

우선순위 규칙을 적용한 BIM 기반 설계검증 성과 분석

BIM-based Design Verification Performance Analysis with Priority Rules Applied

허승하¹⁾, 심재형²⁾, 함남혁³⁾, 김재준⁴⁾

Huh, Seung-Ha¹⁾ · Shim, Jae-Hyeong²⁾ · Ham, Nam-Hyuk³⁾ · Kim, Jae-Jun⁴⁾

Received June 21, 2021; Received August 25, 2021 / Accepted August 27, 2021

ABSTRACT: BIM is one of the means of reducing the economic loss caused by design errors. These features of BIM have led to increased use of BIM. With the increasing use of BIM, several studies have been conducted to analyze the performance of BIM. As the importance of BIM staff is emphasized in the performance analysis of BIM, the human resource allocation of BIM staff can become an important research issue. However, there are few studies to measure the workforce effectiveness of BIM staff. Ham et al (2020) measured BIM workforce efficiency using FCFS queue model rules. Since design errors can have different effects on the project depending on the type, there are design errors that must be dealt with first. Therefore, in this study, a priority queue was used to solve design errors with high priority first. The performance of BIM-based design verification was analyzed by quantitatively analyzing the performance of BIM staff when the priority rule was applied to the design error processing sequence.

KEYWORDS: Priority Queue, Queuing Model, Human Resource Allocation, BIM Design Verification, BIM Performance Analysis

키워드: 우선순위 대기행렬, 큐잉 모델, 인적자원 분배, BIM 설계검증, BIM 성과분석

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

건설 프로젝트에서는 예상치 못한 사건들이 발생할 수 있다. 설계오류는 특히 시공단계까지 그 영향이 미치며 비용초과의 주요 원인이 된다(Lee et al., 2012). Building Information Modeling(BIM)은 설계 오류로 인한 경제적 손실을 줄일 수 있는 수단 중 하나로 인식되고 있다(Loert et al., 2010). 우리나라는 2012년부터 조달청에서 발주하는 500억 원 이상의 공공 공사에 BIM의 적용을 의무화하였다. 그 결과 BIM 사용이 증가하였고

BIM의 활용성과 성과분석에 대한 관심이 증가했다(Kim, 2017). 그러나 BIM은 초기 투자비용이 높고, BIM 관련 전문가가 많지 않다. 이로 인해 BIM 활용 측면에서 어려움이 있고, BIM의 성과분석을 위한 데이터가 부족하다(Seo et al., 2012).

BIM 사용의 증가로 인해 BIM의 성과를 분석하기 위한 여러 연구가 진행되었다(Lee et al., 2012). BIM의 성과를 분석하기 위해 Lee(2012)는 설계오류의 수를 기반으로 BIM의 성과를 분석하였다. 기존 연구들의 ROI(Return On Investment) 데이터수집 및 분석방법에서 한계를 찾고, RFI(Request for Information)의 수를 통해 BIM의 성과분석이 가능하다는 것을 증명하였다. Kim(2008)

¹⁾ 학생회원, 한양대학교 건축공학과 박사과정 (hhsh1017@naver.com)

²⁾ 학생회원, 한양대학교 건축공학과 박사과정 (sjh06040@naver.com)

³⁾ 정회원, 한양사이버대학교 건축도시건설공학부 조교수 (nhham@hycu.ac.kr) (교신저자)

⁴⁾ 정회원, 한양대학교 건축공학부 교수 (jjkim@hanyang.ac.kr)

은 RFI의 수를 활용하여 BIM 인력투입에 대한 성과를 분석하였다. 이처럼 BIM 성과분석에서 BIM 인력(BIM staff)의 중요성이 강조되고 있다(Kim, 2016). BIM 사용에서 요구되는 커뮤니케이션 및 협업이 일정 수준에 도달하려면, 숙련된 BIM 인력을 할당하여 프로젝트 참여자가 제기한 문제(Request For Information, RFI)를 관리해야 한다(Ham et al., 2018).

BIM 인력의 중요성이 강조됨에 따라 프로젝트 성과 또는 효율성에 영향을 줄 수 있는 BIM 직원의 인적 자원분배가 주요 문제가 될 수 있다(Ham et al., 2020). BIM 인력에 초점을 맞추는 연구는 기존의 BIM 투자 수익 분석(ROI)을 한 연구와는 다르다.

Neelamkavil(2012)은 BIM ROI 분석의 성과지표로 품질관리, 정시 완료, 전체 비용, 단위, 달러, 안전 6가지 외에 BIM과 관련된 투자 결정에 매개 변수를 포함하였다. 따라서 BIM ROI 분석의 새로운 매개 변수를 포함할 수 있는 연구가 필요했다. Ham et al., (2020)은 BIM 인력 효율성을 측정하기 위한 새로운 접근 방식을 제시하였다. 큐잉 모델(queueing model)을 통해 BIM 인력 효율성을 정량적으로 분석하여 적절한 BIM 직원의 수를 결정하는데 기여했다. 그러나 BIM 직원이 프로젝트 참여자가 제출한 RFI를 처리할 때, 대기행렬의 선입선출(First-Come First-Served, FCFS)규칙 만을 사용하여 분석하였다.

그러나 선입선출 규칙의 경우 영향도가 큰 설계오류에 대한 처리가 늦어져 건설 프로젝트의 공기 및 원가에 큰 영향을 줄 수 있다. 이에 본 연구는 설계오류의 영향도에 따라 우선순위 규칙을 적용했을 때의 BIM 직원 인력투입 효율성을 분석하였다. 이를 통해 BIM 직원 수에 대한 의사결정을 지원하고, 그에 따른 BIM 기반 설계검증의 효과를 정량적으로 분석하였다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구는 L 프로젝트의 설계오류 데이터를 기반으로 한다. 해당 프로젝트는 지하 5층, 지상 101층의 초고층 건축물로 패스트 트랙 공사이다. RFI의 수를 활용하여 BIM의 성과를 측정할 수 있기에 해당 프로젝트의 실시설계가 끝난 후, 시공 전 단계에 BIM 설계검증을 통해 발견된 1228개의 설계오류를 활용하였다.

Ham et al., (2020)은 해당 프로젝트의 1228개의 설계오류를 활용하여 BIM 인력을 정량화하였다. 그러나 큐잉 모델의 선입선출 규칙을 사용하여 BIM 직원이 설계오류를 처리할 때 '발견된 모든 설계오류를 순서대로 처리한다'는 가정하에 연구가 진행되었다. 실시설계 후 시공 전 단계에 BIM 설계검증을 통해 발견한 1000개가 넘는 설계오류를 시공 전 단계의 짧은 기간(54일) 안에 모두 해결하기는 어렵다.

Ham(2018)은 BIM 영향도에 따라 설계오류를 '상', '중', '하'로 분류하였다. 그 이유는 설계오류의 유형에 따라 프로젝트에 미치는 영향이 다르기 때문이다.

따라서 본 연구에서는 선입선출 규칙을 활용하지 않고 우선순위 규칙을 활용하였다. BIM 직원이 설계오류를 처리하는 순서에 우선순위를 주었을 때 BIM 직원 인력 효율성과 선입선출 규칙을 사용하였을 때의 BIM 인력 효율성을 비교하였다. 우선순위 기준에 따라 설계오류에 등급을 부여하고 큐잉 모델의 '우선순위 대기행렬'을 사용하여 정량적으로 분석하였다. 연구의 방법은 다음과 같다.

첫째, BIM 설계검증을 통해 발견된 1228개의 RFI에 프로젝트의 특성과 설계오류의 영향도를 고려하여 우선순위를 반영했다. 둘째, 우선순위 대기행렬을 사용하여 우선순위 규칙이 적용되었을 때의 BIM 직원의 성과를 분석하여 Ham et al., (2020)의 BIM 직원 성과지표와 비교하였다. 셋째, BIM 직원의 성과분석을 통해 우선순위 규칙이 적용되었을 때의 BIM 기반 설계오류 검증에 대한 성과를 정량적으로 분석하였다.

2. 이론적 고찰

2.1 BIM 설계검증

건축설계 프로젝트는 기본설계에서 실시설계 단계까지 여러 설계자의 작업을 거쳐 완성되지만, 이러한 과정에서 발생하는 설계오류는 시공단계에까지 영향을 미치며 공사비 증가, 공기 지연, 시공품질 저하 등의 문제를 유발한다(Her et al., 2012). 설계오류가 발생할 경우 공정지연과 추가 공사비의 발생으로 인해 시공자가 공사 기간 내에 공사를 완료할 수 없는 경우 발주처에 지체상금을 지불해야 한다(Kim, 2008).

PMBOK(Project Management Body of Knowledge)의 정의에 따르면 Figure 1과 같이 건설 프로젝트 생애주기에서 위험(Risk)과 불확실성(Uncertainty)은 프로젝트 초기에 가장 크며, 의사결정, 설계도서와 같은 산출물이 요구 수준을 충족하여 수용될 때 프로젝트의 생애주기 동안 감소하는 것을 확인할 수 있다. 설계단계에서 위험과 불확실성을 인지하게 되면 비용에 큰 영향을 미치지 않지만, 시공단계에서 인지할 경우 리스크의 증가 폭이 큰 것을 확인할 수 있다.

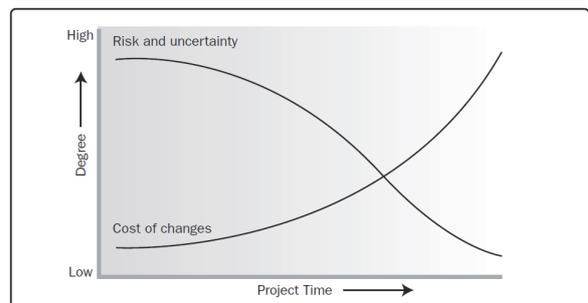


Figure 1. Impact of variable based on project time(PMI, 2013)

결과적으로 프로젝트 초기에 의사결정이 이뤄지면 프로젝트에 미치는 영향력이 크고, 비용도 최소화할 수 있다. 따라서 설계단계에서 시공 위험요소를 없애기 위해 설계변경을 통해 시공 위험요소를 없애야 한다(Gwon et al., 2013).

BIM은 각 공종별 도면, 정보, 모델을 통합함으로써 시공 이전에 설계 및 시공 오류를 발견하여 실제 발생하는 오류의 수를 절감할 수 있고, 설계검토 과정에서 발견되는 설계오류의 이력 관리를 가능하게 한다(Won et al., 2017). BIM 설계검증은 BIM 기반 프로젝트에서 가장 널리 활용되는 BIM의 기능 중 하나이다(Won et al., 2017). BIM 설계검증 효과의 극대화를 위해서는 설계단계에서 BIM 설계검증이 끝나는 것이 가장 효과적이다(Ham et al., 2018).

설계오류의 유형을 분류한 여러 연구가 진행되었다. Robert Lopez(2010)는 문헌 검토를 통해 설계오류를 분류하였고, 설계오류는 엔지니어링 프로젝트에서 문제가 될 수 있어 설계오류를 줄이기 위해 합동으로 채택되어야 하는 전략이 있어야 한다고 밝혔다. Kim(2008)은 설계오류 사례를 통해 설계오류의 유형 및 요인을 분석하고, 설계오류 관리시스템 구축 방안을 제시하였다. Her(2012)는 BIM 도입 이후의 설계오류 유형 분석을 통해 BIM 설계오류의 유형을 6가지로 나누었고 BIM 설계오류의 유형과 원인 간의 상관관계를 분석하였다.

이러한 설계오류의 유형 분류를 통해 진행된 BIM 설계검증 관련 연구로, Won et al., (2017)은 BIM 설계검토를 통해 발견된 설계오류의 발생원인, 발생 공종, 공사비 증가, 공기 지연, 품질 저하, 재작업 발생 여부 간의 관계를 로지스틱 회귀분석을 사용하여 통계적으로 분석하였다. Yang(2017)은 BIM 설계의 효과에 따라 국내 공공기관의 BIM 설계 활성화를 위해 BIM 설계에 대한 오류를 검증할 수 있는 시스템을 개발하였다. 이로 인해 BIM 설계 결과물들에 대한 활용성을 높일 수 있게 하였다. Ham(2018)은 초고층 건설 프로젝트에서 시공 전 단계에 BIM 기반 설계검증을 통해 발견된 설계오류에 의한 손실비용을 정량화하였다. 위 연구의 한계로 제시한 BIM 기반 현장 지원, BIM 기반 현장도면 작성, 단일프로젝트, 장기적인 관점에서 BIM 투자비용 및 수익을 고려한 BIM ROI이다.

위 연구의 한계점을 보완하기 위해 Ham et al., (2020)은 대기행렬의 다중 서버 대기열 모델을 사용한 성능 분석을 통해 건설 프로젝트에서 BIM 인력을 최적화하는 방법을 제안하였다. 3개 프로젝트의 BIM 직원 투자비용과 성과, 서버의 안정성을 분석하였다. 큐잉 모델을 통해 BIM 직원의 수를 최적화하기 위해 선입선출 규칙을 사용하여 정량적으로 분석하였다.

그러나 선입선출 규칙만을 사용한 연구의 한계를 보완하였을 때, BIM ROI는 다른 결과를 나타낼 수 있다. 그 이유는 모든 설계오류를 발견하는 순서대로 처리하게 되면, BIM 직원이 설계오류를 해결할 때 재시공이나 공기 지연의 가능성이 있는 심각한 설계오류들의 순서가 지연될 수 있기 때문이다. 따라서 본 연구에

서는 설계오류 처리순서에 우선순위 규칙을 반영하여 BIM 기반 설계검증의 효과를 개선하고자 한다.

2.2 설계오류 영향도

설계오류의 지속된 누적은 재작업이 요구되며, 재시공, 공기 지연 등으로 인해 비용 손실이 발생할 수 있다. 특히 초고층과 같은 복합시설은 설계오류와 같은 리스크들을 사전에 제거하지 않을 경우, 프로젝트 성과에 치명적인 영향을 줄 가능성이 있다(Ham et al., 2018). 다음 Figure 2는 AIA의 MacLeamy Curve이다. 1번 곡선을 통해 프로젝트 초기 단계에 비용 및 기능에 영향을 줄 수 있는 정도가 크다는 것을 알 수 있고 2번 곡선을 통해 프로젝트 진행에 따라 설계변경에 대한 비용이 급격히 증가함을 알 수 있다. 따라서 치명적인 영향을 줄 가능성이 있는 설계오류와 같은 리스크를 BIM 설계검증을 통해 사전에 제거해야 한다. BIM 설계검증을 통해 발견된 설계오류에 재시공, 공기 지연을 유발할 가능성이 있는 설계오류에 우선순위를 주고, 프로젝트 초기에 처리하여 위험과 불확실성을 최소화하여야 한다.

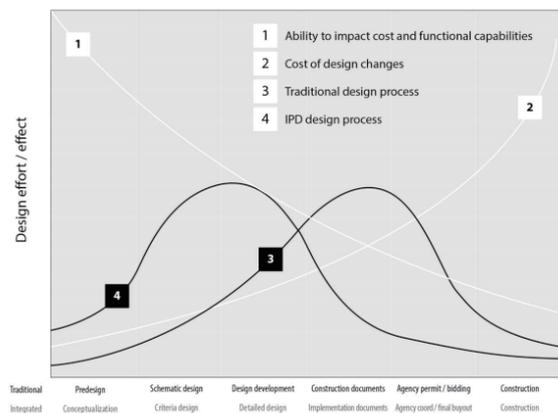


Figure 2. MacLeamy curve (The American Institute of Architects, 2007)

Kim(2003)은 설계오류로 인한 문제점은 공정지연, 추가 공사비 발생으로 인한 원가를 상승, 공정추진 중단으로 인한 피해, 품질 저하, 설계변경 업무로 인한 타 업무처리의 지연 등이 있고, 설계변경 기간으로 인한 공정지연은 설계오류의 내용과 종류에 따라 짧게는 7일에서 길게는 3~7개월 이상의 공정지연을 유발할 수 있다고 밝혔다. Kwon et al., 2013은 BIM 데이터를 활용의 장애 요인으로 BIM 모델의 완성도를 뽑았다. 이를 해결하기 위해 공종별 우선순위를 두고 설계자가 모델을 통합해야 하며 BIM 코디네이터의 역할이 가장 중요하다고 밝혔다. 그러나 BIM 코디네이터가 설계오류를 처리하는 순서에 우선순위에 대한 기준이 확립되어 있지 않다는 점이 연구의 한계이다. Ham(2018)은 BIM 기반 초고층 건설 프로젝트에서 설계오류의 경제적 영향에 대한 분

석을 통해 설계오류가 유형에 따라 프로젝트에 미치는 영향이 다를 수 있다는 것을 확인하였다. 1228개의 설계오류를 단순 설계 오류, 재작업 가능성이 있는 설계오류, 공기 지연 가능성이 있는 설계오류 세 가지로 분류하고, BIM을 사용하여 찾을 수 있는 여부를 BIM 영향도(상, 중, 하)로 분류하였다. 분석 결과 단순 설계 오류의 개수가 가장 많았지만 이를 해결하기 위한 용역비용은 가장 적었다. 그러나 재작업 가능성이 있는 설계오류와 공기 지연 가능성이 있는 설계오류는 BIM 영향도가 반영되지 않은 경우, 상당한 비용 증가가 발생하였다.

그렇기에 설계오류는 유형에 따라 프로젝트에 미치는 영향이 다를 수 있다. 실시설계 후 시공 전 단계에서 BIM 설계검증을 통해 발견된 많은 설계오류를 짧은 시간 안에 모두 해결하는 것은 어렵기에 설계오류의 영향도에 따라 우선적으로 처리되어야 하는 설계오류가 존재한다. 그러나 선행연구에서도 우선순위에 대한 기준이 존재하지 않는다. 따라서 본 연구에서는 사례분석에 앞서 설계오류의 영향도를 고려하여 BIM 직원이 설계오류를 처리하는 순서에 대한 우선순위 기준을 확립하였다.

2.3 대기행렬 모형

대기행렬 시스템(Queueing System)에서는 고객이 도착하는 사이의 시간을 도착 간 시간이라고 한다(Frederick and Gerald J.(2013). 고객이 대기열 시스템에 언제 도착할지 예측하는 것은 거의 불가능하기에 단위 시간당 평균 도착 고객의 수를 추정할 수 있다. 이를 평균 도착률이라고 하고 'λ'로 표현된다. 도착 간 시간의 확률 분포로 지수 분포를 가정하며, 지수 분포는 임의 도착 속성을 적절하게 설명하는 확률 분포로 이를 'Markov 속성'이라고 한다.

고객(Customer)은 서비스(Service)를 받기 위해 개별적으로 대기행렬 시스템에 도착하고 도착 즉시 서비스를 받지 못하면 대기행렬(Queue)에서 기다리게 된다. 고객은 도착한 순서대로 선입선출 규칙에 의해 서비스를 받게 되며, Figure 3과 같이 고객은 1개의 서버(server)에게 서비스받고 서비스가 완료되면 대기행렬 시스템을 떠나는 구조이다. 대기행렬 이론(Queueing Theory)은 여러가지 형태의 기다림에 대한 연구를 하며, 실제로 일어나는 여러 형태의 대기행렬 시스템을 표현하기 위해 대기행렬 모형(Queueing Model)을 사용한다(Frederick and Mark, 2010).

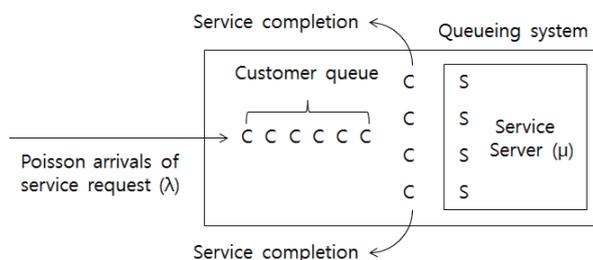


Figure 3. Multi server queueing system

대기행렬에서 '우선순위 대기행렬'은 서비스 순서를 제외하고 M/M/s 모형과 동일하기 때문에 M/M/s 모형에 대한 안정상태 분포를 우선순위 대기행렬에 적용할 수 있다. M/M/s 모형은 도착 간격 시간의 분포가 서로 독립적이고 동일한 지수 분포이며, 서비스 시간 또한 서로 독립적이고 동일한 또 다른 지수 분포이고, 서버의 수는 s명인 시스템이다. M/M/s 모형에서 서버 사용률 $\rho = \lambda / s\mu$ 로 정의되며, 정상적인 서비스를 수행할 수 있는 안정적인 상태를 위해 1보다 작거나 같아야 한다($\rho \leq 1$). 우선순위 규칙을 가질 경우, 우선순위가 낮은 고객에 대한 성능 척도를 희생시켜 높은 우선순위 고객의 성능 척도를 개선한다. 따라서 얼마나 개선을 해야 하는지를 결정하기 위해 각 우선순위 등급별로 시스템 내의 평균 대기시간과 평균 고객의 수와 같은 척도를 구해야 한다.

모든 n 에 대해 λ_n 이 상수 λ 라고 가정하면 안정상태에서 L 과 W 사이에 다음 관계가 성립한다. L (서비스 중인 고객을 포함한 시스템 내에 있는 평균 고객의 수), Lq (서비스 중인 고객을 제외한 평균 대기행렬의 길이), W (개별 고객의 시스템 내에서의 대기 시간), Wq (고객의 대기행렬에서의 대기시간) 중 하나라도 분석하면 나머지 성능 크기를 즉시 얻을 수 있어 서비스의 기본 상태를 분석할 수 있으며, L , W , Lq 및 Wq 사이의 관계식은 (1)~(3)과 같다. 위의 관계식으로부터 L , Lq , W , Wq 중 어느 하나의 값을 구하면 다른 값들은 쉽게 구할 수 있기에 위의 관계식은 매우 중요하다.

$$L = \lambda W. \tag{1}$$

$$Lq = \lambda Wq. \tag{2}$$

$$W = Wq + \frac{1}{\mu}. \tag{3}$$

설계오류는 우선순위 규칙에 의해 BIM 직원에게 처리되며 우선순위가 같을 경우, 도착순으로 처리가 된다. 따라서 대기행렬 시스템에 적합한 모형으로 우선순위가 있는 대기행렬 모형을 선택하였으며, 비 축출형 우선순위 모형이 적합하다. 비 축출형 우선순위는 우선순위가 높은 고객이 도착하였을 때, 서비스 중인 순위가 낮은 고객은 서비스가 끝날 때까지 계속 서비스를 받게 된다. 따라서 고객은 처리되어야 할 설계오류가 되고, 서버는 BIM 직원이 된다. 고객(설계오류)이 도착하면, 서버(BIM 직원)는 우선순위 규칙에 의해 서비스를 하고, 고객은 서비스가 완료되면 대기행렬을 떠난다. 안정상태에서 등급 k 고객의 시스템 내 평균 대기시간을 W_k 라고 하면 s =서버의 수, u =서버당 평균 서비스율, λ_i =등급 i 고객의 평균 도착률, $\lambda = \sum_{i=1}^N \lambda_i$, $r = \frac{\lambda}{u}$ 이며, 관계식 (4)~(7)와 같다.

$$(4) W_k = \frac{1}{AB_{k-1}B_k} + \frac{1}{u}, \quad k=1,2,\dots,N, \quad \text{여기서}$$

$$(5) A = s! \frac{su - \lambda}{r^s} \sum_{j=0}^{s-1} \frac{r^j}{j!} + su, \quad B_0 = 1,$$

$$(6) B_k = 1 - \frac{\sum_{i=1}^k \lambda_i}{su} \text{이 결과는 (4)를 가정한다.}$$

$$(7) \sum_{i=1}^k \lambda_i < su.$$

따라서 등급 k 는 안정상태에 도달할 수 있다. 리틀의 공식을 등급별로 적용할 수 있기에 L_k 를 안정상태에서 대기행렬 시스템 내에 있는 평균 등급 k 고객의 수라고 하면, $L_k = \lambda_k W_k, k = 1,2,\dots,N$ 이다. 등급 k 고객의 대기행렬에서의 평균 대기시간은 W_k 에서 $1/u$ 를 빼면 되고, 평균 대기행렬의 길이는 여기에 λ_k 를 곱해주면 된다. 리틀의 공식 관계식 (1)~(3)을 이용하여 다른 주요 성능 척도를 계산할 수 있다.

여러 형태의 기다림에 대해 다양한 분야에서 많은 연구가 진행되었다. TUGBA and EMRE (2003)는 외래 환자들의 예약 진료 시간을 조절하여 고객의 만족도를 높이는 연구를 통해 고객의 대기시간을 최소화하였다. Cayirli(2009)는 대기행렬 모형을 통해 병원에서 서비스받는 환자와 진료를 시행하는 의료진 간의 대기 시간과 유휴시간을 최소화하는 연구를 하였다. GO(2013)는 함정 정비 최적 예약시간 산정을 위해 예약 도착 대기행렬 모형을 통해 비용을 최소화할 수 있는 최적 예약 간격을 결정할 수 있는 방법론 연구를 하였다. 이처럼 대기행렬 이론을 통해 다양한 분야에서 기다림에 관한 연구가 진행되었다. 현재는 건설 분야에서도 연구방법론으로 대기행렬 이론이 적용되고 있다.

건설 분야에서 대기행렬 이론을 적용한 Ham and Kim(2015)은 대기행렬 모형을 활용하여 BIM 코디네이션 서비스의 효율을 파악하고 그에 따른 의사결정 지원방안을 제시하였다. Kim(2018)은 대기행렬 모형을 활용하여 BIM 사례분석에서 시공단계 BIM 인력 성과 분석을 통해 BIM 인력의 수는 대기시간에 직접적인 영향을 미치는 것을 확인하였다. Ham(2018)은 대기행렬 모형을 활용하여 BIM 코디네이터 업무성과 평가 모델을 통해 BIM 코디네이터의 성과를 분석하였다.

이러한 선행 연구는 대기행렬 이론을 통해 건설 분야에서 BIM 인력의 성과 분석과 서비스 효율에 관한 분석을 하였다. 그러나 한계점은 선입선출 규칙만을 사용하여 분석하였다는 것이다. 대기행렬 이론의 선입선출 규칙을 사용하지 않고, BIM 직원이 RFI를 처리할 때 우선순위 규칙을 사용한다면 성과는 달라질 수 있다. 따라서 우선순위 규칙이 적용되었을 때의 BIM 직원의 성과지

표를 선입선출 규칙을 사용하였을 때와 비교하여 최적의 BIM 직원의 수를 정량화하고자 우선순위 대기행렬 모형을 활용하였다.

3. 설계오류 우선순위 규칙 도출

3.1 사례 프로젝트 개요

사례 프로젝트인 L프로젝트는 A사가 종합 계약자로 참여한 최대 높이 412m의 초고층 건설 프로젝트로, 패스트트랙 방식으로 진행되었고 평면을 코어부와 외주부로 구분하여 분할 시공하는 코어 선행공법(Core-Wall)을 채택하였다(Park, 2020). 패스트트랙 공사는 설계와 시공이 병렬적인 방법으로 단계적으로 이루어지며 전통적인 건설사업 방식에 비해 공기 단축과 사업비가 절감되기 위해 프로젝트 초기에 설계오류 관리를 통해 간섭을 최소화 하여야 한다(Park, 2004). 코어월(Core-Wall) 선행공법은 코어의 웅벽이 외부보다 먼저 올라가는 공법으로 코어부가 올라가면서 외부는 후행하여 골조 공사가 진행되며(Shin et al., 2007) 공기 단축과 비용 절감, 품질확보 등을 할 수 있다. 따라서 프로젝트의 특성상 사업 초기에 설계오류 관리가 중요하다.

그러나 실시설계 완료 후 시공 전 단계에 설계도서 품질검토 과정에서 건설회사가 계약금액 외의 비용을 추가로 부담할 수 있는 리스크를 발견하였다. 이러한 리스크를 예방하기 위해 A사는 C사와 BIM 기반 시공 서비스 32억 원의 계약을 하였다. 낮은 설계품질을 해결하기 위해 6명의 BIM 직원이 설계검증 작업에 참여하였으며 프로젝트 개요는 다음 table 1과 같다.

Table 1. Project overview

Project	Contents
Project name	Haeundae L project
Number of floors/Height	5 basement levels, 101 ground levels
Applied construction method	Reinforced concrete, Core-Wall
Wing of building	<ul style="list-style-type: none"> · Landmark tower[5 basement levels ~ 101 levels above ground, 421m] · Residential tower A[5 floors below ground-85 floors above ground, 333m] · Residential tower B[5 floors below ground-85 floors above ground, 333m] · Podium[1st above ground ~ 7th above ground]
Building area	35.751m ²
Total area	661,134m ²
Total construction cost	1.4 trillion won
Construction completed	2019

해당 프로젝트는 실시설계가 끝난 후 시공 전 단계에 BIM 기반 설계검증을 통해 1228개의 설계오류가 발견되었다. 설계검증 이후 시공 전 단계의 짧은 기간(54일) 안에 6명의 BIM 직원이 모

든 설계오류를 처리하는 것을 어렵다. 따라서 Ham et al., (2020)은 다중 서버 대기열 모델(M/M/s)을 선택하여 성능 분석을 통해 BIM 인력을 최적화하였다.

Table 2. Descriptions of BIM staffing in L-project(Ham et al., 2020)

division	Project
Total BIM RFIs	1228
BIM staff input period	54 days
Number of BIM staff members (s)	6
Mean arrival rate (λ)	22.74
Mean server rate (μ)	3
Server utilization rate ($\rho = \lambda/s\mu$)	1.26

BIM 직원이 6명인 경우, 서버 사용률(ρ)은 1.26으로 대기열이 안정적인 상태에 도달하지 못했다. 이 경우 대기행렬을 사용하여 성과지표를 계산할 수 없다. 따라서 건설 전 단계에서 BIM 기반 설계검증을 통해 설계를 검증한 프로젝트 직원 $s=11$ 을 사용하여 분석하였다. 이 경우 $\rho=0.69$ 로 안정상태이고 $\rho \leq 1$ 을 충족하여, 대기행렬을 통해 성과지표를 계산할 수 있으며 인력분석에 대한 지표는 다음 table 2와 같다. 위의 표를 대기행렬 모형으로 분석한 결과는 다음과 같다. $L=7.99$, $Lq=0.41$, $W=0.35$ 일, $Wq=0.01$ 일이었다. RFI 피드백이 참여자에게 반환되고 BIM 파일의 업데이트까지 걸린 평균 대기시간이 약 0.35 일이다(하루 8시간 근무, 2.8 시간). 위의 성과지표는 대기행렬 모형의 선입선출 규칙을 활용하여 분석한 결과이다.

BIM RFI를 프로세스 단위로 분류하거나 선입선출 규칙을 사용하지 않고 RFI 처리순서에 우선순위 규칙을 적용하면 성과지표는 달라질 수 있다. 따라서 본 연구에서는 우선순위 규칙을 적용하여 BIM 직원 수에 따른 성과지표를 도출하여 최적의 BIM 직원의 수를 정량적으로 분석하였다. 이를 통해 BIM 기반 설계검증의 성과를 개선하고자 한다.

3.2 설계오류 우선순위 규칙

해당 프로젝트의 특성에 따라 설계오류 처리순서에 우선순위 기준을 확립하기 위해 D 사 설계팀과 인터뷰를 진행하였다. 인터뷰 결과 실시설계 납품 후 시공 전 단계에서 BIM 설계검증을 통해 설계오류 발견 시 100% 수정은 힘들다는 답변을 받았다. 그 이유는 착공 시점부터 기초(PF/기둥)는 시공이 진행되기 때문에, 구조계산부터 다시 해야 하는 점을 고려하면 수정이 불가능하기 때문이다. 더하여 기초공사가 진행되고 있는 상태에서의 지하부 구조가 수정되는 사항은 반영이 힘들다는 답변을 받았다.

초고층, 패스트트랙 공사에서 설계오류 발견 시 수정을 해야 하는 우선순위는 순타 공법일 경우, 협의공종 중 지하/ 지상 1층/ 기준층 / 옥상의 순이었다. 타다운 공법을 적용하는 등의 특수 사

업지는 따로 고려하고, 특히 지하층의 경우 공사의 진행을 멈출 수 없기에 우선적으로 고려되어야 한다는 답변을 받았다. 따라서 본 연구에서 BIM 직원이 설계오류를 처리하는 순서를 공정의 진행에 따라 지하의 설계오류, 지상의 설계오류, 협의공종 설계오류로 분류하였다. 해당 프로젝트가 초고층 건축물이고, 패스트트랙 공사이기 때문에 지하의 설계오류를 가장 먼저 처리해야 하고 지상의 설계오류가 처리되어야 한다. 그 중 협의공종은 심각한 공기 지연을 유발할 수 있기에 우선순위 첫 번째는 지하의 설계오류, 두 번째는 협의공종 설계오류, 세 번째는 지상의 설계오류로 분류하여 분석하였다. 더하여 공정의 진행에 따라 협의공종 설계오류를 지하의 협의공종 설계오류와 지상의 협의공종 설계오류로 나누어 분석하였을 경우의 성과지표를 추가적으로 분석하였으며 설계오류 우선순위 분류 기준은 다음 table 3과 같다.

Table 3. Comparison of FCFS rules and priority rules

First Come, First Serve(FCFS)	BIM-based design error priority classification criteria			
	Priority	BIM Impact	Consultation work (underground,ground)	Consultative work (one category)
No priority distinction	1st	High	Underground work	Underground work
	2nd	Middle	Underground consultation work	Consultation work
	3rd	Low	Ground consultation work	Ground work
	4th ...		Ground work	

우선순위가 있는 대기행렬 모형에서 대기행렬 규칙은 우선순위에 근간을 둔다. 따라서 서비스하기 위해 대기행렬 중에 고객을 선택하는 순서는 미리 정해진 우선순위에 의하여 결정된다. BIM 직원은 설계오류의 도착 순서대로 처리하는 선입선출 규칙을 사용하지 않고, 발견된 모든 설계오류에 우선순위를 적용하여 등급별 우선순위에 따라 처리하였다.

우선순위가 1($n=1$)인 경우는 바로 처리를 하지 않으면 공기 지연, 재시공 등의 문제가 생길 수 있는 경우이다. 해당 프로젝트의 예로 대림산업 설계팀 인터뷰의 결과와 선행 연구를 바탕으로 지하의 설계오류가 가장 우선시 되어야 하는 경우이다. 우선순위가 2($n=2$)인 경우는 상황이 악화되는 것을 방지하기 위해 빠른 처리가 필요한 경우이다. 해당 프로젝트의 예로 지하의 협의공종이 될 수 있다. 우선순위가 3($n=3$)인 경우는 처리가 지연되어도 크게 영향을 미치지 않는 경우이다. 해당 프로젝트의 예로 지상의 협의공종 설계오류가 이에 속한다. 우선순위가 4($n=4$)인 경우는 가장 마지막에 처리해도 되는 경우이다. 해당 프로젝트의 예로 지상의 설계오류가 이에 속한다. 위의 우선순위 순서와 기준은 공정의 진행, 특수 사업지, 공법에 따라 변할 수 있다.

4. 우선순위가 적용된 BIM 기반 설계검증 효과분석

4.1 우선순위 규칙에 따른 설계오류 데이터 분류

사례 프로젝트가 코어월(Core-Wall) 선행공법을 채택하였기 때문에 지하의 코어 부분을 가장 먼저 착공하게 된다. 따라서 지하의 설계오류가 먼저 해결되어야 하고 지상의 설계오류를 처리하여야 한다. 더하여 협의공종 설계오류는 심각한 공기 지연을 유발할 수 있기에 두 가지로 나누어 분석하였다. 본 연구는 선입선출 규칙을 사용하였을 때와 우선순위 규칙이 적용되었을 때를 비교하고자 한다. 우선순위 규칙을 적용하여 비교하고자 하는 기준은 다음과 같다.

첫째, BIM 영향도에 따른 설계오류 분류이다. table 4의 BIM 영향도에 따른 설계오류 분류에서 BIM 영향도 '상'은 우선순위 1, BIM 영향도 '중'은 우선순위 2, BIM 영향도 '하'는 우선순위 3이 된다. 이처럼 BIM 영향도에 따라 우선순위를 주었을 경우의 성과지표를 분석하였다.

Table 4. Classification of design errors according to BIM impact(Ham et al., 2018)

Classification of design errors		BIM Impact			Total
		High	Middle	Low	
structure	different drawing dimensions	242	51	52	345
	Inconsistency	87	36	35	158
	Missing drawings	115	9	31	155
architect-ure	different drawing dimensions	141	36	8	185
	Inconsistency	81	7	0	88
	Missing drawings	94	5	1	100
MEP	different drawing dimensions	0	2	0	2
	Inconsistency	0	18	0	18
	Missing drawings	0	1	0	1
Mul-ti Work	Architectural-Structural Interference	15	12	9	36
	MEP-Structure Interference	0	97	5	102
	MEP- Architectural Interference	0	22	0	22
	MEP-Building-Structural Interference	0	16	0	16

둘째, 프로젝트의 특성과 설계오류 발생 부위별 공정진행 순서의 우선순위 분류이다. 지하, 협의공종, 지상의 설계오류로 분류하였고 그 중 협의공종 설계오류는 심각한 공기 지연을 유발할 수 있기에 두 가지로 나누어 분석하였다. 하나, 협의공종 설계오류를 지하의 협의공종 설계오류와 지상의 협의공종 설계오류로 분류하여 분석하였다. 이 경우 우선순위는 1)지하의 설계오류, 2)지하의 협의공종 설계오류, 3)지상의 협의공종 설계오류, 4)지상의 설계오류로 4개의 우선순위로 나누어 분석하였다. 둘, 협의공종 설계오류를 하나의 카테고리 묶어서 분석하였다. 이 경우 우선순위는 1)지하의 설계오류, 2)협의공종 설계오류, 3)지상의

설계오류로 3개의 우선순위로 나누어 분석하였다.

다음 table 5는 설계오류 발생 부위별 개수에 대한 분류표이다. 우선순위 기준에 따라 우선순위 규칙이 적용되었을 때의 BIM 직원 성과분석을 통해 선입선출 규칙의 성과와 비교하여, 우선순위 규칙이 적용되었을 때의 BIM 기반 설계오류 검증의 효과를 분석하였다.

Table 5. Number of design errors per part

division		Number of design errors	
underground design error		224	
consultation work	underground consultation work	47	196
	ground consultation work	149	
ground design error ⁴⁷		808	

4.2 우선순위 대기행렬 모형을 활용한 성과 분석

선입선출 규칙이 적용되었을 때의 성과와 우선순위 규칙이 적용되었을 때의 성과를 비교하기 위해 서버 사용률 $\rho \leq 1$ 을 만족할 수 있는 $s=8$ 부터 $s=11$ 까지 분석을 수행하였다. 우선순위 대기행렬을 사용하여 W, Wq 값에 대한 성과는 분석하지 않았다. 그 이유는 W와 Wq를 이용하면 서비스를 받는 고객의 평균 대기시간을 구할 수 있는데 'W-Wq'는 모두 0.33으로 같은 결과를 나타내었기 때문이다. 서버(BIM 직원의 수) 수의 변화에 따른 L과 Lq 값의 비교를 통해 시스템 내에 있는 평균 고객의 수와 서비스 중인 고객을 제외한 대기행렬의 길이를 비교하였다. 이를 통해 해당 프로젝트의 서버 수의 적정 인원을 파악할 수 있다.

첫째, table 4의 BIM 영향도(상,중,하)에 따라 우선순위를 주었다. 우선순위 규칙이 적용되었을 때 서버 수에 따른 성과지표를 비교하였다. BIM 영향도 '상'은 우선순위 1($n=1$)이 되고 BIM 영향도 '중'은 우선순위 2($n=2$)가 된다. BIM 영향도 '하'는 우선순위 3($n=3$)이 된다. BIM 영향도에 따른 우선순위 대기행렬 모형의 서버 수 변경과 선입선출 규칙의 성과지표를 비교한 것은 다음 table 6과 같다.

Table 6. Priority queue according to BIM Impact

number of server/division		8	9	10	11
L	FCFS	22.83	10.43	8.59	7.99
	priority 1	0.97	0.92	0.90	0.88
	priority 2	2.27	2.10	2.02	1.97
	priority 3	19.43	7.37	5.66	5.13
Lq	FCFS	15.25	2.84	1.01	0.41
	priority 1	0.10	0.05	0.03	0.01
	priority 2	0.34	0.18	0.09	0.04
	priority 3	14.65	2.59	0.88	0.34
W	FCFS	1.00	0.45	0.37	0.35
	priority 1	0.37	0.35	0.34	0.33
	priority 2	0.39	0.36	0.34	0.34
	priority 3	1.35	0.51	0.39	0.35
Wq	FCFS	0.67	0.12	0.04	0.01
	priority 1	0.03	0.02	0.01	0.00
	priority 2	0.06	0.03	0.01	0.00
	priority 3	1.02	0.18	0.06	0.02

s=8인 경우 우선순위가 높은(n=1) 설계오류는 L과 Lq가 0.97, 0.1로 빠르게 처리된다. 그러나 우선순위가 낮은(n=3) 경우 L과 Lq 성과가 19.43, 14.65로 그래프가 큰 폭으로 증가한다. s=9인 경우 우선순위가 높은(n=1, 2) 설계오류는 들어오는 즉시 처리된다. 우선순위가 낮은(n=3) 경우에도 L과 Lq값이 7.37, 2.59로 선입선출 규칙일 때 s=11을 사용하여 분석하였을 때의 L값(7.99)보다 성과지표가 개선된 것을 확인할 수 있다. Lq는 선입선출 규칙일 때의 성과보다 높게 나타난다. 이는 당연한 결과라고 판단된다. 시스템 내에 있는 평균 고객의 수는 줄었지만, 서비스 중인 고객을 제외한 평균 대기행렬의 길이는 늘어난 것인데 비교하고자 하는 선입선출 규칙의 서버 수는 11이고, 해당 분석의 서버의 수는 9명이기 때문이다. 따라서 서버의 수가 줄어들었기 때문에 평균적인 대기행렬의 길이는 길어질 수 있다. s=10, 11인 경우 n=1~4의 모든 경우에서 선입선출 규칙의 s=11일 때의 L과 Lq 성과보다 우수한 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 우선순위 대기행렬을 사용하면 선입선출 규칙을 사용하였을 때 보다 성과지표가 우수한 것을 확인할 수 있다.

둘째, 설계오류 처리 기준을 지하, 지하의 협의공중 설계오류, 지상의 협의공중 설계오류, 지상의 설계오류 4가지로 나누어 분석하였다. 우선순위 1은 지하의 설계오류, 우선순위 2는 지하의 협의공중 설계오류, 우선순위 3은 지상의 협의공중 설계오류, 우선순위 4는 지상의 설계오류이다. 우선순위에 따른 우선순위 대기행렬 모형의 성과지표는 다음 table 7과 같다.

Table 7. Consultation work (underground-ground) priority queue

number of server/division		8	9	10	11
L	FCFS	22.83	10.43	8.59	7.99
	priority 1	1.55	1.47	1.43	1.40
	priority 2	0.33	0.31	0.30	0.29
	priority 3	1.09	1.00	0.96	0.94
	priority 4	19.39	7.58	5.87	5.33
Lq	FCFS	15.25	2.84	1.01	0.41
	priority 1	0.17	0.09	0.05	0.02
	priority 2	0.04	0.02	0.01	0.00
	priority 3	0.17	0.09	0.04	0.02
	priority 4	14.40	2.59	0.88	0.35
W	FCFS	1.00	0.45	0.37	0.35
	priority 1	0.37	0.35	0.34	0.33
	priority 2	0.38	0.36	0.34	0.34
	priority 3	0.39	0.36	0.35	0.34
	priority 4	1.29	0.50	0.39	0.35
Wq	FCFS	0.67	0.12	0.04	0.01
	priority 1	0.04	0.02	0.01	0.00
	priority 2	0.05	0.02	0.01	0.00
	priority 3	0.06	0.03	0.01	0.00
	priority 4	0.96	0.17	0.05	0.02

s=8인 경우, 우선순위가 높은 설계오류(n=1, n=2)는 설계오류가 바로 처리될 수 있다. 그러나 우선순위가 낮은(n=4) 경우 L, Lq값이 19.39, 14.4로 우선순위가 낮은 설계오류에 대한 성

과는 좋지 못하다. s=9인 경우, 우선순위가 높은 설계오류(n=1, n=2)는 설계오류가 바로 처리될 수 있다. 더하여 우선순위가 낮은(s=4) 경우에도 선입선출 규칙의 성과 L값 보다 좋은 결과를 나타내고 있다. BIM 영향도에 따른 분류에서도 마찬가지로 s=9일 때 우선순위가 낮은(n=4) 경우에도 선입선출 규칙의 성과보다 좋게 나타났다. Lq는 BIM 영향도에 따른 분류와 같이 높게 나타났다. s=10, 11인 경우 모두 선입선출 규칙의 성과지표보다 월등히 개선된 것을 확인할 수 있다. 위 경우도 BIM 영향도에 따른 분류에서와 마찬가지로 우선순위 대기행렬을 사용하였을 때 서버의 수를 줄일 수 있다는 결론을 도출하였다.

셋째, 설계오류 처리 기준을 지하, 협의공중, 지상으로 분류하여 우선순위 대기행렬을 사용한 분석 결과이다. 해당 분석은 지하, 지상의 협의공중 설계오류를 하나로 묶어서 분석하였다. 그 이유는 협의공중을 지하와 지상의 설계오류로 나누었을 때의 성과지표와, 협의공중을 하나의 카테고리로 분류하였을 때의 성과지표를 분석하기 위함이다. 지하, 협의공중, 지상의 순서에 따른 우선순위 대기행렬 모형의 서버 수 변경 성과지표는 다음 table 8과 같다.

Table 8. Underground-consultation work-ground priority queue

number of server/division		8	9	10	11
L	FCFS	22.83	10.43	8.59	7.99
	priority 1	1.55	1.47	1.43	1.40
	priority 2	1.43	1.32	1.26	1.23
	priority 3	19.39	7.58	5.87	5.33
Lq	FCFS	15.25	2.84	1.01	0.41
	priority 1	0.17	0.09	0.05	0.02
	priority 2	0.22	0.11	0.06	0.03
	priority 3	14.40	2.59	0.88	0.35
W	FCFS	1.00	0.45	0.37	0.35
	priority 1	0.37	0.35	0.34	0.33
	priority 2	0.39	0.36	0.35	0.34
	priority 3	1.29	0.50	0.39	0.35
Wq	FCFS	0.67	0.12	0.04	0.01
	priority 1	0.04	0.02	0.01	0.00
	priority 2	0.06	0.03	0.01	0.00
	priority 3	0.96	0.17	0.05	0.02

table 7과 table 8을 분리하여 분석한 이유는 협의공중을 지하와 지상으로 나누었을 때와 하나로 묶어 설계오류 분류 기준을 주었을 때의 차이를 확인하고자 하였다. 확인 결과 큰 차이가 없는 것을 확인할 수 있다. s= 8인 경우 우선순위가 높은 설계오류는 바로 처리가 될 수 있다. 그러나 우선순위가 낮은(n=3) 경우 L과 Lq값이 19.39, 14.4로 협의공중을 지하와 지상으로 나누었을 때의 분석과 같이 우선순위가 낮은 설계오류는 성과가 좋지 못하다. s=9인 경우 우선순위가 높은 설계오류는 바로 처리된다. 더하여 우선순위가 낮은(n=3, n=4) 경우에도 선입선출 규칙의 L값 보다 좋은 결과를 나타낸다. BIM 영향도에 따른 분류와 협의공중을 지하와 지상으로 나눈 분류에서도 같은 결과를 보였다. Lq 또

한 BIM 영향도에 따른 분류와 협의공종을 지하와 지상으로 나눈 분류와 같이 선입선출 규칙을 적용하였을 때 보다 높게 나왔다. $s=10$, 11 인 경우 모두 위 두 분석과 같이 선입선출 규칙의 성과지표보다 개선된 것을 확인할 수 있다.

결론적으로 우선순위가 높고 서버의 수가 많으면 L 값은 크게 변하지 않지만, 우선순위가 낮은 경우 서버의 수가 많아짐에 따라 대기시간이 3배 이상 감소하는 것을 확인하였다. $s=11$, $n=3$ 의 경우 $L=5.33$, $L_q=0.35$ 로 선입선출 규칙을 적용하였을 때의 $L=7.99$, $L_q=0.41$ 보다 시스템 내에 있는 평균 고객의 수와 평균 대기행렬의 길이가 감소하였다. 위의 연구 결과는 BIM 직원이 설계오류를 처리하는 우선순위 기준을 초고층, 패스트트랙 공사인 프로젝트의 특성을 감안하여 공정의 진행 순서에 따라 주었기 때문에 두 가지로 해석할 수 있다.

첫째, 우선순위가 낮은 설계오류는 시공이 진행되는 기간이 있기에 후에 처리해도 늦지 않기에 $s=8$ 이어도 된다. 그 이유는 실시설계 후 시공 전 단계에 BIM 설계검증을 통해 발견한 1228개의 설계오류를 54일 안에 모두 처리하기는 힘들다. 그러나 우선순위를 주어 공사 진행 순서에 따라 지하의 설계오류를 처리하고, 지하의 협의공종을 처리한다면 지하공사가 진행되는 동안 우선순위가 낮은 설계오류를 처리할 수 있다. 본 연구에서는 지상의 협의공종 설계오류와 지상의 설계오류이다. 따라서 우선순위가 낮은 설계오류의 경우 L 과 L_q 값이 높아도 공정진행에는 무리가 없기에 $s=8$ 이어도 된다는 해석이다.

둘째, 서버의 수가 적고 우선순위가 낮은 설계오류(ex: $s=8$, $n=4$)는 평균 고객의 수와 대기행렬의 길이가 길고 그래프가 위로 치솟는다. 따라서 서버의 수를 늘려 우선순위가 낮은 설계오류를 안정상태에 들어올 수 있도록 해야 한다는 것이다. 우선순위 대기행렬을 사용하면 $s=9$ 일 때 우선순위가 낮은($n=4$) 경우에도 선입선출 규칙을 적용했을 때의 L 값 보다 낮다. 이 경우 서비스 중인 설계오류를 포함한 시스템 내의 평균 설계오류의 수에 대한 성과가 개선되었기 때문에 $s=9$ 도 안정상태이다. $s=10$ 인 경우와 $s=11$ 인 경우, L 과 L_q 는 우선순위가 높은 경우와 낮은 경우 모두 큰 차이가 없었다. 우선순위가 높은 설계오류를 빠르게 처리할 수 있고 우선순위가 낮은 경우도 대기시간이 짧은 것을 확인할 수 있다. 이는 서버가 안정상태에 들어왔기 때문이라고 판단이 된다.

Ham et al., (2020)은 선입선출 규칙인 대기행렬 모형에서 TC(Total Cost) 분석을 통해 해당 프로젝트 최적의 BIM 직원의 수가 10명이라는 결론을 도출하였다. 그러나 본 연구의 목적인 BIM 직원이 프로젝트 참여자의 RFI를 처리할 때 우선순위를 주었을 경우 BIM 직원의 수는 1명이 단축된 9명이 가능하다. 이 경우 BIM 직원에 대한 인건비 절감이 되며, TC에도 영향을 미칠 수 있다. 우선순위를 주어 설계오류를 처리할 때의 BIM 직원에 대한

성과지표가 선입선출 규칙을 사용했을 때의 성과지표보다 우수하다는 것을 정량적으로 분석하였다.

5. 결론 및 향후 연구 진행 방향

본 연구에서는 'L 프로젝트'의 시공 전 단계에 BIM 설계검증을 통해 발견된 1228개의 설계오류를 기반으로 하였다. BIM 직원이 설계오류를 처리하는 순서에 선입선출 규칙을 적용했을 때와 우선순위 규칙을 적용했을 때의 성과지표를 정량적으로 분석하여 BIM 직원의 수를 최적화하였다. 서버(BIM 직원)의 수와 우선순위에 따른 L (서비스 중인 설계오류를 포함한 시스템 내의 평균 설계오류의 수)과 L_q (서비스 중인 설계오류를 제외한 평균 대기행렬 길이)를 통해 성과지표를 분석하였다. 서버의 수와 우선순위에 따라 성과지표는 큰 차이가 있음을 확인하였다. 결론적으로 서버의 수에 따른 성과지표는 두 가지의 해석이 가능하다.

첫째, 우선순위가 낮은 설계오류($n=3$ 혹은 $n=4$)인 경우, 지하 공사 기간이 있기에 성과가 효율적이지 않아도 우선순위에 따라 설계오류가 처리된다면 $s=8$ 이어도 된다고 판단된다. 그 이유는 공정의 진행에 따라 우선순위를 주었기 때문에 지하의 골조가 진행되는 동안 우선순위가 낮은 설계오류도 모두 해결을 할 수 있기 때문이다.

둘째, 서버의 수가 적고 우선순위가 낮은 경우, 우선순위가 낮은 설계오류에 대한 성과는 효율적이지 않다. 따라서 서버의 수를 늘려 우선순위가 낮은 설계오류가 안정상태에 들어올 수 있도록 해야 한다. 이때의 BIM 직원은 $s=9$ 인 경우이다. 선입선출 규칙이 적용되었을 때의 성과지표보다 시스템 내에 있는 평균 대기행렬의 길이가 감소하였기 때문이다. 위 2가지 결론은 현장의 상황에 따라 바뀔 수 있다. 그 이유는 모든 현장의 상황이 같지 않고 공정이 다르기에 우선순위를 주는 규칙이 바뀔 수 있다.

결론적으로 선입선출 규칙을 사용하였을 때의 대기행렬 성과보다 우선순위 규칙을 주어 처리했을 경우 성과가 우수한 것을 확인하였다. 이로 인해 서버(BIM 직원)의 수도 줄어들 수 있다. 위 경우 서버의 수가 줄어들어 따라 인건비와 TC가 개선될 수 있다. 그러나 단일 프로젝트를 통해 결론을 도출하였기에, 여러 사례 프로젝트를 통해 성과를 분석한다면 보다 정확한 성과지표를 도출할 수 있다. Ham et al., (2020)의 연구에서는 $s=10$ 일 때 TC(Total Cost)가 가장 낮았다. 그러나 우선순위 규칙이 적용되면 $s=9$ 일 때도 성과지표가 선입선출 규칙을 적용한 경우보다 좋게 나타났다. 서버의 수가 감소하게 되면 TC 또한 낮아질 수 있다. 향후 연구에서는 TC 분석을 통해 총 공사금액의 감소량에 대한 정량적인 분석이 필요하다.

본 연구의 한계를 극복하기 위해 여러 프로젝트의 데이터 수집

과 우선순위 규칙이 적용되었을 때의 TC를 정량적으로 분석한다면 BIM 직원의 수를 결정하는 의사결정에 많은 도움을 줄 수 있다고 판단된다. 이를 통해 우선순위가 적용되었을 때의 BIM 기반 설계검증에 대한 성과분석이 가능하다.

References

A GUIDE TO THE PROJECT MANAGEMENT BODY OF KNOWLEDGE, (PMBOK Guide) – Fifth Edition.

Cho, S. H., Yoon, B. K. (2019). An Analysis on the Operation Level of the Dry Dock for Warship Maintenance Using Priority Queue, *The Korean Operations Research and Management Science Society*, 36(1), pp. 37–49.

Frederick s., Gerald J.(2013). *Management Science, Introduction to Operations Management*. 9th Edition, McGrawHill. Chapter 17.

Ham, N. H., Kim, J. J. (2015). A Case Study on BIM Operating and Performance Measurement in Construction Phase, *Journal of Korea Institute of Building Information Modeling*, 5(2), pp. 1–11.

Ham, N. H., Moon, S. K., Kim, J. H., Kim, J. J. (2020). Optimal BIM staffing in construction projects using a queueing model, *Automation in Construction*, 113, pp. 1–14.

Ham, N. H., Yuh, O. K., Ji, K. H. (2018). Empirical Evaluation of BIM Coordinator Performance using Queuing Model in Construction Phase, *Journal of Korea Institute of Building Information Modeling*, 8(3), pp. 31–42.

Ham, N. K., Kim, J. J. (2015). A Case Study on BIM Operating and Performance Measurement in Construction Phase, *Journal of Korea Institute of Building Information Modeling*, 5(2), pp. 1–11.

Her, B., Shim, J. H., Kim, H. S., Kim, D. H. (2012). Design Error Classification and Causation in BIM Design, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 28(10), pp. 21–29.

Ji, K. C., Yu, J. H., Kim, C. D. (2006). The Schema of Work Delay Analysis by Input Factor in Construction, *Architectural Institute of Korea*, 22(11), pp. 181–188.

Kang, T. W., Won, J. S., Lee, G. (2013). A Study on the Development Direction of a BIM Performance Assessment Tool, *Journal of Korea Spatial Information Society*, 21(2), pp. 53–62.

Kim, B. J., Ju, H. W., Jang, M. S., Kim, B. J., Chin, S. Y. (2016). An Analysis on Design Error Issues of BIM Conversion Design Projects through Case Studies, *Journal of Korea Institute of Building Information Modeling*, 6(2), pp. 47–57.

Kim, H. J., Yoo, M. Y., Kim, J. J., Choi, C. S. (2017). Performance Analysis of BIM Labor using Case Analysis, *Journal of Korea Institute of Building Information Modeling*, 7(3), pp. 31–39.

Kim, I. H., Cho, G. H., Choi, J. S., Chun, E. Y. (2011). Open BIM-based Vertical Circulation Planning and Verifying Modules for Super-Tall Building at the Schematic Design Phase, *Korean Journal of Computational Design and Engine*, 16(2), pp. 156–164.

Kim, J. H. (2008). The Constitution Plan of Design Error Management System in Construction Projects, *Architectural Institute of Korea*, 10(3), pp. 231–238.

Ku, S. H., Ahn, B.J., Kim, J. H. (2003). Improving Construability by Analyzing Influencing Factors of Core-Wall Construction, *Korea Journal of Construction Engineering and Management*, 2003, pp. 606–609.

Kwon, O. C., Cho, J. W., Jo, C. W. (2013). BIM Quality Assurance for DFS in Design Phase, *Transactions of the Society of CAD/CAM Engineers*, 18(5), pp. 348–358.

Lee, G., Park, H. K., Won, J. S. (2012). D3 City project—Economic impact of BIM-assisted design validation, *Automation in Construction*, 22, pp. 577–586.

Lee, N. J., Kim, J. H., Ji, S. M., Hyun, C. T. (2011). Development of Construction Documents Checklist for Preventing Error of Design Process in Public Construction Projects, *JOURNAL OF THE ARCHITECTURAL INSTITUTE OF KOREA*, 27(2), pp. 149–158.

Lobert, L., Peter, E. D. L., David, J. E., Peter, R. D. (2010). Design Error Classification, Causation, and Prevention in Construction Engineering, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 24(4), pp. 399–408.

Neelamkavil, J., Ahamed, S. S. (2012). The Return on Investment from BIM-driven Projects in Construction, *IRC–RR–324 National Research Council, Canada*, 324, pp. 1–26.

Bailey, Norman T. J. (2003) A STUDY OF QUEUES AND ApPOINTMENT SYSTEMS IN HOSPITAL OUT-PATIENT DEPARTMENTS, WITH SPECIAL REFERENCE TO WAITING-TIMES, 185, pp. 185–198.

- Park, H. D. (2020). An Analysis of Structural Framework Performance of LMT tower in Haeundae– 101 story Reinforced Concrete High-rise Building–, ARCHITECTURAL INSTITUTE OF KOREA, 40(1), pp. 352–355.
- Shin, H. W., Kim, G. H., Kim, J. Y., Cho, H. K. (2007). A Research on a Comparison between the Strength and Weakness of Each Form work Methods in the Core Wall Construction, Journal of the Korea Institute of Building Construction, pp. 153–159.
- TUGBA, C. Y., EMRE, V. (2003). OUTPATIENT SCHEDULING IN HEALTH CARE: A REVIEW OF LITERATURE, PRODUCTION AND OPERATIONS MANAGEMENT, 12(4), pp. 519–549.
- Won, J. S. (2017). An Analysis on Relations between Design Errors Detected during BIM-based Design Validation and the Impacts Using Logistic Regression, Journal of the Korea Institute of Building Construction, 17(1), pp. 264–267.
- Yang, D. S. (2017). Development of an Verification System for Enhancing BIM Design Base on Usability, Land and Housing Institute, 8(1), pp. 23–29.
- Yun, T. H., Han, M. C., Ham, N. H., Kim, J. J. (2019). A Case Study on the Benefits of Construction Project with BIM, Journal of Korea Institute of Building Information Modeling, 9(4), pp. 10–20.