

# 대기행렬 모형을 활용한 시공단계 BIM 코디네이터 업무 성과 분석

## Empirical Evaluation of BIM Coordinator Performance using Queuing Model in Construction Phase

함남혁<sup>1)</sup>, 여옥경<sup>2)</sup>, 지규현<sup>3)</sup>

Ham, Nam-Hyuk<sup>1)</sup> · Yuh, Ok-Kyung<sup>2)</sup> · Ji, Kyu-Hyun<sup>3)</sup>

Received August 8, 2018; Received September 6, 2018 / Accepted September 6, 2018

**ABSTRACT:** This study focuses on the BIM request for information(RFI) processing performance and quantitatively analyzes the performance of the BIM coordinator and the loss due to the waiting of the project participants. For these purposes, a method to quantitatively evaluate the performance of the BIM coordinator was proposed using a queueing model. For the verification, two projects in which BIM was applied in the construction phase were selected, and the BIM RFI data were collected through the analysis of the BIM monthly report and BIM coordinator work log of each project. In addition, the BIM input personnel, labor cost, and productivity data were collected through interviews with the experts of the case projects. The analysis of the BIM RFI processing performance of the BIM coordinator using the queueing model exhibited on a probabilistic basis that the waiting status of the project participants could vary depending on the preliminary BIM application to the design verification as well as the input number and level of the BIM coordinator personnel. In addition, the loss cost due to the waiting of the project participants was analyzed using the number of BIM RFIs waiting to be processed in the queueing system. Finally, the economic feasibility analysis for the optimal BIM coordinator input was performed considering the loss cost. The results of this study can be used to make decisions about the optimal BIM coordinator input and can provide grounds for the BIM return on investment (ROI) analysis considering the waiting cost of the project participants.

**KEYWORDS:** BIM coordinator; Performance Evaluation; Queueing Model; Waiting Cost; RFI(Request for Information)

**키워드:** BIM 코디네이터, 성과 평가, 대기행렬 모형, 대기비용, 정보요청

### 1. 서론

최근 건설 프로젝트의 복잡성이 지속적으로 증가하는 반면, 건설산업의 노동 생산성은 점차 떨어지고 있다(Moon et al., 2016). 하지만 아직까지도 건설산업에서는 2차원 Computer Aided Design(CAD)기반의 업무 환경이 일반적이다(Walasek and Barszcz, 2017). 이러한 환경에서 프로젝트 참여자들간의 의사소통 및 협업이 원활하게 수행될 수 없으며(Poirier et al., 2015), 설계오류, 설계변경, 재작업 등 프로젝트 성과에 직접적인 영향을 미치는 리스크들을 해결하는 데 문제가 발생할 수 있다(Han

et al., 2012). 문제 해결에 필요한 다양한 형태의 추가 비용(e.g. transaction cost)이 발생할 수 있으며(Lee et al., 2012), 문제 해결을 위해 필요한 정보 요청에 대한 피드백이 지체되거나, 변경에 대한 승인이 길어질 경우 시간에 대한 비용이 발생할 수도 있다(Han et al., 2013).

의사소통 및 협업의 문제를 해결하기 위해 Building Information Modeling(BIM)에 대한 관심이 매우 증가하였다(Zheng et al., 2017). BIM은 일반적으로 건물의 기하학적 모델에 기획, 설계, 시공, 운영 등 프로젝트 생애주기에 대한 정보가 통합적으로 축적된 것으로 정의된다. 또한 BIM은 프로젝트 수

<sup>1)</sup>정회원, 한양사이버대학교 디지털건축도시공학과 겸임교수 (nhham@hycu.ac.kr)

<sup>2)</sup>정회원, 한양사이버대학교 디지털건축도시공학과 교수 (karenyuh@hycu.ac.kr) (교신저자)

<sup>3)</sup>정회원, 한양사이버대학교 디지털건축도시공학과 교수 (goodjkh@hycu.ac.kr)

행 과정에서 정보 생성 및 재활용이 가능하다. 따라서 프로젝트의 참여자들은 업무에 필요한 정보가 발생할 경우 BIM을 활용할 수 있다(Eastman et al., 2011). BIM이 건설 현장에서 적절하게 관리된다면, 현장에서 수행되는 다양한 작업을 효과적으로 지원할 수 있다(Singh et al., 2011). 하지만 프로젝트 참여자들이 단기간에 의사소통 및 협업 문제를 해결하기 위해 자체적으로 BIM 활용 기술을 전부 습득하는 것은 한계가 있다. 따라서, 전문적인 BIM team을 프로젝트에 참여시킨다. 그러므로 BIM을 활용한 프로젝트의 원활한 수행을 위해 BIM 코디네이터의 투입이 고려된다(Rahman et al., 2016). 이들의 주요 역할은 프로젝트 참여자들의 의사소통 및 협업을 지원하고, BIM을 활용한 정보요청사항(RFI, Request for Information)에 대응하는 것이다(Rokoeei, 2015). 실제 BIM 기반 프로젝트의 제안요청서(RFP, Request for Proposal)에는 BIM 코디네이터의 역할뿐만 아니라, BIM 코디네이터의 서비스에 대한 구체적인 요구조건(e.g. 투입인원, 경력, 현장 상주 여부 등)을 명시하고 있다(Korea Land and Housing Corporation, 2012). BIM 도입을 고려할 때 초기 투자 비용은 상당한 재정적 리스크를 가지고 있으며(Poirier et al., 2015). 특히, 일정 기간 동안 투입되는 BIM 코디네이터 인원에 따른 인건비, Hardware, Software 등은 BIM 투자 비용의 대부분을 차지한다(Kim et al., 2017). 따라서 BIM 코디네이터의 투입에 대한 의사결정은 매우 중요하다. 하지만 BIM 코디네이터의 투입이 프로젝트 참여자들의 성과에 얼마나 영향을 미치는지 정량적으로 분석한 연구는 매우 드물다.

본 연구는 대기행렬 모형을 활용하여 BIM 코디네이터의 성과를 분석하고자 한다. 단위 시간 동안의 BIM을 활용한 정보요청사항 처리를 BIM 코디네이터의 성과를 평가하기 위한 지표로 활용하였다. 분석 결과를 통해 BIM 코디네이터가 프로젝트 참여자들을 기다리게 함으로써 발생한 대기비용과 BIM 코디네이터의 투입에 따른 서비스비용을 도출하였다. 이를 통해 BIM 코디네이터의 적정 투입 인원에 대한 의사결정을 지원하고자 한다.

## 2. 이론적 고찰

### 2.1 BIM 코디네이터의 역할

BIM 코디네이터는 프로젝트 참여자들이 BIM의 효과 및 장점을 통해 업무를 원활히 수행할 수 있도록 지원하여야 한다(Merschbrock and Munkyold, 2015). 특히, 시공단계에서는 프로젝트 참여자들간 조율을 위한 BIM을 활용한 정보요청사항에 대응하여야 한다(Khanzode et al., 2008). 이러한 직접적인 지원업무가 BIM 코디네이터의 업무의 대부분(발생건수 97.5%, 작업시간 95.2%)을 차지한다(Kim et al., 2016). 이러한 과정에서

간섭체크, 시공성 검토, 4D&5D, 통합, 물량 산출, 협업, 의사소통 등과 같은 기술적 역량을 활용하여 프로젝트 담당자의 정보요청에 대해 신속하고 정확하게 피드백해야 한다(Lahdou and Zetterman, 2011). 프로젝트 참여자들은 공정계획 수립, 설계정보 관리, 공정 관리 등 업무에 필요한 정보를 BIM 코디네이터에게 요청할 수 있다(Fan et al., 2014). 이러한 정보요청에 대한 응답의 신뢰성 확보를 위해 BIM Model을 항상 최신의 정보를 반영하여 업데이트할 책임이 있다(Gu and London, 2010).

이 밖에도 BIM 코디네이터는 BIM Project Execution Plan(PxP), BIM 월간 보고서, 간섭 체크 보고서 작성 등 문서 작업을 통해 프로젝트의 주요 이슈에 대한 BIM 활용 내용에 대한 기록을 남기는 역할을 담당한다(Kim et al., 2017). 이처럼 직접적인 업무 외에도 BIM 코디네이터는 원활한 업무 수행을 위해 BIM 표준 및 BIM 기반 Workflow, BIM 적용 수준을 나타내는 multi-dimensional (nD), Level of Detail or Level of Development(LOD), 사용자 기반 Model View를 정의한 Model View Definition(MVD), BIM 정보를 효과적으로 전달하기 위한 수단과 방법을 정확하게 인지하여 프로젝트 참여자의 정보요청에 신속하게 대응해야 한다.

서비스의 품질 측면에서 BIM 코디네이터의 역할 및 수준, 투입인원에 따라서 프로젝트 참여자가 지원받을 수 있는 BIM 서비스의 범위 및 BIM을 활용한 정보요청사항에 대한 피드백 시간이 달라질 수 있다(Korea Land and Housing Corporation, 2012). BIM 코디네이터는 시공현장에서 프로젝트 참여자들의 정보요청에 직접적으로 대응할 수 있다. 반면 BIM 모델러는 시공현장에서 활용하기 위한 BIM Model을 2D로 작성된 설계도면을 토대로 특정 공중에 한정하여 BIM Modeling이 가능한 수준이다(Joseph, 2011). BIM 코디네이터가 숙련되지 않았을 경우 프로젝트 참여자들이 요청한 BIM을 활용한 정보요청사항은 즉각적으로 회신되지 않거나, 프로젝트 참여자가 요구하는 정확한 형태의 정보로 제공되기 어렵다. 이 경우 프로젝트 참여자들은 BIM을 활용한 정보요청사항에 대한 피드백에 더 이상 기대하지 않을 수도 있게 된다. 따라서 BIM의 효과적인 활용을 위해서는 적절한 수준의 BIM 코디네이터 투입이 고려되어야 한다.

한편, 투입된 BIM 코디네이터의 수에 비해 프로젝트 참여자들이 요청한 BIM을 활용한 정보요청사항이 매우 많을 경우, BIM 코디네이터들의 업무 성과에 문제가 생길 수 있다. BIM을 활용한 정보요청사항에 대한 응답이 너무 늦거나, 필요한 시점을 아예 지나버리는 경우, 프로젝트 참여자들의 기다림에 따른 비용이 발생할 수 있다(Han et al., 2013). 이와 반대로 프로젝트 비용 측면에서도 투입된 BIM 코디네이터의 수에 비해 프로젝트 참여자들이 요청한 BIM을 활용한 정보요청사항이 매우 적을 경우, BIM 코디네이터들이 쉬게 되는 상황이 발생한다. 두 가지 상황의 경우

BIM 투자 비용 중 대부분을 차지하는 BIM 코디네이터의 투입에 대한 의사결정이 실패한 것으로 판단할 수 있다.

하지만 아직까지 이러한 의사결정을 지원하기 위한 방법은 기존 연구에서 제시되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 BIM 코디네이터의 투입인원, 수준을 고려하여 적정 투입 인원을 결정하기 위한 연구 모델을 제시하고자 한다.

## 2.2 대기행렬 모형(Queueing Model)

미시적 관점에서의 노동 생산성 측정은 특정 투입물(e.g. BIM 코디네이터)이 그 밖의 투입물(e.g. 프로젝트 참여자)의 노동 생산성에 미치는 영향을 분석할 수 있는 장점이 있으며(Halligan et al., 1994), 특정 투입물의 Task(e.g. BIM RFI response)에 초점을 둘 경우 노동 생산성을 파악하고, 개선하는 데 유리하다(Dozzi and AbouRizk, 1993). 따라서 미시적인 관점에서 BIM 코디네이터의 성과를 평가하기 위해서는 프로젝트의 상황이 반영되어야 한다(Bernolak, 1997). 즉, BIM 코디네이터의 성과는 프로젝트라는 시스템 상에서 평가되고 관리되어야 한다(Poirier et al., 2015). 1990년대 초반부터 사용된 Workflow management (WfM) systems 은 lead time, wait time, service time, and utilization of resources과 관련하여 비즈니스 프로세스의 성능을 향상시킬 수 있다(Lawrence, 1997). WfM 시스템의 성과와 관련된 시간을 분석하기 위한 여러 형태의 분석 기법이 존재한다(Zhung et al., 2001). 이 중, 수리적 결과를 공식화하여 도출할 수 있는 대기행렬모형을 일반적으로 활용하였다(Truong et al., 2010).

대기행렬 이론(Queueing Theory)은 다양한 형태의 기다림에 대한 연구로서, Fig. 1과 같이 현실에 나타나는 다양한 형태의 대기행렬 시스템(Queueing systems)을 대기행렬 모형(Queueing models)을 이용하여 표현한다(Frederick and Mark, 2010). 고객(Customer)은 서비스를 받기 위해 개별적으로 랜덤하게 대기행렬 시스템에 도착한다. 만약 도착한 고객이 도착 즉시 서비스를 받지 못하면, 그 고객은 대기행렬(Queue)에서 기다린다. 보통 1명 이상의 서버(Server)가 서비스를 제공한다. 각 고객은 서버 중 1명으로부터 개별적으로 서비스를 받은 후 시스템을 떠난다. 대기행렬 이론은 다양한 활동의 네트워크인 workflow를 효율적으로 분석하는 데 적용할 수 있다(Truong et al., 2010).

Ham and Kim(2015)은 대기행렬 모형의 이러한 특성을 고려하여 시공단계 BIM 적용 프로젝트를 대상으로 BIM을 활용한 정보요청사항에 대한 응답에 초점을 맞추어 BIM 인력의 성과를 분석하였다. Kim et al.(2017)은 BIM 인력의 성과에 따라 프로젝트 참여자들의 대기에 따른 비용이 발생할 수 있음을 분석하였다. Ham et al.(2018)은 대기행렬 모형을 활용하여 비정형 건축물의 시공단계에 투입된 전문건설업체의 성과를 단위 기간 동안 BIM

모델로부터 공장제작을 위해 추출된 제작도면의 수량에 초점을 맞추어 분석하였다.

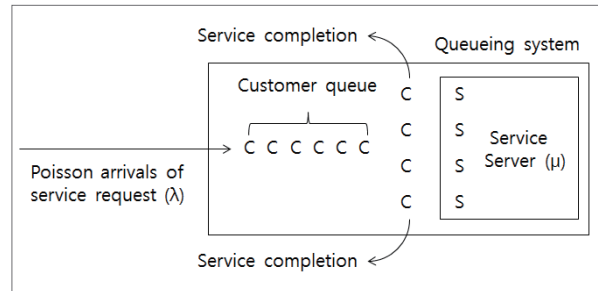


Figure 1. Multi server queueing system (C represents a customer, and S a server)

대기행렬시스템에서 고객의 도착과 도착 사이의 시간을 도착간격시간(interarrival times)이라고 하며, 고객의 도착에 따른 자료가 충분히 수집될 경우 단위시간당 평균 도착고객 수를 추정할 수 있다. 이것을 평균도착률(mean arrival rate)이라고 하며,  $\lambda$  로 표시한다. 또한 도착간격시간에 대한 확률분포를 추정할 수 있다. 대부분의 대기행렬 모형은 도착간격시간에 대한 확률분포로 지수분포를 가정하고 있다. 도착간격시간의 큰 변동성 때문에 다음 고객이 언제 도착할지를 예측하는 것은 불가능하며 이 때문에 랜덤도착이라고도 한다. 평균 도착간격시간의 추정치는  $1/\lambda$  와 같다.

기본 대기행렬시스템에서 각 고객은 1명의 서버로부터 개별적으로 서비스를 받는다. 서버의 수에 따라 단일서버시스템(single-server system)과 복수서버시스템(multiple-server system)으로 나뉜다. 한 명의 고객이 서비스를 받기 시작하는 순간부터 서비스가 완료되는 순간까지의 시간을 서비스 시간(service time)이라고 한다. 여기서 쉬지 않고 일한다는 가정 하에 1명의 서버가 단위시간당 서비스를 완료하는 평균 고객 수를 평균서비스율(mean service rate)이라고 하며,  $\mu$  로 표시한다. 서비스시간은 일반적으로 고객이 요청한 서비스 종류에 따라 다르다. 대기행렬시스템에서 서비스 시간에 대한 확률분포로서 대표적인 것은 지수분포이다. 이는 대부분의 서비스 시간이 매우 짧지만 드물게 매우 길 수도 있다는 것을 의미한다. 따라서 평균 서비스시간의 추정치는  $1/\mu$  와 같다.

## 3. BIM 코디네이터 성과 평가 모델

### 3.1 복수 서버 대기행렬 모형

BIM 적용 건설 프로젝트에서 BIM 코디네이터와 프로젝트 참여자들이 주고 받는 BIM을 활용한 정보요청사항을 고객으로 간주하면, 1) BIM 코디네이터가 프로젝트 참여자에게 요청한 정보요청사항, 2) 프로젝트 참여자가 BIM 코디네이터에게 요청한 정보

요청사항은 결국 BIM 코디네이터에 의해 최종적으로 BIM Model에 반영해야 한다. BIM 코디네이터가 BIM Model을 구축하는 과정에서 발견된 설계오류, 간섭 등에 대해 BIM 코디네이터가 프로젝트 참여자에게 확인을 요청하면, 프로젝트 참여자들은 이슈에 따른 해결방안을 BIM 코디네이터에게 가능한 빨리 피드백해야 한다. 그러면 BIM 코디네이터는 BIM Model의 정보를 수정하거나 새로 작성함으로써 BIM Model의 Integrity를 향상시킨다. BIM 코디네이터는 최적화된 BIM Model을 활용하여 프로젝트 참여자의 공정계획 수립, 설계정보 관리, 공정 관리 등 업무에 필요한 정보를 프로젝트 참여자의 기다림을 최소화할 수 있도록 최대한 빨리 피드백해야 한다. BIM 코디네이터는 업무가 종료될 때까지 이러한 업무를 반복적으로 수행한다.

고객의 도착 시간과 서비스 시간에 대한 확률에 따라 대기행렬 모형은 매우 다양하지만, 본 연구에서 고객으로 간주한 BIM을 활용한 정보요청사항이 서버인 BIM 코디네이터에게 전달되는 빈도는 매우 랜덤하기 때문에 BIM을 활용한 정보요청사항 건수의 시스템내 도착 시간은 지수분포를 가정해야 한다. 또한 BIM 코디네이터에 의해 BIM을 활용한 정보요청사항이 처리되는 서비스 시간도 매우 랜덤하다. 따라서 서비스 시간도 지수분포를 가정해야 한다. 또한 BIM 적용 건설 프로젝트에서 BIM 코디네이터는 2명 이상이 투입되는 것이 일반적이다(Lee et al., 2012). 따라서 본 연구에서는 Fig. 2와 같은 복수서버대기행렬모형(M/M/s)을 통해 BIM 코디네이터의 성과를 평가하고자 한다.

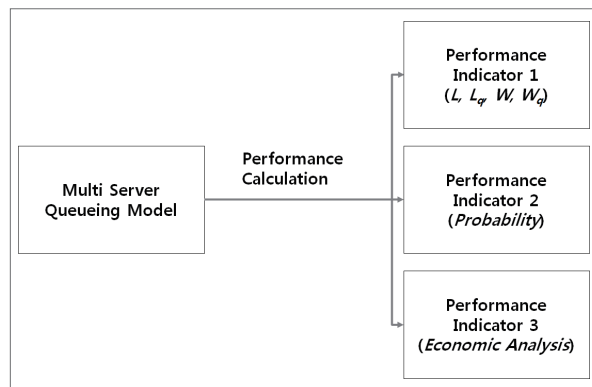


Figure 2. Performance Calculation Process

복수서버대기행렬모형은 다음과 같은 가정을 포함한다.

- 도착간격 시간은 평균이  $1/\lambda$ 인 지수분포를 따른다.
- 서비스 시간은 평균이  $1/\mu$ 인 지수분포를 따른다.
- 대기행렬 시스템에는  $s$ 명의 서버가 있다.
- 서버의 이용률( $\rho$ )은  $\lambda/s\mu$ 로 정의된다.
- 대기행렬 시스템은 무한하다.
- 대기행렬 서비스 규칙 : FCFS (선입선출법)

### 3.2 복수 서버 대기행렬 모형의 성과 척도

#### 3.2.1 기본 성과척도 분석

대기행렬 시스템의 성과는 다음과 같이 두 가지 척도로 분석할 수 있다. 1) 대기행렬 시스템에 대체로 얼마나 많은 고객이 기다리고 있는가? 2) 대기 고객들은 대체로 얼마나 오래 기다리는가? 첫 번째 측면에서, 대기행렬 시스템에서 고객을 기다리게 하는 동안 그들은 조직의 비생산적인 구성원이 된다. 일하고 있는 구성원이 1~2명의 쉬고 있는 구성원의 업무를 대신할 수 있을지 모르지만 그 이상은 경우에는 불가능하다. 두 번째 측면에서, 대기행렬 시스템에서 중요한 목표는 고객을 만족시켜 그들이 다시 서비스를 이용하도록 하는 것이다. 고객은 대기행렬 시스템에 얼마나 많은 다른 고객들이 있는가보다 개인이 얼마나 오래 기다려야 하는가에 더 많은 관심이 있다. 이 두 가지 척도는 일반적으로 평균값(기대치)으로 표현된다. 대기행렬에 있는 고객만 고려할 것인지 아니면 대기행렬 시스템 내에 있는 고객 모두를 고려할 것인지에 따라 네 가지 구체적인 성과 척도로 정의할 수 있다.

$L$  = 서비스 중인 고객을 포함하여 시스템 내에 있는 평균 고객 수

$L_q$  = 서비스 중인 고객을 제외하고 대기행렬에 있는 평균 고객 수

$W$  = 각 고객의 시스템 내에서의 평균 대기 시간(서비스 시간 포함)

$W_q$  = 각 고객의 대기행렬에서의 평균 대기 시간(서비스 시간 제외)

복수서버대기행렬 모형의 성과척도( $L, L_q, W, W_q$ ) 도출을 위한 기본 계산식은 (1)~(4)와 같다.

$$P_0 = \frac{1}{\sum_{n=0}^{s-1} \frac{(\lambda/\mu)^n}{n!} + \frac{(\lambda/\mu)^s}{s!} \left( \frac{1}{1-\lambda/s\mu} \right)} \quad (1)$$

$$L_q = \frac{P_0(\lambda/\mu)^s \rho}{s!(1-\rho)^2} = \frac{P_0 \lambda^{s+1}}{(s-1)! \mu^{s-1} (s\mu - \lambda)^2} \quad (2)$$

$$W_q = L_q / \lambda \quad (3)$$

$$W = W_q + \frac{1}{\mu} \quad (4)$$

대기행렬 모형에서 기본 성과척도를 산출하는 데 있어서 가장 중요한 공식은  $L$ 과  $W$ 사이의 직접적인 관계를 나타내는 리틀의 공식(Little's formula)이며, 식 (5)와 같다(Little, 1961). 식 (5)는  $L_q$ 와  $W_q$ 사이에도 성립한다. 이 공식으로 인해  $L, L_q, W, W_q$ 중 어느 하나를 분석하면 나머지 성과 척도는 바로 얻을 수 있으며, 이를 통해 서비스의 기본적인 상태 분석이 가능하다.

$$L = \lambda W \quad (\lambda : \text{평균도착률}) \quad (5)$$

### 3.2.2 시스템 내 고객 수 및 대기시간에 대한 확률 분석

대기행렬모형을 통해 기본 성과척도 분석 외에 시스템 내에 고객 수, 고객의 대기시간 등 대기행렬시스템의 상태에 대한 확률 분석이 가능하다. 서버의 이용률( $\rho$ )이 높으면, 시스템 상태가 나빠지고 프로젝트 참여자들의 기다림에 대한 비용이 발생할 수 있다. 이러한 대기 비용이 서버를 투입하는 비용보다 상대적으로 크면 경제성에 문제가 생길 수 있다. 따라서 대기행렬시스템 내에 몇 명의 고객이 있는지를 확률적으로 예측함으로써 BIM 코디네이터의 성과를 평가해야 한다.  $P_n$ 은 시스템 내에  $n$ 명의 고객이 있을 안정상태 확률을 나타낸다. 예를 들어 95% 이상의 시간 동안 시스템 내에 3명 이상의 고객이 없도록 하는 것이 목표라면  $P_0 + P_1 + P_2 + P_3 \geq 0.95$ 라는 수식이 성립한다.  $P_n$  도출을 위한 계산식은 (6)~(7)과 같다.

$$P_n = C_n P_0 \quad (6)$$

$$C_n = \frac{\lambda_{n-1} \lambda_{n-2} \dots \lambda_0}{\mu_n \mu_{n-1} \dots \mu_1} = \begin{cases} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n & n=1, 2, \dots, s \\ \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n & n=s+1, s+2, \dots \end{cases} \quad (7)$$

시스템 내에서 고객의 대기시간( $t$ )에 대한 확률은 다음과 같이 나타낼 수 있다. 식 (8)은 시스템 내에서 고객의 대기시간이  $t$ 이 상일 경우의 확률을 나타내며, 식 (9)는 대기행렬 내에서 대기시간이  $t$  이상일 경우의 확률을 나타낸다.

$$P(W > t) = e^{-\mu t} \left[ 1 + \frac{P_0 (\lambda/\mu)^s}{s!(1-\rho)} \left( \frac{1 - e^{-\mu t(s-1-\lambda/\mu)}}{s-1-\lambda/\mu} \right) \right] \quad (8)$$

$$P(W_q > t) = \left( 1 - \sum_{n=0}^{s-1} P_n \right) e^{-s\mu(1-\rho)t} \quad (9)$$

### 3.2.3 서버의 수에 대한 경제성 분석

BIM 투입을 결정할 때 중요한 문제는 얼마나 많은 BIM 코디네이터를 둘 것인가 하는 것이다. 너무 많은 BIM 코디네이터를 투입하면 과다한 서비스 비용이 발생하고, 너무 적게 투입하면 BIM을 활용한 정보요청사항에 대한 응답을 기다리는 프로젝트 참여자들의 대기 비용이 발생할 수 있다. BIM 코디네이터가 프로젝트 참여자들을 기다리게 하면 생산성의 저하를 가져오고, 그 결과는

프로젝트 성과의 감소로 나타날 수 있다. 그러므로 BIM 코디네이터의 적정 투입을 결정하는 것은 BIM 코디네이터 투입에 따른 서비스 비용과 프로젝트 참여자들의 기다림에 따른 대기 비용을 동시에 고려하여 적절한 절충점을 찾는 것이다(Frederick and Mark, 2010). 따라서 BIM 적용 프로젝트에서 관리의 목표는 다음 식(12)을 만족시키는 BIM 코디네이터의 수를 결정하는 것이다.

$$\min. TC = SC + WC \quad (12)$$

- TC(Total Cost) = 단위시간당 평균총비용
- SC(Service Cost) = 단위시간당 평균 서비스 비용
- WC(Waiting Cost) = 단위시간당 평균 대기 비용

BIM 적용 프로젝트에 투입된 BIM 코디네이터의 평균 임금을 고려할 때, 서비스 비용과 대기 비용은 각각 식 (13), (14)와 같다.

$$SC = C_s * s \quad (13)$$

$$WC = C_w * L \quad (14)$$

- $C_s$  = 단위 시간당 1명의 BIM 코디네이터 투입에 따른 비용
- $C_w$  = 프로젝트 참여자의 단위 시간당 대기 비용
- $s$  = 서버의 수
- $L$  = 대기행렬시스템에 있는 평균 고객 수

그러므로 상수  $C_s, C_w$ 를 추정할 후, 다음 식 (15)가 성립하는  $s$ 를 결정하면 서비스 비용과 대기 비용을 동시에 고려하여 최적의 BIM 코디네이터 투입을 결정할 수 있다. 본 연구에서는 사례 프로젝트를 통해 실제로 투입된 BIM 코디네이터의 수를 기준으로 경제적으로 최적의 BIM 코디네이터 투입 인원을 탐색하고자 한다.

$$\min. TC = C_s * s + C_w * L \quad (15)$$

## 4. BIM 코디네이터 업무 성과 평가

### 4.1 사례 BIM 프로젝트 사전조사

이 섹션에서는 앞 섹션에서 규명된 이론적 연구문제를 실제 프로젝트에 대한 사전 분석을 통해 확인하였다. 또한 대기행렬 모형의 적용성을 검토하기 위해 BIM 코디네이터가 프로젝트 참여자들에게 제공하는 BIM을 활용한 정보요청사항의 처리라는 특정 task에 대한 사전 분석을 실시하였다. 이를 위해 Table 1과 같이 시공단계 BIM 적용 프로젝트를 선정하고, 건설회사의 BIM Manager들을 대상으로 프로젝트의 BIM 적용 범위 및 BIM 코디네이터 투입에 대한 상세한 인터뷰를 실시하였다.

Table 1. Summary of Project Cases

Project	Project 1: Hotel	Project 2: R&D Center
Total Construction Cost (KRW)	150,000,000,000	266,600,000,000
Gross floor area(m2)	70,261	96,328
Construction Period	36	21
BIM Coordinator input period	27	20
BIM Consulting Fee (Preconstruction Phase)	562,088,000	None
BIM Consulting Fee (Construction Phase)	405,000,000	200,000,000

BIM 코디네이터의 현장 상주에 따른 성과를 분석하기 위해 현장 중심의 BIM 운영 전략을 실행하고 있는 A사의 호텔, R&D 센터 프로젝트를 사례 BIM 프로젝트로 선정하였다. A사의 BIM Manager와의 인터뷰 결과 호텔 프로젝트는 착공단계에서 BIM 코디네이터가 투입되어 분야별 BIM Model을 구축하여 설계검증을 완료하였다. 착공단계 초기 투자 비용(562,088,000원)에는 BIM Model 구축을 위한 BIM 코디네이터 인건비 및 소프트웨어, 하드웨어, 프로젝트 팀 교육, 간섭체크, 4D Simulation 등의 업무 내용이 포함되었다. 하지만 BIM 전문업체가 A사에 제출한 계약서 상의 인건비 산출을 위한 BIM 코디네이터 투입 인원과 실제로 업무에 투입된 BIM 코디네이터의 수가 동일한지는 확인하기 어렵다. 하지만 시공단계에서 현장에 상주한 BIM 코디네이터에 대한 정보는 명확했다. 27개월 동안 BIM 코디네이터 3명(BIM 코디네이터급 3명, BIM 경력 3년 이상)이 투입되었으며, BIM 코디네이터 한 명당 월 500만원의 인건비가 소요되었다(총 405,000,000원). BIM 코디네이터가 현장에 상주하면서 수행하는 업무는 구축된 BIM Model을 활용하여 공정관리, 설계관리, 간섭관리 등 프로젝트 의사결정 지원에 활용하려는 프로젝트 참여자들의 BIM을 활용한 정보요청사항에 대응하는 것이다. 또한 BIM을 활용한 정보요청사항 대응에 따른 BIM Model의 변경 사항을 수시로 관리하여 후속적으로 발생하는 BIM을 활용한 정보요청사항에 최대한 빠르게 대응하여야 한다. BIM 코디네이터가 수행한 주요 업무 내용들은 Monthly 단위로 작성되는 BIM 보고서에 기록되며(인천 그랜드 하얏트 호텔 : 18개월치 보고서), 이와 별도로 개별 BIM 코디네이터는 작업 폴더에 프로젝트 참여자의 BIM을 활용한 정보요청사항을 날짜별로 관리한다. 따라서 이러한 데이터를 활용하여 BIM 코디네이터가 현장에서 처리한 BIM을 활용한 정보요청사항의 건수를 파악할 수 있다. BIM을 활용한 정보요청사항에 대한 건수는 월간보고서와 BIM 코디네이터의 작업 이력 등을 통해 측정이 가능하지만 피드백되는 시간은 매우 랜덤한 성격을 가지고 있기 때문에 측정이 어렵다.

R&D 센터의 경우 호텔 프로젝트와 몇 가지 차이점을 가지고 있었다. 우선 R&D 센터 프로젝트는 호텔 프로젝트와 같이 착공 단계에서 BIM Model 구축을 통해 사전 설계검증이 이뤄지지 않았다. 또한 시공단계에서 20개월 동안 현장에 상주하면서 프로젝트 참여자들의 업무를 지원할 BIM 코디네이터의 투입인원(3명)은 동일하였으나, 투입된 BIM 코디네이터의 수준이 BIM 코디네이터 1명, BIM 모델러 2명으로 호텔 프로젝트보다 매우 낮았다. BIM 코디네이터를 투입하는 비용으로 BIM 코디네이터 1인당 500만원, BIM 모델러 1인당 250만원 등 일 인당 월 평균 333만원을 투입하였다(총 200,000,000원). 따라서 호텔 프로젝트와 BIM 코디네이터의 성과를 측정하는 데 있어서 좋은 비교 대상으로 활용할 수 있다. 본 프로젝트에서도 BIM 코디네이터가 수행한 주요 업무 내용들은 Monthly 단위로 작성되는 BIM 보고서에 기록되었으며(16개월치 보고서), 이와 별도로 개별 BIM 코디네이터는 작업 폴더에 프로젝트 참여자의 BIM을 활용한 정보요청사항을 날짜별로 관리하였다. 따라서 이러한 데이터를 활용하여 BIM 코디네이터가 현장에서 처리한 BIM을 활용한 정보요청사항 건수를 파악할 수 있었다. 하지만 다른 프로젝트 사례와 마찬가지로 BIM을 활용한 정보요청사항 건수는 측정이 가능하지만 피드백되는 시간은 매우 랜덤한 성격을 가지고 있기 때문에 측정이 어렵다.

사전 분석을 실시한 결과 실제 프로젝트에서 총 BIM 투입 비용이 어느 시점에 얼마나 투입됐는지는 BIM Manager도 명확하게 밝히기 힘들다. 반면 BIM 코디네이터 1인당 투입된 비용(e.g. 인건비, HW, SW)은 비교적 명확하다. 따라서 총 BIM 투입 비용에 대한 성과 분석보다는 단위 BIM 코디네이터 투입이 프로젝트 참여자들에게 미치는 영향을 파악하는 것이 의미 있다. 또한 연구 방법론적인 측면에서 대기행렬 모형은 투입된 BIM 코디네이터인원 수, 수준, BIM 코디네이터와 프로젝트 참여자간의 협업 과정에서 발생하는 BIM을 활용한 정보요청사항 건수를 활용하여 BIM 코디네이터의 성과를 시스템 차원에서 평가할 수 있다.

#### 4.2 BIM을 활용한 정보요청사항 데이터 수집 및 분류

BIM 코디네이터가 BIM 서비스를 수행하는 과정에서 수집된 BIM을 활용한 정보요청사항에 대한 데이터는 Table 2와 같다. Project 1의 경우 시공단계에서 설계오류 확인 요청 데이터 356건, 간섭 확인 요청 데이터 7건, 시공 지원(예, 시공지원, 시각화 자료, 사전 간섭체크, 공정검토, 디지털 목업, 물량 검토, 기타 등) 요청 데이터 650건 등 총 1,077건이 수집되었다. Project 2의 경우 시공단계에서 설계오류 확인 요청 데이터 1376건, 간섭 확인 요청 데이터 202건, 시공 지원 요청 데이터 358건 등 총 1,936건의 데이터가 수집되었다. 데이터는 각 프로젝트에서 작성된 BIM 성과 보고서, BIM 코디네이터의 작업 폴더에 기록된 BIM을 활용한 정보요청사항에 대한 정보를 통해 수집하였다.

Table 2. BIM RFI Collection and Classification

Project	Project 1: Hotel	Project 2: R&D Center
Total No. of BIM RFIs	1,077	1,936
Design Error	356	1376
Clash	71	202
Construction Support	650	358

BIM 코디네이터 업무 성과 평가 모델을 통해서 BIM 코디네이터의 성과를 파악하기 위해서는 수집된 BIM을 활용한 정보요청사항 건수가 일정 기간 동안 몇 명의 BIM 코디네이터에 의해 생성되었는지를 파악해야 한다. BIM 적용 프로젝트에서 이러한 데이터를 수집하는 것은 매우 쉬운 일이다. BIM 코디네이터의 성과 분석을 위한 지표들은 Table 3과 같다.

Table 3. BIM Coordinator Performance Analysis Indicators

Project	Project 1: Hotel	Project 2: R&D Center
Period (Month)	27	20
No. of BIM Coordinator (s)	3	3
mean arrival rate ( $\lambda$ )	1.81	4.4
mean service rate ( $\mu$ )	3	1.67
server utilization ( $\rho = \lambda / \mu$ )	0.20	0.87
server efficiency ( $1 - \rho$ )	0.80	0.13

앞서 수집된 BIM을 활용한 정보요청사항을 BIM 코디네이터의 투입기간(1개월 22일 기준)을 통해 환산하면, BIM 코디네이터가 단위기간 동안 처리한 BIM을 활용한 정보요청사항의 건수를 산출할 수 있다. 대기행렬 모형에서 이 건수는 BIM 코디네이터가 처리해야 하는 고객의 평균 도착률을 의미한다. Project 1의 경우 평균 도착률은 1.81건/일( $\lambda$ ), Project 2의 경우 평균 도착률은 4.41건/일( $\lambda$ )로 분석되었다.

시공현장에서 BIM 서비스를 제공하는 BIM 코디네이터 27명 (A사 21명, B사 6명)의 인터뷰 결과 BIM 코디네이터가 쉬지 않고 일할 경우 보통 하루에 최소 3건 이상의 BIM을 활용한 정보요청사항을 처리할 수 있다고 하였다. 하지만 프로젝트 참여자들이 요청한 정보에 최대한 빨리 대응할 수 있도록 BIM Model이 변경 사항들을 모두 반영하고 있어야 한다는 전제 조건이 붙는다. 또한 일정 경력 이상(최소 3년 이상)의 BIM 코디네이터의 생산

성을 기준으로 한다. 경력이 1년 미만인 BIM 모델러의 경우 도면을 토대로 부분적인 Modeling 작업을 담당하거나, BIM 코디네이터의 지시에 의해 이미 구축된 BIM Model을 활용하여 정보(e.g. 물량산출, 도면산출 등)를 추출하는 단순한 역할을 담당하는 경우가 많다. 이러한 BIM 모델러들의 생산성은 매우 낮은 수준이다. 이러한 상황을 반영하여 본 연구에서 BIM 코디네이터의 서비스율은 3건/일, BIM 모델러의 서비스율은 1건/일로 설정하였다. Project 1의 경우 BIM 코디네이터가 3명 투입되어, 평균 서비스율은 3건/일( $\mu$ )이며, Project 2의 경우 BIM 코디네이터 1명, BIM 모델러 2명 총 3명이 투입되어, 평균 서비스율은 1.67건/일( $\mu$ )으로 설정하였다.

복수서버대기행렬모형에서 서버의 이용률( $\rho$ )은  $\rho = \lambda / s\mu$ 로 정의된다. 서버의 이용률은 기본적으로 1이상이 되어야 정상적인 서비스가 가능한 안정 상태로 간주할 수 있다. Project 1의 경우 평균도착률(1.81건/일)이 평균서비스율(3건/일)보다 낮기 때문에 1명의 직원으로도 BIM을 활용한 정보요청사항에 충분히 대응할 수 있다. 더구나 비슷한 업무 역량을 가진 BIM 코디네이터 3명이 투입되었다. 따라서  $\rho_{project1}$ 값은 0.20으로 굉장히 여유로운 상태이다. 여기서  $1 - \rho_{project1}$ 값(0.80)은 서버 유희율을 나타낸다. BIM 코디네이터가 업무 시간의 20%는 BIM을 활용한 정보요청사항을 처리하고, 80%는 그 밖의 업무를 처리할 수 있는 확률을 의미한다. Project 2의 경우 평균도착률(4.41건/일)이 BIM 코디네이터 1명과 BIM 모델러 2명의 평균서비스율(1.67건/일)보다 높기 때문에 1명의 직원으로는 BIM을 활용한 정보요청사항을 감당할 수 없다. BIM 코디네이터가 3명이 투입되어야 비로소  $\rho_{project2}$ 값은 0.87로 정상적인 서비스가 가능할 수 있다.  $1 - \rho_{project2}$ 값을 살펴보면 0.13으로  $1 - \rho_{project1}$ 값에 비해 상대적으로 여유시간이 부족한 것으로 나타났다.

### 4.3 BIM 코디네이터 업무 성과 분석

#### 4.3.1 기본 성과척도 분석

앞선 성과분석 지표들을 활용하여 각 현장 BIM 코디네이터들의 BIM을 활용한 정보요청사항 처리 성과를 분석한 결과는 Table 4와 같다.

Table 4. Basic performance measures of BIM coordinator

Project	Project 1: Hotel	Project 2: R&D Center
$L$	0.61	8.25
$Lq$	0.01	5.62
$W$	0.34	1.88
$Wq$	0.00	1.28

BIM 코디네이터 3명이 투입된 Project 1의 서버이용률 ( $\rho = \lambda / s\mu$ )은 0.20으로 대기행렬이 안정상태에 도달할 수 있는 조건인  $\rho < 1$ 을 만족한다. 이는 대기행렬시스템에서 BIM 코디네이터들이 BIM을 활용한 정보요청사항을 요청한 고객들에게 정상적인 서비스 제공이 가능하다는 것을 보여준다. Project 1의 기본 성과척도는  $L$ 은 0.61건,  $L_q$ 는 0.01건,  $W$ 는 0.34일,  $W_q$ 는 0.00일이다. 이는 고객의 평균대기시간이 하루(8시간 기준)의 0.34인 대략 2.72시간 정도가 된다는 것을 의미한다. Project 1의 경우 초기 투자 및 사전 설계검증을 위해 이미 BIM 코디네이터의 투입(562,088,000원)이 이뤄졌다. 이로 인해 BIM Model이 시공 단계에서 쓰일 정도로 충분히 업데이트되었으며, 동일한 수준의 BIM 코디네이터 투입으로 인해 프로젝트 참여자들이 요청한 정보를 상대적으로 빨리 제공받을 수 있었다.

BIM 코디네이터 1명, BIM 모델러 2명이 투입된 Project 2의 서버이용률( $\rho = \lambda / s\mu$ )은 0.88으로 대기행렬이 안정상태에 도달할 수 있는 조건인  $\rho < 1$ 을 만족한다. 서버이용률만 살펴볼 경우 본 프로젝트의 BIM 코디네이터들이 BIM을 활용한 정보요청사항을 요청한 고객들에게 정상적인 서비스 제공이 가능하다고 판단할 수 있다. 하지만 Project 2의 기본 성과척도를 살펴보면,  $L$ 은 8.25건,  $L_q$ 는 5.62건,  $W$ 는 1.88일,  $W_q$ 는 1.28일이다. 이는 고객의 평균대기시간이 하루(8시간 기준)의 1.88인 대략 15.04시간(약 2일) 정도가 된다는 것을 의미한다. 동일한 인원이 투입된 Project 1과 비교해볼 때, 기본 성과척도들이 상대적으로 높게 분석되었다. 이는 Project 2의 사전 설계검증을 수행하지 않았기 때문에 시공단계 초기에 해결해야 하는 설계오류에 대한 확인을 위한 BIM을 활용한 정보요청사항 건수의 비중(71%)이 높았기 때문이며, 서비스율이 낮은 BIM 코디네이터가 투입되었기 때문이다. 이로 인해 시공 지원을 위한 BIM을 활용한 정보요청사항 건수의 비중(18.4%)은 낮게 나타났다. Project 2의  $W, W_q$ 값을 Project 1과 비교하면 매우 높은 것으로 나타났다. 이는 앞서 해결되어야 했을 설계오류 확인에 대한 작업의 누적으로 인해 실제 시공단계 프로젝트 참여자들의 BIM 활용도가 떨어지고 있음을 보여준다.

이처럼 대기행렬모형을 활용한 기본 성과척도 분석을 통해 BIM 코디네이터의 성과 평가가 가능하다. 뿐만 아니라, 대기행렬 시스템 상에서 BIM을 활용한 정보요청사항 건수, 대기시간에 대한 확률 분석이 가능하며, 이를 통해 대기행렬시스템에서 BIM 코디네이터의 서비스 상태를 평가할 수 있다.

#### 4.3.2 고객수, 대기시간에 대한 확률 분석

대기행렬시스템 내에서  $P_n$ 은 시스템 내에  $n$ 명( $n=1, 2, 3, \dots$ )의 고객이 있을 안정상태의 확률을 나타낸다. Project 1, Project 2의 대기행렬 시스템 내에 응답을 기다리는 BIM을 활용한 정보요청사항 건수에 따른 확률 값은 Figure 3, Figure 4과 같다.

Project 1의 경우, 95% 이상의 시간 동안 시스템 내에 2명 이상의 고객이 없도록 하는 것이 목표라면  $P_0 + P_1 + P_2 = 0.9748 \geq 0.95$ 라는 수식이 성립한다. Project 1의 BIM 코디네이터는 Project 2의 BIM 코디네이터에 비해 상대적으로 여유롭다. 즉, 프로젝트 참여자들이 요청한 BIM을 활용한 정보요청사항에 충실하고, 늦지 않도록 대응해줄 수 있다. Project 1의 경우,  $P_0 = 0.54$ 로 BIM 코디네이터가 하루에 BIM을 활용한 정보요청사항을 1건도 처리하지 않을 시간에 대한 확률이 54%임을 보여준다. 즉, Project 1의 BIM 코디네이터는 BIM Model의 업데이트 외에 정보 접근성 개선, BIM 보고서 작성, 발주처(e.g. Client, CM) 지원 등 BIM 서비스 개선을 위한 시간적인 여유를 가질 수 있다.

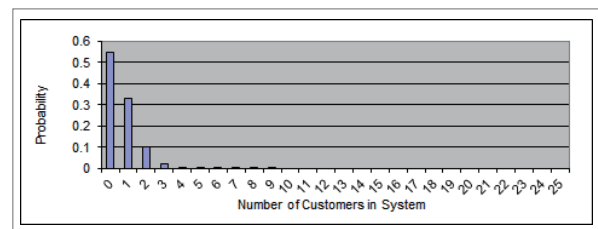


Figure 3. Probability according to the number of BIM RFs in the queuing system(Project1)

하지만 Project 2의 경우,  $P_0 + P_1 + P_2 = 0.2210$ 으로 Project 1과 같이 시스템 내에 2명 이상의 고객이 없도록 하는 목표를 달성하기 힘들다. 실제로 Project 2의 BIM 코디네이터들은 95% 이상의 시간동안 BIM을 활용한 정보요청사항을 처리하는 데 항상 바쁠 것이다( $P_0 + P_1 + \dots + P_{24} = 0.9552 \geq 0.95$ ). Project 2의 경우  $P_0 = 0.03$ 으로 BIM 코디네이터(BIM 코디네이터, BIM 모델러)가 하루에 BIM을 활용한 정보요청사항을 1건도 처리하지 않을 시간에 대한 확률이 3% 밖에 되지 않음을 보여준다. 즉 Project 2의 BIM 코디네이터들은 업무 시간의 97%를 BIM을 활용한 정보요청사항에 응답하는 시간을 할애해야 한다. 이러한 확률 분석 결과를 각 프로젝트의 서버이용률( $\rho$ )과 비교해 보면, BIM 코디네이터의 이용률이 높은 것이 성과를 향상시키는 것이 아님을 보여줄 뿐만 아니라, 프로젝트 참여자들이 기다리게 되는 상황을 초래하게 된다.

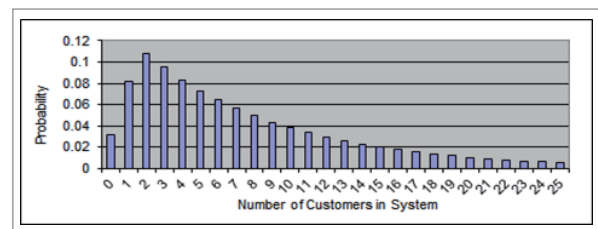


Figure 4. Probability according to the number of BIM RFs in the queuing system(Project2)



대기행렬모형을 활용하여 고객들이 기다리는 시간에 대한 확률 분석이 가능하다. 각 프로젝트의 BIM을 활용한 정보요청사항에 대한 정보 응답을 받는 데 기다리는 시간에 대한 확률은 Table 5와 같다.  $P(W>1)$ 은 고객이 BIM을 활용한 정보요청사항에 대한 정보 응답을 받는데 1일 이상 기다려야 할 확률이고,  $P(W_q>1)$ 은 BIM을 활용한 정보요청사항에 정보 응답을 주기 위해 BIM 코디네이터가 BIM 작업을 시작하기까지 1일 이상 기다려야 할 확률이다.

Table 5. The probability of Waiting time in the Queuing System

Project	Project 1: Hotel	Project 2: R&D Center
$P(W>1)$	0.05067	0.62402
$P(W_q>1)$	0.00002	0.42323

Project 2의  $P(W>1)$ ,  $P(W_q>1)$ 는 각각 0.62402, 0.42323으로 Project 1에 비해 매우 큰 차이가 난다. 이러한 지표를 고려할 때, 즉각적으로 시공지원을 위한 BIM을 활용한 정보요청사항에 대한 요청을 BIM 코디네이터가 빨리 처리해줘야 함에도 불구하고, 프로젝트 참여자들은 기다리게 되는 상황이 발생한다. 이처럼 투입되는 BIM 코디네이터의 인원 수, 경력 수준에 따라 프로젝트 참여자들의 BIM 정보를 활용하는데 기다림이 발생할 수 있으며, 이는 대기비용을 초래할 수 있다. 따라서 BIM 코디네이터 성과를 정확하게 평가하기 위해 BIM 코디네이터의 투입에 따른 서비스 비용 외에 프로젝트 참여자들의 대기에 따른 비용을 고려한 경제성 분석을 실시하였다.

#### 4.3.3 BIM 코디네이터 투입에 따른 경제성 분석

프로젝트 관리 차원에서 BIM 코디네이터의 서비스 상태가 파악되면, BIM 코디네이터의 수에 따른 경제성 검토를 통해 BIM 코디네이터에 투입되는 비용과 프로젝트 참여자들이 대기하는 비용의 절충점을 찾아 이를 최소화하기 위한 BIM 코디네이터의 수를 결정해야 한다.

본 연구에서는  $C_s$ 는 각 프로젝트에 투입된 BIM 코디네이터의 서비스 비용으로 인건비를 활용하였다. Project 1의 경우, BIM 코디네이터가 투입되었으며, BIM 코디네이터의 투입 비용(인건비, HW, SW 포함)으로 사례 프로젝트에서 조사한 바와 같이 월 500만원이 지출되었다. 이를 일 기준으로 환산하면 227,272원/일(1달, 22일 기준)이 투입되었다. 이를 단위 시간(8시간/일 기준)으로 환산하면 시간당  $C_s$ 는 28,409원이다. Project 2의 경우, BIM 코디네이터와 BIM 모델러의 평균 인건비로 151,515원/일이 투입되었다. 이를 단위 시간(8시간/일 기준)으로 환산하면 시간당  $C_s$

는 18,939원이다. 실제로 프로젝트 참여자가 단위 시간 동안 회사에 가져다줄 수 있는 이익은 단위시간당 대기비용인  $C_w$ 보다 높으나, 분석 및 비교의 편의를 위해 2017 엔지니어링 대가 기준의 특급 기술자 인건비(270,333원/일)를 동일하게 활용하였다. 이를 단위 시간(8시간/일 기준)으로 환산하면 시간당  $C_w$ 는 33,792원이다. 이는 프로젝트 참여자가 BIM을 활용한 정보요청사항에 대한 피드백을 주고 받는데 기다리면서 낭비되는 단위 시간당 비용을 뜻한다.

Project 1에서 서비스 비용과 대기비용을 고려한 최적의 총 비용(TC)은  $28,409\text{원} \cdot s + 33,792\text{원} \cdot L$ 을 최소화하는 BIM 코디네이터의 수에 의해 결정된다. Table. 6은 Project 1의 BIM 코디네이터의 수에 따른 이용률( $\rho$ ), BIM을 활용한 정보요청사항 건수( $L$ ), 서비스 비용( $C_s$ ), 대기 비용( $C_w$ ), 총 비용(TC)을 나타낸다.

Table 6. Economical Analysis of BIM Coordinator Input (Project1)

No. of BIM Coordinators (S)	Server utilization ( $\rho$ )	No. of BIM RFIs in the queueing system (L)	Cost of Service (Cs)	Cost of Waiting (Cw)	Total Cost (TC)
1	0.60	1.53	28,409	51,623	80,032
2	0.30	0.67	56,818	22,476	79,294
3	0.20	0.61	85,227	20,637	105,864
4	0.15	0.61	113,636	20,445	134,081
5	0.12	0.60	142,045	20,425	162,470

이를 그래프로 표현할 경우(Fig. 5), Project 1의 프로젝트 관리를 위한 BIM 코디네이터의 최적 현장 투입인원은 2명이다(실제로는 3명 투입). Project 1의 경우 착공단계에서 BIM에 대한 초기 투자 및 설계 검증에 비용이 투입되었기 때문에, 시공단계에서는 적절한 인원 투입을 통해 BIM 투자 비용을 절감했어야 했다. 최적 투입 인원과 실제 투입 인원을 비교해보면 투입기간 동안 1명의 BIM 코디네이터가 과다 투입되었기 때문에 시간당 26,570원의 비용(인건비, HW, SW 포함)의 낭비가 발생한 것으로 판단할 수 있다.

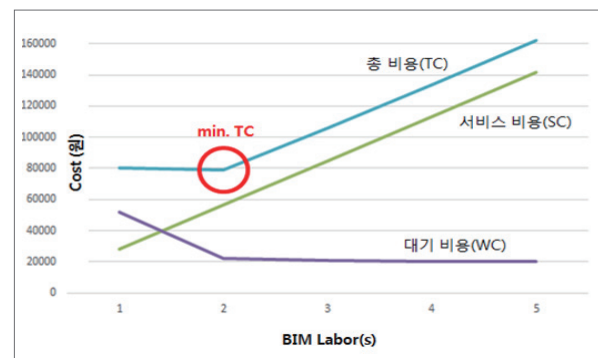


Figure 5. Cost curve for BIM coordinator input decision making (Project1)

Project 2에서 서비스 비용과 대기비용을 고려한 최적의 총 비용(TC)은  $18,939\text{원} * s + 33,792\text{원} * L$ 를 최소화하는 BIM 코디네이터의 수  $s$ 에 의해 결정된다. Table 7은 Project 2의 BIM 코디네이터의 수에 따른 이용률( $\rho$ ), BIM을 활용한 정보요청사항 건수( $L$ ), 서비스 비용( $C_s$ ), 대기 비용( $C_w$ ), 총 비용(TC)을 나타낸다. Project 2의 경우 BIM 코디네이터를 1명, 2명 투입했을 경우 서버이용률이 각각 2.63, 1.32이기 때문에 현장에서 발생하는 BIM을 활용한 정보요청사항을 감당할 수 없다. 이 경우 대기비용은 계산이 불가능하여 N/A(not available)로 표시하였다.

Table 7. Economical Analysis of BIM Coordinator Input (Project2)

No. of BIM Coordinators (S)	Server utilization ( $\rho$ )	No. of BIM RFIs in the queuing system (L)	Cost of Service ( $C_s$ )	Cost of Waiting ( $C_w$ )	Total Cost (TC)
1	2.63	#N/A	18,939	#N/A	#N/A
2	1.32	#N/A	37,878	#N/A	#N/A
3	0.88	8.25	56,817	278,893	335,710
4	0.66	3.34	75,756	112,955	188,711
5	0.53	2.81	94,695	94,880	189,575
6	0.44	2.68	113,634	90,593	204,227
7	0.38	2.65	132,573	89,442	222,015

이를 그래프로 표현할 경우(Figure 6), Project 2의 프로젝트 관리를 위한 BIM 코디네이터의 최적 현장 투입 인원은 4명이다 (실제로는 3명 투입), BIM 코디네이터가 3명 투입되었을 때는  $L$  값이 높아 대기비용이 매우 높게 나타났다. BIM 코디네이터를 추가로 1명 투입할 경우 서비스 비용은 18,939원 증가하지만, 대기 비용은 무려 165,938원이나 감소시킬 수 있다. 이러한 의사결정은 서비스 비용과 대기 비용을 고려한 실제 투입 비용보다 총 비용을 시간당 146,999원 감소시킬 수 있다. BIM 코디네이터의 추가 투입에 따라 서비스 비용이 증가하지만 BIM 코디네이터의 인건비 보다 비싼 프로젝트 참여자들의 대기에 따른 비용을 크게

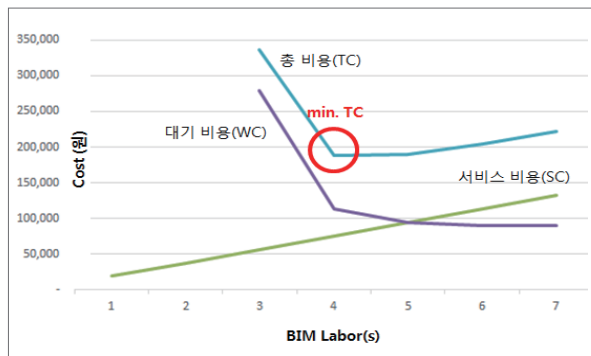


Figure 6. Cost curve for BIM coordinator input decision making (Project2)

상쇄할 수 있다. 또 다른 의사결정으로는 기존 BIM 코디네이터의 수준을 향상시키는 것이다. 이 경우 기존 BIM 모델러 2인을 숙련된 BIM 코디네이터로 대체하는 의사결정을 통해 서비스 비용(인건비)은 증가하지만 대기 비용은 크게 상쇄할 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 대기행렬모형을 활용한 BIM 코디네이터 업무 성과 평가 모델을 통해 BIM 코디네이터의 성과를 분석하였다. 기본 성과적도 분석, 확률 분석, 경제성 분석을 통해 BIM 코디네이터가 프로젝트 참여자들의 성과에 어떠한 영향을 미칠 수 있는지 정량적으로 분석하였으며, 분석 결과를 토대로 BIM 코디네이터 투입 인원 및 수준에 대한 의사결정이 가능한 것을 확인하였다. 본 논문은 다음과 같은 시사점을 갖는다.

첫 번째로 프로젝트 참여자의 대기비용까지 고려하여 BIM 코디네이터의 성과 분석을 실시하였다. 기존 연구에서는 BIM 코디네이터의 투입에 따른 서비스 비용(e.g. 노동비용, 자본비용)만을 고려하였지만, BIM 코디네이터가 직접적으로 서비스를 제공하는 프로젝트 참여자들의 대기에 따른 비용도 고려하였다. 본 연구에서는 프로젝트 참여자들의 투입에 따른 서비스 비용(e.g. 엔지니어링 대가 기준)을 대기 비용을 산출하는 데 활용하였지만, 실제로 프로젝트 참여자들이 일을 통해 얻는 가치는 본 연구에서 활용한 대기 비용보다 매우 클 수 있다. 따라서 BIM 코디네이터의 수준, 인원수에 대한 전략적인 의사결정을 통해 직접적으로 인지되지 않으나, 프로젝트의 성과를 저해할 수 있는 대기 비용을 상쇄할 필요성이 있다.

두 번째로 BIM 코디네이터의 성과를 미시적으로 분석하기 위해 활용된 대기행렬 모형의 가능성을 발견하였다. BIM 코디네이터의 특정 task인 프로젝트 참여자가 요청한 BIM RFI의 해결에 초점을 맞춰 BIM 코디네이터의 성과를 프로젝트 참여자들의 성과와 연계하여 정량적으로 평가할 수 있었다. 기존 연구에서 밝혀왔던 BIM 투입에 따른 효과는 실무적인 관점에서 BIM이 직접적으로 영향을 미친 것인지, 아니면 다른 외적인 변수에 의한 것인지에 대한 논란이 존재하였다. 하지만 본 방식은 특정 task를 중심으로 BIM 코디네이터의 성과를 시스템 상에서 분석하였기 때문에 성과 분석에 대한 결과의 신뢰성에 문제가 없다. 또한 BIM 코디네이터가 수행하는 BIM RFI 처리 외의 또 다른 특정 task에 초점을 맞출 경우 다른 시각에서의 성과 측정이 가능할 것으로 판단된다.

세 번째로 사례 프로젝트들을 통해 사전 설계검증의 효과가 시공단계에도 영향을 미칠 수 있음을 확인할 수 있었다. 기존 BIM ROI 분석 연구에서 사전 설계검증의 경제적 효과는 밝혀졌으나,

시공단계의 참여자들의 성과에 어떠한 영향을 미치는지 분석된 적은 없다. 본 연구에서는 사전 설계 검증을 한 Project 1와 사전 설계 검증 없이 시공현장에 바로 BIM 코디네이터를 투입한 Project 2의 비교를 통해 Project 1의 프로젝트 참여자들의 대기 비용이 훨씬 적게 나타난 것을 확인하였다. 이는 사전 설계검증을 통해 설계품질이 제대로 확보될 경우 BIM 코디네이터는 시공단계의 계약 사항에 명시된 업무에 집중할 수 있으며, 이에 따라 프로젝트 참여자들은 실제 업무에 BIM을 활용할 수 있는 기회를 갖게 된다. 결과적으로 반복적인 BIM 활용을 통해 프로젝트의 성과를 향상시킬 수 있다.

이 밖에도 본 연구는 기존 연구들에 비해 BIM 코디네이터의 성과를 평가하기 위해 필요한 데이터의 수집이 매우 수월하다는 장점도 있다. 이러한 차원에서 본 연구의 결과는 BIM 적용 프로젝트의 인원(e.g. 프로젝트 참여자, BIM 코디네이터) 투입에 대한 실행 전략을 세우는 데 기여할 수 있다고 판단된다. 또한 기존 BIM ROI를 분석하는 데 Input 변수였던 BIM 서비스 비용 외에 대기 비용이라는 추가 변수를 제공함으로써 보다 정확한 BIM ROI를 분석하기 위한 가능성을 제공한다.

이러한 가능성에도 불구하고 본 연구가 갖는 한계점은 단일 프로젝트에서 수집된 BIM을 활용한 정보요청사항, 투입이력 등에 대한 정보를 활용하여 BIM 코디네이터의 업무 성과를 분석하였다는 점이다. 따라서 향후 연구 방향은 다양한 BIM 프로젝트에 대한 BIM 관련 정보요청사항, 투입이력, 인건비 등에 대한 데이터를 수집하여, 건설 프로젝트 관리 차원의 의사결정에 수집된 데이터와 분석 결과가 어떻게 활용될 수 있는지 비교분석이 필요할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 한양사이버대학교의 2018 학과경쟁력사업에서 지원받아 수행되었습니다.

## References

- Bernolak, I. (1997). Effective measurement and successful elements of company productivity: the basis of competitiveness and world prosperity, *International Journal of Production Economics*, 52(1-2), pp. 203-213.
- Dozzi, S. & AbouRizk, S. (1993). Productivity in Construction, in: National Research Council (Ed.) Ottawa, Canada.
- Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R. & Liston, K. (2011). *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors*, 2nd ed. Wiley, Hoboken, NJ, 2011.
- Fan, S., Skibniewski, M. & Hung, T. (2014). Effects of Building Information Modelling During Construction, *Journal of Applied Science and Engineering*, 17(2), pp. 157-166.
- Frederick S. & Mark S. (2010). *Introduction to Management Science, A Modeling and Case Studies Approach with Spreadsheets*, 4th Edition, McGrawHill, Chapter 11.
- Gu, N., London, K. (2010). Understanding and facilitating BIM adoption in the AEC industry. *Automation in construction*, 19(8), pp. 988-999.
- Halligan, D., Brown, J., Demsetz, L. & Pace, C. (1994). Action-response model and loss of productivity in construction, *Journal of Construction Engineering and Management*, 120(1), pp. 47-64.
- Ham, N. H., Ahn, B. J. & Kim, J. J. (2018). Specialty Contractor's Role and Performance Analysis for Digital Fabrication - Focusing on the case of irregular podium construction - *Journal of KIBIM*, 8(1), pp. 43-55.
- Ham, N. H. & Kim, J. J. (2015). A Case Study on BIM Operating and Performance Measurement in Construction Phase, *Journal of KIBIM*, 5(2), pp. 1-11.
- Han, S., Lee, S. & Peña-Mora, F. (2012). Identification and Quantification of Non-Value-Adding Effort from Errors and Changes in Design and Construction Projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 138(1), pp. 98-109.
- Han, S., Love, P.E.D. & Peña-Mora F. (2013). A system dynamics model for assessing the impacts of design errors in construction projects. *Mathematical and Computer Modelling*, 57, pp. 2044-2053.
- Joseph, J. (2011). DL4436: BIM Titles & Job Descriptions: How do They Fit In Your Organizational Structure?, Autodesk University 2011 Learn, Connect, Explore.

- Khanzode, A., Fischer, M. & Reed, D. (2008). Benefits and lessons learned of implementing building virtual design and construction (VDC) technologies for coordination of mechanical, electrical, and plumbing (MEP) systems on a large healthcare project. *Electronic Journal of Information Technology in Construction*. (Electronic Journal of Information Technology in Construction, 13, June 2008, pp. 324–342.
- Kim, E., Kim, J. & Huh, Y. (2016). A Case Study on Practical Uses of BIM in Building Construction, *Journal of Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, 32(12), Serial No. 338, December 2016
- Kim, H. J., Yoo, M. Y., Kim, J. J. & Choi, C. S. (2017). Performance Analysis of BIM Labor using Case Analysis, *Journal of KIBIM*, 7(3), pp. 31–39.
- Kim, S., Chin, S., Han, J. & Choi, C. (2017). Measurement of Construction BIM Value Based on a Case Study of a Large-Scale Building Project, *Journal of Management in Engineering*, 33(6), pp. 05017005–1–05017005–10
- Korea Land and Housing Corporation (2012). New headquarters (HQ) building project of the Korea Land and Housing Corporation (KLH) Request for Proposal(RFP).
- Lahdou, R. & Zetterman, D. (2011). BIM for Project Managers : How project managers can utilize BIM in construction projects. Chalmers University of Technology. Master's Thesis 2011:104
- Lawrence, P. (1997). *Workflow handbook*, John Wiley & Sons, Inc. New York, NY, USA ©1997 table of contents ISBN:0–471–96947–8
- Lee, G., Park, K. & Won, J. (2012). D3 City project — Economic impact of BIM-assisted design validation. *Automation in Construction*, 22, pp. 577–586.
- Little, J.D.C. (1961). A Proof of the Queuing Formula:  $L = \lambda W$ . *Operations Research*. 9(3), pp. 383–387.
- Merschbrock, C. & Munkvold, B. E. (2015). Effective digital collaboration in the construction industry – A case study of BIM deployment in a hospital construction project. *Computers in Industry*, 73, pp. 1–7.
- Moon, S., Forlani, J., Wang, X. & Tam, V. (2016a). Productivity Study of the Scaffolding Operations in Liquefied Natural Gas Plant Construction: Ichthys Project in Darwin, Northern Territory, Australia. *Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice*, 142(4), October 2016.
- Poirier, E., Staub–French, S. & Forgues, D. (2015). Measuring the impact of BIM on labor productivity in a small specialty contracting enterprise through action–research, *Automation in Construction* 58 (2015) pp. 74–84.
- Rahman, R., Alsafouri, S., Tang, P. & Ayer, S. (2016). Comparing Building Information Modeling Skills of Project Managers and BIM Managers based on Social Media Analysis. *International Conference on Sustainable Design, Engineering and Construction*, *Procedia Engineering*, 145, pp. 812 – 819.
- Rokooei, S. (2015). Building Information Modeling in Project Management: Necessities, Challenges and Outcomes. 4th International Conference on Leadership, Technology, Innovation and Business Management, *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 210, pp. 87 – 95.
- Singh, V., Gu, N. & Wang, X. (2011). A theoretical framework of a BIM–based multi–disciplinary collaboration platform. *Automation in Construction*, 20, pp. 134–144.
- Truong, N.K.V, Choi, Y., Kim, I., Shin, S. & Hwang, W.J. (2010). A Probabilistic Approach to Workflow Time Analysis for Business Process Management, *International Journal of Human and Social Sciences*, 5(12), pp. 811–815.
- Walasek, D. & Barszcz, A. (2017). Analysis of the adoption rate of Building Information Modeling [BIM] and its Return on Investment [ROI]. *Procedia Engineering*, 172 (2017), pp. 1227–1234.
- Zheng, L., Lu, W., Chen, K., Chau, K. & Niu, Y. (2017). Benefit sharing for BIM implementation: Tackling the moral hazard dilemma in inter–firm cooperation. *International Journal of Project Management* 35 (2017) pp. 393–405.
- Zhugue, H., Cheung, T. & Pung, H. (2001). A timed workflow process model, *The Journal of Systems and Software*, 55(3), pp. 231–243.