

## 적층식 모듈러 공동주택 현장설치 단계의 생산성 분석

### Productivity Analysis of the Site Installation Stage of Laminated Modular Multi-Family Housing

박문선<sup>1</sup>, 김석<sup>2\*</sup>

Moon-Sun Park<sup>1</sup>, Seok Kim<sup>2\*</sup>

#### 〈Abstract〉

This study was conducted to present useful information on the utilization and productivity analysis of laminated modular multi-family housing. To this end, the process of site installation was investigated and analyzed through a prior study, and the monitoring survey was conducted through the site installation case of an stacked multi-family housing. Based on the above, the results of productivity analysis using the web-cyclone technique were also presented. However, the site installation process has limitations on generalisation because the process is not the same for each construction company, and also limits that require verification through application in the actual site of the web-cyclone model presented in this study.

*Keywords : Modular, Multi-Family Housing, Productivity, Web-Cyclone*

---

1 정회원, 한국교통대학교, 연구교수

2\* 정회원, 교신저자, 한국교통대학교, 조교수  
E-mail: kimseok@ut.ac.kr

1 Department of Railroad Infrastructure System Engineering,  
Korea National University of Transportation

2\* Department of Railroad Infrastructure System Engineering,  
Korea National University of Transportation

## 1. 서론

### 1.1 연구의 배경 및 목적

모듈러 건축은 공장에서 구조, 내장재, 각종 설비 등을 설치한 유닛 일부를 완성하고, 현장에서는 최소한의 조립공정으로 건축물을 시공하는 공법으로 조립 및 해체작업이 간단하고, 공사기간을 단축함과 동시에 재사용이 용이하다. 따라서 최근 연구 개발 및 일부 건설공사에서 모듈러 건축을 활발히 적용되고 있다.

현재 미국의 경우 뉴욕 브루클린에 건설을 완료한 애틀랜틱 야드 B2(Atlantic Yard B2) 프로젝트를 통해 32층의 중·고층 공동주택을 모듈러 건축을 적용하여 시공하였으며, 한국의 경우에도 서울 강서구 가양동 행복주택을 통해 6층의 저층 공동주택을 모듈러 건축을 적용하여 시공하였다. 또한 2018년 개최된 평창동계올림픽의 레지던스 호텔을 모듈러 건축을 적용하여 시공하였으며, 2019년 4월 초순 강원도에서 발생한 대형 산불로 인한 이재민 피해 복구 지원을 위해 모듈러 건축을 대안으로 적극 검토 및 활용을 고려하는 등 각종 재난 및 재해 지역에서도 모듈러 건축 적용을 활발히 모색하고 있는 실정이다.

최근 모듈러 건축의 건설산업 적용 노력에도 불구하고 여전히 낮은 모듈러 주택 수요 및 열악한 모듈러 주택 제작환경 등의 현실적인 문제들로 인하여 기존 주택형태인 Reinforced Concrete(이하:RC) 건축물에 비해 높은 공사비를 나타내고 있다. 높은 공사비는 모듈러 주택의 보급 확대의 걸림돌로 작용하고 있으나, 모듈러 건축의 특징인 공장제작 및 조립공정의 생산성을 높임으로써 공사비를 저감할 수 있을 것으로 판단된다[1].

현재까지 진행된 모듈러 건축과 관련하여 제기

되고 있는 문제들을 해결하기 위한 다양한 노력들이 있어 왔고, 이를 살펴보면 모듈러 공장생산 단계의 부재 표준화[2], 공장생산 단계의 인력투입 분석[3], 현장설치 단계의 공정 프로세스 분석[4][5][6][7], 등을 초점으로 수행되었다. 일부 연구들이 모듈러 건축의 경제성 비교 분석[4][8][9], 공사비 절감 분석[4][10] 진행하였으나 현장설치 단계의 구체적인 데이터를 활용한 분석에는 한계점을 지니고 있다. 따라서 적층형 모듈러 공동주택의 현장설치 단계의 투입된 실제 데이터를 바탕으로 생산성을 분석하는 실증적인 관점에서의 연구가 필요하다.

이에 본 연구는 적층식 모듈러 공동주택의 현장설치 단계 공정분석, 작업시간, 투입인원 등을 조사하여 현장에 대한 모니터링을 실시하고자 하며, 또한 웹사이클론 분석 기법을 활용하여 생산성 분석 결과를 제시하여 효율적인 적층식 모듈러 건축의 활용 및 생산성 분석을 위한 유용한 정보를 제공하고자 한다.

상기와 같은 본 연구의 목적을 구체적으로 설명하면 다음과 같다.

- 1) 적층식 모듈러 공동주택의 현장설치 단계에 대한 공정, 시간, 인원을 A사례를 바탕으로 조사 및 도출한다.
- 2) 상기에서 도출된 현장설치 단계의 주요 요인을 바탕으로 웹사이클론 기법을 활용한 생산성 분석 결과를 제시한다.

### 1.2 선행연구 고찰

현재까지 국내에서 수행되어온 모듈러 건축 및 웹사이클론 분석 관련 연구들은 다음의 Table 1과 같다.

Table 1. Previous research analysis

Division	Author	Title	Analysis opinion
Modular construction	Jee-Hee Lee et al.(2015)	An Economic Feasibility Analysis on the Movable Modular Lodging Buildings	The economics of the life cycle of RC and Modular Construction were analyzed for accommodation buildings, but there are limitations to the general assumptions in the analysis process.
	Hu-Yong Kim et al.(2018)	An Analysis of Cost Reduction Potentials for Modular Housing from the Long-term Perspective	Based on the details of Modular Multi-Family Housing Project, the cost analysis was conducted by the stage of factory manufacturing and site installation, but the productivity of the process, time and personnel was not analyzed.
	Jong-Dae Bang et al.(2014)	An Economic Analysis of Steel Framed Modular Housing	Construction cost (direct cost) analysis of modulators in Multi-Family Housing was performed, but air reduction and various factors were not applied to cost analysis, and productivity of process, time and personnel was not analyzed.
Web-Cyclone	Dong-Wan Kang et al.(2010)	A Study on the Productivity Analysis of Superstructure Construction for Multi-Housing Projects Using Construction Simulation	Proposed the process for the construction by applying the web cyclone technique to the frame construction of the Multi-Family Housing, but there is a limit to the single process, not the whole process.
	Doo-Won Hwang et al.(2017)	Lifting Work Process Optimization Method in High-rise Building Construction Through Improvement of CYCLONE Modeling Method	Productivity on the quantity of materials using lift cars of high-rise construction was analyzed by applying the Web-Cyclone technique, but there is a limit to a single process rather than the entire process.

상기의 연구들은 대부분 단편적인 사례를 통한 모듈러 건축의 경제성 분석과 단일 공정에 대한 웹사이클론 분석에 편중되고 있고, 모듈러 현장설치 단계에 대한 생산성 분석에 관한 연구는 미흡한 실정이다. 이에 본 연구에서는 모듈러 공동주택에 대한 현장설치 단계를 중심으로 공정을 분석하고, 이에 대한 작업시간, 투입인원을 조사하여 웹사이클론 기법을 통하여 생산성 분석 결과를 제시한다.

## 2. 모듈러 공동주택의 현장설치 모니터링

### 2.1 본 연구의 범위

적층식 모듈러 건축의 프로세스는 크게 공장제작, 운반, 현장설치의 3단계로 구분하고 있으나, 본 연구에서는 현장설치 단계에 대한 모니터링 조사 및 분석을 실시하기 위하여 연구의 범위를 공장제작 및 운반을 제외한 현장설치 단계로 한정하였다.



Fig. 1 Field installation of modular

상기 Fig. 1은 적층식 공동주택의 현장설치 A 사례의 이동식 크레인 양중 및 가고정 공정에 대한 모니터링 자료이며, A 사례에 대해 2019년 4월 4일부터 4월 7일까지 4일간 진행된 모듈러 현장설치 단계에 대한 공정을 모니터링하였다.

## 2.2 현장설치 공정 분석

일반적인 모듈러 유닛의 현장설치 공정은 현장 기초, 마감공사, 지붕공사로 분류[2]할 수 있으나, 본 연구에서는 현장기초 공정 완료 및 지붕공사(프레임 설치)는 모니터링 실시시간에 포함되지 않아 연구범위에서 제외하였다. 따라서 본 연구에서는 마감공사를 한정하여 현장설치 공정에 따른 세부공정(Level 3) 분류를 다음의 Table 2와 같이 도출하였다.

Table 2. The process classification of site installation in this study

Level 1	Level 2	Level 3
Site installation	site foundation	- Excluding the scope of this study
	Finishing work	(01) The on-site entry of trailer and unit module
		(02) Unpacking
		(03) Balance beam fastening to the unit module
		(04) Lifting
		(05) Temporary fixation
		(06) Balance beam disassembly
		(07) Crane preparation
		(08) Bolting of unit modules
		(09) Connection plate welding
Roof works	- Excluding the scope of this study	

상기의 Table 2에서 보는 바와 같이 모듈러의 현장설치 공정은 총 9개의 세부적인 작업으로 분류하였고, 상기를 바탕으로 현장설치에 대한 모니터링 조사를 실시하였다.

## 2.3 현장설치 시간, 인원 조사

상기 2.2 현장설치 단계 공정분석에서 제시한 공정분류를 바탕으로 현장설치 단계의 세부공정에 대한 최소, 평균, 최대 작업시간과 공정에 투입된 인원을 조사하였으며, 이에 대한 내용은 다음의 Table 3과 같다.

Table 3. Site installation phase monitoring of work hours and input workers by process

Level 2	Level 3	Input person	The time required(Min)/1Modular		
			Min	Ave	Max
Finishing work	(01) The on-site entry of trailer and unit module	1	1.5	3.4	5.0
	(02) Unpacking	2	2.1	3.0	4.0
	(03) Balance beam fastening to the unit module	2	1.5	2.3	3.5
	(04) Lifting	4	7.2	8.9	10.0
	(05) Temporary fixation	1	4.5	16.6	33.0
	(06) Balance beam disassembly	2	1.2	2.2	3.0
	(07) Crane preparation	1	2.5	3.4	4.5
	(08) Bolting of unit modules	2	9.0	11.0	13.0
	(09) Connection plate welding	1	46.0	52.0	60.0

상기 Table 3에서 보는 바와 같이 현장설치 공정에 대해 Min 값의 최소시간을 기록한 공정은 (6) 밸런스빔 해체 공정으로 투입된 인원은 2명이고, 소요시간은 최소 1.2분, 평균 2.2분, 최대 3.0분이 소요된 것으로 조사되었다. 또한 Min 값의 최대시간을 기록한 공정은 (9) 커넥션 플레이트 용접 공정으로 투입된 인원은 1명이고, 소요시간은 최소 46.0분, 평균 52.0분, 최대 60.0분이 소요된 것으로 조사되었다. 상기와 같이 적층식 모듈러 공동주택의 현장설치 시 소요시간은 처음 작업시간이 최대시간으로 필요하게 되지만, 작업 반복진행 및 작업 학습에 따라 최소시간을 기록하는 것으로 조사되었다.

### 3. 모듈러 공동주택의 생산성 분석






#### 3.1 현장설치 시간, 인원 조사

본 연구의 목적은 적층식 모듈러 공동주택의 현장설치 단계의 공정, 시간, 인원을 바탕으로 생산성 분석 결과를 제시하는 것이다. 이를 위해 반복적인 작업 프로세스를 모델링하고 민감도 분석을 통해 자원 조합에 따른 생산성에 영향을 미치는 요인을 파악할 수 있는 웹사이클론 분석 기법을 적용하고자 한다.

Web-Cyclone' 방법론은 미국 Purdue 대학의 Halpin 교수에 의해 고안된 반복 작업 프로세스 시뮬레이터 'Cyclone'(1974)을 웹 인터페이스에 맞추어 개량한 것으로 불연속사건 시뮬레이션 기법 중 하나로 건설공정의 계획과 분석에 유용하게 쓰이는 순차적 알고리즘 방법이다. 공정의 반복적 시뮬레이션 형태인 사이클론은 Activity, Operation, Work task 등으로 구성되며, 자원 및 작업시간, 공중간 선·후행관계를 모델링 할 수 있다. 따라서 본 연구에서 적용할 웹사이클론 기법에 대한 내용은 다음과 같다.

첫째, 공장제작 및 현장설치 단계에 대한 공정 프로세스를 모델링 한다. 이를 위해 전체 공정에서 공정지연이 발생하거나 효율이 저하되는 공정을 선정하고, 선행연구 및 현장 관리자 인터뷰를 통해 관리 목표를 설정 후, 세부 작업들 간의 순서와 인력, 장비 등의 자원투입 계획을 설정한다. 둘째, 상기 조건을 바탕으로 시뮬레이션을 실행한다. 이를 위해 사이클론 모델을 구축하고, 실제 현장과의 차이를 줄이기 위해 모델을 현장과 동일하게 설정하여 세부작업 조정을 통해 주공정을 도출한다. 셋째, 사이클론 시뮬레이션으로 민감도 분석 및 현장 적용성 평가를 분석한다. 이를 위해

Table 4. Element of web-cyclone analysis method

Component	symbol	Remarks
Combi-nation (Combi) Activity		Stop the process and wait for the preceding QUEUE tasks to be completed.
Normal Activity		The first prior action that arrives takes a user-specified amount of time before proceeding.
Queue Node		Indicates idle time between jobs and precedes COMBI.
Function Node		It is an element for special functions. a) Record number of passes. b) Skipping to a specific number of jobs. c) Creating a dummy for sampling of probabilities.
Accumulator		Type of FUNCTION, Added the number of passes one more time and returned to the first time. Completion of the process.

단위 시간당 생산성 분석, 반복 시뮬레이션을 통한 민감도 분석과 추가 자원투입 여부를 고려하여 현장 적용성을 평가한다.

본 연구에서 적용할 웹사이클론 기법의 모델을 위한 주요 구성요소는 다음의 Table 4와 같다.

### 3.2 현장설치 학습효과에 따른 생산성 분석

본 연구의 적층식 모듈러 A사례 현장설치 단계의 모니터링 조사 및 분석을 통해 소요시간 편차 (variance)가 존재하는 공종은 최소·평균·최대 값의 삼각분포로 모델의 입력변수로 적용하였다. 또한 현장설치 공정의 웹사이클론 시뮬레이션을 위해 작업시간을 포함하고 있으며, 구체적으로는 액티비티 타입, 노드 넘버, 공종명, 최소 소요시간, 평균 소요시간, 최대 소요시간을 포함한 모델의 입력값은 Table 5와 같고, 웹사이클론 모델은 다음의 Fig. 2와 같다.

Table 5. Activity type, activity name, and time required for the site installation process.

Activity type	Activity name	The time required(Min)		
		Min	Ave	Max
COMBI	(01) The on-site entry of trailer and unit module	1.5	3.4	5.0
NORMAL	(02) Unpacking	2.1	3.0	4.0
COMBI	(03) Balance beam fastening to the unit module	1.5	2.3	3.5
NORMAL	(04) Lifting	7.2	8.9	10.0
COMBI	(05) Temporary fixation	4.5	16.6	33.0
NORMAL	(06) Balance beam disassembly	1.2	2.2	3.0
NORMAL	(07) Crane preparation	2.5	3.4	4.5
COMBI	(08) Bolting of unit modules	9.0	11.0	13.0
COMBI	(09) Connection plate welding	56.0	52.0	60.0

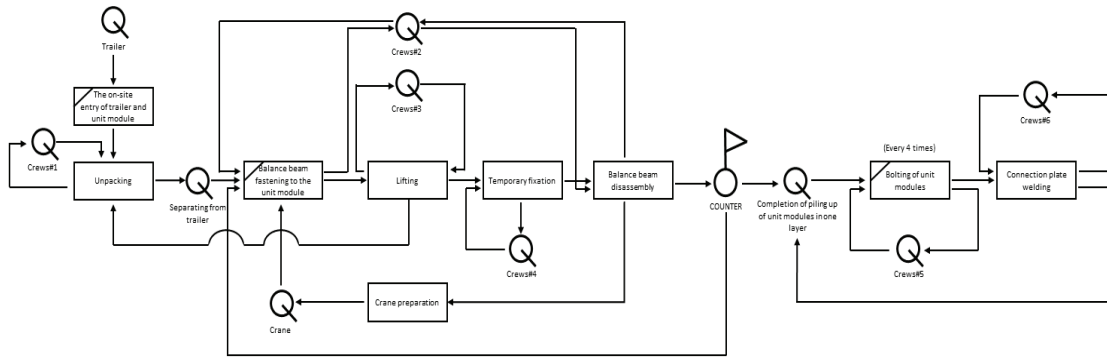


Fig. 2 Site installation of modular

상기 Table 5의 입력값을 통해 본 연구에서 구축한 웹사이클론 모델의 1번의 cycle은 1층(4개의 모듈 유닛)을 조립하는 과정을 의미하며, 본 연구에서 적용한 사례는 5층 건축물이 대상이기 때문에 총 5개의 Cycle로 시뮬레이션을 수행하였다. 1층 모듈 유닛을 조립하는데 소요된 시간은 595.2min(1.2day)이며, 이에 대한 생산성은 약 0.001680 cycle/min으로 분석되었다. 또한 5층 유닛을 조립하는데 소요된 시간은 2,067.1min(3.9day)이며, 이에 대한 생산성은 약 0.002419cycle/min으로 분석되었으며, 이에 대한 결과는 다음의 Table 6과 같다.

Table 6. Time and productivity of site installation process by cycle

Cycle No.	The time required			Productivity (cycle/min)
	Min	Hour	Day	
1	595.2	9.9	1.2	0.001680
2	1000.8	16.7	1.9	0.001998
3	1328.9	22.1	2.5	0.002258
4	1719.4	28.7	3.2	0.002326
5	2067.1	34.5	3.9	0.002419

※ Day\*: The site has nine hours of work per day.

적층식 모듈러 건축의 현장설치의 각 단위 공종에 대해 투입 노무자를 인적자원으로 활용하여 웹사이클론 모델을 구축하는 경우, 여러 공종 간

자원배정이 지속적으로 변동되거나 작업공간이 변동될 수 있고, 이로 인해 공종의 소요시간이 영향을 받을 수 있으며, 공정 전체의 생산성이 달라질 수 있다.

따라서 웹사이클론 모델을 통한 시뮬레이션 분석결과 (시간당 생산량, 공정 완료시간, 투입자원 사용효율 등)의 신뢰성을 확보하기 위해 각 공종에서 현장의 작업공간이 변동되는 조건을 현실적으로 모델링에 반영해야 한다. 민감도 분석은 웹사이클론 모델의 분석과정에서 발생할 수 있는 불확실성을 각 공종에 적용함으로써, 그 결과에 따라 발생할 수 있는 모든 종류의 결과를 검토하는 과정이라 할 수 있다. 소규모 공장제작에 의해 완성되는 모듈러 제작 특성상, 재료 및 장비는 거의 고정된 변수라는 점을 고려할 때, 불확실성으로서 조정할 수 있는 요인은 주로 인력이라 판단된다. 본 연구에서 구축된 웹사이클론 모델을 대상으로 인적자원 변수의 변화(증·감)를 통해 결과를 비교 분석하는 민감도 분석(Sensitivity analysis)을 실시하였다.

상기 과정을 통해 현장설치 공정에 대한 인적자원 투입 대안별 단위시간당 생산성 변화추이를 조정 및 분석하여 최적의 인력투입 대안을 제시하고자 하였다.

본 연구의 모듈러 현장설치 공정의 웹사이클론

모델은 공정을 양측과 적층 두 가지 파트로 나누어, 각 파트에 투입되는 자원을 대상으로 민감도 분석 수행하였다. 양측파트에는 임시고정의 세부 공종과 적층파트에는 커넥션플레이트 용접의 세부 공종을 선정하였으며, 이에 대한 분석결과는 다음의 Table 7과 같다.

Table 7. Work types subject to sensitivity analysis (Assembly process)

No.	Part	Person	Works in charge	Idle time (min)	Idle ratio (%)	Average waiting time (min)
1	Lifting	1	(05) Temporary fixation	1820.1	97.44	91.5
2	Lamination	1	(09) Connection plate welding	1608.0	86.08	268.0

양측 및 적층 공정에 대해 민감도 분석을 수행한 결과 양측에서는 임시고정 3명, 적층에서는 커넥션 플레이트 용접 2명을 투입하는 대안이 생산성 0.003133(cycle/min)으로 가장 좋은 것으로 분석되었고, 이는 다음의 Table 8과 같다.

Table 8. Sensitivity analysis results(Site installation)

NO.	Person		The time required			Productivity (cycle/min)
	Temporary fixation	Connection plate welding	Min	Ave	Max	
1	1	1	2067.1	34.5	3.9	0.002419
2	1	2	1937.1	32.3	3.6	0.002581
3	1	3	1893.8	31.6	3.6	0.002640
4	1	4	1872.1	31.2	3.5	0.002671
5	2	1	1811.4	30.2	3.4	0.002760
6	2	2	1681.4	28.0	3.2	0.002974
7	2	3	1638.1	27.3	3.1	0.003052
8	2	4	1616.4	26.9	3.0	0.003093
9	3	1	1726.2	28.8	3.2	0.002897
10	3	2	1596.2	26.6	3.0	0.003133
11	3	3	1552.8	25.9	2.9	0.003220
12	3	4	1531.2	25.5	2.9	0.003265
13	4	1	1683.6	28.1	3.2	0.002970
14	4	2	1553.6	25.9	2.9	0.003218
15	4	3	1510.2	25.2	2.8	0.003311
16	4	4	1488.6	24.8	2.8	0.003359

상기의 웹사이클론 분석을 통해 적층식 모듈러 공동주택의 현장설치 공정의 민감도 분석결과 원안 작업일수는 3.9일로 분석되었으나, 민감도 분석 후 3.0일로 분석되어 원안 대비 24.21% 약 1일의 생산성이 개선되는 것으로 분석이 되었으며, 이는 다음의 Table 9와 같다.

Table 9. Productivity improvement through sensitivity analysis

Division		As-is	To-be	Change in %
Productivity	cycle/min	0.002419	0.003133	24.21%
	Day	3.9	3.0	

#### 4. 결론

본 연구는 적층식 모듈러 공동주택의 활용 및 생산성 분석에 유용한 정보를 제시하기 위하여 수행되었다. 이를 위해 선행연구를 통해 현장설치에 대한 공정을 조사 및 분석하였으며, 적층식 공동주택의 현장설치 사례를 통해 모니터링 조사를 실시하였다. 또한 웹사이클론 기법을 활용한 생산성 분석 결과를 제시하였다. 상기와 같은 과정을 통하여 수행한 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 문헌 및 선행연구를 통해 적층식 모듈러 공동주택의 현장설치 공정에 대해 총 9개 세부공정을 도출하였으며, 이를 통해 적층식 공동주택의 현장설치 사례에 대한 최소, 평균, 최대 작업시간과 투입된 인원에 대해 모니터링 조사를 통해 도출하였다.

둘째, 상기의 적층식 공동주택의 현장설치에 대한 공정, 시간, 인원을 바탕으로 웹사이클론 분석 기법을 적용하여 생산성을 분석하였고, 이를 통해 민감도 분석결과 원안 대비 약 1일의 생산성이



개선되는 것으로 분석되었다.

본 연구는 적층식 모듈러 공동주택의 생산성 분석을 위해 수행되었다. 그러나 현장설치 공정에 대한 내용은 건설회사 마다 공정이 동일하지 않아 일반화에 대한 한계점이 있다. 또한 본연구에서 제시한 웹사이트클론 모델의 실제 현장에서 적용을 통한 검증이 필요한 한계를 갖고 있다.

## 참고문헌

- [1] I. Seung et al., "Overseas Case Study of 3D Printing Technology for Construction and Commercialization Plan in Korea," *Journal of the Korean Society of Industry Convergence*, vol. 21, no. 6, pp. 273-284, (2018).
- [2] K. Lee et al., "Proposal for Optimizing Unit Modular System Process to Improve Efficiency in Off-site Manufacture, Transportation and On-site Installation," *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 12, no. 6, pp. 14-22, (2011).
- [3] D. Kang et al., "A Study on the Productivity Analysis of Superstructure Construction for Multi-Housing Projects Using Construction Simulation," *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, vol. 26, no. 4, pp. 123-132, (2010).
- [4] H. Kim et al., "An Analysis of Cost Reduction Potentials for Modular Housing from the Long-term Perspective," *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 19, no. 6, pp. 124-135, (2018).
- [5] J. Lee et al., "An Economic Feasibility Analysis on the Movable Modular Lodging Buildings," *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 16, no. 5, pp. 12-21, (2015).
- [6] D. Hawng et al., "Lifting Work Process Optimization Method in High-rise Building Construction Through Improvement of CYCLONE Modeling Method," *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 18, no. 2, pp. 58-71, (2017).
- [7] D. T. Thanh, "Modeling Microtunnelling Construction Operations with WebCYCLONE," *Journal of Geological Resource and Engineering*, vol. 4, no. 5, pp. 188-196, (2017).
- [8] I. Yoon et al., "A System Development for Management of On-the-spot Using the Event Management Theory," *J. Korea Society of Industrial Application*, vol. 2, no. 1, pp. 113-119, (1999).
- [9] J. Bang et al., "An Economic Analysis of Steel Framed Modular Housing: Compared with Case of Urban Type Living Housing of Wall-slab," *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 5, no. 4, pp. 305-315, (2014).
- [10] M. Park et al., "Probabilistic Maintenance Cost Analysis for Aged Multi-Family Housing," *Molecular Diversity Preservation International-Sustainability*, vol. 11, no. 7, pp. 1-13, (2019).