DOI: https://doi.org/10.13161/kibim.2024.14.3.001

공간 사용률 기반 오피스 실 생성 자동화 방법론 개발

Development of Methodology for Automated Office Room Generation Based on Space Utilization

송요안[1], 장재영[2], 차승현[3]
Song, Yoan[1] · Jang, Jae Young[2] · Cha, Seung Hyun[3]

Received July 4, 2024; Received July 11, 2024 / Accepted July 13, 2024

ABSTRACT: Many efforts are being made to enhance user productivity and promote collaboration while ensuring the economic efficiency of office buildings. Analyzing space utilization, indicating how users utilize spaces, has been a crucial factor in these efforts. Appropriate space utilization enhances building maintenance and space layout design, reducing unnecessary energy waste and under-occupied spaces. Recognizing the importance of space utilization, there have been several studies to predict space utilization using information about users, activities, and spaces. These studies suggested an ontology of the information and implemented automated activity-space mapping as part of space utilization prediction. Despite the existing studies, there remains a gap in integrating space utilization prediction with automated space layout design. As a foundational study to bridge this gap, our study proposes a novel methodology that automatically generates office rooms based on space utilization optimization. This methodology consists of three modules: Activity-space mapping, Space utilization calculation, and Room generation. The first two modules use data on space types and user activity types as input to calculate and optimize space utilization through requirement-based activity-space mapping. After optimizing the space utilization value within an appropriate range, the number and area of each space type are determined. The Room generation module then automatically generates rooms with optimized areas and numbers. The practical application of the developed methodology is demonstrated, highlighting its effectiveness in fabricated case scenario. By automatically generating rooms with optimal space utilization, our methodology shows potential for expanding to automated generation of optimized space layout design based on space utilization.

KEYWORDS: Office Design, Space-Use Analysis, Space Utilization, Design Automation, Room Generation
키워드: 오피스설계, 공간사용분석, 공간사용률, 설계자동화, 실생성

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

효율적인 공간 사용률은 오피스 건축물의 공간 디자인과 운영 관리에 있어서 중요한 요인이다(Lah et al., 2015). 사용자 활동 중심의 공간 사용률은 실과 장비 등의 자원의 효율적인 사용, 에너지 관리 등에 중요한 영향을 미침으로써 건축물의 경제성과 지속가능성 향상에 도움을 줄 수 있다(Peeters et al., 2021). 공간 사용률을 기반으로 공간의 사용자 수 및 활동에 따라 냉난방이나 조명 등의 효율적인 에너지 관리가 가능하다. 또한, 적절히 구성된 공간, 장비, 사용자 활동 스케줄 등을 통해 최적의 공간 사용률을 갖는 오피스 건축물의 평면도는 다양한 업무 환경의 대응을 통해 조직의 효과적인 운영과 관리에도 큰 역할을 한다. 이처럼 공간 사용률을 고려하여 오피스 건축물 설계를 수행할 경우 다양한 장점을 얻을 수 있으며, 이는 사용자의 업무 생산성 및 만족도 향상에도 영향을 미친다(Haynes, 2008). 공간 사용률을 오피스 평면도 설계 단계에 고려하기 위해 건축가들은 이를 설계 초기 단계에 예측하고 반영할 수 있어야 한다. 하지만, 사용자, 활동, 공간과 관련된 수많은 데이터와 이들 간의 복잡한 관계로 인해 공간 사용률의 예측은 오류가 발생하기 쉬우며 최적의 안을 도출하기 위한 과도한 시간 소모의 잠재적 문제도 가지고 있다(Kim et al., 2013; Kim et al., 2015).

컴퓨터 자원과 인공지능(Artificial Intelligence, AI) 등의 기술적 발전과 함께, 설계 단계에 발생 가능한 오류 및 시간 소모

[1]학생회원, 한국과학기술원 건설및환경공학과 석박사통합과정 (dydks024@kaist.ac.kr)
[2]학생회원, 한국과학기술원 메타버스대학원 석사과정 (jaebbang0421@kaist.ac.kr)
[3]정회원, 한국과학기술원 문화기술대학원 교수 (shcha@kaist.ac.kr) (교신저자)

등을 줄이기 위한 설계 자동화에 관련된 연구가 많이 진행되어 오고 있다(Weber et al., 2022). 컴퓨터 지원 설계(Computer-aided Design, CAD)의 상용화 및 발전에 따라, 데이터 기반 설계(Data-driven design)를 위한 파라메트릭 디자인(Parametric design)과 제너레이티브 디자인(Generative design)과 같은 효과적인 설계 지원 방법론들이 등장해오고 있다. 최근에는 평면도 이미지 생성, 에너지 효율성 기반 평면도 설계 최적화 등 인공지능을 건축 설계 자동화에 접목하는 연구들이 많이 이루어져오고 있다(Pizarro et al., 2022). 하지만, 대다수의 연구들은 데이터 확보가 용이하고 레이아웃 구성이 비교적 명확한 주거 유형의 건축물들을 제한적으로 다루고 있다. 오피스 건축물의 평면도 설계 자동화와 관련된 연구로는 부서 및 실 간의 인접성 기반 설계, 가구 배치 등의 연구들이 존재하며 인공지능 기반 오피스 도면 생성 최적화와 관련된 시도가 존재했다(Shi et al., 2020; Kán and Kaufmann, 2018).

오피스 건축물에서의 공간 사용률의 중요성 및 관련 연구 분야의 다양성에도 불구하고 이를 설계 단계에 반영하여 도면 자동 생성과 연계하고자 하는 연구는 부족하다. Pennane (2004)의 연구를 기점으로, 상업 건축물에서 사용자, 활동, 공간 데이터 기반의 공간 사용률을 예측하기 위한 방안에 관한 사전 연구가 존재하며 이를 오피스 계획 시 고려하기 위한 다양한 접근 또한 존재한다. Kim et al. (2015)은 공간 사용률 예측을 자동화하고 관련 활동 및 공간 데이터를 업데이트하기 위한 연구들을 수행하였으며 이들은 적절한 공간 사용률을 갖는 사용자 활동-공간 간의 관계의 최적화에 초점을 맞춰왔다. 오피스 도면 설계 자동화와 관련된 알고리즘, 머신러닝, 이미지 생성 연구들이 활발하게 이루어지고 있음에도 이를 공간 사용률 예측과 통합하고자 하는 시도는 미흡하다. Chen et al. (2021)은 유전 알고리즘(Genetic algorithm)을 통해 공간 사용률을 최대화하는 개방형 오피스 레이아웃을 자동으로 생성하는 툴을 제안하였지만, 해당 연구에서 공간 사용률의 극대화는 개방 공간 면적의 최대화로 한정되었고 사용자 활동에 대한 논의는 부재했다.

사용률 예측을 위한 데이터 기반 설계 및 설계 자동화 방법론들을 통합한 프로세스가 구축된다면, 건축가들은 오피스 건축물의 설계 및 유지관리와 조직 운영에 중요한 공간 사용률을 더 정확하고 빠르게 예측할 수 있을 것이다. 이를 통해 설계에 소요되는 시간 및 오류가 감소될 수 있으며, 이는 설계 결과물의 완성도 및 지속가능성에 긍정적인 영향을 미칠 것이다.

따라서, 본 연구를 통해 오피스 건축 설계 자동화를 위한 공간 사용률 최적화 기반 실 생성 자동화 방법론을 제안하고자 한다. 공간 사용률 관련 사전 연구 조사를 통해 시공 전 예측을 위한 방법론을 결정하고, 평면도 설계 시 실 생성에 영향을 미치기 위한 변수와 연계 방안을 제안하였다. 제안된 프로세스를 Revit의 Visual script tool인 Dynamo를 통해 구현하였으며 Generative design을 통해 최적의 공간 사용률을 만족하는 실 유형별 면적과 개수를 결정 가능함을 보였다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구의 대상 및 범위는 사용자, 활동, 공간 정보가 확보 가능한 오피스 건축물의 계획 및 기본 설계 단계의 평면도 설계에 앞서 최적의 공간 사용률을 갖는 실을 생성하는 것으로 한정하였다. 공간 사용률의 계산과 실 생성을 위해 사전 연구를 기반으로 사용자 활동(User activity type)과 공간(Space type) 관련 프로세스 인풋 데이터를 결정하였다. 이를 바탕으로 BIM 소프트웨어(Revit, 2025)의 다이나모(Dynamo)와 제너레이티브 디자인을 활용하여 활동-공간 매핑(Activity-space mapping), 공간 사용률 계산, 실 생성을 포함한 공간 사용률 최적화 기반 실 생성 자동화 방법론을 제안하고 구현하였다. 본 연구는 방법론의 제안과 구현을 Figure 1과 같이 진행하였다.

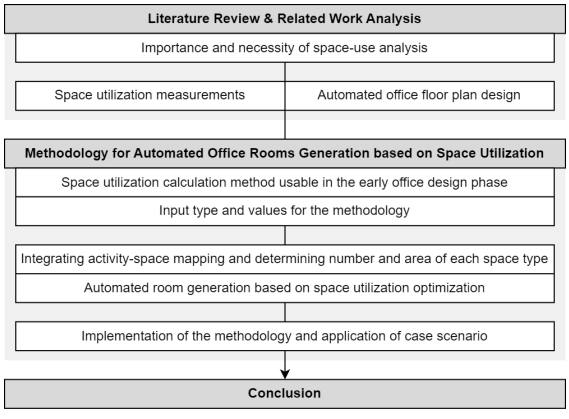

Figure 1. Research process

첫째, 공간 사용의 분석과 관련된 선행 연구 조사를 통해 오피스에서 공간 사용률 분석의 중요성 및 필요성을 확인하였다.

둘째, 공간 사용률을 측정하기 위해 사용되어온 여러 방법들을 살펴보았으며 오피스 설계 초기 단계의 적용 가능성에 초점을 맞추어 관련 연구 조사를 수행하였다.

셋째, 오피스 설계 초기 단계에 사용가능한 공간 사용률 측정 수식을 결정하고, 제안하고자 하는 방법론의 결과물 형성에 필요한 인풋 값들을 결정하였다.

넷째, 활동-공간 매핑 과정 기반 실 개수 및 면적 결정 중심의 공간 사용률 최적화 기반 실 생성 자동화 방법론을 제안하였다.

다섯째, 제안한 방법론을 다이나모를 활용하여 구현하였으며 사례 적용을 통해 공간 사용률 최적화 기반 실 생성이 이루어짐을 확인하였다.

마지막으로는 사례 적용 결과물 분석을 통해 본 연구에서

제안한 방법론의 한계점을 기술하며 향후 후속연구에 대한 제안을 한다.

2. 선행연구 조사

2.1 공간 사용 분석의 중요성

공간을 어떻게 사용하는지(Space-use)에 대한 분석은 시공 단계 전, 후에 있어서 모두 중요하다. 건축물 내 공간 사용 분석(Space-use analysis, SUA)은 사용자의 종류 및 수, 수행 활동의 종류, 활동 시간 등과 같은 요소들을 포함한다. 공간을 적절하게 사용한다고 여겨지는 건축물은 활동과 사용자 수에 따른 장비와 공간의 수 및 면적의 수요와 공급을 최적에 가깝게 유지할 수 있다. 이는 건축물 내 자원들의 관리와 효율적인 공간 사용에 직접적으로 연관되어 있다(Akadiri et al., 2012). 또한, HVAC (Heating, Ventilation, and Air Conditioning), 조명과 같은 건축물의 에너지 효율성 관리에 있어서, SUA를 통해 확인 가능한 공간 사용률, 사용자 수, 활동의 종류 및 시간이 주요 관리 기준이 될 수 있다(Peng et al., 2017; de Bakker et al., 2017).

정기적인 SUA를 통한 건축물 내 조직의 균형잡힌 자원 관리는 오피스 건축물의 업무 환경을 더 좋게 만들어줄 뿐만 아니라, 다양한 업무 스타일(Work style)들을 새로 적용하고 운영하는 데에도 효과적인 인사이트를 제공해 줄 수 있다. 오피스의 업무 스타일은 같은 건물 내에서도 개인 업무, 소규모 회의, 외부 미팅 등 활동에 따라 다양하게 일어난다(Miller et al., 2014). 또한, COVID-19와 같은 사회문화적 사건들에 의해서도 원격 업무, 공유 오피스 처럼 새롭고 다양한 업무 스타일들이 등장할 수 있다(Aleem et al., 2023). 사용자들의 SUA를 정기적으로 수행할 경우, 조직은 변화된 업무 활동에 따라 불필요한 공간과 장비를 줄이고 새로운 업무 환경을 제공하는 등 효과적인 대응이 가능하다.

이처럼 건축물 내 효과적인 조직 운영에 중요한 SUA는 건축 설계 단계에 있어서도 중요한 역할을 한다. 건축 설계 단계에서 추후 사용자들이 어떻게 공간을 사용할 것인지 SUA를 통해 공간 사용률을 예측할 수 있다면 제한된 설계부지 내에서 공간의 면적과 수, 내부 인테리어까지 최적으로 결정하는 데에 도움을 받을 수 있다. 이는 발주자의 요구사항의 만족과 건축물 유형에 따른 세부 설계 목표들의 달성을 용이하게 해주며 건축물의 지속가능성을 향상 시키는 효과를 갖는다. 또한, 균형잡힌 적절한 공간 사용률을 만족하고 유지할 수 있는 건축물 설계가 이루어진다면 시공 후 사용자들의 활동이 모두 일어날 수 있고, 모든 공간을 효율적으로 사용할 수 있을 것이다(Cha et al., 2018). SUA를 수행하기 위해서 사용자, 공간, 장비 등의 다양하고 복잡한 데이터를 다루어야 하는 만큼 공간 사용률의 계산과 측정에 관련된 방식과 연구는 진화되어 오고 있다.

2.2 공간 사용률 측정 관련 동향

공간 사용률(Space utilization)은 몇 명의 사람들이 어떤 활동을 하며 공간을 사용하는지를 나타내며 얼마나 오래 공간이 사용되고 선호되는 지를 보여준다. 공간 사용률을 측정하기 위한 노력은 Table 1과 같이 다양하게 등장하고 변화해오고 있다. 공간 사용률은 오피스의 효율적인 운영과 관리를 위하여 주로 거주 후 평가(Post-occupancy Evaluations, POE)를 통해 측정되어 왔다(Zhou et al., 2022). 1990년대 영국의 오피스 환경 디자인 및 컨설턴트 회사인 DEGW에 의해 개발된 Time Utilization Survey (TUS)는 관찰자가 건축물 내에 사전에 지정된 장소와 경로를 주기적으로 현장 방문하여 활동하는 사람들의 수와 활동 공간의 유형 및 개수를 직접 관찰하는 방식이다(Rashid et al., 2006; Oseland et al., 2013). NAO (1996)는 교육 공간 관리를 위한 보고서를 통해 공간 사용률을 측정하기 위해 Frequency (F)와 Occupancy (O)를 곱하는 수식을 사용하였으며, 이는 Abdullah et al. (2012)에 의해 "UFO" 방법론으로 불렸다. 이때, Frequency (F)는 공간이 사용 가능한 시간 대비 실제 사용된 시간 비율을, Occupancy (O)는 공간의 수용 가능 인원에 따른 평균 사용 인원의 비율을 의미한다. 하지만, TUS, UFO 같이 관찰자가 직접 주기적으로 현장을 둘러보고 활동과 시간을 체크하는 공간 사용률 측정 방식은 수동적인 데이터 수집으로 몇가지 한계점들을 지닌다. 관찰자가 정해진 기간에 몇 초 동안만 공간 사용을 관찰하기 때문에 그 외의 시간의 공간 사용 정보는 기록될 수 없다는 정확성 저해의 문제가 있다. 또한, 관찰하는 동안 공간을 사용 중인 사람들의 업무를 방해할 수 있다는 한계 역시 존재한다.

이러한 한계점들을 극복하기 위해, 센서를 활용한 공간 사용률 데이터 수집 및 측정 연구들이 수행되어 왔다. 센서 기반 사용률 측정 방식은 실제 공간 사용자들의 업무에 방해를 주지 않을 수 있으며, 지속적으로 데이터를 자동으로 수집하여 정확도를 더 높일 수 있다(Tagliaro et al., 2021). PIR 센서(Passive infrared sensor)는 공간 사용률을 측정하기 위해 사용되는 대표적인 센서 중 하나이다. 공간이 사용 중인지 아닌지를 나타내는 이진의 데이터를 측정하여 다른 센서들과 통합되어 활용되기도 하며, 단일 PIR 센서 데이터와 머신러닝을 활용해 사용자 수 추정을 통한 공간 사용 분석이 이루어지기도 하였다(Raykov et al., 2016). Das et al. (2020)은 3D 스테레오 비전 카메라를 사용하여 시간에 따른 영상 데이터를 수집하였으며, 사용자의 위치를 정확하고 일관되게 추정하는 알고리즘과 간단한 활동 여부를 구분하는 알고리즘을 적용하여 공간 사용의 패턴을 분

Table 1. Research on space utilization measurement

Researcher	Title	Contents
Rashid et al. (2006)	Sedentary and fleeting activities and their spatial correlates in offices.	The Time Utilization Survey (TUS), a tool developed by DEGW consulting, is a point–based observation technique where the field observer walks along a route to observe behaviors only at a predefined set of points perhaps once an hour taking notes of the use of each space.
Oseland et al. (2013)	The WCO guide to: utilisation and occupancy studies	
NAO (1996)	Space management in higher education: a good practice guide	Through UFO method, space utilization rate (U) is calculated as a multi–plication of frequency (F) and occupancy (O). Frequency is the number of hours a room is in use as a proportion of total availability (the timetabled week). Occupancy is the average group size as a proportion of total capacity for the hours the room is in use.
Abdullah et al. (2012)	Benchmarking space usage in higher education institutes: attaining efficient use.	
Raykov et al. (2016)	Predicting room occupancy with a single passive infrared (PIR) sensor through behavior extraction	Passive infrared (PIR) sensors are the most prominently used sensors in these contexts. However, they can only provide binary information (occupied vs. not occupied) and are often unreliable for capturing immobile occupants. This can be solved by behavior extraction through machine learning.
Das et al. (2020)	Space utilization and activity recognition using 3D stereo vision camera inside an educational building	Based on the time–series data collected from 3D stereo vision camera, algorithms ensuring accurate estimates and annotating data in activity recognition are proposed. Through the camera, the seats and space utilization patterns are extracted. The data obtained can be used for inspecting various types of open and shared spaces available for work.
Calì et al. (2015)	CO2 based occupancy detection algorithm: experimental analysis and validation for office and residential buildings	An algorithm for the detection of occupants in the indoor environment is presented, validated and evaluated among different scenarios. The algorithm is based on the concentration of carbon dioxide (CO2) in the indoor air. The CO2 concentration deriven from the CO2 level detected implies the Occupants presence profile in the rooms.
Pennanen (2004)	User activity based workspace definition as an instrument for workplace management in multi–user organizations.	Pennanen generalized the space utilization prediction formula proposed by Cherry (1998) for application to various types of building, including office. This method calculates space utilization based on the relationships among users, activities, and spaces.
Kim et al. (2015)	Automated updating of space design requirements connecting user activities and space types	Kim et al. developed an automated requirements updating method comprising three phases: updating of user information, updating of the requirements for each space type, and adjustment of the numbers of space types to satisfy target utilization.

석하였다. Calì et al. (2015)은 이산화탄소 감지 센서를 활용하여 측정된 이산화탄소의 농도에 따른 실내 공간의 사용자 현황 파악 알고리즘을 제안하였다.

센서를 활용한 사용률 측정 방식은 자동화된 데이터 수집 및 분석을 통해 공간 사용률 기반의 효율적인 공간 사용, HVAC 시스템, 조명 관리 등의 건축물 관리와 연계될 수 있다. 이러한 POE를 통한 공간 사용률 측정 연구들은 실제 사용자의 공간 사용에 기반은 건축물 유지 관리에 효과적인 반면, 설계 단계에 적용하기에는 다소 어려움이 있다. 오피스 설계 초기 단계에 공간 사용률 예측을 통합하여 설계 최적화를 수행하기 위해서는 거주 전 평가(Pre–occupancy Evaluations, POE)에서 사용률을 예측할 수 있는 방법에 관한 연구가 필요하다.

Pennanen (2004)은 오피스의 업무 공간 계획 과정을 제안하였으며, 활동의 시간과 일어나는 공간 정보를 바탕으로 활동 기반 업무공간의 사용률을 계산하는 방법을 정리하였다. Cherry (1998)에 의해 제안된 공간 사용률 측정 방안을 오피스와 같이 다양한 유형의 건축물에 적용가능하도록 일반화 및 수식화하였다. 해당 공간 사용률 측정 방법은 초기 설계를 통한 오피스 공간 개수 및 면적 등의 타당성을 평가하는 데 사용될 수 있으며, 설계 내용의 수정 방향성을 제공해 주는 역할도 할 수 있다. Pennanen (2004)의 공간 사용률 계산 방법을 바탕으로, Kim and Fischer (2014)는 공간 사용 분석의 자동화와 관련된 연구를 수행하였다. 공간 사용 분석에 요구되는 사용자 활동과 공간에 관련된 데이터 온톨로지를 제안하였으며, 지식 베이스 데이터베이스 기반 공간 사용 분석 자동화 프레임워크를 제안하였다. 또한, Kim et al. (2015)은 활동과 공간을 서로 연결시키는 과정을 자동화하고, 공간 사용률에 따라 자동으로 공간 요구사항을 업데이트하는 연구를 수행하였다. Cha et al. (2018)은 공간 사용률을 포함하여 건축물의 설계 시 사용자 활동 프로파일 기반의 공간 사용 분석 시뮬레이션을 제안하였다. 이처럼 오피스 설계 단계에서 공간 사용률을 예측하고 평가하는 방안에 관련된 연구는 다수 존재하나, 이를 오피스 레이아웃 생성

자동화와 연계 하는 방안에 관한 논의는 미흡하다.

2.3 오피스 설계 자동화 및 최적화 관련 동향

오피스 설계 단계의 성공적인 최적화는 사용자들의 협업을 장려하고 생산성을 높일 수 있으며 경제적인 공간 및 자원 활용을 가능하게 한다. Computer-aided Design (CAD) 및 인공지능을 포함한 기술의 발전은 건축물 설계 자동화 분야의 활발한 연구를 가능케 했다. 오피스 설계 최적화와 관련하여 다양한 목적을 위한 설계 자동화 및 최적화 연구가 이루어져 오고 있다. Tachikawa and Osana (2010)는 적응형 유전 알고리즘(Adaptive genetic algorithm, AGA)과 탐색 영역 적응 유전 알고리즘(Genetic algorithm with search area, GSA)을 결합한 알고리즘을 활용하여, 기존의 직사각형 공간에만 적용 가능했던 오피스 레이아웃 생성 시스템을 다각형 공간에도 적용할 수 있는 방법론을 제안했다. Okhoya et al. (2022)은 하이브리드 생성형 디자인 방법인 shape grammar와 space allocation algorithms을 결합하여 오피스 레이아웃을 생성하고 네 가지 평가 기준(Daylighting, movement, view, visibility)을 종합 평가하여 최적의 오피스 레이아웃을 제안했다. Ratajczak et al. (2023)은 유전 알고리즘과 RBFOpt 모델 기반 최적화를 사용하여 오피스 건축물의 에너지 효율과 일광 성능을 극대화하는 오피스 레이아웃을 자동으로 생성했다. Chen et al. (2021)은 중첩 유전 알고리즘을 사용하여 개방형 오피스 레이아웃을 자동으로 생성하는 연구를 진행했다. 해당 연구에서는 오피스 경계, 그리드 크기, 방들의 지오메트리 정보와 오피스 출입구를 입력으로 받아 유전 알고리즘을 활용하여 조건에 맞는 방 배치 조합을 찾고, 통로 공간을 최소화하는 또 다른 유전 알고리즘을 활용하여 최적의 오피스 레이아웃을 제안했다. 하지만, 해당 연구에서 공간 사용률은 개방된 공간의 면적의 비율로 한정되었고 사용자 활동에 대한 논의는 부재했다.

오피스 설계 자동화 및 최적화를 통한 프로젝트의 경제적 비용 감소의 효과가 극명한 만큼, 이와 관련된 연구뿐만 아니라 상용화 시스템들도 Table 2와 같이 다양하게 등장하고 있다. 인공지능의 적용과 함께 건축가의 오피스 도면 설계를 보조할 뿐만 아니라 설계 비용 최적화 등을 만족하는 오피스 레이아웃을 자동으로 생성해주기도 한다. qbiq는 인공지능 및 이미지 처리 기술을 활용하여 부동산 목적의 오피스 레이아웃을 빠르게 생성한다. Attri는 생성형 인공지능을 활용하여 공간 선호도, 요구사항 들을 고려하여 오피스 도면을 생성 및 개선해준다. Sketch와 Flexity는 법규검토 및 지형 정보 등을 기반으로 용도별 최적의 평면도 및 설계안을 제공해주고, Finch는 인공지능을 활용하여 이산화탄소 배출량 등 다양한 건축물의 특성에 따라 최적화된 평면도를 생성한다. dRofus는 설계 프로젝트의 공간 요구사항을 포함한 BIM 데이터의 입력 및 수정을 지원해준다. 인공지능 기반의 다양한 오피스 도면 자동생성 시스템들이 존재함에도 불구하고, 사용자 활동 중심 사용률 예측 및 최적화 기반의 오피스 레이아웃 자동 설계와 관련된 연구는 없으며, 활동 종류와 사용자 정보에 근거하여 사용률을 도출해 내는 시스템도 부재하다. 오피스 건축물 내 공간 사용률의 중요성과 관련 연구 및 시스템의 부재를 해소하기 위해, 본 연구는 사용률 예측 계산과 실 생성을 연계하는 방안을 제안하고 이를 통해 사용률 최적화를 통한 실 유형별 개수와 면적을 도출하는, 공간 사용률 기반 실 생성 자동화 방법론을 제안하고자 한다.

Table 2. Systems supporting automated or optimized office building planning and space layout design

System (Website)	Contents
qbiq (https://qbiq.ai/)	qbiq's AI-powerd planning software generates custom office layouts in a matter of seconds and provides visualization of future workplace.
Attri (https://attri.ai/)	Attri uses generative AI to create office floor plans based on remarkable space optimization.
Sketch (https://sketch.howbuild.com/)	Sketch automatically generates optimal workplace floor plans and 3D designs from design to construction cost estimates based on site location.
Flexity (https://flexity.app/urban/home)	Flexity is an automated planning and design software that accurately incorporates building codes and terrain elevation differences, providing optimal office floor plans and various scenarios.
Finch (https://www.finch3d.com/)	By using generative design, Finch generates different design options that follow the design parameters and constraints set by the user.
dRofus (https://www.drofus.com/en/)	dRofus is a unique planning, data management and BIM collaboration tool that provides all stakeholders with extensive workflow support and access to building information throughout the building lifecycle.

3. 공간 사용률 기반 공간 유닛 생성 자동화 방법론 구축

3.1 공간 사용률 계산 방안 수식화

오피스의 초기 설계 단계에 적용 가능한 공간 사용률의 예측을 위한 방안으로 공간 사용률 측정 관련 동향 선행연구에서 조사한 Pennanen (2004)의 사용률 계산식을 사용하고자 한다. 다양한 시설에 적용 가능하도록 공간 사용률 계산식이 일반화되었다는 점과, Kim et al. (2013)에 의해 사용률 예측 과정의 자동

화 연구가 진행되었다는 점을 미루어 보았을 때, 해당 계산 방안이 오피스 설계 단계에 적용 가능할 것으로 사료되었다. 공간 사용률 계산은 사용자 활동과 공간에 관련된 데이터를 다루며, 활동과 공간의 관계를 기반으로 이루어질 수 있다. 사전 연구를 바탕으로 정리한 공간 사용률의 계산 수식은 아래와 같다.

$$Event\ Quantity\ (EQ) = \frac{the\ number\ of\ users \times Ratio}{Group\ Size}$$

$$Activity\ Load\ (AL) = EQ \times\ Frequency \times\ Duration$$

$$Load\ per\ Space\ (LpS) = \frac{AL}{\sum (the\ number\ of\ spaces\ that\ occupy\ the\ activity)}$$

$$Total\ Load = \sum (LpS\ of\ activities\ that\ occupy\ the\ space)$$

$$Utilization = \frac{Total\ Loads}{Open\ Time\ of\ the\ space}$$

공간 사용률 계산 수식은 크게 다섯 가지 요소들로 구성되어 있다: Event quantity, Activity load, Load per space, Total load, Utilization. 모든 활동에 대하여 활동에 참여하는 사용자 그룹의 수를 나타내는 Event quantity가 먼저 계산되어야 한다. 이때 사용되는 Ratio는 해당 활동에 관여하는 사용자의 비율이다. 또한, Group size는 해당 활동이 한번 일어날 때 참여하는 사용자의 수를 의미한다. 활동 별로 계산된 Event quantity 값은 해당 활동의 Frequency와 Duration과의 곱셈을 통해 Activity load로 계산된다. Activity load는 활동이 공간에서 요구하는 시간을 나타낸다. 이에 사용되는 Frequency는 해당 활동의 하루 중 일어나는 횟수(How many times)를 나타내고, Duration은 활동이 일어났을 때 지속되는 시간(Hours)을 나타낸다. 모든 활동에 대하여 Activity load 값이 계산되면, 해당 활동이 연계된 공간 개수로 이를 나누어 Load per space 값이 계산된다. 이후, 각 공간 유형별로 연계된 활동들의 모든 Load per space 값들을 합하여 Total load가 계산된다. 마지막으로, 각 공간 유형별 Total load 값을 해당 공간의 영업시간(Open time)으로 나누면 공간 사용률(Utilization)이 계산된다.

위의 계산식을 기반으로 하는 관련 사전 연구들을 살펴보았을 때, Figure 2와 같이 각 활동이 어떤 유형의 공간에서 일어날 것인지를 결정하는 활동–공간 매핑(Activity–space mapping) 과정이 반드시 사용률의 계산 이전에 선행되어야 한다. 해당 과정을 통해 Load per space의 계산을 위한 활동이 이루어지는 공간의 개수가 결정된다. 본 연구에서는 Activity–space mapping 과정에서 각 활동과 공간별 요구사항(Requirement)의 일치를 기준으로 활동–공간 쌍을 생성하였다. 또한, 공간 사용률 계산에 앞서 활동별 Group size를 무작위로 생성하는 과정을 추가하였다. 임의의 Group size는 다양한 공간 사용률 값이 출현할 수 있도록 하며 추후 사용률 최적화와 실 생성을 위한 변수로서 작용한다.

Figure 2. Space utilization calculation procedure

위에서 언급한 바와 같이 공간 사용률의 계산식과 본 연구의 과정별 필요 요소들을 고려하여, 제안하고자 하는 방법론의 인풋 값들을 "User activity type", "Space type" 두 유형으로 결정하였으며 자세한 내용은 Table 3에 나타난 바와 같다.

Table 3. Defined input values for the methodology of this paper

Input type	Input values	Data type
User activity type	UserType	Description
	UserNumber	Number
	Action	Description
	Ratio	Percentage (%)
	Frequency	Number
	Duration	Hours
	Requirement	Description
Space type	SpaceType	Description
	SpaceCriteria	Area (m^2)
	OpenTime	Hours
	Requirement	Description

3.2 활동–공간 매핑에 따른 공간 유형별 개수 및 면적 결정 프레임워크

공간 사용률의 계산에 있어서 활동–공간 매핑(Activity–space mapping) 과정은 활동이 일어나는 공간의 유형과 개수를 결정하기에 반드시 필요한 과정이다. 이 과정을 통해 사용자 활동 들이 일어나는 공간 유형과 개수가 결정되게 된다. 한 공간 유형은 한 가지 활동 유형과만 연결되지 않을 수 있으며, 다양한 유형의 활동과 연결될 수도 있다. 다시 말해, 같은 활동 유형일지라도 일어날 수 있는 공간에는 복수의 유형이 존재한다. 이러한 활동과 공간 유형 간의 관계 형성의 복잡성으로 인해, Activity–space mapping의 자동화를 이루고자 한 노력이 있었다. Kim et al. (2013)은 Activity–space mapping 과정에 User constraints, User preferences, Spatial requirements를 활용했다. 사용자의 중요도에 따라 사용자 활동의 요구사항을 Constraints와 Prefere–Nces로 구분하였고 이는 각 공간 유형별 요구사항인 Spatial

requirement와 같은 내용으로 구성된다. 이러한 사용자와 공간 간의 요구사항의 일치를 기반으로 각 활동이 어떤 공간에서 일어날 것인지 결정(매핑) 된다. 이때, 각 활동이 필요로 하는 공간의 개수는 각 활동별 Event quantity를 따른다.

위의 사전 연구에 근거하여 본 연구에서 제안하는 Activity–space mapping에 따른 공간 유형별 개수 및 면적 결정 프레임워크는 Figure 3에 나타난 바와 같다. Activity–space mapping의 결과와 실 생성을 연계시키고자, 각 사용자 활동에 대하여 일치하는 requirement를 갖는 공간 유형들의 후보들(Req_MapList)을 먼저 추출한다. 이후, Req_MapList에서 사용자 활동별로 대응하는 공간 유형들을 Event quantity만큼 중복을 허용하여 선택하고 이를 EQ_Count_Map으로 작성한다. Event quantity의 계산에 사용되는 Group size는 User activity type 입력 유형 중 UserNumber 이하의 자연수로 결정되고, 3.1장의 공간 사용률 계산 방안에 따라 공간 유형별 개수 및 면적뿐만 아니라 사용률의 변수로도 작용한다. EQ_Count_Map의 활동별 Event quantity만큼의 공간 유형의 중복 선택 과정은 무작위로 이루어지고, 이는 Activity–space mapping 결과물로서 공간 유형별 사용률, 개수, 면적에 영향을 미친다. EQ_Count_Map에서 활동에 매핑된 공간들을 통해 각 공간 유형별 개수가 결정된다. 공간 유형별 면적이 결정되기 위해서는 각 공간 유형의 사용자 인당 면적을 의미하는 Space criteria와 매핑된 활동별 Group size를 곱한 Space–use area를 구해야 한다. 공간 사용률의 최적화를 통해 공간 유형별로 활동들이 적절히 매핑되고, 각 활동별로 최적의 Group size가 결정되게 된다. 이를 사용하여 특정 공간 유형에 매핑된 각 활동에 대하여 Space–use area가 계산

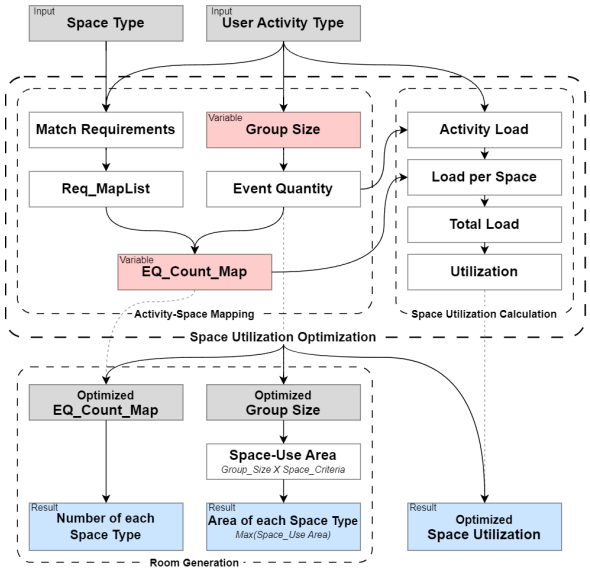

Figure 3. Process of a methodology for automated room generation based on space utilization optimization

된다. 여러 Space–use area 값들 중 최댓값을 공간 면적으로 사용하면 보다 적은 면적을 요구로 하는 그 외의 활동들을 모두 해당 공간이 지원 가능하다. 따라서, 공간 유형별 면적은 매핑된 활동별 Space–use area 중 최댓값으로 결정된다.

3.3 공간 사용률 최적화 기반 공간 유닛 생성 자동화 방법론 구현

본 장에서는 3.1장과 3.2장의 공간 사용률 방안, 방법론의 인풋 값, 그리고 Activity–space mapping 기반 공간 유형별 실 개수 및 면적 결정 프레임워크를 통합하여 최적의 공간 사용률을 갖는 실을 생성하는 방법론을 제안하고 구현한다. 제안하는 Activity–space mapping, 공간 사용률 계산(Space utilization calculation), 실 생성(Room generation)의 세 가지 과정으로 구성된다. Space type과 Use activity type의 입력값을 바탕으로 Activity–space mapping과 Space utilization calulation 과정이 이루어지면 공간별 사용률 수치가 적절한지를 기준으로 최적화가 이루어진다. 이때, 사용률의 수치에 따른 적절성의 기준은 Table 4와 같이 4가지 범위로 구분하였다. 이중 50% 초과, 75% 이하의 사용률을 갖는 경우를 적절한 범위로 설정하였다. 모든 공간 유형의 사용률이 적절 범위 내에 속하도록 Activity–space mapping과 Space utilization calculation 과정의 반복을 통해 최적화가 이루어지게 된다. 이와 함께 최적의 공간 사용률을 결정한 Group size와 EQ_Count_Map를 통해 각 공간 유형의 개수와 면적이 결정되고 실이 생성되게 된다.

Table 4. The implication of the space utilization

Range of utilization	Implication	Description
Utilization ≤ 50%	No wait	Activities can be done without waiting.
50% 〈 Utilization ≤ 75%	Adequate	Activities may need to be scheduled.
75% 〈 Utilization ≤ 100%	Inconvenient	Activities need to be relocated.
100% 〈 Utilization	Infeasible	Activities cannot be physically accommodated.

제안한 방법론을 구현하기 위해 BIM 소프트웨어인 Revit (2025)를 사용하였으며, 시각적 프로그래밍 툴인 다이나모(Dynamo)의 노드와 파이썬 스크립트를 활용하였다(Figure 4). User activity type과 Space type 인풋값을 각각 하나의 엑셀 파일로 작성하여 다이나모에 불러왔다. 이를 바탕으로 프로세스의 구성과 같이 Activity–space mapping, Utilization calculation, Room generation 모듈을 구현하였으며 그에 앞서 Group size를 무작위로 생성하는 모듈이 실행되도록 하였다. 또한,

Revit의 제너레이티브 디자인을 통한 최적화 및 결과물 탐색을 수행하기 위하여 출력값으로 Group size, Space utilization, Space Number, Space area, EQ_Count_Map를 확인할 수 있도록 구성하였다. 최종적으로 실이 생성됨을 보이기 위해 실의 모양은 정사각형으로 고정하였으며 각 공간 유형별 개수가 확인 가능하도록 시각화하였다.

구현된 프로세스의 공간 사용률 최적화는 Revit의 제너레이티브 디자인을 통해 이루어졌다. 제너레이티브 디자인의 디자인 최적화 프로세스는 유전 알고리즘을 기반으로 이루어진다. 여러 세대를 반복적으로 만드는 방식으로 작동하며 각 반복에서는 이전 세대의 결과물을 입력으로 사용한다. 특히 다중 목적 최적화를 위해서 NSGA-II 알고리즘 기반의 파레토 최적화가 이루어진다(Di Filippo et al., 2021). 본 연구의 방법론에서 제안한 공간 사용률의 최적화는 여러 공간 유형들의 사용률을 "적정 범위 내"라는 제약 조건과 "최소화"라는 목적 함수를 가지고 이루어지게 된다. 다수의 공간 사용률의 적정 범위 내 최소화에 대한 다중 목적 최적화가 이루어진다.

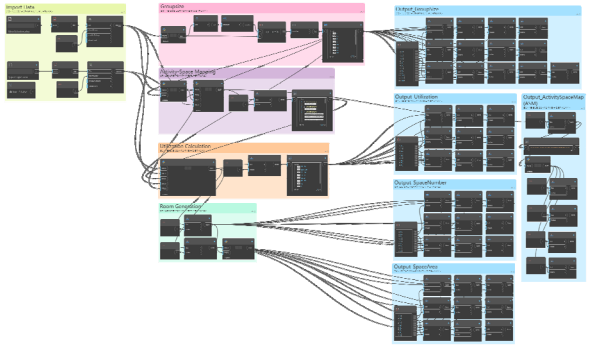

Figure 4. Dynamo workspace implementing the methodology

4. 제안된 방법론 검증을 위한 사례 적용 및 분석

제안한 방법론이 적절하게 작동하는지 검증하기 위해 구현된 방법론의 사례 적용을 통해 확인해 보고자 한다. 사전 연구(Kim et al., 2013)에서 사용된 사례의 정보를 기반으로 하여 시연에 적절하게 수정하였다. 13가지의 사용자 활동 유형과 9가지의 공간 유형으로 사례를 구성하였다. 각 인풋 유형 중 요구사항(Requirement) 중 특정 요구사항이 필요하지 않은 활동이나 공간의 경우에는 '0'으로 표현하였다.

Table 5와 Table 6의 인풋 데이터를 엑셀 파일로 작성하여 구현한 방법론을 적용하여 제너레이티브 디자인을 수행하였다. 이때, 최적화의 목표로는 각 공간 사용률의 최소화를 설정하였고, 구속 요건으로는 최소 50%, 최대 75% 공간 사용률 값의 범위를 설정하였다. 100의 모집단 크기, 10번의 생성 횟수, 1의 시드를 설정값으로 제너레이티브 디자인 최적화 연구를 생성하였다. 생성 결과는 Figure 5와 같다.

Table 5. User activity type input of the cases for the demonstration of the methodology

User type	User number	Action	Ratio	Frequency	Duration	Requirement
A workers	25	Working	100%	1	4	Req 2
B workers	122	Working	100%	1	4	Req 2
A workers	25	Meeting (computer work)	100%	1	1	Req 1
B workers	122	Meeting (computer work)	100%	1	2	Req 1
A workers	25	Meeting (no computer work)	100%	1	2	0
B workers	122	Meeting (no computer work)	100%	1	1	0
B workers	122	Meeting for research	100%	1	1	0
A workers	25	Studying individually	100%	1	2	0
B workers	122	Studying individually	100%	1	1	0
faculty	5	Working	100%	1	8	Req 3
C workers	12	Working	100%	1	8	Req 4
Staff	6	Working	100%	1	7	Req 5
Faculty	5	Meeting	100%	1	1	0

Table 6. Space type input of the cases for the demonstration of the methodology

Space type	Space criteria	Open time	Requirement
Computer cluster	4	12.0	Req 1
Workspace	3	12.0	Req 2
Small conference room (computer)	4	12.0	Req 1
Conference room (computer)	5	12.0	Req 1
Private office	7	12.0	Req 3
Shared office (2 workstations)	5	12.0	Req 4
Cubicle spaces (6 workstations)	5	12.0	Req 5
Small conference room	2	12.0	0
Large conference room	5	12.0	0

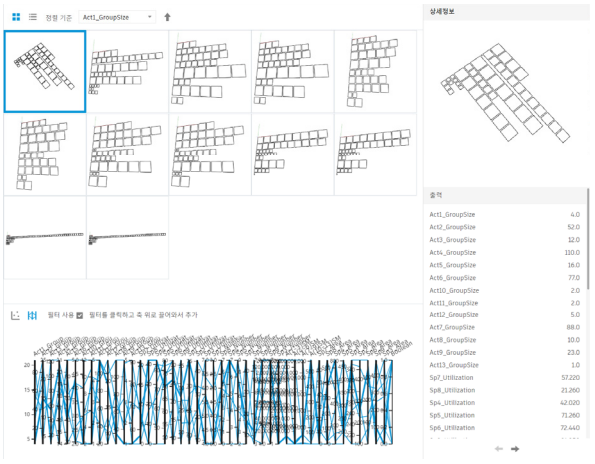

Figure 5. Result of an space utilization optimization though generative design

생성 결과를 살펴보았을 때 2개씩 5종류의 서로 다른 결과물이 생성됨을 확인할 수 있었다. 각 결과물 종류는 모두 사용률 값이 달랐으며, 생성된 실의 개수와 면적 역시 모두 다름을 시각화 결과물을 통해 쉽게 확인하였다. 다만, 50%~75%의 사용률 최적화 구속 조건을 설정하였음에도 불구하고 이 범위를 벗어나는 사용률 값이 있는 결과물도 존재하였다. 결과물 분석에 앞서 활동이 일어나기에 어려움이 있음을 의미하는 75% 이상의 사용률을 갖는 결과물을 우선적으로 제외하였다. 모든 공간 유형의 사용률 값이 75% 이하인 결과물은 5종류 중 2종류가 존재하였으며 서로 매우 다른 Group size, 공간 유형 개수 및 면적, Activity–space mapping 결과물을 가짐을 확인할 수 있었다. 각 결과물에서 최대 및 최소 공간 사용률을 갖는 공간 유형을 구체적으로 살펴보았으며, 제안한 방법론에 기반하여 어떤 요소가 공간 사용률에 영향을 미쳤는지 분석해 보았다.

모든 공간 유형이 적절한 사용률을 갖는 2종류의 결과물은 Figure 6과 같다. 첫 번째 결과물(Table 7)의 경우 모든 공간 유형의 실들이 생성되었으며 가장 높은 사용률을 갖는 공간 유형은 Shared office (2 workstations) (72.440%)로 B workers meeting for research와 C workers working의 두 가지 활동이 매핑되었다. 더 많은 종류의 활동들과 매핑된 다른 공간 유형들이 존재함에도 Shared office가 더 높은 사용률을 갖는 이유는 C workers worker 활동이 오직 Shared office에만 매핑되어 Load per space가 높기 때문인 것으로 유추된다. 반면에 가장 낮은 사용률을 갖는 공간 유형은 Small conference room (computer) (8.330%)로 Faculty meeting의 한 가지 활동이 매핑되었다. 해당 활동이 적은 사용자에 의해 짧은 시간동안, 여러 유형의 공간에서 이루어지기 때문에 매우 낮은 공간 사용률을 갖는 것으로 유추된다.

두 번째 결과물(Table 8)의 경우에는 Conference room

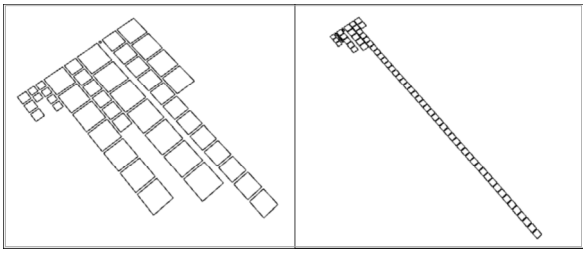

Figure 6. Generated rooms of case study results with space utilization: the first type (left), the second type (right)

Table 7. Values of the first type of case study results

Space type	Optimized utilization	Mapped activities' Idx (Follow the order in Table 5)	Number	Area
Computer cluster	36.290%	3, 4, 8, 9	4	440.0
Workspace	68.210%	1, 2, 6, 7	12	264.0
Small conference room (computer)	8.330%	13	1	4.0
Conference room (computer)	42.020%	3, 4, 5, 6, 9	7	550.0
Private office	71.260%	9, 10, 13	6	161.0
Shared office (2 workstations)	72.440%	7, 11	7	440.0
Cubicle spaces (6 workstations)	57.220%	8, 12, 13	4	50.0
Small conference room	21.260%	8, 9	2	46.0
Large conference room	21.350%	5, 13	3	80.0

(computer)과 Small conference room의 사용률과 면적이 0으로 나타났으며, 이는 어떠한 활동과도 매핑되지 않았으며 사용되지 않음을 의미한다. 사용된 공간 유형들 중 가장 높은 사용률을 갖는 공간 유형은 Cubicle spaces (6 workstations) (66.670%)로 Staff working과 Faculty meeting의 두 가지 활동이 매핑되었다. 매핑된 두 활동 모두 오직 해당 공간 유형에만 매핑되었으며, 이로 인해 높은 Load per space 값을 가질 것으로 보였다. 가장 낮은 사용률을 갖는 공간 유형은 Computer cluster (17.440%)로 A workers studying individually와 B workers studying individually 두 가지 활동이 매핑되었다. 두 활동 모두 낮은 Duration으로 낮은 Activity load 값을 가지며, 다른 공간 유형에도 매핑되어 낮은 Load per space 값을 갖기 때문에 비교적 낮은 공간 사용률을 갖는 것으로 유추된다. 결과물의 분석을 통해, 제안한 방법론의 내용과 같이 최적화된 공간 사용률에 따라 활동–공간 매핑, Group size가 결정됨을 확인할 수 있었다. 또한, 이들이 제안된 방법론에 따라 다양한 실 개수

및 면적을 결정할 수 있음을 확인할 수 있었다.

Table 8. Values of the second type of case study results

Space type	Optimized utilization	Mapped activities' Idx (follow the order in Table 5)	Number	Area
Computer cluster	17.440%	8, 9	2	460.0
Workspace	64.100%	1, 2, 7, 9	45	345.0
Small conference room (computer)	44.890%	3, 4, 6, 8	5	488.0
Conference room (computer)	0	–	–	–
Private office	41.670%	10	2	28.0
Shared office (2 workstations)	61.580%	5, 6, 7, 11	5	370.0
Cubicle spaces (6 workstations)	66.670%	12, 13	7	25.0
Small conference room	0	–	–	–
Large conference room	31.370%	5, 7, 8	3	250.0

5. 결론 및 향후 연구 방향

본 연구는 오피스 초기 설계 단계에서 적정 수준의 공간 사용률을 만족하는 설계를 지원하고자 거주 전 평가 (POE)에서의 사용률 계산 방안을 살펴보았고 이를 실 생성과 연관시킴으로써, 최적화를 통한 공간 유형 별 실 개수 및 면적 도출을 위한 공간 사용률 기반 실 생성 자동화 방법론을 제안하고 구현하였다.

공간 사용률은 건축물의 공간 설계 및 운영 관리에 있어서 중요한 요소이며 효율적인 공간 사용률을 가질 경우, 효과적인 자원 분배, 에너지 관리, 조직 운영 및 관리 등을 가능하게 한다. 오피스와 같이 요구되는 사용자 및 공간 유형이 예측 가능한 경우에는 설계 단계에 공간 사용률 반영을 통한 설계 평가가 이루어질 수 있으며 이를 통한 건축물의 경제성 및 업무 생산성 증가 등을 이룰 수 있다.

본 연구에서 개발한 방법론은 공간 사용률과 실 생성의 연계 방안을 중심으로 최적의 공간 사용률을 만족하는 실을 자동으로 생성한다. 설계 초기 단계에 적용가능한 공간 사용률 계산식을 결정하고 이를 기반으로 프로세스의 인풋 유형 및 값들을 설정하였다. User activity type과 Space type 데이터 인풋 값을 기반으로 Activity–space mapping이 이루어지며 이후 사용률 계산이 이루어지게 된다. 계산된 공간 사용률의 최적화를 통해 적정 수준의 사용률을 갖는 공간 유형별 실 개수 및 면적을 결정하고 이를 생성 가능함을 보였다.

구현된 방법론의 Demonstration을 통해 같은 인풋 값을 가짐에도 상이한 결과물을 도출할 수 있음을 확인할 수 있었다. 다종의 데이터가 존재하고 이들 간의 관계가 복잡한 만큼 공간 사용률 최적화의 변수로 작용한 활동 유형별 Group size와 공간 유형별 Mapped activities는 다양하게 나타남을 확인하였다. 공간 사용률을 최적화해 가면서 적절한 변수를 결정하는 과정이 제안한 프로세스를 통해 자동으로 수행 가능함이 확인되었다. 더 나아가 공간 유형별 실 개수 및 면적 결정을 통한 실 생성이 이루어짐을 보였으며 이는 추후 최적의 공간 사용률을 기반으로 한 오피스 도면 설계로 확장할 수 있음을 시사한다.

다만, 본 연구에서 제안한 방법론은 최적의 공간 사용률 기반 실 생성에 그쳤으며 오피스 도면 설계로 확장되기 위해선 실 배치와 관련된 연구 또한 추가적으로 필요할 것으로 보인다. 실 배치 자동화를 통한 도면 생성과 관련된 사전 연구들의 조사를 바탕으로 최적 사용률의 오피스 자동 설계 연구에 적용 가능한 방안의 탐구가 이루어져야 한다. 사용률에 영향을 줄 수 있는 실들 간 인접성, 출입구, 통로, 코어부 등을 고려한 실 배치관련 알고리즘에 대한 연구가 필요할 것이다. 더 나아가, 건축 부지나 경계선 같은 시작 도면과 같이 생성된 실들을 배치하기 위한 제약 조건에 대한 고려도 이루어질 수 있어야 한다. 또한, 실이 배치되면서 생성되는 오피스 도면 중 최선의 경우를 판단하기 위한 정량적 지표의 도출 및 평가 방법의 제안이 필요할 것으로 보인다. 도면을 평가한다는 것은 개별 공간이 아닌 건축물 전체를 대상으로 하기 때문에 개별 공간 사용률 뿐만 아니라 보다 다양한 평가 지표 탐구가 요구될 것으로 생각된다. 공간을 배치하는 알고리즘에 관한 연구가 필요하며 이를 자동화하고 최적화하기 위한 변수 및 제약 요건의 설정이 이루어져야 할 것이다.

References

Abdullah, S., Ali, H. M., Sipan, I. (2012). Benchmarking Space Usage in Higher Education Institutes: Attaining Efficient Use, Journal of Techno–Social, 4(1), pp. 11–20.

Akadiri, P. O., Chinyio, E. A., Olomolaiye, P. O. (2012). Design of a Sustainable Building: A Conceptual Framework for Implementing Sustainability in the Building Sector, Buildings, 2(2), pp. 126–152.

Aleem, M., Sufyan, M., Ameer, I., Mustak, M. (2023). Remote Work and the COVID–19 Pandemic: An Artificial Intelligence–based Topic Modeling and a Future Agenda. Journal of Business Research, 154, 113303.

Calì, D., Matthes, P., Huchtemann, K., Streblow, R., Müller, D. (2015). CO2 based Occupancy Detection Algorithm: Experimental Analysis and Validation for Office and Residential Buildings. Building and Environment, 86, pp. 39–49.

Cha, S. H., Steemers, K., Kim, T. W. (2018). Modeling Space Preferences for Accurate Occupancy Prediction during the Design Phase, Automation in Construction, 93, pp. 135–147.

Chen, C., Chacón Vega, R. J., Kong, T. L. (2021). Using Genetic Algorithm to Automate the Generation of an Open–Plan Office Layout, International Journal of Architectural Computing, 19(3), pp. 449–465.

Cherry, E. (1998). Programming for Design: From Theory to Practice, John Wiley & Sons, pp. 132–140.

Das, A., Jens, K., Kjærgaard, M. B. (2020). Space Utilization and Activity Recognition Using 3D Stereo Vision Camera Inside an Educational Building, In Adjunct Proceedings of the 2020 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing and Proceedings of the 2020 ACM International Symposium on Wearable Computers, pp. 629–637.

de Bakker, C., Aries, M., Kort, H., Rosemann, A. (2017). Occupancy–Based Lighting Control in Open–Plan Office Spaces: A State–of–the–Art Review, Building and Environment, 112, pp. 308–321.

Di Filippo, A., Lombardi, M., Lorusso, A., Marongiu, F., Santaniello, D. (2021). Generative Design for Project Optimizatio, In Proceedings of the 27th International Conference on Distributed Multimedia Systems, pp. 110–115.

Miller, N. G. (2014). Workplace Trends in Office Space: Implications for Future Office Demand, Journal of Corporate Real Estate, 16(3), pp. 159–181.

Haynes, B. P. (2008). The Impact of Office Comfort on Productivity, Journal of Facilities Management, 6(1), pp. 37–51.

Kán, P., Kaufmann, H. (2018). Automatic Furniture Arrangement Using Greedy Cost Minimization, In 2018 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR) pp. 491–498.

Kim, T. W., Fischer, M. (2014). Automated Generation of User Activity–Space Pairs in Space–Use Analysis, Journal of Construction Engineering and Management, 140(5), 04014007.

Kim, T. W., Kim, Y., Cha, S. H., Fischer, M. (2015). Automated Updating of Space Design Requirements Connecting User Activities and Space Types, Automation in Construction, 50, pp. 102–110.

Kim, T. W., Rajagopal, R., Fischer, M., Kam, C. (2013). A Knowledge–based Framework for Automated Space–Use Analysis, Automation in Construction, 32, pp. 165–176.

Lah, N. M. I. N., Mohammed, A. H., Abdullah, M. N., Asmoni, M. (2015). Office Space Study: A Review from Facilities Management context, Jurnal Teknologi, 75(10) pp. 85–96.

NAO (1996). Space Management in Higher Education: A Good Practice Guide, https://dera.ioe.ac.uk/id/eprint/4704/ (Apr. 11. 2024).

Okhoya, V. W., Bernal, M., Economou, A., Saha, N., Vaivodiss, R., Hong, T. C. K., Haymaker, J. (2022). Generative Workplace and Space Planning in Architectural Practice. International Journal of Architectural Computing, 20(3), pp. 645–672.

Oseland, N., Gillen, N., Verbeemen, G., Anderson, M., Allsopp, P., Hardy, B. (2013). The WCO Guide to: Utilisation and Occupancy Studies, Occasional Paper OP3, Workplace Consulting Organisation, pp. 1–28.

Peeters, M., Compernolle, T., Van Passel, S. (2021). Leasing Out Unused Meeting Room Capacity to Reduce Future Office Space Needs: A Case Study of The Hague, Netherlands, Journal of Building Engineering, 44, 102953.

Peng, Y., Rysanek, A., Nagy, Z., Schlüter, A. (2017). Occupancy Learning–Based Demand–Driven Cooling Control for Office Spaces, Building and Environment, 122, pp. 145–160.

Pennanen, A. (2004). User Activity based Workspace Definition as An Instrument for Workplace Management in Multi–user Organizations. Doctors Thesis, Tampere University of Technology, pp. 7–154.

Pizarro, P. N., Hitschfeld, N., Sipiran, I., Saavedra, J. M. (2022). Automatic Floor Plan Analysis and Recognition, Automation in Construction, 140, 104348.

Rashid, M., Craig, D., Zimring, C., Thitisawat, M. (2006). Sedentary and Fleeting Activities and Their Spatial Correlates in Offices, In Proceedings of the 37th Annual Conference of the Environmental Design Research Association, pp. 22–29.

Ratajczak, J., Siegele, D., Niederwieser, E. (2023). Maximizing Energy Efficiency and Daylight Performance in Office Buildings in BIM through RBFOpt Model–Based Optimization: The GENIUS Project. Buildings, 13(7), 1790.

Raykov, Y. P., Ozer, E., Dasika, G., Boukouvalas, A., Little, M. A. (2016). Predicting Room Occupancy with a Single

Passive Infrared (PIR) Sensor through behavior Extraction, In Proceedings of the 2016 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing, pp. 1016–1027.

Shi, F., Soman, R.K., Han, J., Whyte, J. K. (2020). Addressing Adjacency Constraints in Rectangular Floor Plans Using Monte–Carlo Tree Search. Automation in Construction, 115, 103187.

Tachikawa, R., Osana, Y. (2010). Office Layout Support System using Genetic Algorithm? Generation of Room Arrangement Plans for Polygonal Space?. IEICE Proceedings Series, 44(C1L–D3), pp. 512–515.

Tagliaro, C., Zhou, Y., Hua, Y. (2021). A Change in Granularity: Measure Space Utilization through Smart Technologies, Facilities, 39(1/2), pp. 64–79.

Weber, R. E., Mueller, C., Reinhart, C. (2022). Automated Floorplan Generation in Architectural Design: A Review of Methods and Applications, Automation in Construction, 140, 104385.

Zhou, Y., Hua, Y., Liu, J. (2022). Study Workplace Space Occupancy: A Review of Measures and Technologies, Journal of Facilities Management, 20(3), pp. 350–368.