

Research Paper

IPA 분석을 통한 3차원 스캐닝의 모듈러 건축 프로젝트 품질관리 적용에 관한 연구 An IPA-based Evaluation of 3D Scanning Technology Application for Quality Control in Modular Construction Projects

이정훈*

Lee, Jeong-Hoon*

Assistant Professor, Major in Architectural Systems Engineering School of Architectural Engineering, Gyeongsang National University, Jinju, Gyeongnam, 52725, Korea

*Corresponding author

Lee, Jeong-Hoon
Tel : 82-55-772-3677
E-mail : jhleepro@gnu.ac.kr

Received : July 1, 2024

Revised : July 10, 2024

Accepted : July 17, 2024

ABSTRACT

Modular construction, a prominent method in the evolving construction industry, necessitates robust quality control for successful implementation. This study investigates the potential of 3D scanning technology for enhancing quality control processes in modular building construction. Through an IPA analysis of major construction projects across factory production, transportation, and on-site stages, the study evaluates the current state of 3D scanning application in modular construction quality control. Results indicate a high demand for 3D scanning data across various quality control aspects. However, certain limitations in technology and practical application were identified. The findings of this research contribute to the advancement of 3D scanning technology in modular construction and inform future research on cutting-edge quality control strategies.

Keywords : modular construction, quality control, importance-performance analysis, 3D scanning technology, smart construction

1. 서론

1.1 연구 배경 및 목적

모듈러 건축공법은 건축공사의 약 70% 이상을 공장에서 완료하고 현장에 운반한 후 설치하는 것을 말한다. 따라서 기존 현장 중심 건축공법(On-Site Construction)에 비해 품질관리가 더 우수하다고 알려져 있다. 그러나, 모듈러 건축의 경우 공장제작단계-운송단계-현장설치단계를 거치며 필연적으로 모듈러 유닛의 반복적인 이동, 양중, 운송의 프로세스를 거치며 모듈러 유닛 구조체와 실내외 마감재의 변형(뒤틀림, 탈락, 휨 등)이 발생할 수밖에 없다[1]. 따라서 프로젝트 기간 내 모듈러 유닛의 지속적인 품질관리가 필요한데, 현재 모듈러 건축의 품질관리는 육안검사 및 샘플링을 통한 일부 부재의 비파괴검사를 통해 수행되고 있어 관리방안의 신뢰도와 효율성이 떨어지고 있다[2]. 이에, 본 연구는 IPA(Importance-Performance Analysis)분석을 이용하여 모듈러 건축프로젝트 단계별 품질관리에 3차원 스캐닝 기술 적용 및 활용성에 대한 가치평가와 향후 개선사항 도출을 실시한다.

1.2 연구 범위 및 방법

본 연구의 범위는 모듈러 건축 프로세스에서 공장제작단계(구조체 조립단계-벽체 및 마감 제작단계-모듈러 출하 단계), 운송단계(공장 양중-이동-현장 하역), 현장설치단계(양중 전 단계-양중단계-구조체 조립단계-실내외 마감단계)를 대상으로



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

변형, 파손, 탈락을 주요 품질이슈로 규정한 후 이에 따른 3D 스캐닝 적용 효과성을 검토한다. 본 연구의 목적 달성을 위한 연구절차는 다음과 같다. 첫째, 모듈러 건축 품질관련 국내외 연구문헌 분석을 통해 주요 품질 이슈와 건설산업에서 3D스캐닝을 이용한 품질관리 방안현황 분석을 실시한다. 둘째, 선행연구문헌 분석에 따른 주요 모듈러 프로젝트 품질이슈와 3D스캐닝의 품질관리 방안을 IPA 세부 항목으로 도출한다. 셋째, 모듈러 건축 전문가를 대상으로 한 IPA 중요도 및 성취도를 산출하고, 상호관계 분석을 통해 프로세스 단계별 품질관리방안을 제시한다.

2. 선행연구분석

2.1 모듈러 건축 품질관리

모듈러 건축의 건설프로세스는 크게 1)공장제작단계, 2)운송단계, 3)현장시공 단계로 구분할 수 있다. 공장제작단계에서는 모듈러 구조체 및 마감공사 등 전체 공정의 약 70%가 수행되므로 기존 현장중심 건설공법과 같이 건설품질관리기준 및 점검이 실시된다. 예를 들어, 철골구조의 모듈러 유닛은 구조체 조립단계에서 철골조의 수직 및 수평 오차에 대한 검측과 내화 코팅 유무 및 두께 확인등의 품질관리작업이 수행된다. 해당 기준들의 경우, 모듈러 건축을 위해 별도로 존재하는 품질기준이 아니라 국토교통부고시 「건설공사 품질관리 업무지침」 제2조(정의)의 품질관리지침을 따라야 한다[1]. 세부적으로는 동 지침 [별표 2] 건설공사 품질시험기준(제8조제1항관련)의 시험종목 및 시험방법에 따라 실시한다. 운송단계 품질관리의 경우, 공장에서 설치 현장까지 모듈러가 차량 또는 선박 등의 이동 수단을 이용해 운송되면서 공장제작이 완료된 모듈러의 품질이 손상되지 않도록 포장 및 저진동 운송을 실시하는 것을 말한다. 일반적으로 육로로의 이동이 많으므로 저진동 트레일러를 이용해 운송되는데, 이때 모듈러는 육로 이동 과정에서 차량의 진동, 회전, 풍압 등의 외력으로 인해 공장에서 시공된 가구 및 마감재가 손상 받을 수 있다. 현장 도착 후 이에 대한 육안검사 및 수직/수평계를 이용하여 구조체 수직도 여부를 확인하는 품질검수 절차가 있다. 다만, 해당 품질관리는 현재 국내 별도 규정이 존재하지 않아 의무사항은 아니므로 주로 내/외부 마감재의 손상여부를 육안 검사로 짧은 시간 내 실시하고 있다. 현장시공단계의 품질관리는 현장설치에 필수적인 기초공사부터 시작되며, 이후 공장제작 완료된 모듈러가 현장에 도착하면서 구조체 및 내/외부 마감재에 대한 품질관리가 시작된다. 기초공사의 품질관리란, 공장에서 제작된 모듈러 중 현장 기초와 최초 설치되는 모듈러와의 접합을 위한 기초 주각부를 시공할 때 앵커볼트의 수직도와 베이스 플레이트의 시공관리를 뜻한다. 구조체 및 내외부 마감재 품질관리란, 공장제작 완료된 모듈러가 현장에 도착후 타워크레인 등 양중 장비를 통해 양중 및 설치되는 과정에서 구조체 휨 변형 및 충돌 방지를 위한 일련의 관리를 뜻한다[2].

2.2 3D스캐닝을 이용한 건설산업 품질관리 연구현황

2.2.1 3D 스캐닝 정의 및 활용현황

3D 스캐닝이란, 3D 스캔장비를 이용하여 대상물을 3차원 형태로 스캔하여 이를 분석 가능한 형태의 데이터로 전환하는 것을 말한다. 스캐닝 방식은 크게 접촉식 방식과 비접촉식방식이 있는데, 스캐닝 대상물의 형태와 크기, 그리고 목적성에 따라 선택된다. 접촉식 방식의 경우, 프루브(Probe)라는 탐촉자를 물체에 직접 닿게 하여 측정하는 것을 말하며 CMM(Coordinate Measuring Machine)이 대표적인 방식이다[3]. 이 방식은 주로 제조업에서 비교적 크기가 작은 물체에 대한 정밀치수를 스캔하거나 표면검측을 위해 사용한다. 다만, 프루브에 의해 물체의 표면이 변형되거나 손상될 수 있는 단점이 있다. 비접촉식 방식의 경우, 장거리와 단거리로 구분하여 빛을 물체 표면에 조사하여 그 빛이 돌아오는 시간인 TOF(Time of Flight)방식을 이용하여 물체의 형태와 표면을 인식하고 이를 데이터화 하는 방식이다. 대표적으로 사진, LiDAR(라이다), RGBD센서, 토털스테이션 등의 방식이 있으며 이 중 지상형 LiDAR 방식은 광범위하고 복잡한 측정에 유효하며 측정방식은 TOF(Time of Flight)방식과 위상(Phase)방식으로 구분하고 있다. 이밖에도 일반적인 3차원 레이저스캔 방식에 따른 분류는 Table 1과 같다.

Table 1. Classification of 3D scanning methods(adapted from KICT[3])

Classification	Scanning technology	Scanning method
Close contact type scan	Contact type scan	- Data interpretation method scanning using a contact inspection device
Long-distance laser method	Laser scan, LiDAR	- Time of flight measuring method scan - Phase-shift detection method scan
Short-distance laser optical method	Optical 3D scan, Laser scan	- Handheld method - Line scanning method
Optical image method	Camera, Stereo camera, Depth camera	- Photogrammetry scan method - Stereo image scan method - RGB-Depth scan method

스캐닝 데이터의 스캔 정보와 산출물은 사용목적에 따라 품질 수준에 차이가 있으며, 이는 상세수준(Level of Detail, LOD)으로 정의한다. LOD의 경우 점군 밀도와 해상도에 따라 구분되며, 해당 LOD에 따른 산출물 유형 및 내용은 Table 2와 같다.

Table 2. Level of Detail(LOD) definitions for deliverables(adapted from KICT[3])

Level of Detail(LOD)	Scanning result			Output	
	Tolerance	Average dot density	Resolution	Content	Category
LEVEL 1	±50	20	100×100	- Dot data	-
LEVEL 2	±15	10	30×30	- Dot data	-
				- 3D parametric Model	-LOD 200
LEVEL 3	±10	5	20×20	- 2D drawing	-Elevation drawing
				- Dot data	-
				- 3D parametric Model	-LOD 300
LEVEL 4	±5	2	10×10	- 2D drawing	-Plan,section,elevation,detail drawing
				- Dot data	-
				- 3D curved model	-
				- 3D parametric model	-LOD 300
				- 2D drawing	-Plan,section,elevation,detail drawing

2.2.2 3차원 스캐닝 관련 선행연구 분석

국내의 경우, 지난 2022년 1월 한국건설기술연구원에서 「3차원 스캔 가이드라인(건설, 건축시설물 역설계, 관리, 시공을 위한 스캐닝 가이드라인)」을 배포하면서 발주자 및 산업계 실무자에게 활용가능한 지침을 제공하였다[3]. 본 가이드라인의 경우, 3D스캔 장비를 이용한 건축 품질관리 및 제품 역설계 시 발주자를 위한 요구사항 정의, 프로세스 정의, 산출물 품질 정의 등을 포함하고 있다. Kim[4]은 골조공사 품질점검에 3차원 스캐닝 기술을 적용하였을 때 실제 측정값과의 오차와 측정 시간에 따른 효율성에 대해 사례조사를 실시하였다. 본 연구 결과, Revit을 이용한 측정값과 3D 레이저스캐닝을 통한 측정값 차이를 실시하였고 그 결과가 건축공사 표준시방서의 최대 오차수치 이내에 있는 것을 확인하였다. 다만, 해당 연구결과는 Revit 도면에 작성된 수치와 실제 3D 스캐너로 측정한 값과의 비교였기 때문에 현장 실측값과 3D스캐닝간의 오차범위 이내 결과에 대해서는 확인하기 어려운 한계가 있다.

국외의 경우, 3D 스캐너를 이용한 건설공사 품질관리에서 BIM과의 연계성 및 3D 스캐닝 데이터 전처리 및 후처리와 관련한 연구가 진행되고 있다. Esfahani et al.[5]은 3D 스캐닝은 BIM으로 구현된 3차원 형태의 가상현실 속 구조물이 실제 현실에서 구현될 때 발생하는 오차와 이를 감지해내고 수정할 수 있는 가장 효과적인 방법으로 보았다. 이에, Scan-to-BIM개념에 대한 정의와 이에 따른 정량적 수치 및 수평 오차값을 확인 및 검출할 수 있는 몇 가지 모델을 제안하며, 실제 사례분석을 통해 그 개념을 검증하였다. Arayici[6]은 3차원 스캐닝을 이용해 현재 지어진 건축물 두 곳의 실측을 하고, 이를 CAD와 3D Printer를 이용해 모형제작으로 연결하여, 건설 실무진이 3차원 스캐닝의 활용성에 대한 검토를 실시하였다. 본 연구의

Table 3. Application of 3D scanning in construction quality management research

Part	Author	Research purpose	Research method	Suggestion	Year
Regulation	KICT [3]	“The main purpose of these guidelines is to effectively apply 3D scanning technology to records and actual measurements of building facilities to build good quality data and provide practical guidance and information that can be used to suit the orderer’s purpose”	Guideline	“Guidelines were created focusing on the content required when working on a request for proposal for a business order, and the entire process from scanning work to data post-processing and output of results was organized and proposed so that 3D scanning work can be understood.”	2021
Case study	Kim [4]	“The 3D laser scanning technology used in the case analysis site in this study is particularly time consuming and research and development is being conducted as an efficient application method for the quality inspection of construction that require high precision.”	3D data comparing real construction data	“Quality inspection using 3D laser scanning can inspect many parts quickly with less manpower compared to the existing conventional inspection method.”	2021
	Esfahani et al. [5]	“This paper assesses the impact of levels of automation and modeller training on the accuracy and precision of generated BIM data.	Field test with five modelling scenarios	“The value for pursuing automation of such modelling tasks should be based predominately on time savings.”	2021
	Arayici [6]	“Two case studies are introduced to demonstrate the use of laser scanner technology in Built Environment.”	Field test	“In regard to engineering, modelling from reality offers an efficient alternative for engineers and surveyors. For example, engineers can use the information that is converted into IFC can be used in the building lifecycle for regeneration.”	2007
	Bhatti et al. [8]	“This research utilized the most modern models of laser scanners and accompanying software capable of accurately capturing and aligning point clouds.”	Field test using Faro 3D 150-S laser scanner	“The results showed that the above technique provides the best outcomes for reducing seismic damage collapses.”	2021
Scanning data application	Yuan et al. [9]	“..aims to develop an automatic classification method for common building materials based on TLS data.”	Using Terrestrial laser scanning (TLS)	“Different machine learning algorithms were compared, and the best algorithm showed an average classification accuracy of 96.7%, which demonstrated the feasibility of the developed method”	2019
	Rausch et al. [10]	“..development of a framework for deploying and comparing three distinct gDT approaches for use during fabrication and assembly in OSM(Off-Site manufacturing)	3D Scan, BIM	“..scan-vs-BIM is the most accurate approach, parametric BIM updating produces the most semantically rich gDT, and scan-to-BIM is a middle-tiered option, striking a balance between representational accuracy and semantic enrichment.”	2023
	Xu et al. [11]	“This paper seeks to explore a more automated and accurate quality control process, focusing on the surface defects in prefabricated elements. Laser scanning is adopted for data collection and the 3D reconstruction of the prefabricated components“	K-nearest neighbors (KNN), BIM, IFC (Industrial Foundation Classes)	“This study designs a more efficient and accurate quality evaluation process, including data collection, data processing, indicator calculation, and quality evaluation. Moreover, the results moving forward can provide feedback to the cause of the quality issues and further improve the production quality of prefabricated elements”	2020
	Son and Han [7]	“This study focuses on the development of a scan planning method for modular or fabricated components, ensuring the data quality for quality assessment.”	3D CAD, Algorithm, TLS data	“This paper proposes a model-based 3D scan planning method for modular components that ensures user-specified scan quality.”	2023

경우, 3차원 스캐닝에 대한 기술과 이에 대한 개념이 명확하게 정립되지 않았던 시기였으나 향후 3차원 스캐닝이 실제 시공 단계 및 준공된 건축물에 어떤 형태로 적용될 수 있는 지에 대한 청사진을 제시한 의의가 있다. Son and Han[7]은 3차원 스캐닝 데이터의 모듈러 건축 적용에 따른 정확도 향상 및 효율성 향상을 위해 사용자 중심의 3차원 데이터 품질향상 방안을 제시하였다. 본 연구에서는 정확한 데이터 수집을 위해서는 계획수립이 잘 되어야만 하며, 이 계획은 수집하는 데이터의 종류와 그 크기에 따라 구분될 필요가 있다고 말한다. 특히, 모듈러 건축의 경우, 품질관리 이슈에서 수직도와 수평값에 대한 요구도가 크므로, 현재 2D 기반의 스캐닝 계획이 오히려 실측 데이터와의 오류를 키울 수 있다는 점을 강조하고 있다.

따라서, 선행연구를 종합 분석하면, 3차원 스캐닝을 이용한 건설산업 품질관리 활용방안은 주로 1)실제 시공된 구조체의 수직/수평 오차와 2D 또는 3D도면상에서의 오차 비교 분석, 2)실제 시공된 부분에 대한 손상여부 확인 및 도면과의 상이점 도출, 3)시공오차의 허용범위 내 시공여부 확인, 4)기존 실측방법과 3차원 스캐닝 방법을 이용한 측정 방법과의 효율성 검증 및 활용성 검토로 볼 수 있다(Table 3).

2.3 모듈러 건축 및 OSC(Off-Site Construction)분야 3차원 스캐닝관련 연구현황

모듈러 건축은 OSC 건축 공법 중 하나로 기존 건축공법과 달리 탈현장 중심이므로 주요 공정의 70% 이상이 통제된 공간인 공장제작 환경에서 진행된다. 기존 현장중심 건축공사와 가장 큰 차이점 중 하나는 부재들을 하나씩 결합 또는 연결하는 과정에서 수직/수평 오차가 연속적이면서 누적된 형태로 계속 발생될 수 있다[2]. 또한, 마감 공사가 공장에서 완료된 후 운송 및 현장설치 과정을 거치면서 손상 또는 변형이 발생할 수 있는 특수성을 갖고 있다. 따라서 주요 구조체의 수직/수평 오차 및 실내/외 표면 손상에 대한 지속적이며 체계적인 품질관리가 필요하다. 3차원 스캐닝 기술의 경우, LOD 기준에 따른 스캐닝 데이터 취득 및 가공을 통해 모듈러 건축물의 세부 품질관리가 가능하다[11]. Kim et al.[12]는 선행연구개발을 보완시켜 PC 부재의 모서리 부분을 3차원 스캐닝하여 해당 데이터 취득 및 가공을 통한 품질관리 알고리즘 개발 및 해당 기술에 대한 검증을 실시하였다. Wang et al.[13]은 색상 인식이 가능한 3차원 스캐닝 기술을 적용하여 pc 부재의 휨 변형 측정과 해당 부재의 현장설치 과정 중 발생하는 오차를 확인에 대한 알고리즘을 개발하였다. Kim et al.[14]는 pc 부재 표면을 3차원 스캔하여 이에 대한 하자 발생 여부 감지 알고리즘에 대한 연구를 진행하였으며, Li et al.[15]는 3차원 스캐닝을 통한 osc 부재 표면의 평활도를 시각적으로 표현할 수 있는 방법에 대한 연구를 진행하였다.

선행연구를 종합하여 보면, 3차원 스캐닝 기술의 건축분야 적용은 앞으로도 활발히 진행될 것으로 보이며 모듈러 건축 및 OSC 분야에 특화된 형태의 연구도 일부 수행되고 있으나 주로 3차원 스캐닝 기술이 가진 시각적 효과 및 데이터 정밀도를 활용한 실시간 데이터 취득과 활용에 집중되고 있음을 알 수 있다. 따라서 현재 3차원 스캐닝 장비의 기술 수준과 해당 기술을 이용하여 얻고자 하는 데이터 유형 및 향후 요구되는 데이터의 정밀도가 어느 정도인지를 정확히 파악하여 이를 적극적으로 활용할 수 있는 계획과 전략이 필요하다.

2.4 IPA(Importance-Performance Analysis) 방법

Martilla and James[16]가 1997년 처음 제안한 전통적인 IPA(Importance-Performance Analysis) 방법은 전문가 자문 및 설문문을 통해 한정된 자원을 효율적으로 투입하기 위한 분석방법으로, 분석 대상에 대한 속성을 정의한 후 이를 상대적 중요도와 반영도(만족도, 적용성 등)를 2차원 도면에 배치(X-Y축)하여 표현 및 분석한다[2]. 이에, IPA는 특정 분석 대상에 대한 전문가 집단의 세부적 분석 방안을 효과적으로 표현하고 분석할 수 있는 장점으로 경영 및 마케팅, 건설분야에서 다양한 연구에 활용되고 있다[17-19]. 본 연구에서는 기존 IPA 분석 매트릭스(Figure 1(a))를 연구분석방향에 맞도록 사분면 정의를 일부 수정하여 분석한다. Figure 1(b)의 수정된 IPA 사분면을 보면, 1사분면은 중요도와 만족도가 모두 높은 영역이므로 해당 영역에 포함된 공사의 경우 3차원 스캐닝 적용 시 가장 높은 수준의 결과를 도출해 낼 수 있다는 것을 의미한다. 일반적

으로 1사분면의 경우, 중요도-만족도가 높아 현재 수준을 유지하는 것으로 해석되는 결과로 사용될 수 있으나, 본 연구에서는 현재 실행되고 있는 품질관리대상에 대한 품질검사 및 절차에 3차원 스캐닝 적용 시에 대한 그 효과성과 중요도를 확인하고자 하는 목적을 갖고 있으므로, 1사분면에 대한 해석을 High level of demand로 정의하였다. 2사분면은 집중관리지역으로 중요도는 높지만 실제 실행도가 낮으므로 3차원 스캐닝의 실무 적용성에 대한 개선이 시급하다는 것을 말한다. 예를 들어, 모듈러 건축공사 부분 중 3D 스캐닝관련 항목이 해당 위치에 있는 공사라면 3D 스캐닝적용 시 효과성 및 중요도가 높지만 현재 실행하지 못하고 있다는 것을 말한다. 3사분면은 중요도와 실행도가 모두 낮으므로 해당 항목에 대한 개선은 큰 의미가 없다는 것을 뜻한다. 마지막으로, 4사분면은 과잉투자 우려 지역으로 중요도는 낮지만 실행도가 높아 해당 영역에 대한 실행도를 낮추거나 다른 영역으로의 이동이 필요하다는 것을 말한다.

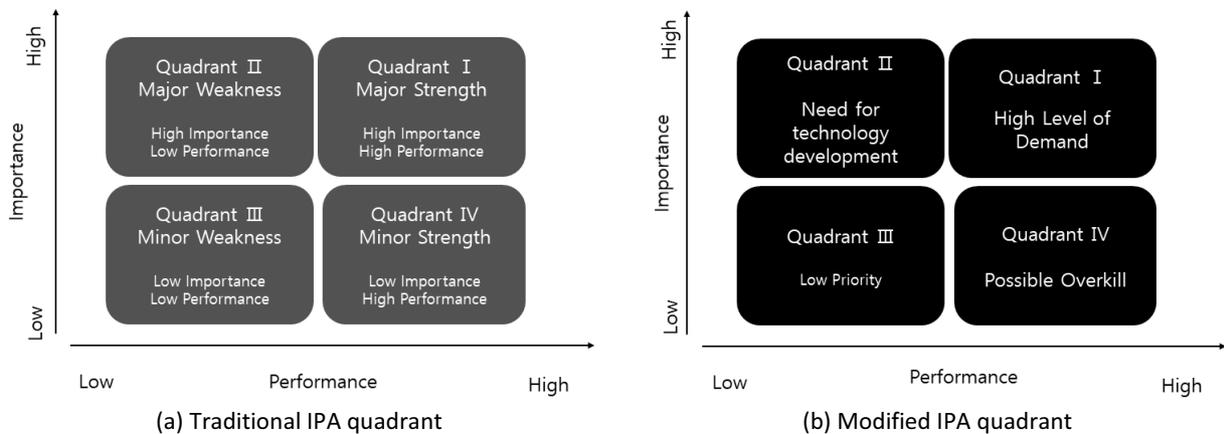


Figure 1. Importance-Performance Analysis(IPA) quadrant example

3. 분석 결과

3.1 분석개요

본 연구의 모듈러 건축 프로젝트 관련 설계, 공장제작, 현장시공 실무진 및 모듈러 건축 프로젝트 관련 연구를 수행하고 있는 학계 전문가를 대상으로 한다. 설문조사 배포 기관은 총 6개 기관이며, 설계전문가 4명, 공장제작단계 전문가 8명, 현장시공 전문가 5명, 학계 전문가 5명으로 총 22명의 설문결과를 확보하였다. 설문조사 기간은 2024년 3월 4일부터 2024년 4월 15일까지 진행하였으며, 대면 및 비대면 온라인 평가를 병행하여 실시하였다. 설문조사 대상자들은 모듈러 건축 현업에 종사하고 있는 관계자 및 연구자를 대상으로, 3차원 스캐닝 기술현황 및 데이터 취득내용을 사전에 학습 및 인지한 후, 현재 모듈러 프로세스 단계별 품질관리 업무에 3차원 스캐닝 적용이 얼마나 효과적일지에 대한 기술 적용성 평가를 실시한다.

3.2 분석항목 선정

본 연구는 모듈러 프로젝트 수행 단계에서 실제 품질관련 이슈 설문조사 항목은 선행연구분석으로 3차원 스캐닝 데이터의 수준과 활용처에 대한 내용을 분석하여, 해당 내용을 설문조사 대상자들에게 사전 배포 및 교육을 실시하고, 이후 모듈러 건축 프로세스 단계별 품질측정 방법과 수준을 고려하여 선정하였다. 항목 선정 후 모듈러 프로젝트 실행 프로세스에 따른 품질관리대상 항목을 분류 및 정리하며, 해당 항목의 3차원 스캐닝 적용 목적을 정의하고, 이에 대한 중요도-적용성을 도출한다. 다만, 공사별 3차원 스캐닝 적용 목적의 경우, 표면검측 및 시공오차 등 다양한 목적을 동시에 확인 및 검사할 수 있으

나, 본 연구에서는 해당 공사에서 가장 우선적으로 필요로 하는 품질검사 한 가지만을 대상으로 한정한다. 모듈러 프로젝트 실행 프로세스는 공장제작(F), 운송(T), 현장설치(O)로 구분한다. 공장제작의 경우, 구조체 조립과 실내/외 마감공사를 LEVEL1으로 구분하며, 이에 따른 세부 공사에 따라 3차원 스캐닝 적용 목적성을 구분한다. 공장제작단계 구조체 조립단계(S)에는 1)주요구조부(골조)조립(S), 2)데크플레이트시공(B), 3)내화석고보드시공(C)이 있으며, 실내/외 마감공사단계(EI) 1)전기공사(A), 2)천정공사(B), 3)바닥공사(C), 4)위생기구설치공사(D), 5)벽지 및 몰딩시공(E), 6)가구설치(F), 7)조명설치 공사가 있다. 3차원 스캐닝 적용목적의 경우, 선행연구문헌 및 전문가 자문을 통해 품질관리에 해당하는 세부 사항으로 정의된다. 운송단계(T)는 포장 및 운송(P)에서 1)포장(A), 2)공장에서의 양중(B), 3)이동(C), 4)현장하역(D)이 있다. 마지막으로, 현장설치(O)는 기초공사(BS)의 경우, 1)앵커볼트설치(A), 2)베이스 플레이트 설치(B)가 있고, 양중 전 단계(PL)는 1)벨러스빔 연결(A), 양중단계(L)는 모듈러 양중(B)이 있다. 설치단계(IN)는 1)모듈러 가조립(A), 2)모듈러 최종 조립(B)이 있으

Table 4. Application of 3D scanning in modular construction processes

Class	LEVEL 0	LEVEL 1	LEVEL2	Code	3D Scanning Applications		
1	Factory (F)	Structural Assembly(S)	Main Structural Assembly(A)	F-SA	Vertical/horizontal error detection at joints		
			Deck Plate Construction(B)	F-SB			
			Fire-resistant gypsum board construction(C)	F-SC	Check installation location & vertical/horizontal error detection at joints		
					Wall(gypsum board, insulation) construction(D)	F-SD	Check for interference
					Electrical/communication wiring work(A)	F-EI-A	Vertical/horizontal error detection at joints
					Ceiling(gypsum board, etc.) construction(B)	F-EI-B	
					Floor(concrete pouring, heating piping) construction(C)	F-EI-C	
2		Interior and Exterior Finishing(EI)	Installation of sanitary equipment(D)	F-EI-D	Check installation location & Vertical/horizontal error detection at joints		
			Interior(wallpaper, molding, etc.)(E)	F-EI-E	Check surface quality		
			Interior furniture(sink, storage cabinet, etc.)(F)	F-EI-F	Vertical/horizontal error detection at joints		
			Light fixture installation(G)	F-EI-G	Check for interference		
3	Ttransportation (T)	Packaging and Transportation (P)	Packaging(A)	T-PA	Detection of modular unit deformation and confirmation of damage to finishing materials		
			Loading(B)	T-PB			
			Moving(C)	T-PC			
			Unloading(D)	T-PD			
5	On-Site Work (O)	Foundation and based construction work(BS)	Anchor Bolt Installation(A)	O-BS-A	Check installation location & Vertical/horizontal error detection at joints		
			Base Plate Installation(B)	O-BS-B			
		Pre-lifting(PL)	Balance Beam Connection(A)	O-PL-A	Check installation location & vertical/horizontal error detection at joints		
		Lifting(L)	Modular Unit Lifting(B)	O-L-B	Vertical/horizontal error detection at joints		
		Installation(IN)	Modular Unit Provisional Assembly(A)	O-IN-A	Check installation location & vertical/horizontal error detection at joints		
			Modular Unit Final Assembly(B)	O-IN-B	Check installation location & vertical/horizontal error detection at joints		
		Finish work(FI)	Roof Installation(A)	O-FI-A	Detection of modular unit deformation and confirmation of damage to finishing materials		
			Exterior Panel Assembly(B)	O-FI-B			

며, 마무리작업(FI)에는 1)지붕설치(A), 2)외부판넬 설치(B)가 있다. 예를 들어, 주요구조부 조립(F-SA)의 경우, 3차원 스캐닝 데이터를 이용한 품질관리 대상 항목으로는 구조체의 수직/수평도 및 접합부 시공오차를 측정하고 확인하는 목적으로 사용한다. 또한, 내화석고보드시공(F-SC)의 경우, 석고보드 설치 위치확인 및 수직/수평 시공오차를 위한 목적으로 3차원 스캐닝을 실시한다(Table 4).

3.3 분석 결과 종합

3.3.1 신뢰도 분석 결과

각 평가 척도별 설문조사는 Likert's 5점 척도를 적용했으며, 점수가 높을수록 척도의 의미가 높다는 것을 뜻한다. 설문 결과의 신뢰도 검증을 위해, 크론바흐(Cronbach) α 계수를 사용하여 신뢰도 평가를 실시하였다. 일반적으로 α 계수가 0.6 이상이면 설문 결과의 신뢰도가 있다고 판단하며, 그 이상의 수치가 나오면 해당 신뢰도가 매우 높다고 판단한다[16]. 본 연구의 신뢰도 분석과 IPA분석에는 SPSS Statistics 27을 사용했다. 신뢰도 분석 결과, 전체 크론바흐 알파계수는 0.866으로 나왔으며 Importance는 0.895, Performance는 0.817로 나왔다. 따라서, 설문조사 신뢰도는 분석기준에 적합한 것으로 나타났다. Table 5의 Section 항목은 설문조사 항목이 IPA분석 사분면 중 몇 사분면에 위치하고 있는지에 대한 표기이다.

Table 5. Paired t-test results(Importance-Performance)

Num	Code	Importance		Performance		GAP (I-P)	T	Section
		Mean	SD	Mean	SD			
1	F-SA	4.27	1.17	4.45	1.30	-0.182	2.0859 *	1
2	F-SB	4.41	0.90	4.32	1.10	0.091	3.127 *	1
3	F-SC	4.14	1.04	3.77	1.18	0.364	2.2567 *	1
4	F-SD	4.05	1.02	3.36	1.21	0.682	2.4509 **	2
5	F-EI-A	3.95	0.74	4.00	1.08	-0.045	2.1394 ***	4
6	F-EI-B	4.00	0.87	3.45	1.13	0.545	4.4820 ***	3
7	F-EI-C	3.95	1.16	4.23	1.26	-0.273	2.0850 **	4
8	F-EI-D	3.45	1.02	4.05	1.15	-0.591	-1.3000 **	4
9	F-EI-E	4.50	0.95	3.41	1.15	1.091	2.0901 ***	2
10	F-EI-F	4.05	0.91	3.45	1.13	0.591	2.1232 *	3
11	F-EI-G	4.00	1.10	3.73	1.25	0.273	-0.1142 *	4
12	T-PA	3.55	1.01	3.50	1.22	0.045	3.9004 *	4
13	T-PB	4.00	0.77	3.41	1.01	0.591	2.1229 *	3
14	T-PC	3.23	0.83	3.14	1.05	0.091	2.8284 ***	3
15	T-PD	2.95	1.12	3.36	1.29	-0.409	3.8606 *	3
16	O-BS-A	4.59	1.10	2.91	1.25	1.682	2.3204 ***	2
17	O-BS-B	4.41	1.30	3.68	1.40	0.727	-1.4737 ***	1
18	O-PL-A	3.91	0.95	3.32	1.11	0.591	1.9754 ***	3
19	O-L-B	4.50	0.95	3.73	1.13	0.773	-0.8257 *	1
20	O-IN-A	4.18	0.96	4.09	1.14	0.091	-0.5477 *	1
21	O-IN-B	4.55	0.85	3.27	1.10	1.273	2.1053 **	2
22	O-FI-A	4.27	1.04	3.64	1.22	0.636	3.3779 ***	1
23	O-FI-B	4.05	0.43	3.55	0.89	0.500	-1.1619 **	1

* p<.05, ** p<.01, *** p<..001

3.3.2 IPA 분석 결과

IPA분석을 위해 중요도-만족도 항목간 대응표본 t-검정을 먼저 실시하였다. 대응표본 t-test는 1개의 표본을 2회 측정하여 두 측정치 간 차이점을 분석하는 방법으로 사용된다. 본 연구에서는 3차원 스캐닝 적용 대상 공사에 대한 중요도와 만족도를

측정하여 어떠한 차이가 있는지를 확인하기 위한 목적으로 실시하였다. 분석 결과, 모든 항목에서 대응표본 t 검정결과 두 항목간 차이가 유의확률 $p < 0.05$ 보다 작으므로 통계적 유의수준에서 차이가 있는 것으로 나타나 중요도-만족도 항목 간 유의미한 차이가 있음을 확인하였다. 마지막으로, 중요도 항목의 평균은 4.04이며 만족도 항목의 평균은 3.64로 중요도의 평균이 더 높게 나타났다.

3차원 스캐닝을 이용한 모듈러 품질관리에 대한 전문가 설문결과를 통해 가장 중요도가 높은 항목은 ‘현장설치시공단계 중 앵커볼트 설치(O-BS-B)’로 4.59점으로 나타났다. 그 다음으로는 ‘현장설치시공단계 중 모듈러 유닛 최종 설치(O-IN-B)’가 4.55점이며 ‘공장제작단계 중 실내외 마감공사에서 실내 벽지 및 몰딩 시공 단계(F-EI-E)’와 ‘현장설치시공단계 중 모듈러 유닛 양중 단계(O-PL-A)’가 4.50점으로 같은 점수가 도출되었다. 만족도가 높은 항목으로는 ‘공장제작단계 중 주요 구조체 철골 조립 단계(F-SA)’가 4.45점으로 가장 높게 평가되었다. 그 다음으로는 ‘공장제작단계 중 데크플레이트 시공단계(F-SB)’가 4.32점, ‘현장설치단계에서 모듈러 유닛 가조립 단계(O-IN-A)’가 4.09점으로 나왔다(Table 5).

3.3.3 IPA Matrix 분석결과

IPA Matrix결과(Figure 2)를 분석하면 다음과 같다.

1) 높은 중요도와 높은 만족도를 보이는 대상이며, 3차원 스캐너 적용에 대한 기대와 효과성이 높으므로 적극적인 사용 및 분석이 필요함

1사분면에 나타난 항목은 모듈러 건축프로세스 중 3차원 스캐너를 이용한 품질관리가 가장 효과적이며 필요한 부분으로 판단된 것이다. 분석 대상 항목 23개 항목 중 총 11개의 항목에 해당하며, 이 중 가장 높은 수준의 점수를 받은 항목은 공장제작단계 주요 구조체 조립(F-SA) 및 데크플레이트 시공(F-SB)이다. 항목들 대다수에 대한 측정 방법 및 기준이 오차율 확인과 관련되어 있는 것으로 분석되었으며, 이는 3차원 스캐너가 현재 모듈러 제작 및 시공단계에서 실시하고 있는 시공오차 측정 및 기록에 대한 대안으로 충분히 활용될 수 있음을 나타낸다.

2) 높은 중요도를 갖고 있으나, 실제 3차원 스캐너 적용에 대한 만족도가 높지 않아 기술개발 또는 적용성 개선을 위한 노력이 필요함

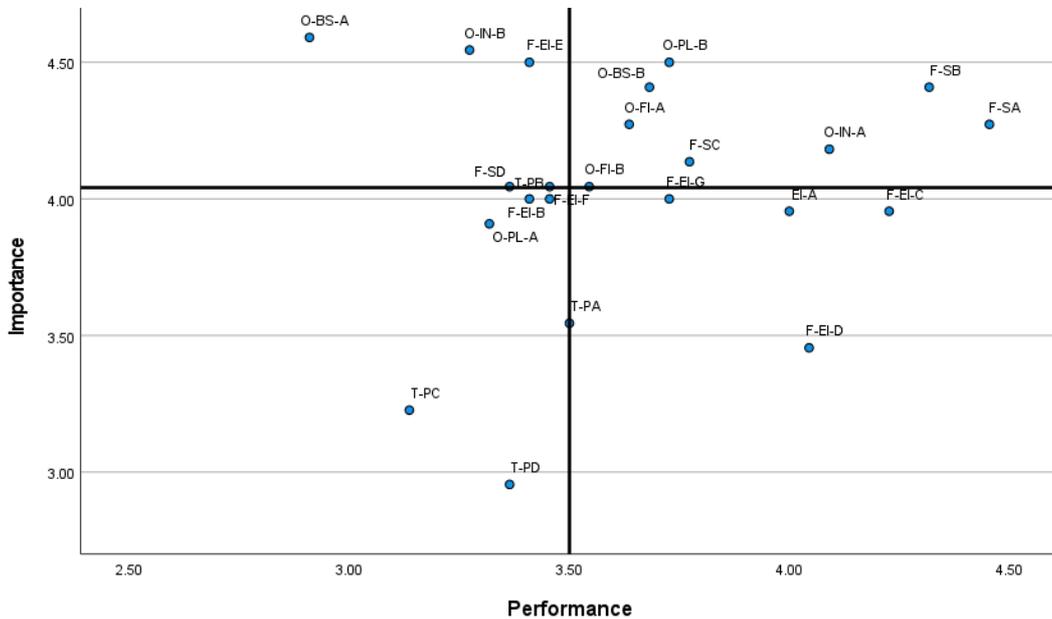
2사분면에 나타난 항목은 모듈러 건축 품질관리에 3차원 스캐너 사용에 대한 중요도가 높게 판단되나, 실제 현업에서 사용하기에 제약이 있거나 그 활용도가 낮게 평가되는 항목들이다. 특히, 현장설치단계 앵커볼트 설치 공사에서는 3차원 스캐너의 중요도가 매우 높음에도 활용도가 매우 낮은 것을 알 수 있는데, 전문가 자문 의견을 종합해보면 이는 3차원 스캐너 장비 사용 시 현장에서 배터리를 이용해 실제 사용할 수 있는 시간이 짧고, 작업 중 타 작업과의 간섭으로 인해 스캐닝 데이터 수집에 어려움이 있음을 알 수 있었다. 이 밖에도 현장 설치단계 최종 모듈러 조립단계와 공장제작단계 실내 마감재에 대한 중요도가 높으나 장비 사용 시 오차율 확인에 따른 시공 수정단계 데이터와의 비교에 따른 시간이 오래 걸리는 한계점이 있어 실제 만족도는 높지 않음을 알 수 있었다.

3) 중요도가 낮고, 실제 만족도도 낮으므로 3차원 스캐닝을 적용하는 것이 효과적이지 않음

해당 영역에 포함된 항목은 주로 운송과 관련된 항목들이 대다수를 차지하고 있었다. 실제 운송과정 중 모듈러의 품질 문제가 다수 있음에도 불구하고 3차원 스캐너를 이용한 품질관리와는 거리가 있어 이에 대한 만족도와 중요도가 낮게 형성되었다. 운송과정 중 모듈러 구조의 손상 및 내/외부 마감재의 손상은 3차원 스캐닝으로 실시간 확인은 가능할 수 있으나 이를 적극적으로 해결할 수 있는 유의미한 데이터를 획득하거나 가공하는데 큰 의미가 없기 때문이다. 다만, 2사분면과의 경계선상으로 조사된 항목 중 공장제작단계의 가구설치단계(F-SD)와 공장제작단계에서 모듈러 유닛의 운송차량으로 상차단계(T-PB)의 경우 3차원 스캐닝 활용도가 일부 개선된다면 2사분면으로 진입하여 활용도가 높은 항목이 될 수 있음을 알 수 있다.

4) 중요도는 낮으나, 실제 만족도는 높으므로 3차원 스캐너 사용이 용이하지만 그 결과가 현업에서 미치는 영향력은 크지 않음

해당 영역에 포함된 항목 중 대다수가 1사분면의 평균 경계선에 모여 있음을 알 수 있다. 이는 일반적인 타 항목들에 비해 그 중요도가 낮다고 평가는 되었으나 실제 현장에서는 상당히 그 중요도가 무시될 수 있는 수준은 아니라는 것을 알 수 있다. 예를 들어, 공장제작단계 전기공사단계(F-EI-A)와 등기구 설치단계(F-EI-G)의 경우 3차원 스캐닝을 활용할 경우 타 공사와의 작업 간섭여부에 활용도가 높지만 3차원 스캐닝 데이터를 활용하는 것이 작업 효율에 큰 영향은 없다. 다만, 해당 데이터가 수집 및 저장되어 있을 경우 향후 공사 과정 중 발생할 수 있는 보수 및 보완 작업에서도 활용할 수 있거나 작업자의 작업 여부 확인 등에 대한 데이터로도 활용할 수 있다. 따라서, 3차원 스캐닝 적용에 따른 정보활용도를 높일 방안이 마련된다면 충분히 활용도가 더 커질 수 있다.



※ Note: See Table 4 for item-specific references

Figure 2. IPA analysis results for 3D scanning application in modular construction

4. 결론

본 연구는 문헌고찰 및 전문가 인터뷰를 통해 모듈러 건축 프로젝트 프로세스에 따라 프로젝트 참여자(설계사, 공장제작사, 시공사, 학계 전문가 등)를 대상으로, 모듈러 건축 프로젝트의 품질관리를 위한 3차원 스캐닝 적용에 따른 활용방안에 대한 중요도와 만족도를 IPA를 통해 확인하였다. 대부분의 항목들에서 3차원 스캐닝 적용에 대한 중요도가 높고 이를 활용한 결과에 대한 만족도가 높게 인식되고 있음을 알 수 있으나, 일부 항목들에서는 향후 3차원 스캐닝 장비의 현장 사용성 개선을 위한 기술개발 및 환경 개선이 필요하다는 것을 확인하였다. IPA 사분면 결과를 종합하면, 전반적인 모듈러 프로젝트 품질관리에서 3차원 스캐닝을 이용한 품질관리가 필요하며, 그 효과에 대한 기대와 만족도가 대체적으로 높다는 것을 알 수 있었다. 특히, 공장제작단계에서 3차원 스캐닝 기술에 대한 중요도와 만족도가 모두 높다고 나타난 것은 오히려 현재 공장제작 단계의 품질관리체계 및 방법이 개선될 필요가 있다는 것을 의미하므로 이와 관련된 후속 연구가 필요하다. 또한, 실제 3차원 스캐닝 장비를 모듈러 제작 및 시공 과정 중 일부에 품질관리에 적용하여 이에 대한 관리자 및 작업자 만족도와 개선방안에 대한 연구가 필요하다. 추후, 본 연구를 토대로 3차원 스캐닝 장비의 활용도 개선을 위한 주요 요구사항 도출 및 이에 따른 효과성 검증 등의 연구에 활용할 수 있을 것이다.

요약

모듈러 건축은 스마트 건설방법 중 하나로 건설산업 혁신을 위한 필수적인 공법이 되고 있다. 모듈러 건축의 스마트 건설 실현에 필요한 가장 기초적인 전제 조건 중 하나가 품질관리이며 이를 위해 3차원 스캐닝을 이용한 품질관리 방안에 대한 관심이 높다. 본 연구는 모듈러 건축 프로세스 단계별(공장제작, 운송, 현장시공) 주요 공사를 대상으로 IPA 분석을 통해 3차원 스캐닝을 이용한 모듈러 건축물의 품질관리에 대한 현황을 분석하고 이를 개선하기 위한 방안을 제시하였다. 그 결과, 대부분의 항목에서 3차원 스캐닝 데이터 활용에 대한 필요성과 중요성이 높다는 것을 확인할 수 있었으며, 일부 현장 적용성이 낮은 항목들에 대해서는 추후 기술개발 및 적용성 개선이 필요한 것을 알 수 있었다. 본 연구결과는 향후 모듈러 건축 품질관리를 위한 첨단 시공 기술 적용에 대한 연구에 활용할 수 있다.

키워드 : 모듈러 건축, 품질관리, 중요도-성취도 분석 방법, 3차원 스캐닝, 스마트 건축

Funding

Not applicable

Acknowledgement

This results was supported by “Regional Innovation Strategy(RIS)” through the Natinal Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education(MOE)(Assignment Number: 2021RIS-003).

ORCID

Jeong-Hoon Lee,  <https://orcid.org/0000-0002-5683-7497>

References

1. Lee JH. Assessment of quality assurance in the lifting and assembly phase of modular construction: an importance-performance analysis approach. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*. 2023 Oct;23(5):595-605. <https://doi.org/10.5345/JKIBC.2023.23.5.595>
2. Lee JH. Application of activity-based costing(ABC) for modular construction quality management. *Journal of The Korea Institute of Building Construction*. 2022 Oct;22(5):485-96. <https://doi.org/10.5345/JKIBC.2022.22.5.485>
3. Korea Institute of Civil and Building Technology. 3D scanning guidelines (scanning guidelines for construction, reverse engineering, management, and construction of architectural facilities). Goyang(Korea): Korea Institute of Civil and Building Technology; 2022. 95 p.
4. Kim JY. Case study applying 3D laser scanning technology to quality inspection of structural frame construction work [master's thesis]. [Suwon (Korea)]: Kyonggi University; 2021. 74 p.
5. Esfahani ME, Rausch C, Sharif MM, Chen Q, Haas C, Adey BT. Quantitative investigation on the accuracy and precision of Scan-to-BIM under different modelling scenarios. *Automation in Construction*. 2021 Jun;126:103686. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103686>

6. Arayici Y. An approach for real world data modelling with the 3D terrestrial laser scanner for built environment. *Automation in Construction*. 2007 Sept;16(6):816-29. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2007.02.008>
7. Son RH, Han K. Automated model-based 3D scan planning for prefabricated building components. *Journal of Computing in Civil Engineering*. 2023 Nov;37(2):1-16. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0001055](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0001055)
8. Bhatti AQ, Wahab AB, Sindi WD. Application of 3D Laser Scanning for Digitization, Design and Analysis of Multistoried Building. *Journal of Engineering Research*. 2023 Nov;11(2):118-30. <https://doi.org/10.36909/jer.13419>
9. Yuan L, Guo J, Wang Q. Automatic classification of common building materials from 3D terrestrial laser scan data. *Automation in Construction*. 2020 Feb;110:103017. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.103017>
10. Rausch C, Lu R, Talebi S, Hass C. Deploying 3D scanning based geometric digital twins during fabrication and assembly in offsite manufacturing. *International Journal of Construction Management*. 2021 Mar;23(3):565-78. <https://doi.org/10.1080/15623599.2021.1896942>
11. Xu Z, Kang R, Lu R. 3D reconstruction and measurement of surface defects in prefabricated elements using point clouds. *Journal of Computing in Civil Engineering*. 2020 Jul;34(5):1-17. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000920](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000920)
12. Kim MK, Wang Q, Park JW, Cheng JC, Sohn H, Chang CC. Automated dimensional quality assurance of full-scale precast concrete elements using laser scanning and BIM. *Automation in Construction*. 2016 Dec;72(2):102-14. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.08.035>
13. Wang Q, Cheng JC, Sohn H. Automated estimation of reinforced precast concrete rebar positions using colored laser scan data. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2017 Sep;32(9):787-802. <https://doi.org/10.1111/mice.12293>
14. Kim MK, Sohn H, Chang CC. Localization and quantification of concrete spalling defects using terrestrial laser scanning. *Journal of Computing in Civil Engineering*. 2014 Jul;29(6):1-12. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000415](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000415)
15. Li D, Liu J, Feng L, Zhou Y, Liu P, Chen YF. Terrestrial laser scanning assisted flatness quality assessment for two different types of concrete surfaces. *Measurement*. 2020 Mar;154:107436. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107436>
16. Martilla JA, James JC. Importance-performance analysis. *Journal of Marketing*. 1997 Jan;41(1):77-9. <https://doi.org/10.1177/002224297704100112>
17. Landrigan M. Improving your measurement of customer satisfaction: : A guide to creating, conducting, analyzing and reporting customer satisfaction measurement programs. *Journal of Consumer Marketing*. 1999 Aug;16(4):1-4. <https://doi.org/10.1108/jcm.1999.16.4.1.2>
18. Deng W. Using a revised importance-performance analysis approach: The case of taiwanese hot springs tourism. *Tourism Management*. 2007 Oct;28(5):1274-84. <https://doi.org/10.1016/j.tourman.2006.07.010>
19. Kim, EJ. Analysis of unsafe acts of older construction workers using revised IPA. *Journal of the Regional Association of Architectural Institute of Korea*. 2021 Oct;23(5):97-104.