

적층식 모듈러 공동주택 공장제작 단계의 생산성 분석

Productivity Analysis of the Prefabrication Stage for Layered Modular Housing Units

김석¹, 박수열², 박문선^{3*}

Seok Kim¹, Suyeul Park², Moonson Park^{3*}

〈Abstract〉

The aim of this study is to evaluate the productivity of multilayered modular housing units during the prefabrication phase. Additionally, it shows the results of productivity analysis conducted using the Web Cyclone technique. Initially, an review of literature and prior studies helped outline the comprehensive manufacturing process of laminated modular apartments, examining the range of minimum, average, and maximum work durations along with workforce size. Subsequently, the productivity of the multilayered apartments' prefabrication was assessed using the Web Cyclone technique, focusing on the workflow, duration, and personnel involved. This analysis also included a comparison of productivity against the initial plan based on the outcomes of a sensitivity analysis.

Keywords : Modular Construction, Productivity Analysis, Sensitivity Analysis, Web-Cyclone

1 정회원, 국립한국교통대학교, 부교수

2 정회원, 국립한국교통대학교, 공학박사

3* 정회원, 교신저자, (주)공간종합건축사사무소, 이사
E-mail: cemmoon@empas.com

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

2 Department of Railroad Infrastructure Engineering, Korea National University of Transportation

3* Space Architectural Design Co., Ltd., Construction Management

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

현재 한국 사회는 심각한 노령인구 증가 및 출산을 저하로 인해 노동력 인구가 급격히 감소하고 있으며, 특히 건설산업의 경우 건설근로자 부족으로 현장 내 외국인 근로자를 채용하여 어려움을 회피하고 있으나, 숙련 기술자 부족으로 공사기간 및 저품질에 따른 생산성 저하 문제에 당면하고 있다.

탈현장 건설 Off-Site Construction (이하 : OSC) 방식은 공장제작-운송-현장조립으로 공장에서 주요 건설자재, 시스템 등을 생산하고 현장에서 운송 이후 조립, 생산하는 방식으로 OSC 방식은 일부 건설공정을 시스템화하여 공장에서 생산하고 있으며, 일부 제조산업으로 분류가 가능하여 노령인구 및 저출산에 따른 건설인력부족 문제를 해결할 수 있는 방식이다.

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 건축은 활발히 적용되고 있다.

미국의 글로벌 시장조사기관인 Fortune Business Insights 분석보고서에 따르면 북미 모듈식 건설산업은 주거용, 상업용, 산업용 건축을 비롯하여 다양한 분야에서 활용되고 있고, 2023년 214억 9천만 달러에서 2030년까지 348억 2천만 달러로 연평균 성장률(CAGR) 7.1%로 성장할 것으로 예상하였다.[14] 한국의 경우 건설분야 대기업들이 모듈러 건축사업을 통해 기업과 소비자 간 거래(Business-to-Customer) 사업을 활발히 진행하고

있고, 교육부의 '그린 스마트스쿨' 사업이 2021년부터 2025년까지 총 2,835개 학교를 증·개축, 리모델링 하여 임시교실을 모듈러 사업으로 발주하는 등 꾸준히 시장이 확대되고 있다.[12] 또한 국토교통부에 따르면 국내 모듈러 건축시장 규모는 2022년 1,757억원에서 2030년 약 2조에 달할 것으로 전망하고 있어 모듈러 건축 시장은 향후 수요가 상당할 것으로 예상된다.[13]

모듈러 건축 초기 적용 시기인 2003년 이후 현재까지 모듈러 건축 분야는 상당한 발전을 달성하였으며, 모듈러 건축과 관련하여 제기되고 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[1][4][5][6][7][11], 등을 초점으로 수행되었다. 일부 연구들이 모듈러 건축의 경제성 비교 분석[4][8][9][11], 공사비 절감 분석[4][10][11] 진행하였으나 공장제작 단계의 구체적인 데이터를 활용한 분석에는 한계점을 지니고 있다. 따라서 적층형 모듈러 공동주택의 공장제작 단계의 투입된 실제 데이터를 바탕으로 생산성을 분석하는 실증적인 관점에서의 연구가 필요하다.

이에 본 연구는 적층식 모듈러 공동주택의 공장제작 단계 공정분석, 작업시간, 투입인원 등을 조사하여 공장제작에 대한 모니터링을 실시하였다. 또한 생산성 분석을 위하여 웹사이클론 분석 기법을 활용하였으며, 이를 통해 적층식 모듈러 건축의 활용성과 생산성에 관한 유용한 정보를 제공하고자 한다.

상기와 같은 본 연구의 목적을 구체적으로 설명하면 다음과 같다.

- 1) 적층식 모듈러 공동주택의 공장제작 단계에 대한 공정, 시간, 인원을 A사례를 바탕으로 조사 및 도출한다.

- 2) 상기에서 도출된 공장제작 단계의 주요 요인을 바탕으로 웹싸이클론 기법을 활용한 생산성 분석 결과를 제시한다.

1.2 선행연구 고찰

2014년에 다가구 주택을 대상으로 모듈건설을 위한 비용이 분석되었으나, 공기 축소 및 다양한 요인이 분석에 반영되지 못하였다 [9]. 이지희 외 (2015)는 이동식 모듈러 숙박 건물에 대한 경제적 타당성을 분석하여 모듈러 건설의 생애주기 경제성을 분석하였으며, 김후용 외 (2018)는 모듈러 다가구 주택 프로젝트의 세부 사항을 바탕으로 공장 제작 및 현장설치의 단계별 비용을 분석하였다. 이후 박문선 외 (2019)는 적층 모듈러 건설의 현장설치 단계의 공정분석 및 시간 투입을 분석하여 생산성을 제시하였다. 하지만 앞선 연구들에서는 모듈러의 공장생산에 대한 공정분석 및 시간투입 분석이 이루어지지 않았다.

웹싸이클론 분석은 생산성 및 최적방법 조합 등의 분석을 위해 사용되어 오고 있다. 강동완 외 (2010)는 웹싸이클론 분석 방법을 이용하여 다가구 주택의 프레임 구조를 고려한 건설공정을 제안하였으며, 황두원 외 (2017)은 고층 건설용 리프트카의 생산성을 웹싸이클론 방법을 적용하여 분석하였다.

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

2. 모듈러 공동주택의 공장제작 모니터링

2.1 본 연구의 범위

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

상기 Fig. 1은 적층식 공동주택의 공장제작 A사례의 모듈러 구조체 조립, 외장 하지 제작 및 모듈러 포장 공정에 대한 모니터링 자료이며, A사례에 대해 공장제작 단계에 대한 공정을 모니터링하였다.



Fig. 1 Prefabrication of modular

2.2 공장제작 공정 분석

일반적인 모듈러 유닛의 공장제작 공정은 구조체 조립, 바닥판 설치 및 접합, 본체 및 천정틀, 설비공사, 마감공사로 분류할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 상기 제시 공정에 따른 세부공정 (Level 3) 분류를 다음의 Table 1과 같이 도출하였다.

상기의 Table 1에서 보는 바와 같이 모듈러의

Table 1. The process classification of prefabrication in this study

Level 1	Level 2	Level 3
Prefabrication	Structural Assembly	(01) Frame Fabrication
	Floor Panel Installation and Jointing	(02) Deck Plate Installation
		(03) Rebar Reinforcement
		(04) Pouring(Curing)
		(05) Aerated Concrete Pouring(Curing)
		(06) Voided Slab Pouring(Curing)
		(07) Formwork/Shuttering
	Wall and Ceiling Framing	(08) Window Sill
		(09) Window Frame Installation
		(10) Light Gauge Stud
		(11) Interior Wall Gypsum Board
		(12) Interfloor Sound Insulation Material
		(13) Interior Wall Insulation Material
		(14) Exterior Wall Gypsum Board
		(15) Fire-resistant Silicone
		(16) Lightweight Ceiling Frame
		(17) Ceiling Gypsum Board 1 Layer
		(18) Airtightness
		(19) Ceiling Gypsum Board 2 Layers
		(20) Ceiling Insulation Material
	Mechanical, Electrical, and Plumbing (MEP) Works	(21) MEP Sleeves and Piping
		(22) Underfloor Heating Piping
		(23) Electrical Punching(Wall)
		(24) Electrical and Telecommunications Wall/Ceiling Piping
		(25) Electrical Punching((Ceiling)
		(26) Unit Bathroom(UBR)
		(27) Lighting/Fixture and Outlet Installation
	Finishing Works	(28) Anti-rust Painting
		(29) Fire-rated Gypsum Board
		(30) Breathable Waterproof Membrane
		(31) Balcony Waterproofing
		(32) Tile Laying(Curing)
		(33) Entry Door
		(34) Molding(Ceiling/Baseboard)
		(35) Vinyl Flooring Installation
		(36) Window Sash Installation
		(37) Wallpaper Application
		(38) Furniture Installation
		(39) SGP Panel
		(40) Exterior Sill

공장제작 공정은 총 40개의 세부적인 작업으로 분류하였고, 상기를 바탕으로 공장제작에 대한 모니터링 조사를 실시하였다.

2.3 공장제작 시간, 인원 조사

상기 2.2 공장제작 단계 공정분석에서 제시한 공정분류를 바탕으로 공장제작 단계의 세부공정에 대한 최소, 평균, 최대 작업시간과 공정에 투입된

인원을 조사하였으며, 이에 대한 내용은 다음의 Table 2와 같다.

Table 2에서 보는 바와 같이 현장설치 공정에 대해 Min 값의 최소시간을 기록한 공정은 (8) 창호 하지 공정으로 투입된 인원은 2 명이고, 소요시간은 최소 19.0 분, 평균 20.0 분, 최대 21.0 분이 소요된 것으로 조사되었다. 또한 Min 값의 최대시간을 기록한 공정은 (16) 경량천정틀 공정으로 투입된 인원은 3명이고, 소요시간은 최소 403.2 분, 평균

Table 2. Prefabrication phase monitoring of work hours and input workers by process

Level 2	Level 3	Input person	The time required(Min)/1Modular		
			Min	Ave	Max
Structural Assembly	(01) Frame Fabrication	7	880.1	1,000.0	1,270.0
Floor Panel Installation and Jointing	(02) Deck Plate Installation	2	58.5	60	62.1
	(03) Rebar Reinforcement	3	114.0	120.0	144.0
	(04) Pouring(Curing)	3	-	1,700.0	-
	(05) Aerated Concrete Pouring(Curing)	3	-	1,110.0	-
	(06) Voided Slab Pouring(Curing)	3	-	1,110.0	-
	(07) Formwork/Shuttering	1	-	540.0	-
	Wall and Ceiling Framing	(08) Window Sill	2	19.0	20.0
(09) Window Frame Installation		2	28.5	30.0	31.5
(10) Light Gauge Stud		3	158.1	170.0	204.0
(11) Interior Wall Gypsum Board		3	199.5	210.0	231.0
(12) Interfloor Sound Insulation Material		3	58.2	60.0	72.0
(13) Interior Wall Insulation Material		2	114.0	120.0	168.0
(14) Exterior Wall Gypsum Board		3	194.0	200.0	216.0
(15) Fire-resistant Silicone		1	29.1	30.0	30.6
(16) Lightweight Ceiling Frame		3	403.2	420.0	462.0
Wall and Ceiling Framing	(17) Ceiling Gypsum Board 1 Layer	2	85.5	90.0	108.0
	(18) Airtightness	2	76.0	80.0	88.0
	(19) Ceiling Gypsum Board 2 Layers	2	85.5	90.0	103.5
Mechanical, Electrical, and Plumbing (MEP) Works	(20) Ceiling Insulation Material	2	57.6	60.0	72.0
	(21) MEP Sleeves and Piping	2	24.3	25.0	26.8
	(22) Underfloor Heating Piping	3	24.3	25.0	27.5
	(23) Electrical Punching((Wall)	1	19.8	20.0	20.4
	(24) Electrical and Telecommunications Wall/Ceiling Piping	2	45.0	50.0	52.5
	(25) Electrical Punching((Ceiling)	1	19.8	20.0	20.4
	(26) Unit Bathroom(UBR)	3	66.5	70.0	77.0
	(27) Lighting/Fixture and Outlet Installation	2	39.2	40.0	41.2

Table 2. (Continued)

Level 2	Level 3	Input person	The time required(Min)/1Modular		
			Min	Ave	Max
Finishing Works	(28) Anti-rust Painting	2	57.0	60.0	67.2
	(29) Fire-rated Gypsum Board	3	232.5	250.0	275.0
	(30) Breathable Waterproof Membrane	2	180.0	220.0	228.0
	(31) Balcony Waterproofing	2	180.0	200.0	234.0
	(32) Tile Laying(Curing)	3	368.0	400.0	480.0
	(33) Entry Door	2	19.8	20.0	20.6
	(34) Molding(Ceiling/Baseboard)	2	48.0	50.0	53.0
	(35) Vinyl Flooring Installation	2	88.2	90.0	99.0
	(36) Window Sash Installation	2	19.6	20.0	20.6
	(37) Wallpaper Application	3	196.0	200.0	210.0
	(38) Furniture Installation	3	161.5	170.0	195.5
	(39) SGP Panel	3	172.8	180.0	198.0
(40) Exterior Sill	2	199.5	210.0	252.0	

※ Day:Curing are done at once, so only the average work time is indicated.

420.0 분, 최대 462.0 분이 소요된 것으로 조사되었다. 상기와 같이 적층식 모듈러 공동주택의 공장제작 시 소요시간은 처음 작업시간이 최대시간으로 필요하게 되지만, 작업 반복진행 및 작업 학습에 따라 최소시간을 기록하는 것으로 조사되었다.

3. 모듈러 공동주택의 생산성 분석






3.1 공장제작 시간, 인원 조사

웹사이클론 분석 기법은 반복적인 건설작업 프로세스를 모델링하여 분석할 수 있으며, 민감도 분석을 통해 생산성에 영향을 미치는 다양한 요인을 파악할 수 있다. 본 연구에서는 웹사이클론 분

석 기법을 활용하여 적층식 모듈러 공동주택의 공장제작 단계의 공정을 모델링하고, 조사한 시간과 인원을 입력값으로 하여 생산성을 분석하였다.

웹사이클론 방법론은 1974년에 개발된 반복 작업 프로세스 시뮬레이터인 ‘Cyclone’을 웹 인터페이스에 맞추어 개량한 형태이다.[11] 웹사이클론 기법은 불연속사건 시뮬레이션을 하기 위한 알고리즘이며, Table 3과 같이 5가지의 주요 구성요소로 이루어져있다. ‘콤비’는 공정을 중지하고 앞선 대기열 (queue) 작업이 완료될 때까지 기다림을 의미한다. ‘일반활동’은 도착하는 첫번째 우선 순위의 작업이 사용자가 지정한 시간동안 대기한 후 진행함을 의미하며, 또한 ‘대기 노드’는 작업 간의 유휴 시간을 나타내고 ‘콤비’ 앞에 위치한다. ‘기능 노드’는 통과 횟수 기록, 특정 작업 건너뛰기,

Table 3. Element of web-cyclone analysis method

Component	Combination (Combi) Activity	Normal Activity	Queue Node	Function Node	Accumulator
symbol					

확률적 더미 생성 등의 특수 기능을 수행하며, ‘누산기’는 통과 횟수를 추가하고 처음으로 돌아가는 등 공정의 완료를 의미한다.

3.2 공장제작 학습효과에 따른 생산성 분석

본 연구의 적층식 모듈러 A사레 공장제작 단계의 모니터링 조사 및 분석을 통해 소요시간 편차

(variance)가 존재하는 공종은 최소·평균·최대 값의 삼각분포로 모델의 입력변수로 적용하였다. 또한 공장제작 공정의 웹사이클론 시뮬레이션을 위해 작업시간을 포함하고 있으며, 구체적으로는 액티비티 타입, 노드 넘버, 공종명, 최소 소요시간, 평균 소요시간, 최대 소요시간을 포함한 모델의 입력값은 Table 4와 같고, 웹사이클론 모델은 다음의 Fig. 2와 같다.

Table 4의 입력값을 통해 본 연구에서 구축한

Table 4. Activity type, activity name, and time required for the prefabrication process

Activity type	Activity name	The time required(Min)		
		Min	Ave	Max
COMBI	(01) Frame Fabrication	880.0	1000.0	1270.0
NORMAL	(02) Deck Plate Installation	114.0	120.0	144.0
COMBI	(03) Rebar Reinforcement	57.0	60.0	67.2
NORMAL	(04) Pouring(Curing)	24.3	25.0	26.8
NORMAL	(05) Aerated Concrete Pouring(Curing)	52.1	60.0	58.5
COMBI	(06) Voided Slab Pouring(Curing)	-	1700.0	-
NORMAL	(07) Formwork/Shuttering	158.1	170.0	204.0
COMBI	(08) Window Sill	19.0	20.0	21.0
NORMAL	(09) Window Frame Installation	28.5	30.0	31.5
COMBI	(10) Light Gauge Stud	199.5	210.0	231.0
COMBI	(11) Interior Wall Gypsum Board	180.0	200.0	234.0
NORMAL	(12) Interfloor Sound Insulation Material	368.0	400.0	480.0
COMBI	(13) Interior Wall Insulation Material	66.5	70.0	77.0
COMBI	(14) Exterior Wall Gypsum Board	19.8	20.0	20.6
COMBI	(15) Fire-resistant Silicone	45.0	50.0	52.5
COMBI	(16) Lightweight Ceiling Frame	114.0	120.0	168.0
COMBI	(17) Ceiling Gypsum Board 1Layer	194.0	200.0	216.0
NORMAL	(18) Airtightness	-	540.0	-
NORMAL	(19) Ceiling Gypsum Board 2 Layers	29.1	30.0	30.6
NORMAL	(20) Ceiling Insulation Material	19.8	20.0	20.4
NORMAL	(21) MEP Sleeves and Piping	58.2	60.0	72.0
COMBI	(22) Underfloor Heating Piping	-	1110.0	-
NORMAL	(23) Electrical Punching(Wall)	24.3	25.0	27.5
NORMAL	(24) Electrical and Telecommunications Wall/Ceiling Piping	-	1110.0	-
COMBI	(25) Electrical Punching(Ceiling)	158.1	170.0	204.0
NORMAL	(26) Unit Bathroom(UBR)	85.5	90.0	108.0
NORMAL	(27) Lighting/Fixture and Outlet Installation	76.0	80.0	88.0
NORMAL	(28) Anti-rust Painting	85.5	90.0	103.5
NORMAL	(29) Fire-rated Gypsum Board	57.6	60.0	72.0
NORMAL	(30) Breathable Waterproof Membrane	232.5	250.0	275.0

Table 4. (Continued)

Activity type	Activity name	The time required(Min)		
		Min	Ave	Max
NORMAL	(31) Balcony Waterproofing	180.0	220.0	228.0
COMBI	(32) Tile Laying(Curing)	19.8	20.0	20.4
COMBI	(33) Entry Door	48.0	50.0	53.0
COMBI	(34) Molding(Ceiling/Baseboard)	19.6	20.0	20.6
COMBI	(35) Vinyl Flooring Installation	196.0	200.0	210.0
NORMAL	(36) Window Sash Installation	39.2	40.0	41.2
NORMAL	(37) Wallpaper Application	88.2	90.0	99.0
COMBI	(38) Furniture Installation	161.5	170.0	195.5
COMBI	(39) SGP Panel	172.8	180.0	198.0
COMBI	(40) Exterior Sill	199.5	210.0	252.0

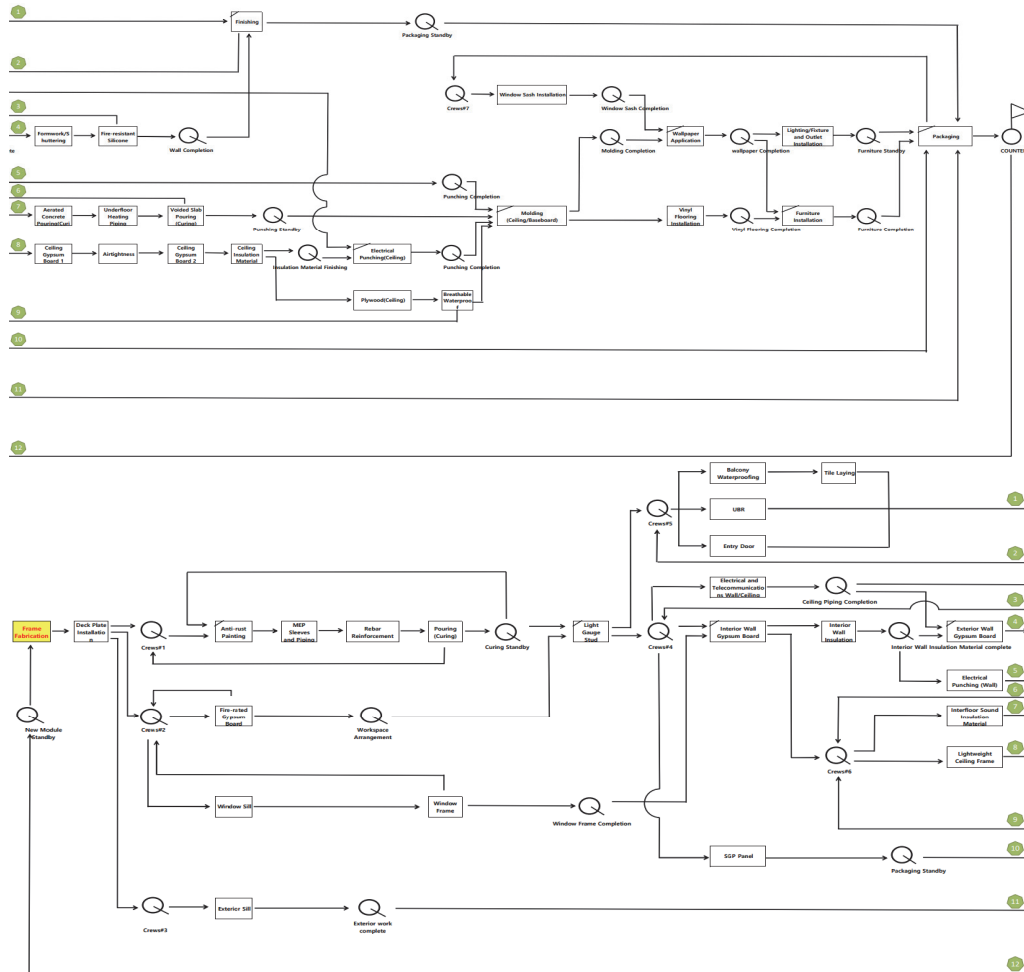


Fig. 2 Webyclone model for Prefabrication of modular

웹사이클론 모델의 1번의 cycle은 1개 모듈 유닛 제작 프로세스가 진행되는 과정을 의미하며, 본 연구에서 적용한 사례는 20개의 모듈 유닛이 대상이기 때문에 총 20개의 Cycle로 시뮬레이션을 수행하였다.

1개 모듈 유닛을 조립하는데 소요된 시간은 528.4 hour(58.7 day)이며, 이에 대한 생산성은 약 0.0018925 cycle/hour로 분석되었다. 528.4 hour를 소요하여 1개 모듈 유닛 제작 후 20개 모듈까지 평균 8.24 hour가 소요되며, 이는 ‘바닥 판 설치 및 접합’ 과정에서 ‘타설/양생’, ‘기포콘크리트 타설/양생’, ‘방통 타설/양생’의 공종으로 인해 각각의 후행공종이 지연되고 있기 때문인 것으로 분석되었다. 또한 20개 유닛을 생산하는데 소요된 시간은 684.9 hour(76.1 day)이며, 이에 대한 생산성은 약 0.0292013 cycle/hour로 분석되었고 결과는 Table 5와 같다.

웹사이클론 모델의 시뮬레이션 분석결과와 신뢰성을 높이기 위해서는 공장제작에 투입되는 인적자원 변수를 증감하는 민감도 분석 (Sensitivity Analysis)를 실시하여 결과를 분석하였다. 민감도 분석을 통해 공장제작 프로세스에 투입되는 인적 자원에 따른 생산성의 변화를 살펴보고, 최적의 생산성을 보여주는 인력투입 대안을 도출하였다.

본 연구의 모듈러 공장제작 공정의 웹사이클론 모델의 해당 공정을 벽체 석고보드(바깥), 전기타공(천정), 유닛화장실(UBR), 몰딩 네 가지 파트로 나누어, 각 파트에 투입되는 자원을 대상으로 민감도 분석 수행하였으며, 이에 대한 분석결과는 Table 6과 같다.

해당 각 공정에 대해 민감도 분석을 수행한 결과 벽체 석고보드(바깥)에서는 단일 공정으로 세부 분류하여 시뮬레이션하면 통신배관 2명, 벽체 단열제 3명, 석고보드 2명에 대한 투입 대안의 생산성이 0.0293 (cycle/hour)으로 가장 좋은 것으로 분

석되었다. 전기타공(천정)에서는 단일공정으로 세부 분류하여 시뮬레이션하면 천정을 2명, 석고보드 1명에 대한 투입 대안의 생산성이 0.0293 (cycle/hour)으로 가장 좋은 것으로 분석되었다. 또한, 유닛화장실 (UBR)에서는 단일공정으로 세부 분류하여 시뮬레이션하면 방수/타일 2명, 화장실 설치 3명, 화장실문 2명에 대한 투입 대안의 생산성이 0.0314 (cycle/hour)으로 가장 좋은 것으로 분석되었다. 몰딩에서는 단일공정으로 세부 분류하여 시뮬레이션하면 타공(천정) 1명, 기타 몰딩 2명, 타공(벽) 2명, 하지 2명에 대한 투입 대안의 생산성이 0.0293 (cycle/hour)으로 가장 좋은 것으로 분석

Table 5. Time and productivity of prefabrication process by cycle

Cycle No.	The time required		Productivity (cycle/hour)
	Day	Hour	
1	58.7	528.4	0.0018925
2	59.8	537.8	0.0037189
3	60.3	542.3	0.0055320
4	61.1	550.3	0.0072688
5	61.9	557.4	0.0089702
6	62.9	565.7	0.0106063
7	63.8	574.2	0.0121909
8	64.7	582.5	0.0137339
9	65.6	590.8	0.0152336
10	66.6	599.5	0.0166806
11	67.5	607.8	0.0180981
12	68.5	616.5	0.0194647
13	69.5	625.1	0.0207967
14	70.4	633.9	0.0220855
15	71.4	642.8	0.0233354
16	72.3	650.9	0.0245813
17	73.3	659.8	0.0257654
18	74.3	668.4	0.0269300
19	75.2	676.7	0.0280774
20	76.1	684.9	0.0292013

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

Table 6. Work types subject to sensitivity analysis (Assembly process)

No.	Part	Person	Works in charge	Idle time (hour)	Idle ratio (%)	Average waiting time (hour)
1	(14) Exterior Wall Gypsum Board	1	Communication Piping	241.1	37.22	6.7
		1	Wall Insulation	598.5	92.40	16.6
		1	Gypsum Board	361.3	55.79	10.0
2	(25) Electrical Knockouts(Ceiling)	1	Ceiling Frame	475.3	73.38	22.6
		1	Gypsum Board	361.3	55.79	10.0
		1	Tile /Waterproofing	163.0	25.17	81.7
3	(26) Unit Bathroom(UBR)	2	Other Bathroom	31.3	4.84	15.7
		1	Door	38.0	5.87	19.0
		1	Punching(Celing)	95.2	14.70	9.2
4	(34) Molding(Ceiling/Baseboard)	2	Other Molding	489.4	75.56	43.8
		1	Punching(Wall)	430.1	66.4	201.3
		1	Sill	258.2	39.87	4.9

Table 7. Sensitivity analysis results(Prefabrication)

(14) Exterior Wall Gypsum Board				
NO.	Person			Productivity (cycle/hour)
	Communication Piping	Wall Insulation	Gypsum Board	
1	1	1	1	0.0292
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
11	2	3	2	0.0293
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
20	3	3	3	0.0293
(25) Electrical Knockouts(Ceiling)				
NO.	Person		Productivity (cycle/hour)	
	Ceiling Frame	Gypsum Board		
1	1	1	0.0292	
⋮	⋮	⋮	⋮	
5	2	1	0.0293	
⋮	⋮	⋮	⋮	
20	4	4	0.0292	
(26) Unit Bathroom(UBR)				
NO.	Person			Productivity (cycle/hour)
	Tile /Waterproofing	Other Bathroom	Door	
1	1	2	1	0.0293
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
7	2	3	2	0.0314
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
20	3	3	3	0.0313

Table 7. (Continued)

(34) Molding(Ceiling/Baseboard)					
NO.	Person				Productivity (cycle/hour)
	Punching (Celimg)	Other Molding	Punching(Wall)	Sill	
1	1	1	2	1	0.0292
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
15	1	2	2	2	0.0293
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
20	2	2	3	2	0.0292

Table 8. Productivity improvement through sensitivity analysis

Division		As-is	To-be	Change in %
Productivity	cycle/hour	0.0292	0.03138	
	Day	76.1	70.7	

되었다. 이는 Table 7과 같다.

상기의 웹사이클론 분석을 통해 적층식 모듈러 공동주택의 공장제작 공정의 민감도 분석결과 원안 작업일수는 76.1일로 분석되었으나, 민감도 분석 후 70.7일로 분석되어 원안 대비 7.47 % 약 5.4일의 생산성이 개선되는 것으로 분석이 되었으며, 이는 다음의 Table 8과 같다.

상기의 Table 4에서부터 Table 8까지의 웹사이클론 분석을 통해 적층식 모듈러 공동주택의 공장제작 단계의 생산성 분석을 수행하였으나, 향후 모듈러 건설 분야의 보완된 공정 및 데이터 추가 분석이 보완된다면 향후 생산성은 획기적으로 향상될 수 있을 것으로 사료된다.

위한 방안을 제시하였다. 이를 위해 공장제작 공정을 정의하고, 적층형 모듈러 공동주택 제작공장을 모니터링하여 제작에 투입되는 인력과 시간을 조사하였다. 조사한 자료들을 바탕으로 웹사이클론 방법론을 활용하여 공장제작 생산성을 분석하고, 민감도 분석을 통해 최적 생산성을 도출하였다.

관련 문헌 조사를 통해 적층형 모듈러 공동주택의 공정을 총 40개의 세부공정으로 도출하였으며, 각 공정별로 투입되는 인력과 작업시간을 최소, 평균, 최대 작업시간으로 나누어 조사하였다. 웹사이클론 방법을 사용하여 생산성 및 민감도 분석을 실시하였으며, 이를 통해 기존 방안 대비 약 5.4일의 생산성 향상이 가능하다는 결과를 얻을 수 있었다.

본 연구는 적층형 모듈러 공동주택의 공장제작 생산성 분석을 목적으로 수행되었으나, 제한된 사례조사를 통해 공장제작 공정을 일반화하기에는 한계가 있으며, 본 연구에서 제안한 웹사이클론 모델을 통한 생산성 분석결과는 향후 다양한 사례 조사를 통해 보완될 필요가 있다.

4. 결론

본 연구는 적층형 모듈러 공동주택에 대한 공장제작의 생산성을 평가하고 최적 생산성을 달성하기

사 사

이 논문은 2022학년도 한국교통대학교의 해외 파견 연구교수지원금을 받아 수행한 연구입니다.

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. Hwang 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).
- [11] M. Park et al, "Productivity Analysis of the Site Installation Stage of Laminated Modular Multi-Family Housing," Journal of the Korean Society of Industry Convergence, vol.22, no. 5, pp. 519-527, (2019).
- [12] Ministry of Education, "2022 Green Smart Future School Implementation Plan", 2022.
- [13] Korea Iron & Steel Association, "Modular Construction Market Research and Forecast", 2022.
- [14] Fortune Business Insights, "North America Modular Construction Market Size, Share & Industry Analysis", 2022.