

구조안전진단에서의 3D 레이저 스캐너 투입 성과 분석

Analysis of 3D Laser Scanner Input Performance in Structural Safety Diagnosis

성도윤¹⁾, 백인수²⁾, 김재준³⁾, 함남혁⁴⁾

Seong, Do-Yun¹⁾ · Baek, In-Soo²⁾ · Kim, Jea-Jun³⁾ · Ham, Nam-Hyuk⁴⁾

Received July 22, 2021; Received September 14, 2021 / Accepted September 16, 2021

ABSTRACT: This study quantitatively analyzes the work performance of the structural safety diagnosis team that diagnoses pipe racks. To this end, a method for evaluating the performance of the structural safety diagnosis team using the queuing model was proposed. For verification, the case of applying the existing method and the method of introducing a 3D laser scanner for one site was used. The period, number of people, and initial investment cost of each project were collected through interviews with case project experts. As a result of analyzing the performance of the structural safety diagnosis team using the queuing model, it was possible to confirm the probability of delay in the work of each project and the amount of delayed work. Through this, the cost (standby cost) when the project was delayed was analyzed. Finally, economic analysis was conducted in consideration of the waiting cost, labor cost, and initial investment cost. The results of this study can be used to decide whether to introduce 3D laser scanners.

KEYWORDS: Structural Safety Diagnosis, 3D Laser Scanner, BIM, Performance Evaluation, Queuing Model

키 워 드: 구조안전진단, 3D 레이저 스캐너, 빌딩정보모델, 성과측정, 대기행렬 모형

1. 서론

1.1 연구 배경 및 목적

4차 산업 혁명의 영향이 건설 산업에도 미치고 있다(Son and Lee, 2019). 대형 건설사들을 중심으로 BIM 설계 및 시공, 드론 및 스캐닝 측량, 가상현실기반 시각화, IoT를 이용한 자재관리 및 안전관리 등과 같은 새로운 건설기술을 활용하고 있다(MOLIT, 2017). 그러나 건설업의 디지털 지수는 여러 산업군 중 가장 낮은 수준이며, 건설업 생산성은 지난 20년간 1% 증가하는 데 그치고 있다(MGI, 2017). 이는 표준화나 자동화가 어려운 건설산업의 생산방식과 기술인력 노령화, 지식체계구축의 어려움 등에 기인한다(Eom, 2017).

구조안전 분야에도 디지털화가 진행되고 있다(Lee et al., 2019; Kim et al., 2020). 구조안전진단은 엔지니어의 능력에 따

라 결과가 다르기 때문에 일관된 검사 결과를 얻기가 어렵다(Ham and Lee, 2018). 다른 문제점으로 도면의 부재, 무분별한 보수·보강, 고소작업의 위험성 등이 있다(Kim et al., 2020). 해당 문제점들을 해결하기 위해 3D 레이저 스캐너를 통한 역설계(Reverse Engineering)가 제안되었다. 역설계란 기존에 존재하는 건물 또는 시공 중인 시설물을 대상으로 형상정보를 추출하여 3D화하는 것이다(Park et al., 2016). 초기의 역설계 방법으로는 2D 도면을 활용하여 3D화하였으나, 존재하는 2D 도면이 건축물의 상태를 반영하지 않은 경우가 대부분으로 기초 데이터로 사용하기에는 부적절하였다(Kim et al., 2015). 선진국에서는 초기 역설계의 문제점을 해결하기 위해 3D 레이저 스캐너를 활용하여 기존 건축물의 3D 모델을 구축하고 있다(GSA, 2014). 이러한 방법을 이용하여 3D 레이저 스캐너를 활용하여 안전진단 및 유지보수를 진행하고 있다(Seo, 2019).

¹⁾학생회원, 한양대학교 건축공학과 석사과정 (tjdehdb123@naver.com)

²⁾정회원, 한양대학교 건축공학과 박사과정 (aandb5@naver.com)

³⁾정회원, 한양대학교 건축공학과 교수 (jjkim@hanyang.ac.kr)

⁴⁾정회원, 한양사이버대학교 건축도시건설공학부 교수 (nhham@hycu.ac.kr) (교신저자)

3D 레이저 스캐너를 안전진단 및 유지보수에 활용한 사례로 문화재(Yoo et al., 2013), 터널(Yoon et al., 2007), 비정형 건축물(Lee and Kwon, 2014), MEP(Kang, 2016) 등이 있다. 건설기업들은 앞서 진행한 연구들을 통해 3D 레이저 스캐너 도입 시 건설 생산성을 향상시킨다는 것을 확인했다. 그러나 3D 레이저 스캐너를 적극적으로 도입하지 않고 있다. 3D 레이저 스캐너의 저해요인으로는 초기단계에 대한 비용, 시공 오류 및 부정확성, 변화에 대한 거부감이 있다(Seo, 2019). 건설기업의 기준에서 혁신적인 기술이더라도 지원되는 정보 및 연구 없이 기술을 채택할지에 대한 여부를 결정하는 것은 바람직하지 않다(Ham and Lee, 2018). 그러나 3D 레이저 스캐너 및 BIM 도입의 비용 절감 효과, 성과를 정량적으로 분석하여 의사결정을 지원하는 연구가 부족하다.

따라서 본 연구에서는 실제 적용 사례를 기반으로 3D 레이저 스캐닝이 적용된 프로젝트의 성과 측정 방식을 제안하고, 이를 통해 향후 3D 레이저 스캐너 도입에 대한 의사결정 지원을 목적으로 한다.

1.2 연구 범위 및 방법

본 연구는 3D 레이저 스캐너를 도입한 D사의 구조안전진단 프로젝트의 성과를 기반으로 한다. 해당 프로젝트는 하나의 현장에 대해 두 가지 방법의 구조안전진단을 진행한 사례이다. 각 방법은 사람을 중심으로 진행되는 기존 구조안전진단 방법과 3D 레이저 스캐너가 중심으로 진행되는 구조안전진단이다. 각 방법이 소요되는 단위시간 및 활용된 인원수를 데이터로 활용하였다.

건설 분야에서 단위시간 및 인원수에 대한 데이터를 대기행렬 모형에 활용한 방법 및 성과 분석에 대한 연구는 다음과 같다. K. Teknomo (2012)는 건설 산업에서 사례 연구의 수치적 예를 통해 건설 활동을 대기행렬 시스템으로 모델링하는 방법을 제안하였다. Ham and Kim (2015)은 대기행렬 모형을 통해 BIM을 활용한 정보요청사항 건수가 일정 기간 동안 몇 명의 BIM 코디네이터에 의해 생성되었는지에 초점을 맞추어 성과 분석을 진행하였다. Ham et al. (2020)은 BIM 직원 배치에 따른 성과를 측정하기 위해 대기행렬 모형을 활용하여 새로운 접근 방식을 제시하였다.

따라서 본 연구에서는 대기행렬 모형을 활용하여 구조안전진단의 성과를 분석하고자 한다. 단위 시간 동안 파이프랙이 진단 받는 길이를 구조안전진단 팀의 성과를 평가하기 위한 지표로 활

용하였다. 분석 결과를 통해 진단받는 파이프랙이 대기함에 따라 발생하는 대기비용과 구조안전진단 팀의 투입에 따른 서비스비용을 도출하였다. 이를 통해 구조안전진단에서 3D 레이저 스캐너의 성과 및 경제성을 정량적으로 분석하여 의사결정을 지원하고자 한다.

2. 이론적 고찰

2.1 역설계와 3D 레이저 스캐닝

최근 건설산업에서 생산성과 지속 가능성을 높이는 데 필요한 기술들을 도입하고 있다. 노후화된 시설물의 안전성 확보 및 설비에 대한 효율적 운영 및 장비의 교체 요구가 늘어나고 있다(STEPI, 2015). 이러한 요구에 따라 건물 정보 모델링(Building Information Modeling, BIM)과 3D 레이저 스캐닝과 같은 감지 기술이 활용되고 있다. 3D 레이저 스캐너는 토목, 구조, 건축 및 Mechanical, Electrical, and Plumbing (MEP) 등과 같은 다양한 분야에서 시공품질 및 안전성을 검토할 때 활용되고 있다(Seo, 2019).

3D 레이저 스캐너는 건축물의 내·외부의 모든 형상정보 추출이 가능하다. 포인트 클라우드(Point Cloud)⁵⁾의 정확성과 밀도에 따라 건물의 구성요소를 쉽게 파악할 수 있다. 3D 레이저 스캐너는 여러 위치에서 스캔한 데이터를 통합하여 생성할 수 있다(EI-Omari and Moselhi, 2008). 따라서 기록화, 수치화, 도면화를 통해 유지관리에 활용될 수 있다(Park et al., 2016). 이러한 활용도에 따라 3D 레이저 스캐너 기반 역설계 기술을 구조안전진단에도 활용하고 있다(Kim et al., 2020).

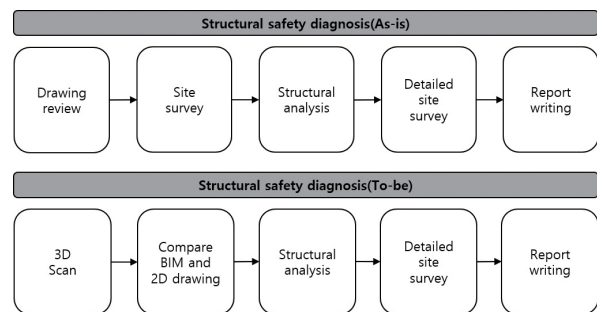


Figure 1. Structural safety diagnosis process(Ham and Lee, 2018)

⁵⁾포인트 클라우드(Point Cloud) : 포인트 클라우드는 3D 레이저 스캐너를 통해 취득되며, 3차원 x,y,z 좌표계에 속한 점들의 집합으로 사물의 표면을 나타내기 위해 사용된다.

3D 레이저 스캐너 기반 BIM 역설계 기술을 이용한 구조안전 진단은 육안검사 단계에서 레이저 스캐너를 활용한다. 해당 단계에서 취득된 스캔 데이터를 BIM 모델로 변환 후 시설 내·외부에 대한 현장조사 데이터를 BIM 모델에 반영시켜 구조 분석을 진행한다(Ham and Lee, 2018). 기존 방식과 3D 레이저 스캐너 및 BIM이 도입된 방식의 과정은 Figure 1과 같다.

3D 레이저 스캐너를 이용한 시설물의 진단에 대한 연구는 다음과 같다. Bosche(2010)는 시설 요소의 육안 검사를 위해 레이저 스캐닝 데이터에서 3D CAD 개체를 인식하는 자동화 기술을 제안했다. Bosche et al.(2015)는 MEP 파이프 형상에 대한 3D 스캐닝 데이터를 BIM 데이터로 변환하여 시설물을 모니터링하는 방법을 제안했다. Gordon and Lichti(2007) 및 Park et al.(2007)은 레이저 스캐닝 데이터에서 시설 변형 측정 결과를 얻었다. Ham and Lee(2018)는 레이저 스캐닝과 BIM을 사용하여 대규모 인프라의 구조적 안전성을 진단하는 과정을 제안하고 제안된 방법의 경제적 타당성을 분석했다.

3D 레이저 스캐너에 대한 의사결정을 위해 정성적으로 분석한 연구는 많으나 정량적인 분석이 부족하다. 따라서 본 연구에서는 정량적인 분석을 통해 레이저 스캐너의 도입 여부에 대한 의사결정을 지원하고자 한다.

2.2 스마트 건설기술의 성과 분석

최근 3D 레이저 스캐너는 다양한 분야의 성과에 영향을 미치고 있다. 이러한 상황에 따라 성과를 분석하는 연구가 활발하게 진행되고 있다. 먼저, 3D 레이저 스캐너에 대해 정성적으로 분석한 연구는 다음과 같다. Lee and Yun(2007)은 3D 레이저 스캐너가 터널 구조물의 변형 관측에 있어서 기존 방법의 신뢰성 문제를 해결하고, 시각적으로 판단할 수 있는 자료를 제시하여 빠른 대책을 강구할 수 있다고 검증하였다. Seo et al.(2015)는 3D 레이저 스캐너가 시공시 구조물의 간섭 확인이 용이하며, 다양한 관측 정확도 평가를 통해 비정형 건축물의 적용 가능성을 검증하였다. Woo et al.(2016)는 3D 레이저 스캐너 및 BIM을 활용시 편차가 큰 기존 방법에 비해 결과의 신뢰성이 높으며, 건축물의 유지관리 분야에서 더 높은 안정성을 확보할 수 있음을 검증하였다. Kang et al.(2016)은 건축 내부에 설치된 MEP 시설물의 정확한 현황정보를 파악하여 리모델링 공사의 설계 오류 감소, 재시공 위험성 최소화, 공기단축 및 공사비 절감 등에 효과가 있음을 검증하였다.

Ham and Lee(2018)은 3D 레이저 스캐너 도입에 따른 인력의 감소, 전체적인 시간의 단축에 대해 정량적으로 분석하였다. 연구의 한계점으로는 기존 방법과 3D 레이저 스캐닝 방법을 정량적으로 비교했지만, 이 데이터만으로 고비용이 드는 3D 레이저 스캐닝을 도입해야 하는지 의사결정이 하기 힘들다는 점이다. 해당

연구에서 세부적인 경제성 분석이 어려웠던 이유로는 단일 사례의 활용과 제공되는 정보의 세부 사항 부족으로 판단된다. 그러나 데이터 취득이 어려운 프로젝트를 대상으로 한 경우 관련 지식 분야에서 가치가 있다(Jang and Lee, 2018). 예를 들어 Ham et al.(2018)은 단일 프로젝트이지만 BIM Return on Investment (ROI) 분석 방법을 제시함으로써 가치를 있음을 검증하였다. 또한, 스마트 건설 기술 도입 연구의 경우 선도적인 프로젝트 사례 논문이 기술 도입의 방향성을 제시해주는 경우가 많다.

정보의 세부 사항이 부족한 경우에는 대기행렬 모형을 활용하면 기존 방법(M/M/1)과 3D 레이저 스캐닝 방법(M/M/1, M/D/1)에 대해 성과, 작업량, 작업이 지연될 확률과 관련하여 다양한 분석이 가능하고, 경제성 분석이 가능하여 기존 연구의 한계점을 극복할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 정량적인 성과분석과 초기 투자비용을 포함하여 경제성 분석을 할 수 있는 대기행렬 모형을 활용하고자 한다.

2.3 대기행렬모형

경영과학(Management Science)은 계량적 요소를 고려하는 경영에 대해 과학적 접근 방법을 활용하여 의사결정을 지원하는 학문 분야이다(Frederick and Gerald, 2013). 경영과학에서 중요한 점은 과학적 접근 방법을 적용하여 얻은 결론이 최종적인 의사결정이 아니라 의사결정을 지원한다는 것이다. 경영과학 분석은 경영자가 의사결정을 내릴 때, 필요한 자료를 제공하는 것을 목적으로 둔다.

본 연구에서 활용하고자 하는 경영과학의 과학적 접근 방법 중 하나인 대기행렬 모형은 대기행렬 이론을 기반으로 하고 있다. 대기행렬 이론(Queueing Theory)은 다양한 형태의 기다림에 대한 연구이다. 현실에 나타나는 다양한 형태의 대기행렬 시스템을 대기행렬 모형을 이용하여 표현한다(Frederick and Mark, 2010). 고객(Customer)은 서비스를 받기 위해 무작위로 대기행렬 시스템에 도착한다. 만약 도착한 고객이 도착했을 때 서비스를 받지 못한다면, 그 고객은 대기행렬에서 기다린다. 보통 1명 이상의 서버(Server)가 서비스를 제공한다. 각 고객은 서버 중 1명으로부터 개별적으로 서비스를 받은 후 시스템을 떠난다. 또한, 대기행렬 이론은 다양한 활동의 네트워크인 workflow를 효율적으로 분석하는데 적용할 수 있다(Truong et al., 2010). 대기행렬 시스템은 시간에 따른 매개변수 변경을 특징으로 하며, 매개변수 변경은 대기행렬 시스템의 성능에 상당한 영향을 미치기 때문에 시스템의 설계 및 제어에서 고려되어야 한다(Schwarz et al., 2016).

대기행렬 시스템에서 성과는 다음과 같이 두 가지 척도로 분석할 수 있다. 1) 대기행렬 시스템에 얼마나 많은 고객이 기다리고 있는지? 2) 대기 고객들은 얼마나 오래 기다리고 있는지?(Ham et al., 2018). 첫 번째, 대기행렬 시스템에서 기다리고 있는 고객

수의 경우는 대기행렬 시스템의 서버 수를 변화시켜 업무의 효율성을 증감시킬 수 있다. 그러나 단일 대기행렬 시스템에서는 서비스 수의 변화 없이 한 명으로 고정된다. 따라서 단일 대기행렬 시스템에서는 서버의 서비스율에 따라 기다리는 고객 수가 변한다. 두 번째, 고객들이 대기하는 시간에 관한 경우에는 고객이 서비스에 만족하여 다시 서비스를 이용하도록 하는 것이다. 대기행렬에 대기하고 있는 고객이 얼마나 있는지 보다는 서비스를 받기 위해 대기해야 하는 시간이 중요한 부분이다. 고객들이 사물인 경우엔 지연되는 작업량으로 간주될 수 있다. 해당 척도들은 일반적으로 평균값(기대치)으로 표현된다.

3. 3D 레이저 스캐너 도입에 대한 성과 평가 모델

3.1 단일 서버 대기행렬 모형

본 연구에서는 두 가지 상황의 대기행렬모형을 설계하고자 한다. 첫 번째, 기존 방식으로 진행되는 구조안전진단이다. 두 번째, 3D 레이저 스캐너와 BIM이 결합된 방식이 도입된 구조안전진단이다. 세 번째, 결합된 방식의 구조안전진단을 진행했을 때, 제조 프로세스처럼 생산성이 일정한 경우이다. 먼저, 대기행렬 모형을 설계하기 위해서는 고객과 서버를 설정해야 한다. 고객은 서비스를 받게 되는 사람 혹은 사물을 의미하며, 서버는 작업을 진행하는 사람 혹은 기계 등을 의미한다. 또한, 서버는 단일 개체인 한 사람일 필요는 없으며 한 집단의 사람들일 수도 있다(Frederick and Gerald, 2013). 예를 들면 고객이 요구하는 일을 동시에 처리하기 위해 힘을 합쳐야 하는 수리팀 등을 들 수 있다. 따라서 상황에 맞춰 서버는 구조안전진단 팀, 고객은 파이프랙으로 가정한다. 또한, 구조안전진단의 과정은 데이터 수집, 분석, 세부 현장 조사 및 구조안전진단 순차적으로 진행된다. 이 과정들은 대기행렬에 적용하기 위해 파이프랙(고객)이 순차적으로 대기행렬 시스템으로 들어온다고 가정한다.

고객의 도착 시간과 서버의 서비스 시간에 대한 확률에 따라 적용할 수 있는 대기행렬 모형은 다양하지만, 본 연구에서는 M/M/1 모형과 M/D/1 모형을 활용하였다. M/M/1, M/D/1 모형은 도착 간격 시간 분포가 지수분포(M)를 따르며, 서비스 시간 분포는 각각 지수분포(M), 확정적분포(D)를 따른다. 두 모형은 서비스 규칙으로 선입선출법(First Come First Served, FCFS)을 따르며, 각 한 명 또는 한 팀의 서버가 있다. 서버의 이용율은 $\rho = \lambda / \mu$ 로 정의되며, 정상적인 서비스를 수행하려면 안정상태($\rho \leq 1$)를 충족해야 한다.

기존 방법과 3D 레이저 스캐너를 활용한 방법 모두 고객이 서버에게 도착하는 빈도가 불확실하기 때문에 지수분포를 따른다고 가정하였다. 구조안전진단은 다수가 하나의 팀을 이루어 다양한 작업을 동시에 진행함으로써 서버의 수는 한 팀으로 이루어진

다. 기존 방법의 구조안전진단의 육안조사 과정은 기술자의 능력에 따라 작업에 소요되는 시간과 작업의 완성도가 다르다. 이와 같이 기존 방법의 서버가 서비스를 해주는 시간이 매우 불확실하기 때문에 지수분포를 따른다고 가정하였다. 따라서 기존 방법은 M/M/1 모형을 활용하여 성과를 평가하고자 한다. 3D 레이저 스캐너를 활용한 방법은 기존 방법과 다르게 육안 조사 과정에서 3D 레이저 스캐너를 활용하기에 불확실성이 저감 되었다는 측면에서 확정적 분포를 따른다고 가정하였다. 그러나 3D 레이저 스캐너를 활용하였지만, 사람의 불확실성이 포함되어 있는 측면으로 지수분포를 따른다고 가정하였다. 각 가정에 따라 3D 레이저 스캐너를 활용한 방법의 경우 M/M/1, M/D/1 모형을 활용하여 성과를 평가하고자 한다.

3.2 단일 서버 대기행렬 모형의 성과 척도

대기행렬 모형의 성과 척도는 고객이 대기행렬에 속해있는지 대기행렬 시스템에 속해있는지에 따라 L , L_q , W , W_q 로 표현된다. L 은 진단 중인 파이프 랙을 포함하여 시스템 내에 있는 평균 파이프 랙의 길이를 나타내며, L_q 는 진단 중인 파이프 랙을 제외하고 시스템 내에 있는 평균 파이프랙의 길이, W 는 각 1m의 파이프 랙이 시스템 내에서 기다리는 평균 대기 시간(진단시간 포함), 마지막으로 W_q 는 각 1m의 파이프 랙이 대기행렬에서 기다리는 평균 대기 시간(진단시간 제외)을 나타낸다.

단일서버 대기행렬 모형(M/M/1)의 성과척도(L , L_q , W , W_q) 도출을 위한 기본 계산식은 (1)~(5)와 같다.

$$P_0 = 1 - \frac{\lambda}{\mu} \quad (1)$$

$$L_q = \frac{\lambda^2}{\mu(\mu - \lambda)} \quad (2)$$

$$W_q = \frac{L_q}{\lambda} \quad (3)$$

$$W = \frac{L}{\lambda} \quad (4)$$

$$L = L_q + \frac{\lambda}{\mu} \quad (5)$$

M/D/1 모형은 서비스 시간에 변동이 없는 고정된 서비스 시간의 경우에 사용된다. 단일서버 대기행렬 모형(M/D/1)의 성과척도 도출을 위한 기본 계산식은 M/M/1 모형과 유사하지만, L_q 의 계산식이 다르다. M/D/1 모형의 L_q 의 계산식은 다음 식 (6)과 같다.

$$L_q = \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^2}{2(1 - \frac{\lambda}{\mu})} \quad (6)$$

대기행렬 모형은 기본 성과척도 분석 외에 대기행렬 시스템 내에 고객의 대기시간, 고객 수 등과 같은 시스템의 상태에 대한 확률 분석이 가능하다. 서버의 이용률(ρ)이 높으면, 시스템 상태

가 나빠지고 구조안전진단 참여자들의 대기함에 따른 비용이 발생할 수 있다. 이러한 대기 비용이 서버를 투입했을 때의 비용보다 많아지면 경제적 측면으로 문제가 생길 수 있다. 따라서 대기행렬 시스템 내에 몇 명의 고객이 있는지를 확률적으로 예측하여 구조안전진단 팀의 성과를 평가할 수 있다. P_n 은 시스템 내에 n 명의 고객이 있을 안전상태 확률을 나타낸다. 예를 들면 95% 이상의 시간동안 3명 이상의 고객이 시스템 내에 없도록 하는 것이 목표하면 $P_0+P_1+P_2+P_3 \geq 0.95$ 라는 수식이 성립한다. P_n 도출을 위한 계산식은 (7)과 같다.

$$P_n = P_0 \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^n \quad n = 1, 2, \dots \quad (7)$$

대기행렬 시스템 내에서의 대기시간이 어떤 값(t)을 초과할 확률은 식 (8)과 같으며, 대기행렬 내에서의 대기시간이 t 를 초과할 확률은 식 (9)과 같다. 단, 분포의 차이로 M/M/1 모형에만 적용되는 식이다.

$$P(W > t) = e^{-\rho(1-\rho)t} \quad (t \geq 0) \quad (8)$$

$$P(W_q > t) = \rho e^{-\rho(1-\rho)t} \quad (t \geq 0) \quad (9)$$

레이저 스캐너의 도입에 대한 여부를 결정하기 위한 가장 중요한 문제는 비용이 얼마나 드는가 하는 것이다. 기존 방법과 비교하여 대기비용 및 서비스비용이 과다하게 발생하게 된다면 의사결정에 좋지 않은 영향을 미친다. 구조안전진단 팀이 파이프를 진단함에 많은 시간 소요된다면 생산성의 저하를 가져오고, 그 결과는 프로젝트 성과의 감소로 나타날 수 있다. 그러므로 구조안전진단 팀의 서비스율은 성과 분석에 중요한 요소라 할 수 있다. 단위 시간당 평균 총 비용(TC)과 단위 시간당 평균 서비스 비용(SC), 단위 시간당 평균 대기 비용(WC)를 도출하기 위한 계산식은 (10)~(12)과 같다.

$$SC = C_s \quad (10)$$

$$WC = C_w \times L \quad (11)$$

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

- C_s = 단위 시간당 1팀의 진단 팀 투입에 따른 비용
- C_w = 파이프 랙의 단위 시간당 대기 비용

본 연구에서는 사례 프로젝트를 통해 실제로 투입된 레이저 스캐너와 구조안전진단 팀의 서비스율을 기준으로 상수 C_s , C_w 를 추정 후, 정량적으로 분석하고자 한다. 또한, 경제성 분석을 통해 최적의 방법을 찾아 의사결정에 지원하고자 한다.

4. 3D 레이저 스캐너 도입에 대한 사례 조사

4.1 구조안전진단 사례 개요

이 연구의 사례연구에는 H사 울산공장이 활용됐다. 사례사업은 면적이 500만㎡로 단일 공장으로는 세계 최대 규모다. 하루 평균 5400대의 차량을 생산할 수 있다. 시설 안전 문제로 생산 안전이 저해되면 경제적으로 막대한 손실을 초래할 수 있는 대규모 민간 인프라이다. 따라서 공장에서는 노후화에 따른 시설물의 구조안전진단을 요구하였다. 사례사업의 범위는 파이프 랙에 대한 구조안전진단이다.

기존에 구조안전진단을 수행한 업체가 작성한 설계서류가 당시 공장 현황과 달라 시설물의 안전진단을 제대로 수행할 수 없었다. 또한, 시설도 넓었으며, 일반적인 안전진단 방식으로 효율적이지 못했다. 따라서 레이저 스캐닝과 BIM 기술을 이용해 공장 내 노후화된 파이프 랙에 대한 안전진단을 실시했다. 이 사업을 시행한 D사는 공장 내 공사현황을 살피고, 구조안전진단 및 유지관리, 역설계, BIM과 3D 레이저 스캔을 활용한 비정기 건축물 시공품질관리 등을 수행한 구조공학 설계사무소다.

세부적인 조사 전에 육안상으로 확인한 결과, 구조보 편향, 파이프라인 확장에 따른 높이 상승, 침하 및 접합부 결함 등 성분 변형 문제가 나타났다. 이에 따라 노후설비 점검, 시설증강, 외부 변형 등이 필요한 상황이었다.

4.2 구조안전진단 사례 사전조사

해당 장에서는 3장에서 규명된 이론적 연구문제를 해결하기 위해 실제 프로젝트에 대한 사전 조사를 진행하였다. 또한, 대기행렬 모형의 적용성을 검토하기 위해 레이저 스캐너가 적용되기 전과 적용된 후의 구조안전진단에 대해 사전조사를 실시했다. 이를 위해 Table 1과 같이 구조안전진단 프로젝트를 선정하고, 구조안전진단 회사의 업무자들을 대상으로 기존 구조안전진단과 레이저 스캐너 투입에 대해 상세한 인터뷰를 실시하였다.

Table 1. Summary of project cases

Project	As-is	To-be
Initial investment cost []	-	135,000,000
Diagnostic section (m)	959.2	959.2
Contract period (months)	8	8
Service period (months)	7	3

3D 레이저 스캐너를 이용한 사례 프로젝트의 세부적인 구조안전진단의 범위 범위는 다음 Table 2와 같다.

현장에서의 3D 레이저 스캐너의 서비스 범위는 Figure 2와 같이 단명 분석을 통한 변위(처짐)을 조사하였다. 해당 현장은 Level 2로 한번 스캔에 1분 40초 정도 소요되며, 한번 스캔 시

Table 2. Detailed structural safety diagnosis service scope of case project using laser scanning

No. of Survey Sections	Straight Length of the Section(mm)
No.1	50,000
No.2	133,200
No.3	79,180
No.4	96,240
No.5	57,300
No.6	143,130
No.7	144,700
No.8	26,820
No.9	61,130
No.10	55,780
No.11	38,240
No.12	34,280
No.13	34,280
Total	959,200

30m 내외의 스캔 데이터를 활용하였다. 또한, 형상을 취득하기 위해 사각지대가 발생하지 않게 스캔해야 하므로 30m의 간격으로 최소 3개의 지점에서 최대 5개 지점까지 스캔하였다.

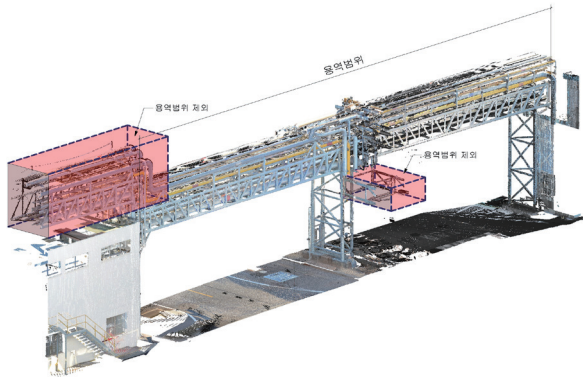


Figure 2. Structural safety diagnosis service scope

기존 구조안전진단의 과정과 3D 레이저 스캐너를 활용한 구조 안전진단 과정의 차이점은 변위 조사와 같은 현장 데이터의 취득과 도면작성의 과정만 다를 뿐 나머지 과정은 기존 구조안전진단의 방식과 동일한 과정으로 진행하였다. 각 방법의 진단과정 항목에 대한 활용 객체는 Table 3과 같다. 현장조사 과정에서 기존 방법은 사람 중심으로 진행하였고, 스캐너를 활용한 방법은 3D 레이저 스캐너를 중심으로 조사하였다. 구조분석 과정에서는 각 2D 도면과 BIM 모델과 스캔 데이터를 합친 3D 모델을 활용하였다. 세부 현장조사 단계에서는 기존 방법과 동일하게 두 방법 다 사람을 중심으로 기존 도구를 활용하여 조사하였다. 마지막으로 보고서 작성 과정에서는 2D 도면과 3D 모델을 활용하였다.

Table 3. Application object for each method's diagnostic process item

Project	Site survey	Structural analysis	Detailed site survey	Report writing
As-is	Human	2D drawing	Human	2D drawing
To-be	3D Laser Scanner	3D Model	Human	3D Model

구조안전진단의 레이저 스캐너 및 BIM 투입 여부에 따른 성과를 분석하기 위해 한 곳의 현장에 대해 두 가지 방법으로 진단을 진행한 D사의 울산공장 프로젝트의 비용과 시간에 대해서도 인터뷰를 실시하였다. D사의 전문가와의 인터뷰 결과, 프로젝트 초기 데이터 수집 단계(현장조사)에서 3D 레이저 스캐너 및 BIM이 투입되었고, 그 밖에 과정은 기존의 진단 방법과 동일하게 진행되었다. 초기 투자 비용(135,000,000원)에는 소프트웨어(Realwalk) 및 하드웨어(TX8) 등이 포함되어 있다. 진단하는 구간은 기존과 동일하게 959.2m이며, 계약 기간은 8개월로 동일하다. 실제 진단 기간을 기존 방법은 7개월, 신기술을 이용한 방법은 3개월이 소요되었다. 레이저 스캐너 투입은 초기 데이터 수집 단계에서만 활용되었으나, 해당 데이터를 이용한 데이터는 최종 단계인 구조안전진단까지 활용되었다. 대기행렬 모형의 초기 값을 설정하기에 앞서 두 방법에 대한 조건을 동일하게 계약 기간을 최대 작업 기간으로 설정하였다. 초기 설정값으로 실제 진단 기간을 각 방법의 서비스 능력(단위 시간당 작업량)에 활용하였다. 또한, 고객의 수는 직접 진단을 받게 되는 파이프 랙의 길이로 설정하였다.

본 연구에서 진행되는 사례에 대한 세부적인 인원수와 소요시간은 다음 Table 4와 같다. 기존 구조안전진단에서 도면 및 현장 측정에 3개월이 소요되었으며, 20명의 인력이 필요하였다. 구조 분석 및 분석결과 수집에는 앞 과정과 동일하게 3개월이 소요되었고, 25명의 인력이 필요하였다. 상세 현장조사 및 구조안전진단에는 1개월 동안 5명의 인력이 필요하였다. 레이저 스캐너 및 BIM 투입 시 2개월 동안 데이터 수집을 하였고, 5명의 인력이 필요하였다. 상세 현장조사 및 구조안전진단은 기존과 동일하게 1개월간 5명의 인력이 필요하였다. 전체적인 개월 수나 인원수가

Table 4. Summary of service personnel in the project cases

Project	As-is		To-be	
	Period (month)	Number of people	Period (month)	Number of people
Drawing review and on-site survey	3	20	2	5
Structural analysis and collection of analysis results	3	25		
Detailed on-site survey and structural safety diagnosis	1	5	1	5

다르지만, 단계별로 동일한 과정을 통해 구조안전진단을 진행하는 것을 알 수 있다. 기존 구조안전진단과 다른 점은 현장조사 과정을 3D 레이저 스캐너로 대체하며, 해당 스캔 데이터를 BIM 모델에 반영하여 정확하고 수치상으로 확인할 수 있다. 또한, 데이터 보존이 쉽다는 이점이 있다.

4.3 사례 데이터 수집 및 분류

구조안전진단 팀의 업무 성과 평가 모델을 통해서 구조안전진단 팀의 성과를 파악하기 위해서는 동일한 상황과 일정 시간동안 파이프 랙에 대한 진단 얼마나 진행되었는지 파악해야 한다. D사에 동일한 현장에 대해 기존 방법의 데이터와 레이저 스캐너를 이용한 방법으로 구조안전진단을 진행한 데이터를 수집하였다. 각 구조안전진단의 성과를 분석하기 위한 지표들은 Table 5와 같다.

Table 5. Structural safety diagnosis performance analysis indicators

Project	As-is	To-be
Number of structural safety diagnosis teams (s)	1	1
Mean arrival rate (λ)	0.68	0.68
Mean service rate (μ)	0.78	1.82
Server utilization (ρ)	0.87	0.37
Server efficiency ($1-\rho$)	0.13	0.63

앞서 수집된 진단한 파이프의 길이를 구조안전진단 계약기간(1개월 = 22일 = 8시간 기준)을 통해 환산하면, 구조안전진단 팀이 단위시간(h) 동안 처리한 파이프랙의 길이(=작업량)를 산출할 수 있다. 대기행렬 모형에서 이 길이는 구조안전진단 팀이 처리해야 하는 고객의 평균 도착률을 의미한다. 동일한 상황이기에 두 가지 경우의 평균 도착률은 0.68m/h(λ)로 분석되었다. 서비스율(단위시간당 작업량)을 산정하기 위해 용역기간을 활용하였다. 기존 구조안전진단의 서비스율은 0.78m/h으로 분석되었으며, 레이저 스캐너가 투입된 구조안전진단의 서비스율은 1.82m/h으로 분석되었다.

단일서버 대기행렬 모형에서 서버의 이용률(ρ)은 $\rho=\lambda/\mu$ 로 정의된다. 서버의 이용률은 기본적으로 1 이하가 되어야 정상적인 서비스가 가능한 안정상태로 간주할 수 있다. 기존 방법과 신기술이 투입된 방법 모두 평균 도착률이 평균 서비스율보다 낮기에 각 진단 팀의 능력으로 파이프랙을 진단하는 것에 대해 충분히 대응할 수 있다. 따라서 $1-\rho$ 는 서버의 유휴율을 나타낸다. 신기술이 도입된 방법의 이용률은 0.37이며, 유휴율은 0.63이다. 업무시간의 37%는 파이프랙을 진단하고, 63%는 그 밖의 업무

를 처리할 수 있는 확률을 의미한다. 또한, 기존 방법의 이용률은 0.87이며, 유휴율은 0.13이다. 이를 통해 알 수 있는 것은 기존 방법은 신기술이 도입된 방법에 비해 상대적으로 여유시간이 부족한 것으로 나타났다.

5. 3D 레이저 스캐너 도입에 대한 성과 평가

5.1 사례 성과 분석

앞선 성과분석 지표들을 활용하여 각 방법의 구조안전진단 팀의 파이프랙 진단 성과를 분석한 결과는 Table 6과 같다.

Table 6. Basic performance measures of structural safety diagnosis team

Project	As-is	To-be	
	M/M/1	M/M/1	M/D/1
L	6.80	0.60	0.49
Lq	5.93	0.22	0.11
W	10.00	0.88	0.71
Wq	8.72	0.33	0.16

기존 방법의 기본 성과 척도는 L은 6.80m, Lq는 5.93m, W는 10.00h, Wq는 8.72h이다. 이는 파이프 랙(고객)의 평균 대기시간이 10시간 정도임을 의미하며, 대기행렬 시스템 내에 있는 평균 파이프 랙의 길이(작업량)가 6.80m 정도가 된다는 것을 의미한다. 레이저 스캐너가 투입된 방법의 기본 성과 척도는 L은 0.60m, Lq는 0.22m, W는 0.88h, Wq는 0.33h이다. 이는 고객의 평균 대기시간이 0.88시간 정도임을 의미하며, 대기행렬 시스템 내에 있는 평균 파이프의 길이가 0.60m 정도가 된다는 것을 의미한다. M/M/1 모형의 사례를 비교해보면, 대기행렬 시스템에 있는 파이프 랙의 길이는 기존에 비해 약 8.8%로 감소하였다. 또한, 진단 받는 시간을 제외하고 1m의 파이프 랙이 시스템 내에서 기다리는 평균 대기시간이 3.7%로 감소되었다. 이는 육안조사만을 의지하는 것에는 한계가 있다는 것을 보여준다. 여기서 M/M/1 모형은 제조 프로세스가 일관적이지 않다는 점이 반영되어 있다.

반면에 제조 프로세스처럼 생산성이 일정한 경우를 가정하여 확정적 분포를 따르는 M/D/1 모형을 활용했다. 3D 레이저 스캐너가 도입된 방법의 L은 0.49m, Lq는 0.11m, W는 0.71h, Wq는 0.16h이다. 일관적이지 않은 프로세스를 반영한 M/M/1 모형보다 L은 18%, Lq는 50%, W는 19%, Wq 50%씩 감소된 것을 확인할 수 있다. 이 부분은 일관적이지 않은 프로세스를 3D 레이저 스캐닝과 BIM을 활용함으로써 명확한 프로세스로 관리될 경우 파이프 랙의 대기시간과 대기하는 파이프의 길이가 기존 방법보다 줄어드는 것을 의미한다.

5.2 고객 수, 대기시간에 대한 확률 분석

대기행렬 시스템 내에서 P_n 은 시스템 내에 n 명($n=1,2,3, \dots$)의 고객이 있을 안정상태의 확률을 나타낸다. 기존 방법과 신기술이 도입된 방법의 대기행렬 시스템 내에 응답을 기다리는 파이프 랙에 따른 확률 값은 Figure 3, Figure 4와 같다.

기존 방법의 경우, 95% 이상의 시간 동안 시스템 내에 3명 이상(작업량 기준 m 단위)의 고객(작업량)이 없도록 하는 것이 목표라면 $P_0+P_1+P_2+P_3=0.4224 \geq 0.95$ 라는 목표를 달성하기 힘들다. 실제로 기존 방법의 구조안전진단 팀은 95%의 시간 동안 파이프 랙을 진단하는데 항상 바쁠 것이다($P_0+P_1+\dots+P_{25}=0.9717 \geq 0.95$). 기존 방법의 경우 $P_0=0.128$ 으로 구조안전진단 팀이 한 시간에 파이프 랙을 1m도 진단하지 못할 시간에 대한 확률이 12.8% 밖에 되지 않음을 보여준다. 즉, 기존 방법의 구조안전진단 팀은 업무시간의 87.2%를 파이프랙을 진단하는 것에만 시간을 할애해야 한다. 이러한 확률 분석결과가 각 방법의 서버 이용률과 비교해보면, 구조안전진단 팀의 이용률이 높은 것이 성과를 향상시키는 것이 아님이 보여줄 뿐만 아니라, 파이프랙이 대기하는 상황을 초래하게 된다.

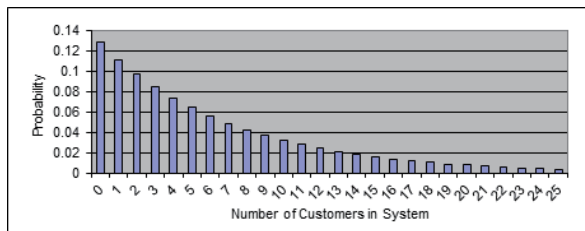


Figure 3. Probability according to pipe rack in the queuing system(As-is)

레이저 스캐너 및 BIM이 도입된 방법의 경우, $P_0+P_1+P_2+P_3=0.9805$ 으로 기존 방법과 같은 95% 이상의 시간 동안 시스템 내에 3명 이상의 고객이 없도록 하는 목표를 달성할 수 있다. 신기술이 도입된 방법의 구조안전진단 팀은 기존 방법의 구조안전진단 팀에 비해 상대적으로 여유롭다. 즉, 파이프 랙을 진단에 충실하고, 늦지 않도록 대응해줄 수 있다. 신기술이 도입된 방법의 경우, $P_0=0.626$ 로 구조안전진단 팀이 한 시간에 파이프 랙을 1m도 진단하지 못할 시간에 대한 확률이 62.6%임을 보여준다.

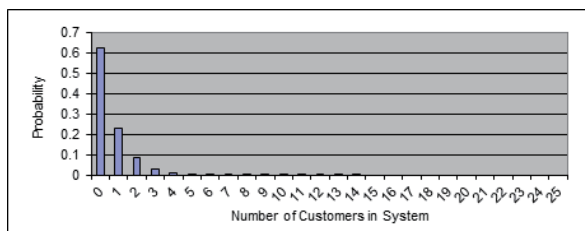


Figure 4. Probability according to pipe rack in the queuing system(To-be)

즉, 구조안전진단 팀의 여유시간도 늘어나고, 본업을 제외하고 나머지 잔업을 처리할 수 있는 시간이 늘어난다. 더불어 복수의 프로젝트를 동시에 진행할 수 있는 여유시간을 가질 수 있다.

대기행렬모형을 활용하여 파이프랙이 기다리는 시간에 대한 확률 분석이 가능하다. 각 구조안전진단 방식의 파이프랙이 안전진단을 받는 데 기다리는 시간에 대한 확률은 Table 7과 같다. $P(W>1)$ 은 파이프랙이 안전진단을 받는 데 1일 이상 기다려야 할 확률이고, $P(Wq>1)$ 은 구조안전진단 팀이 파이프랙에 대한 안전진단을 시작하기까지 1일 이상 기다려야 할 확률이다.

Table 7. The probability of waiting time in the queuing system

Project	As-is	To-be
$P(W>1)$	0.904837	0.319819
$P(Wq>1)$	0.788833	0.119493

기존 구조안전진단 방법의 $P(W>1)$, $P(Wq>1)$ 는 각각 0.904837, 0.788833으로 3D 레이저 스캐너가 도입된 방법에 비해 매우 큰 차이가 난다. 파이프랙이 안전진단을 받기 위해 1일 이상 기다려야 할 확률은 약 3배 차이가 나며, 구조안전진단 팀이 안전진단을 시작까지 1일 이상 기다려야 할 확률은 약 7배 차이가 난다. 이러한 지표를 고려할 때, 사람을 통한 기존 방식의 구조안전진단은 선행 작업 도중에 생각지도 못한 문제로 지연되는 상황이 많다. 반면에 3D 레이저 스캐너를 활용하면 동일한 과정으로 진행하고, 동일한 스캔 시간으로 안전진단을 진행하기 때문에 지연될 확률이 줄어드는 것을 알 수 있다. 따라서 구조안전진단의 성과를 정확하게 판단하기 위해 각 구조안전진단 팀의 투입에 따른 서비스 비용 외에 파이프랙이 진단받기 위해 대기하는 비용을 고려한 경제성 분석을 실시하였다.

5.3 경제성 분석

본 연구에서는 C_s 는 각 진단 방법에 투입된 인원과 장비의 서비스 비용으로 인건비 및 초기 투자비용을 활용하였다. 3D 레이저 스캐너의 초기 투자비용(Hardware)은 135,000,000원으로 단위 시간으로 환산하면 95,881원/시간이다. 인건비는 비교 및 편의를 위해 2020 엔지니어링 대가 기준의 특급 기술자 인건비(292,249/일)를 동일하게 활용하였다. 기존 방법의 경우 일반적인 구조안전진단 팀이 투입되었으며, 구조안전진단 팀의 투입 비용(인건비)으로 특급 기술자 인건비를 단위시간으로 환산하면 시간당 36,531원이다. 팀 인원수의 평균 인원수만큼 곱하면 SC는 608,972원이다. 3D 레이저 스캐너를 투입한 경우, 위와 마찬가지로 방법으로 평균 인원수와 인건비를 곱한 값과 초기 투자비용을 단위시간으로 환산하여 더해주면 SC는 278,536원이다. 실제 대기시간에 대한 이익과는 다르겠지만 인건비와 마찬가지로 비교

및 편의를 위해 특급 기술자 인건비를 활용하였다. 이를 단위시간으로 환산하여 L과 곱하면 기존 방법의 WC는 248,411원, 레이저 투입 시의 WC는 21,919원이다. 이는 파이프 랙을 진단함에 따라 진단받지 않고 있는 파이프 랙을 작업하지 못함으로써로 수 정으로써 낭비되는 단위 시간당 비용을 의미한다. Table 8은 단위 시간당 총 비용(TC), 대기 비용(WC), 단위 시간당 서비스 비용(SC) 등을 나타낸다.

Table 8. Economical analysis of structural safety diagnosis team input

Project	C _w	SC(=C _s)	WC	TC
As-is (M/M/1)	36,531	608,972	248,411	857,383
To-be (M/M/1)	36,531	278,536	21,772	300,308
To-be (M/D/1)	36,531	278,536	17,718	296,254

기존 구조안전진단 방법에 비해 3D 레이저 스캐너가 도입된 방식의 TC가 857,383원에서 557,299원으로 약 35% 줄어든 것을 확인할 수 있다. 3D 레이저 스캐너가 도입된 방법의 경우 사람이 줄어들고 일관적인 방식으로 육안조사에 소모되는 시간이 줄어들어 서비스 비용 및 대기 비용이 크게 감소하였다. M/D/1 모형을 이용한 경제성 분석의 경우 M/M/1에 비해 대기 비용이 줄어든 것으로 확인되었다. 이는 인력에서는 동일하지만 부분적으로 자동화된 방식의 영향을 받아 지연되는 작업량이 감소하여 파이프랙에 대한 대기비용이 줄어든 것으로 판단된다. 3D 레이저 스캐너가 도입된 방식의 TC는 초기 투자비용이 포함된 값이기 때문에 단일 프로젝트보다는 여러 프로젝트를 진행할수록 초기 투자비용에 대한 부담은 줄어들 것이다.

5.4 대기행렬 모형을 활용한 의사결정

대기행렬 모형의 정량적인 분석 및 기존 연구의 정성적인 분석을 종합하면, Table 9와 같다. 기존 구조안전진단 방법은 인력 중심의 측정방식으로 인해 많은 시간을 필요로 한다. 그러나 3D 레이저 스캐너를 활용한 방법은 기계와 사람이 동시에 활용한다. 또한, 일관된 결과를 확보할 수 있어 기존 방법의 단점을 보완하였다. 수집 데이터 형태의 차이점으로 기존 방법은 수집된 개별 데이터를 취합하는 방식이다. 3D 레이저 스캐너 및 BIM을 이용한 방법은 스캔 데이터를 BIM 데이터로 변형하는 과정에서 자동으로 취합된다. 분석방법으로 기존 방법은 육안조사 및 수동 범위 분석으로 진행된다. 3D 레이저 스캐너 및 BIM을 이용한 방법은 BIM 데이터 기반으로 범위 분석을 진행한다. 정보의 관리 면에서도 용이하며, 변위를 기존 방법보다 정확한 데이터 값으로 확인할 수 있다.

Table 9. Differences in structural safety diagnosis methods

Project	As-is	To-be
Survey Objects	humans	humans + Machine
Data collection form	Point organization	Automatic collection
Displacement analysis method	Visual and manual displacement analysis	Displacement analysis based on BIM data
Diagnosis period (Month)	7	3
Probability that the structural safety diagnosis team is not working (%)	13	63
Average amount of work delayed (m)	6.80	0.60
Average amount of work delayed excluding busy work (m)	5.93	0.22
Average waiting time of pipe rack (hour)	10.00	0.88
Average waiting time of pipe rack excluding time for diagnosis (hour)	8.72	0.33
Probability of pipe rack waiting more than one day (%)	79	12
Total cost (₩/h)	857,383	300,308

대기행렬 모형을 활용하여 분석한 결과에 따르면 3D 레이저 스캐너 도입 시 이점은 다음과 같다. 첫 번째, 진단 기간이 단축 되었음에도 구조안전진단 팀의 여유율은 약 5배 증가하였다. 즉, 기존 방법의 구조안전진단 팀보다 여유 시간이 많고, 진행하는 프로젝트 외에 다른 프로젝트까지 병행하는 것이 가능하다. 두 번째, 지연되는 작업량이 약 92% 감소하였다. 3D 레이저 스캐너를 활용에 의한 일관적인 결과를 통해 분석하기 때문에 지연되는 작업량이 적다. 세 번째, 파이프랙이 1일 이상 대기할 확률이 67% 감소하였다. 즉, 대기할 확률이 감소한 만큼 대기에 대한 비용이 해당 내용으로 것을 확인할 수 있다. 네 번째, 총비용이 기존 방법의 구조안전진단에 비해 65% 감소하였다. 초기 투자비용보다 대기 비용의 감소와 인력의 감소로 얻은 이익이 더 크다는 것을 의미한다. 종합적으로 구조안전진단 팀의 여유율, 지연되는 작업량, 고객의 대기 확률, 비용 측면에서 많은 이점이 있는 것을 확인할 수 있다.

6. 향후 연구 진행 방향 및 결론

본 연구에서는 대기행렬모형을 활용하여 기존 방법과 3D 레이저 스캐너 도입에 따른 구조안전진단 팀의 성과를 비교 분석하였다. 기본 성과적도 분석, 확률 분석, 경제성 분석을 통해 기존 방법과 3D 레이저 스캐너가 도입되었을 때 구조안전진단 팀의 성

과에 어떤 영향을 미칠 수 있는지 정량적으로 분석하였다. 분석 결과를 토대로 3D 레이저 스캐너 도입에 대한 의사결정을 지원하였다. 본 논문은 다음과 같은 시사점을 갖는다.

첫 번째로 지면되는 작업량에 대한 비용과 초기 투자비용의 일부까지 고려하여 구조안전진단 팀의 성과 분석을 실시하였다. 기존 연구에서는 시간과 인력 투입 측면만을 고려하였지만, 구조안전진단 팀이 직접적으로 서비스를 제공하는 파이프랙의 대기 시간과 3D 레이저 스캐너의 구매비용까지 고려하였다. 실제 프로젝트 참여자들이 일을 통해 얻는 가치는 본 연구에서 활용한 대기 비용보다 클 수 있다. 따라서 구조안전진단 팀의 경력, 인원수에 대한 의사결정을 통해 직접적으로 인지되지 않으나, 프로젝트의 성과를 저해할 수 있는 대기 비용을 상쇄할 필요성이 있다.

두 번째로 제조 프로세스처럼 생산성(서비스율)이 일정한 경우, 일관적이지 않은 성질이 반영된 M/M/1 모델이 아니라 M/D/1 모델로 분석할 경우 좀 더 향상된 성과를 얻을 수 있다. 즉, 일관성 없는 기존 프로세스를 3D 레이저 스캐닝을 활용함으로써 명확한 프로세스로 관리될 수 있으며, 성과가 향상될 수 있다.

세 번째로 정량적으로 분석했을 때 3D 레이저 스캐너가 구조안전진단을 진행함에 있어 더 효율적이라는 것을 확인할 수 있었다. 기존 방법과 3D 레이저 스캐너가 도입된 방법을 비교하여 3D 레이저 스캐너가 도입된 방법이 용역비와 대기 비용이 훨씬 적게 나타난 것을 확인하였다. 이는 3D 레이저 스캐너를 활용하여 정확해진 진단결과를 빠르게 확보할 경우 후발 과정에도 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다. 또한, 작업 기간 및 작업 속도에도 영향을 미치기에 다른 프로젝트도 동시에 진행하는 것이 가능할 것으로 판단된다. 결과적으로 3D 레이저 스캐너를 활용하면 프로젝트의 성과를 향상시킬 수 있다.

이 밖에도 본 연구에서는 대기행렬 모형을 활용하여 대기 비용과 초기 투자비용을 통해 정량적으로 경제성 분석을 진행했다는 장점도 있다. 이러한 장점을 통해 본 연구의 결과는 3D 레이저 스캐너 도입에 대한 실행 전략을 세우는 데 기여할 수 있다고 판단된다. 또한, 기존 경제성 분석의 대기 비용이라는 추가 변수를 제공함으로써 보다 정확한 경제성 분석을 위한 가능성을 제공한다.

이러한 가능성에도 불구하고 본 연구가 갖는 한계점은 단일 프로젝트를 통해 결론을 도출하였기 때문에 여러 프로젝트를 통해 성과를 분석하면 더 신뢰성 있는 성과 지표를 도출할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 해당 사례에서는 기존 구조안전진단 팀이 자체적으로 3D 레이저 스캐너 사용법을 습득하였기에 초기 투자 비용 중 교육비와 software에 대한 비용이 포함되어 있지 않다는 한계점이 있다. 해당 비용들이 추가되어 분석된다면 더 정확한 결과가 나올 것으로 판단된다.

References

- Bosche F., Ahmed M., Turkan Y., Haas C. T., Haas R. (2010). The value of integrating scan-to-BIM and scan-vs-BIM techniques for construction monitoring using laser scanning and BIM: The case of cylindrical MEP components. *Autom. Constr.* 49, pp. 201–213.
- Bosche, F. (2010). Automated recognition of 3D CAD model objects in laser scans and calculation of as-built dimensions for dimensional compliance control in construction. *Adv. Eng. Inform.* 24, pp. 107–118.
- El-Omari S., Moselhi O. (2008). Integrating 3D laser scanning and photogrammetry for progress measurement of construction work. *Autom. Constr.* 18, pp. 1–9.
- Eom, S. J. (2017). The 4th Industrial Revolution, Construction Industry, and CM. *Construction Engineering and Management*, 18(4), pp. 3–7.
- Frederick S., Gerald J. (2013). *Introduction to Management Science, A Modeling and Case Studies with Spreadsheets*, 9th Edition, McGrawHill, Chapter 17.
- Frederick S., Mark S. (2010). *Introduction to Management Science, A Modeling and Case Studies with Spreadsheets*, 4th Edition, McGrawHill, Chapter 11.
- Gordon S., Lichti D. (2007). Modeling terrestrial laser scanner data for precise structural deformation measurement. *J. Surv. Eng. ASCE*, 133, pp. 72–80.
- GSA. (2014). <https://sites.google.com/site/bimprinciple/in-the-news/gsabimguidefor3dimaging>.
- Ham, N., Moon, S., Kim, J. H., Kim, J. J. (2020). Optimal BIM staffing in construction projects using a queueing model. *Automation in Construction*.
- Ham, N., Moon, S., Kim, J. H., Kim, J. J. (2018). Economic analysis of design errors in BIM-based high-rise construction projects: Case study of Haeundae L project. *Journal of Construction Engineering and Management*, 144(6).
- 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.

- Ham N. H., Yeo O. K., Ji K. H. (2018). Construction phase BIM coordinator business performance analysis using atmospheric matrix model. *Journal of the Korean BIM Society*, 8(3), pp. 31–42.
- Ham, N. H., Lee, S. H. (2018). Empirical study on structural safety diagnosis of large-scale civil infrastructure using laser scanning and BIM. *Sustainability*, 10(11), pp. 4024.
- Jang, S., Lee, G. (2018). Process, productivity, and economic analyses of BIM-based multi-trade prefabrication—A case study. *Automation in Construction*, 89, pp. 86–98.
- J.A. Schwarz, G. Selinka, R. Stolletz, Performance analysis of time-dependent queueing systems: survey and classification, *Omega* 63 (2016) pp. 170–189
- Teknomo, K., Queuing rule of thumb based on M/M/s queuing theory with applications in construction management, *civil engineering dimension, Journal of Civil Engineering Science and Application*, (2012), 14(3), pp. 139–146.
- Kang J.M., Lee J. Y., Yeon C. G. (2016). .3D BIM design plan using scanners. *Journal of The Institute of Technology And Engineering Conference*, pp. 205–208.
- Kang T. W. (2016). 3D image scan-based MEP facility management technology study. *Journal of the Korean BIM Society*, 6(4), pp. 18–26.
- Kim J. E., Park S. C., Tae W. (2015). A basic study of lidar-based point cloud data data structures and processes for architectural MEP reverse engineering guidance. *Journal of the Korean Society for Industrial-Academic Technology*, 16(8), pp. 5695–5706.
- Kim T. H., Woo W. T., Jung K. R. (2020). Scan-to-BIM for 3D scanning and precision scanning and precision investigation process—As-Built-BIM construction for construction and structural monitoring. *Journal of the Conference of the Institute of Architecture*, 40(1), pp. 428–431.
- Lee B. D., Kim T. H., Park K. M. (2019). Accurate survey of fire-sea buildings using 3D scanning. In 2019, The Korean Society of Structural Eddyms Spring Conference, pp. 26–29.
- Lee J. W., Yoon B. Y. (2007). Astronomical and internal displacement observation of tunnels using three-dimensional laser scanning. *Journal of Korea Space Informatics*, 15(2), pp. 67–75.
- Lee S. S., Kwon S. W. (2014). A Study on Optimal Laser Scanning method for Reverse Engineering at Interior, *Construction Management Society*, 15(3).
- Mckinsey Global institute(MGI). (2017). Reinventing Construction: A Route to Higher Productivity.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport(MOLIT). (2017). 4th Industrial Revolution Response Strategy.
- Park H. J., Ryu J. R., Woo S. H., Chu S. Y. (2016). A study on the improvement method of building safety diagnosis investigation method using laser scanner-based BIM reverse engineering technology. *Proceedings of the Korean Society of Architects – Planning*, 32(12), pp. 79–90.
- Park H. S., Lee H. M., Adeli H. (2007). A new approach for health monitoring of structure: Terrestrial laser scanning. *J. Comput. Aided Civ. Infrastruct. Eng.* 22, pp. 19–30.
- Science and Technology Policy Institute(STEPI). (2015). A report on the regeneration strategy of an aging industrial complex.
- Seo H. C. (2019). The use of 3D scanning in the construction industry. *KIBIM Magazine*. 9, pp. 31–38.
- Seo S. I., Won J. H., Park B. W., Lee B. G. (2015). Ground laser measurement accuracy evaluation for undying building scanning. *Journal of the Korean Society of Measurement Conference*, pp. 385–388.
- Son T. H., Lee K. P. (2019). Digital construction technology utilization strategy of the future construction industry. *Korea Construction Industry Research Institute*, pp. 31–33.
- 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.
- Woo S. H., Yi D. R., Ha G. J. (2016). Basic research on 3D scanning for building maintenance. *Journal of the Conference of the Institute of Architecture*, pp. 71–72.
- Yoo J. H., Hong S. A., & Kim Y. G. (2013). Analysis of the accuracy of reverse engineers of architectural cultural property by ground-based radar. *The Korean Society of Cadastre*, 29, pp. 85–97.
- Yoon J. S., Sah G. M., Lee J. S., Lee K. S. (2007). Development of automatic detection algorithm for lining damage through tunnel laser scanning data analysis. *KTA*, 9(1), pp. 19–28.