic Feasibility of Modular Unit." *Korean journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, 15(1), pp. 11-19.
- Kim, Jung Kyeong. (2014). "Improvement plan of modular plant production process for residential buildings.", MS thesis, University of Seoul, Korea.
- Kim, Jae-young, Lee, Jong-kuk. (2014). "A Basic Study on the Application of Modular Construction - Focused on the Analysis of Case Study -", *Journal of the Korean Housing Association*, 25(4), pp. 39-46.
- Kumanan, S., Jegan Jose, G., Raja, K. (2006). "Multi-project scheduling using an heuristic and a genetic algorithm." *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 31(3-4), pp. 360-366.
- M. Gen, R. Cheng, and L. Lin. (2008). "Network Models and Optimization: Multiobjective Genetic Algorithm Approach.", Springer.
- M. Moghadam, M. Al-Hussein, S. Al-Jibouri, A. Telyas. (2012). "Post simulation visualization model for effective scheduling of modular building construction", *Can. J. Civ. Eng.*, 39, pp. 1053-1061.
- Meyer, L. and Shaffer, R. (1963). "Extensions of the critical path method through the application of integer programming." University of Illinois, Urbana, 111, July.
- Mohamed, Y., Borrego, D., Francisco, L., Al-Hussein, M., Abourizk, S., and Hermann, U. (2007).

- “Simulation-based scheduling of module assembly yards: Case study.” *Eng., Constr. Archit. Manage.*, 14(3), pp. 293-311.
- Mohsen, O.M., Knytl, P.J., Abdulaal, B., Olearczyk, J., and Mohamed, A.-H. (2008). “Simulation of modular building construction.” *Proc., Winter Simulation Conf., IEEE, Piscataway, NJ*, pp. 2471-2478.
- Nasereddin, M., M. Mullens, and D. Cope. (2007). Automated simulator development : A strategy for modeling modular housing production, *Automation in Construction*, 6(2), pp. 212-223.
- Noh, hong woo. (2008). “Process Planning and Scheduling in Job Shop with Multiple Work Centers.” MS thesis, Soongsil University, Korea.
- Odeh, A. M. (1992). “CIPROS: knowledge-based construction integrated project and process planning simulation system.”, PhD thesis, University of Michigan, Ann Arbor, MI.
- Oguz, O., and Bala, H. (1994). “A comparative study of computational procedures for the resource constrained project scheduling problem.” *Eur. J. Oper. Res.*, 72(2), pp. 406-416.
- Park, Jae sik, (2007). A Study of the Modular System of Construction to Build Defense Bachelor Officers’ Quarters, PhD thesis, Mokwon University, Korea.
- Payne, J.H. (1995). Management of multiple simultaneous projects: a state-of-the-art review. *International Journal of Project Management*, 13(3), pp. 163-168.
- Robinson, R. (1975). “A dynamic programming solution to cost time tradeoff for cpm.” *Mgmt Sci.*, 22(2), pp. 158-166.
- R.M. Lawson and R.G. Ogden. (2008). “Hybrid’ light steel panel and modular systems”, *Thin-Walled Structures*, 46(7-9), pp. 720-730.
- Seren Oz Mehmet Tasan. (2008). “A Priority-based Genetic Algorithm Approach for Solving Multiple Alternative Project Scheduling Problems with Resource Constraints and Variable Activity Times.” *International Conference on Systems, Man and Cybernetics, IEEE*, pp. 2537-2542.
- Taghaddos, H., AbouRizk, S. M., Mohamed, Y., and Hermann, R. (2009). “Integrated simulation-based scheduling for module assembly yard.” *Proc. Construction Research Congress 2009, ASCE, Reston, VA*, pp. 1270-1279.
- Yu, H., M. Al-Hussein, and R. Nasser. (2007). Process Flowcharting and Simulation of house structure components production process. *Proceedings of 2007 Winter Simulation Conference, S. G. Henderson, B. Biller, M.-H. Hsieh, J. Shortle, J. D. Tew, and R.R. Barton*, pp. 2066-2072.

요약 : 모듈러 건축공법은 공장 생산, 운송, 현장설치 프로세스를 통해 기존 현장중심 건축공법에 비해 품질향상 및 공기단축이 가능한 특징을 가지고 있다. 특히 모듈러 유닛의 제작과 시공이 분리되어 수행되기 때문에 다수의 프로젝트가 동시에 수행될 경우 각 프로젝트에 따라 생산해야하는 모듈의 크기, 수량, 납기일, 생산 유형 및 과정을 고려하는 SCM(Supply Chain Management) 관점의 공장 생산 공정 계획 수립이 필요하다. 그러나 현재 모듈러 유닛 공장 생산 계획은 개별 프로젝트 중심으로 수립되고 있어 다중 모듈러 건축 프로젝트 수행 시 모듈러 유닛 제작공장의 한정된 자원과 설치 현장별 프로젝트 요구조건들을 동시에 고려한 공장 생산계획을 도출하는데 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 다양한 변수 간 상호 연계성 및 제약조건으로 공정 계획 최적화 결과 도출이 가능한 유전자 알고리즘 방법을 통해 모듈러 유닛 제작공장의 한정된 자원과 설치 현장별 요구사항이 반영된 모듈러 유닛 공장 생산 공정계획 최적화 수립 모델을 제시하며 이를 사례분석을 통해 검증하였다. 연구 결과, 기존 다중프로젝트의 공장생산계획에 비해 평균 7.9%의 현장설치 공기단축 및 43%의 최대 야적장 이용률 감소가 가능하였다. 향후 본 연구 내용을 바탕으로 제약 조건 범위 확장 및 생산성 데이터 추가가 될 경우 다중 모듈러 건축 프로젝트의 모듈러 유닛 공장 생산 계획 수립과 현장시공프로세스 구축을 동시에 지원할 수 있는 기초 자료로 활용될 수 있다.

키워드 : 모듈러 건축, 모듈러 유닛, 다중 프로젝트, 공장 공정 계획, 유전자 알고리즘
