

## 모듈러 건축 프로젝트 계획 및 관리를 위한 Discrete-Event Simulation 모델 개발



이정훈 서울주택도시공사(SH) 도시연구원 초빙책임연구원

### I. 서론

건축프로젝트는 공사수행과정에서 예기치 못한 사건들로 인해 프로젝트 초기 단계에서 수립 한 공정계획이 변동되는 공정 계획 불확실성이 높다. 따라서 프로젝트 계획단계에서 작업의 선/후행을 결정하고 난 후, 과거 공사수행 데이터베이스를 바탕으로 각 작업별로 일정 수준의 여유일정을 추가하여 전체 공정계획을 수립하게 된다. 이후 프로젝트 수행 시 위 공정계획 수준을 벗어나는 일정 변동이 발생될 경우 작업의 선/후행 조정 및 추가 작업을 통한 작업관리 계획을 수립하게 된다.

모듈러 건축공법의 경우 건물을 구성하는 모듈러 유닛의 구조체 및 실내/외 마감공사 대부분을 제조업의 공장제작프로세스 통해 수행하고 이를 운송 차량을 통해 설치 현장에 반입 후 최종 설치한다. 이는 기초공사와 구조체 및 마감공사를 동시에 수행할 수 있어 일반 건축공법에 비해 공기단축 효과가 크며, 구조체 및 실내/외 마감공사가 실내에서 수행되기 때문에 품질 확보 및 생산성 향상이 가능한 장점이 있다. 따라서 프로젝트 계획단계에서 일반 건축공법에 비해 공사 수행과정에서 발생 가능한 공정지연 문제 예측이 용이하기 때문에 초기에 수립 한 프로젝트 수행 계획 이행 확률이 높다는 장점이 있다. 그러나 이와 같은 모듈러 건축공법 적용에 따른 공기단축, 품질 및 생산성 향상 효과를 얻기 위해서는 프로젝트 초기 단계에서 공장 제작, 운송, 현장설치 단계별로 공정 지연을 최소화해야 한다. 만일, 모듈러 건축 프로젝트 수행과정에서 현장기초공사 일정이 기존 계획보다 지연될 경우 공장제작 단계에서는 모듈러 유닛 생산속도를 조절해야 하거나 이미 제작 완료 한 모듈러 유닛에 대한 추가적인 야적이 필요하게 된다. 다시 말해 모듈러 건축 프로젝트는 일반 건축공사에 비해 프로젝트 계획 측면에서 공사수행과정에서 발생 가능한 공정지연문제 예측이 용이한 반

면, 이를 벗어난 사건이 발생될 경우 프로젝트 관리가 더 어렵다는 문제가 있다.

따라서 모듈러 건축 프로젝트 매니저는 프로젝트 계획 및 관리 단계에서 프로젝트 수행에 문제가 발생할 경우 공장제작, 운송, 현장설치 단계별 작업특성 및 자원 활용 수준을 고려한 프로젝트 관리 기준선을 설정해야 한다. 그러나 과거 모듈러 건축 프로젝트에 대한 실적 데이터가 충분히 존재하지 않기 때문에 현재 일반 건축공사의 자료를 가공하여 사용하고 있다. 따라서 모듈러 건축 프로젝트 관리 기준선 설정은 모듈러 건축물을 구성하는 모듈러 유닛의 제작, 운송, 설치 작업을 중심으로 이루어지지 않고 일반적인 건축 공종 (철근콘크리트 공사, 철골공사, 창호공사, 유리공사 등)을 중심으로 이루어지고 있다.

이는 모듈러 건축 프로젝트 수행 중 특정 단계에서 공정지연 또는 자원조달 문제가 발생되었을 때 해당 문제가 모듈러 유닛의 전체 생산 과정(제작, 운송, 현장설치)에 얼마나 영향을 미치며, 이를 해결하기 위한 방안이 프로젝트 전체적으로 얼마나 적절한지를 판단하는 데 한계가 있다. 이에 본 고에서는 모듈러 건축 프로젝트 매니저에게 모듈러 건축 단계별(공장제작, 운송, 현장설치)에 따른 작업특성 및 자원 활용 수준 변화에 따른 프로젝트 계획 및 관리 기준을 제공할 수 있는 시뮬레이션 모델을 제안한다.

### II. 예비적 고찰

#### 1. 모듈러 건축 정의

모듈러 건축에 대한 용어는 학술적으로, 산업적으로 많이 혼동되어 사용되고 있다. 본 고에서는 모듈러 빌딩 건축에 해당되는 연구를 수행하였기에 이에 대한 정의를 우선 수행한다. 첫

째, 오프사이트 건축(Off-site Construction)이란, 구조적 형태가 어떤 재료를 갖고 구성되었는지를 분류하는 기준이다. 둘째, 모듈러 건축이란 플랜트, 원전과 같이 완전한 기성품을 최종 건설 위치에서 부분적 혹은 전체적으로 최종 건설 목적물을 만드는 것이다. 셋째, 모듈러 빌딩 건축은 앞서 언급한 두 개념을 사용하여 수직 또는 수평적으로 구조체가 완성된 후 사용자의 사용목적에 따라 나누어지는 건축물을 통칭한다.

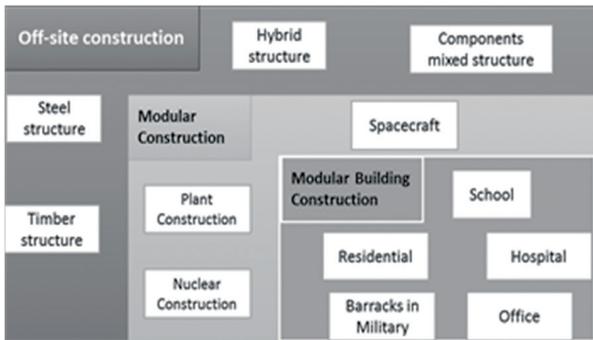


그림 1. Classification of Off-site construction, Modular construction, and Modular building construction

## 2. 모듈러 건축 프로젝트 계획 및 관리

모듈러 건축 프로젝트의 계획 및 관리 중점은 제작, 운송, 현장설치 단계별로 서로 다른 작업일정 기준단위를 하나로 통합하는 것에 있다. 공장제작단계의 경우 계획 및 관리 중점 단계를 1시간 단위, 1일 단위, 1주일 단위와 같이 다양한 기준이 가능하지만 운송의 경우 1일 총 운송차량 수로 기준 설정이 필요하다. 현장작업의 경우 기초공사와 마감공사와 같은 일반 건축 공사는 1일 작업단위로 관리할 수 있으며 모듈러 유닛의 현장조립은 시간단위로 계획 및 관리 기준을 설정해야 한다. 다시 말해, 모듈러 건축 프로세스를 구성하는 세 단계(공장제작, 운송,

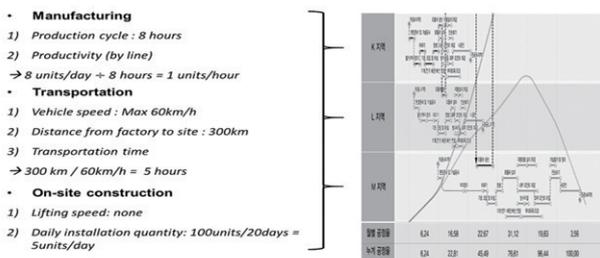


그림 2. Basic Results of Modular Building Construction Duration Calculation

현장설치)는 프로젝트 계획 및 관리 기준이 상이하다. 그러나 모듈러 건축 프로젝트 계획 및 관리를 위한 기준선을 만들기 위해 세 단계를 단일 단위로 통일할 경우 프로젝트 관리자가 세부적인 변경 사항을 확인하기 어렵기 때문에 효과적인 의사결정을 내리는데 많은 시간이 필요하다(Abu Hammad, 2008; Wu et al. 2011; Hasan and Al-Husseini 2010; Moghadam, 2014).

## III. 컴퓨터 시뮬레이션을 활용한 모듈러 프로젝트 계획 및 관리 모델

본 장에서는 이산사건 시뮬레이션 (Discrete-Event Simulation, DES)을 이용하여 모듈러 건축 프로세스의 세 단계(공장제작, 운송, 현장설치)에 대한 작업 특성을 반영한 프로젝트 계획 및 관리 시뮬레이션모델을 제안한다.

### 1. Discrete-Event Simulation

이산사건 시뮬레이션(Discrete-Event Simulation, DES)이란 시간의 변동에 따라 주어진 조건상황(사건)에 적합할 경우 시스템의 변동이 관측될 수 있는 것을 말한다. 본 방법을 적용하기 위해서는 모델링의 목적에 맞도록 엔티티(Entity)의 구조를 결정해야 한다. 일반적으로 DES에서는 세 가지의 목적에 맞게 세부작업 표현의 수준이 결정된다. 첫째, Activity-Oriented의 경우 특정 엔티티가 일련의 작업과정을 거치면서 겪게 되는 작업에 따른 전체적인 행태를 도출하는데 목적을 두고 있다. 둘째, Event-Oriented의 경우 특정 사건이 발생되었을 때 시스템 내 상태변화를 보기 위한 목적을 갖고 있다. 마지막으로 Process-Oriented의 경우 다수의 엔티티가 시스템 내에서 거동되는 행태와 조건에 따른 결과 변화를 도출하는 데 목적을 두고 있다 (Matloff, 2008). 본 연구에서는 공장제작, 운송, 현장제작의 단계에 따라 수행되는 작업의 목적이 최종적으로 모듈러 유닛에 목적을 두고 수행되며 이에 따른 특정 단계의 변화가 전체 작업 수행에 얼마나 영향을 미칠 수 있는지를 확인하는데 초점을 맞추고 있기 때문에 Activity-Oriented 방법을 적용한다.

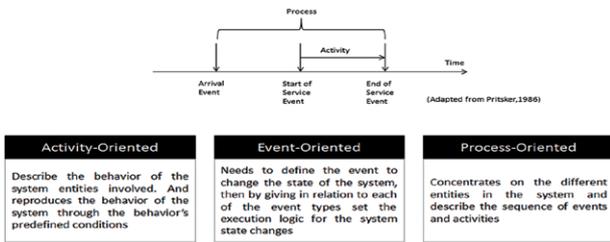


그림 3. Classification of Discrete-Event Simulation

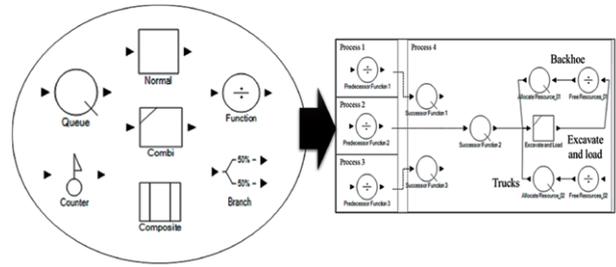


그림 4. CYLONE Simulation Elements and Multiple Predecessor Process (Sawhney,1998)

## 2. CYLONE(Cycle Operation Network) Simulation

본 연구에서는 이산사건 시뮬레이션의 Activity-Oriented 방법을 모듈러 건축 프로젝트 계획 및 관리 모델 개발에 적용하기 위해 건설 산업의 반복작업을 구현하고 일들의 작업일정 및 자원 사용유무에 따른 생산성 도출 및 총 작업시간을 산정하는데 적합한 CYCLONE Simulation을 사용한다. 본 시뮬레이션의 경우 총 7개의 엘리먼트를 활용하여 작업을 정의하며, 각 작업조건에는 작업시간 및 자원 활용 수준을 모델러가 설정할 수 있다.

## 3. 시뮬레이션 모델 개발 프로세스

모듈러 건축 프로세스는 공장제작, 운송, 현장설치로 총 세 단계로 구성되지만 실제 현장설치 작업이 이루어지기 위해서는 현장 기초공사가 선행되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 모듈러 건축 프로젝트 계획 및 관리를 위한 시뮬레이션 모델 개발 시 현장 기초 공사를 포함하여 총 네 부분으로 나누어 개발한다. 다만, 현장 기초공사의 경우 현장 여건에 따라 투입 가능한 자원의 종류 및 구조(지하층 유무 등)에 대한 편차가 현장설치 작업에 비해 크기 때문에 세부작업에 대한 자원분배를 지원하

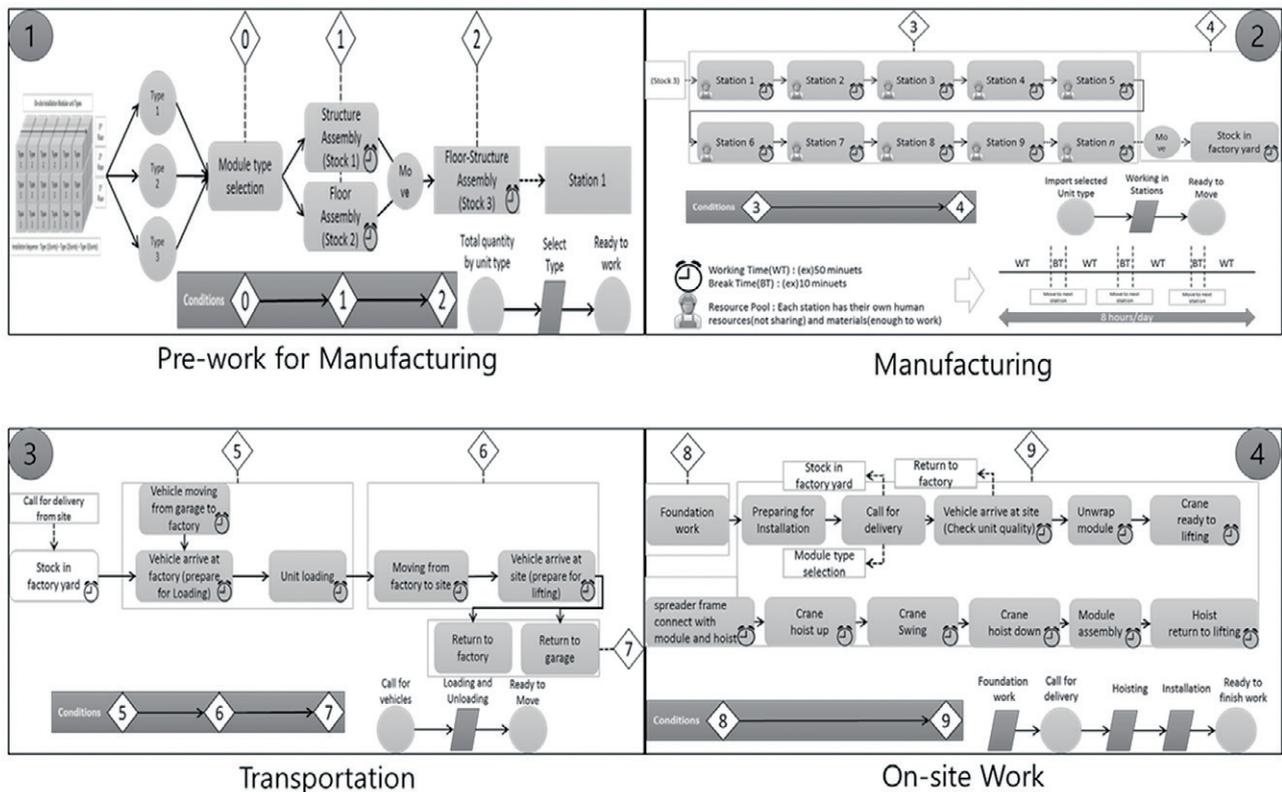


그림 5. Concepts of Simulation Model Development

지 않고 총 자원가용 수준의 비율이 적용될 수 있도록 모델을 개발한다. 최종적으로, 각 단계별 작업특성에 대한 정의를 내린 후 작업시간 및 활용가능 한 자원수준과 작업 조건을 사전에 입력하게 되면 개별 모듈러 유닛에 대한 생산성 결과뿐만 아니라 특정 단계에서 발생 가능 한 작업지연 수준에 따른 전체 프로젝트 일정 변동에 대한 영향정도를 파악할 수 있게 된다.

#### IV. 결론

본 연구는 모듈러 건축 프로젝트를 수행하는 데 필요한 계획 및 관리 단계에서 공장제작, 운송, 현장설치 단계에서 발생 가능한 작업지연에 따른 프로젝트 수행 영향 정도를 파악할 수 있는 모델을 개발했다는 데 의의가 있다. 본 시뮬레이션 모델은 모듈러 건축 프로젝트의 규모에 상관없이 해당 작업에 대한 정보를 사전에 입력하게 되면 프로젝트 매니저가 원하는 생산성 정보 및 작업 지연 발생 시 대체 가능한 시나리오를 수립할 수 있는 장점이 있다. 또한, 모듈러 건축 프로젝트 매니저가 모듈러 건축 프로젝트에 대한 경험이 적을 경우에도 본 연구에서 정의 한 각 단계별 작업정의를 바탕으로 작업관리 기준선을 마련할 수 있다는 점에서 활용도가 높다 할 수 있다. 다만, 본 연구에서는 모듈러 건축의 현장설치 이후 마감작업의 레벨을 별도로 정의하지 않았기 때문에 마감작업 수준에 따른 프로젝트 전체 작업 관리 기준선을 도출하는데는 한계가 있다. 따라서 추후 모듈러 건축의 현장설치 마감작업 수준에 대한 정의가 필요하며, 본 시뮬레이션 모델의 사용 범위를 넓히기 위해서는 웹 기반 시뮬레이션 프로그램을 개발하여 공장 및 현장에서 함께 프로젝트 정보를 공유하며 사용할 수 있는 연구가 필요하다.

#### 참고문헌

이정훈 (2017). “Planning and Control of Modular Building Construction Projects Using Discrete-Event Simulation” 서울대학교 박사학위논문

Abu Hammad, A., Salem, O., Hastak, M., & Syal, M. (2008). Decision support system for manufactured housing facility layout. *Journal of Architectural Engineering*, 14(2), 36-46.

Hasan, S., Al-Hussein, M., & Gillis, P. (2010, December). Advanced simulation of tower crane operation

utilizing system dynamics modeling and lean principles. In *Proceedings of the Winter*

Moghadam, M. (2014). *Lean-MOD: An Approach to Modular Construction Manufacturing Production Efficiency Improvement* (Doctoral dissertation, University of Alberta).

Wu, D., Lin, Y., Wang, X., Wang, X., & Gao, S. (2010). Algorithm of crane selection for heavy lifts. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 25(1), 57-65.

■ 본 논고는 저자의 박사학위논문(이정훈, 2017)에서 발췌, 요약되었음.