

BIM과 그래프를 기반으로 한 건물 동선의 표현과 분석 접근방법 - UCN의 확장형인 MRP 그래프의 제안 -

김지수¹ · 이진국*

¹한양대학교 실내건축디자인학과

An Approach to the Graph-based Representation and Analysis of Building Circulation using BIM - MRP Graph Structure as an Extension of UCN -

Kim, Jisoo¹, Lee, Jin-Kook*

¹Dept. of Interior Architecture Design, Hanyang University

Abstract : This paper aims to review and discuss a graph-based approach for the representation and analysis of building circulation using BIM models. To propose this approach, the authors survey diverse researches and developments which are related to building circulation issues such as circulation requirements in Korea Building Act, spatial network analysis, as well as BIM applications. As the basis of this paper, UCN (Universal Circulation Network) is the main reference of the research, and the major goal of this paper is to extend the coverage of UCN with additional features we examined in the survey. In this paper we restructured two major perspectives on top of UCN: 1) finding major factors of graph-based circulation analysis based on UCN and 2) restructuring the UCN approach and others for adjusting to Korean Building Act. As a result of the further studies in this paper, two major additions have demonstrated in the article: 1) the most remote point-based circulation representation, and 2) virtual space-based circulation analysis.

Keywords : Building Information Modeling (BIM), Building Circulation, Metric Graph, Universal Circulation Network (UCN)

1. 서론

1.1 연구의 배경

대규모의 건물에서 다수의 사용자를 대상으로 하는 건물 일수록 설계 단계에서의 사용자 동선에 대한 예측과 분석의 중요성은 더욱 커진다(Choi et al. 2010). 건물 내부의 동선을 분석하기 위하여 다양한 표현과 접근방법이 연구되어 왔으며, 동선을 결정하는 복잡한 요소 중에서 건물과 실내공간의 기하학적 형상정보 및 공간간의 연결 관계는 매우 중요하다(Choi 2006). 해당 정보는 입, 단, 평면도로 일컬어지는 도면 정보만으로는 즉각적으로 얻기 쉽지 않으며 각 실 간의 모든 동선을 설계단계에서 파악하기는 쉽지 않다.

BIM(Building Information Modeling)기반 가상의 건물 모델은 활용 가능한 많은 정보를 담고 있으므로 초기설계단계

부터 다양한 동선 분석이 가능하다. BIM을 적용한 다수의 국내의 프로젝트 사례에서 동선분석을 초기설계단계부터 진행하여 매우 효과적으로 분석 결과를 설계에 반영하였고, 이로 인해 많은 시간적, 경제적 이익을 얻을 수 있었다(Eastman et al. 2008). 평가자가 직접 동선을 도면 위에 그려가며 수행되었던 전통적인 방식과 달리, 대형 건물 또는 병원이나 법원과 같은 특수성을 가지고 있는 건물 및 보안 규칙 등의 여러 제약 조건을 가지고 있는 건물의 경우에는 그 분석이 매우 까다롭거나 시간이 오래 걸리는 관계로 BIM을 활용하여 동선 분석을 일정 부분 자동화함으로써 얻을 수 있는 이익이 크다(Eastman et al. 2009). BIM기반의 동선분석 자동화는 1) 수작업으로 수행하던 것을 컴퓨터가 대신함으로써 시간 및 예산을 절감할 수 있다는 사실 이외에, 2) 기존의 방식에서 시도하기 어려웠던 건물 내 모든 가능한 동선을 대상으로 분석함으로써 보다 정확성과 신뢰도를 높일 수 있다는 의미를 내포한다. 가령 500개의 실을 가진 건물의 경우 산술적으로 가능한 실간 최단 동선은 120,000가지가 넘는다(Lee 2008). 실제로 미국의 GSA는 법원 청사 건설 프로젝트에서 BIM을 도입함으로써 법원 건물의 보안 체계와 같은 많은 제약 조건이

* Corresponding author: Lee, Jin-Kook, Department of Interior Architecture Design, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea
E-mail: designit@hanyang.ac.kr

Received March 31, 2015; revised June 23, 2015

accepted August 6, 2015

따르는 특수성에도 불구하고 수만 건이 넘는 복잡한 동선 분석을 매우 짧은 시간에 정확하게 해결 할 수 있었다(Eastman et al. 2008, 2009). 이러한 배경에서 본 논문은 동선의 표현에 대한 접근방법을 BIM과 그래프를 중심으로 기술하며, 본 저자의 선행 연구 및 해당 구현의 결과물인 UCN(Universal Circulation Network) (Lee et al. 2010)을 기반으로 새로운 요소를 추가함으로써, 그래프를 사용한 건물 동선의 확장된 표현과 분석의 접근방법을 제시한다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구의 목적은 그래프 이론을 중심으로 한 국내외 동선 관련 선행 연구를 살펴보고, BIM모델에 일반적으로 적용 가능한 그래프 표현과 분석의 접근방법을 고찰한다. 선행 접근 방법의 재구성 및 제안을 위해 본 연구에서는 그래프 이론을 기반으로 한 동선 및 공간 연결 관계 분석에 관한 기존의 다양한 선행 연구들을 비교하고, 이를 바탕으로 BIM 모델을 활용한 동선분석 접근방법을 제안한다. 이를 위해 선행 접근 방법 중 UCN의 그래프 모델에 대한 접근을 재구성하고 추가적인 구성요소에 대한 제안을 하고자 한다. 이를 위한 연구의 범위 및 방법은 다음과 같다.

- 1) 선행 연구인 UCN을 바탕으로 그래프 기반의 동선분석 요소에 대해 파악한다. 또한, 본 연구에서는 UCN을 기반으로 하여 국내외의 타 접근 방법을 반영하고 보충하여 국내에서 일반적으로 활용 가능한 그래프 접근 방법으로 확장 하고자 한다.
- 2) 국내의 법규 및 규칙 등을 중심으로 BIM 기반 동선 분석의 필요 사항에 대해 국내에 적합한 형태로 UCN을 확장 한다.

2. 그래프 이론 기반 동선의 표현과 분석

2.1 위상기하학적 연결 관계 그래프

건축 계획단계에서의 동선 분석은 건물에 대한 사용자의 편리성 및 효율성을 예측하는 자료가 될 수 있으며, 다양한 디자인 대안에 대해 보다 합리적으로 판단하고 선택할 수 있다는 점에서 중요하다. 또한, 건물의 각 실들을 계획하고 배치하는 행위는 동시에 사용자의 동선을 직접 결정짓게 하므로, 건축 계획단계부터 실간 위상기하학적 연결 관계에 관한 다양한 표현과 분석에 대한 접근방법이 있다(Fig. 1). 그 중 하나인 그래프 이론은 도시 및 건축 공간의 위상기하학적 관계 표현 및 분석의 주요 도구로 자리해왔다(Alexander et al. 1977). 그래프는 건축 공간의 위상기하학적 연결 관계를 나타내는데 손쉽게 사용되며, 이는 구체적인 실의 배치 등이 결정되지 않은 초기 설계 단계에서 실간 관계 및 기능을 고려하는데 널리 활용된다.

위상기하학에 기초하여 동선을 포함한 건축 계획 관련으로 잘 알려진 연구는 공간 구분론(Hillier et al. 1984)이 있으며, 이를 기반으로 국내에서도 다양한 응용 연구가 수행되었다. 가령 Kim(2005)의 연구인 공간구성체계도(SCGC)는 공간구분론을 활용하여 공간의 배치 및 분석을 위해 정량적인 판단기준을 제시하며, Park(2010)은 공간 배치 디자인 대안의 합리적인 선택을 위한 공간 배치 모델을 연구하였다. Lee et al.(2013)의 연구에서는 공간구분론의 볼록 공간도와 시각측도를 활용한 수직 동선을 분석하였다. 건축 계획분야 자체에 대한 심도 있는 논의는 본 논문의 논지를 벗어나나, 건축 계획을 위한 공간 간 연결 관계에 대한 표현과 분석을 위해 공히 위상기하학적 그래프가 중요하게 사용되었다는 점을 알 수 있다.

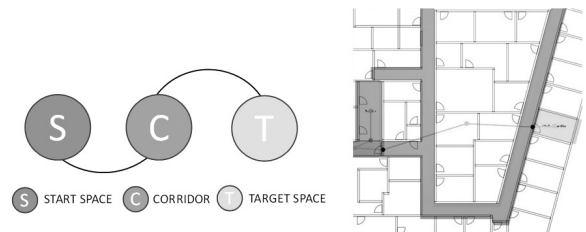


Fig. 1. Topological relation and its visualization example

2.2 동선관련 응용을 위한 기하학적 그래프

그래프 구조를 기반으로 한 동선의 표현과 분석은 가시성 분석 등과 같은 형태로 응용되기도 하여, Choi et al.(2006)의 연구에서는 가시성 분석을 기반으로 건물과 외부의 동선 체계를 분석 하여 보행자의 통행을 예측 하고자 하는 등, 다양한 응용을 찾아볼 수 있다.

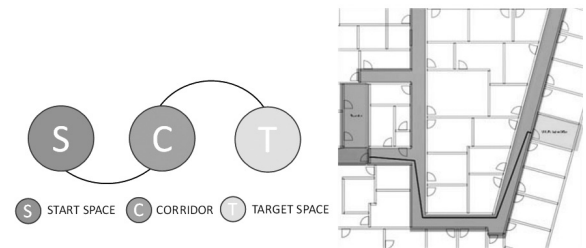


Fig. 2. Topological relation and its metric graph(Lee 2010)

Park(2010)의 연구는 공간 모델의 정보를 추출하여 공간 배치를 위한 분석 모델을 자동생성 할 수 있도록 한다. 이는 동선 그래프를 생성하기에 앞서 필요한 공간 모델의 정보를 추출하고 그 관계에 대한 분석이 선행 되어야 한다는 점에서 의미가 있다. 특히, Park(2010)의 연구에서는 국제 표준포맷인 IFC(Industry Foundation Classes)를 따라 그 활용성이 더욱 크다. Kim et al.(2011)의 연구에서는 작업자의 위험 지역을 식별하기 위해 작업자의 동선을 그래프로 표현한다. 그

래프의 점(Node)은 도면에서의 건축요(Element)를 추출하여 생성하고 그 점들의 연결선(Edge)을 BIM 모델과의 간섭체크를 통해 간섭이 일어나지 않는 선을 추출한다. 이것을 최적 이동 경로 리스트로 결정하며, 실제 작업자의 경로를 관찰하여 편차를 통해 장애물이 있음을 인지하고 위험 지역을 식별한다. Lee et al.(2011)의 연구에서는 오토데스크 사의 레빗(Autodesk Revit)에서 모델링 된 건축 평면을 게임인공지능에서 활용하는 실험용 시뮬레이터 패스파인더(PathFinder) 프로그램으로 불러온 후, 길 찾기 알고리즘을 적용하여 동선 그래프를 생성하였다. 이외에도 다양한 그래프 기반의 동선 관련 표현과 분석 접근방법을 찾아볼 수 있으며, 이들은 앞서 살펴 본 위상기하학적 정보를 포함하여 기하학적 형상을 생성함으로써 실질적인 동선 관련 응용이 가능하다. 이를 위해서는 건물모델이 필요한데, 다양한 속성의 동선을 생성하기 위해서는 평면도와 같은 기하학적인 형상 정보뿐만 아니라, 연결 관계 등과 같은 추가적인 정보를 생성할 수 있어야 한다. 이러한 관점에서, 여러 추가정보를 활용할 수 있는 BIM을 사용함으로써 보다 효과적인 동선의 표현과 분석에 대한 접근이 가능하다.

3. BIM 기반 동선의 표현 접근 방법

3.1 BIM 기반 그래프 생성 도구

현재 가용한 BIM 기반 동선 그래프의 표현 및 분석 소프트웨어의 대표적인 국내외 예시는 1) SMC(Solibri Model Checker) (국외)와 2) ABIMO(국내)로 본 논문에서 상정하였으며, 동선 그래프의 생성방법 측면에서 살펴보았다. 해당 도구는 공히 IFC 인스턴스에 존재하는 건물의 기하학적 정보 및 공간간의 연결 관계 추적, 벽체, 문 등과 같은 건축 객체간의 관계 속성 정보를 활용하여 다양한 방식의 동선 그래프를 생성하여 표현한다.

SMC는 현재 BIM 모델의 분석 및 평가를 다루는 소프트웨어 중 가장 세계적으로 널리 활용되고 있는 소프트웨어중 하나로써, 다양한 룰셋(Ruleset)을 이용하여 설계검토 및 분석을 지원한다. 특히, 동선 분석을 위한 그래프는 본 논문에서 기반으로 하고 있는 접근 방법인 UCN을 동선의 표현 방법으로 채택하고 있으며, 해당 UCN에 관한 자세한 내용은⁴ UCN 그래프 및 확장단락에서 다룬다.

ABIMO는 국내에서 개발된 BIM 저작도구이자 설계검토 도구로써, 검토 기준 항목을 수정 및 조합 하여 규칙을 생성한 후 분석 하는데, 동선 분석을 위한 기준 항목으로는 객체 사이 최단 거리 검토 및 공간의 인접 여부, 공간 사이 중심거리 계산 등이 있다. ABIMO는 건물의 실과 문, 계단의 기상 위하학적 정보를 추출하여 각 거리를 계산하며, 목적지가 존재하는 경우에는 최단 경로를 탐색하여 거리지도 및 동선 그

래프를 산출한다. 마찬가지로 그래프 생성에 UCN의 접근방법을 사용하였다. 이러한 기존의 소프트웨어상의 구현 내용을 출발점으로, 부가적으로 필요한 동선 그래프의 추가 요소에 대해 알아보하고자 한다.

3.2 동선 관련 요구 사항

BIM 모델을 기반으로 일반적인 동선 그래프를 표현하고 분석을 수행하려면, 동선 관련 요구 사항 파악이 선행되어야 한다. 이러한 요구사항들로부터 구체적인 동선 그래프의 필요 요소들이 도출될 수 있다. 이를 위하여 본 논문에서는 1) 건축법 및 관련법, 2) 제안요청서(RFP: Requirement for proposal), 그리고 3) 설계지침으로 나누어 동선 관련 요구사항을 선택적으로 살펴보고자 한다. 건축법 및 건축 관련법으로 '건축물의 피난 방화 구조 등의 기준에 관한 규칙'(국가법령정보센터, <http://law.go.kr/main.html>)을 활용하였고, 제안요청서는 부산 B병원의 사례(나라장터, <http://www.g2b.go.kr>)를 활용하였다. 또한 피난 관련 설계지침과 해외 디자인가이드를 예시로 동선 표현에 필요한 요소를 살펴보고자 한다. 본 논문은 모든 법규나 규칙을 다루지는 않으며, 동선 관련 중요한 특징들을 통해 그 내용을 살펴보고 추가적으로 필요한 요소들을 파악하는 것에 의의를 둔다.

3.2.1 건축법과 건축 관련법

건축물의 피난 방화 구조 등의 기준에 관한 규칙 제 11조 ①(중략)건축물의 바깥쪽으로 나가는 출구를 설치하는 경우 피난 층의 계단으로부터 건축물의 바깥쪽으로의 출구에 이르는 보행거리는 영 제 34조 제 1항의 규정에 의한 거리 이하로 하여야 하며, 거실의 각 부분으로부터 건축물의 바깥쪽으로의 출구에 이르는 보행거리는 영 제34조 제1항의 규정에 의한 거리의 2배 이하로 하여야 한다.

위의 건축법을 통해서 동선의 길이 계산 시 BIM 모델에서 단순히 객체 간 직선거리가 아닌 보행거리의 계산이 필요함을 알 수 있으며, 실내의 각 부분, 특히 문에서 가장 먼 지점에서 출구까지의 거리 산정이 필요함을 알 수 있다.

한편, 국내의 건축법 중 보행거리 관련한 규정은 일본, 미국, 중국 등에 비해 보다 획일적인 규정으로 보다 일반적인 내용을 다룬다고 평가되고 있다(Shin et al, 2009). 따라서 동선 생성 시 기본적인 접근 이외에도 상세한 조건을 사용자가 부여하여 여러 응용이 가능한 형태가 될 수 있어야 할 것이다.

3.2.2 제안요청서 (RFP)

1) 외부의 오염된 동선이 수술 장 내부에 임의로 진입하지 않도록 계획되어야 하며, (중략) 수술실로의 출입을 갱의실을 거치도록 하는 것도 한 가지 방법이 될 수 있음.

2) 외기에 면하는 곳에 배치하여 자연채광이 이루어지도록 하며 중환자실 내부에 통과동선이 발생하지 않도록 함.

3) 사체가 자주 발생하는 응급실과 중환자실로부터의 사체 운반동선과 부검실로의 동선은 일반 환자나 방문객 동선과는 완전 분리되도록 함.

제안요청서의 경우에는 보다 세부적인 내용을 다루며 BIM 모델 내의 실과 동선의 관계에 관한 요구사항을 제시한다. 특히, 하나의 동선을 검토하기 보다는 다른 실과의 관계를 통한 검토, 또는 동선이 지나는 곳에 창문 등의 개구부가 존재하는 지에 대한 정보가 필요한 경우로, 동선 자체로도 여러 요구사항이 적용될 수 있음을 알 수 있다.

3.2.3 설계지침

설계지침은 법규나 제안요청서에 비해 건물의 종류나 위치적 특성을 반영한 상세한 요구사항의 한 예로, 본 논문에서는 일반적인 피난계획에 대해 다루었다. 피난계획은 건축물의 대형화 및 초고층화로 인해 다수 사용자의 안전과 관련하여 중요성이 매우 크다. 국내의 피난계획 설계지침은 해외에 비해 그 기준이 상대적으로 개략적이기는 하나 기본적인 사항(Kim 2010)은 다음과 같다.

1) 피난경로는 단순한 경로로 실이나 복도 또는 계단을 여러 번 통과하는 경로가 되어서는 안 된다.

2) 피난경로는 직선으로 되어 있는 것이 좋다. 계단실까지 여러 번 꺾이는 복도, 직각 이외의 구부러진 곳 또는 위치를 알기 어려운 피난계단 등의 배치를 줄이는 것이 좋다.

피난 경로 분석은 실 통과 개수나 방향 전환 개수 등과 같은 정량적인 평가가 필요함을 알 수 있다. 이러한 수치는 더 빠르고 안전한 피난을 유도할 수 있는 설계안을 객관적인 평가로 선택 가능하게 한다. 해외 설계지침은 국내에 비해 더욱 상세한 내용으로, 그 내용은 다음과 같다.

1) 실 및 공간에 존재하는 문 및 개구부 중심점에서 외부 공간과 직접 연결되어 있는 가장 먼 점이 거리로 규정된 한도를 넘어서는 안 된다(NY Code-Section 27-360: Travel distance).

2) 보행거리는 보행자가 출구에 도달하기 전까지의 총 거리로 보며 그 것은 방 안에서의 가장 먼 점부터 가장 가까운 출구까지의 거리로 측정한다(NFPA 101).

앞선 피난관련 법규 및 설계지침의 요구사항을 통해, 동선을 문과 문 사이의 연결 뿐만아니라 실 내부로 확장시킬 필요성이 있음을 알 수 있다. 이를 위해서 문으로부터 가장 먼 지점을 의미하는 MRP(Most Remote Point)를 구현하여 활용할 수 있다. MRP를 적용하여 생성된 그래프를 이용한다면, 특정한 공간객체로부터 최단 피난 경로에 해당 공간객체 출구의 가장 먼 지점으로부터 출구까지의 거리를 측정할 수 있다. 이는 해외의 피난 관련 법규 및 설계지침을 분석한 연구(Choi et al, 2013)에서 공통적으로 적용된 항목 중 하나이다.

3.3 동선 객체 및 속성

동선 관련 법규 및 제안요청서, 설계지침의 동선의 표현과 분석을 위한 요구 사항은 Table 1과 같이 정리될 수 있으며, Table 1을 통해 동선 관련 요구사항이 다루는 내용은 크게 네 가지로 분류될 수 있다(Table 1).

Table 1. Circulation graph considerations by design requirements

| Rules | Contents | Considerations | |
|--------------|---|---|-----------------------------|
| Building Act | From stairs of fire escaping floor to exits | Stairs and doors | Start points and End points |
| | Travel distance | Need for real human movement paths not straight line distance | |
| RFP | Separation of exterior circulation | Relations between circulations | |
| | Visitors' access | Considering users for security reasons | |
| | Encountered to open air | Considering passing rooms of circulation | |
| Guideline | Passing through many rooms | Number of passing spaces | Spatial Depth |
| | corners and curved corridors | Number of turns | |
| | "It starts from a center point of the exit" | Location of start point (center point) | |
| | Definition of travel distance | Sum of length of edges | |
| | Most-remote point in a room | Considering the farthest point from inside of space to door | |

1) 동선의 필수요소는 그래프 노드의 관점에서 하나 이상의 시작과 끝 노드이며, 중간 노드는 없을 수 있다.

2) 보행거리는 나타내고자 하는 동선의 시작점과 최종 목표점까지의 그래프 선들의 길이의 합을 통해 나타낸다.

3) 동선은 통과하는 각 실의 환경이나 개수, 꺾임 횟수 등의 속성을 포함하거나 유추할 수 있다.

4) 각기 다른 동선 간의 관계가 존재한다.

Table 1에서 다루는 내용에 필요한 정보를 얻기 위해 BIM 모델에서 추출해야 하는 요소와 해당 정보의 목적 등은 Table 2와 같이 나타낼 수 있다.

Table 2. Key elements of graph geometry and circulation features

| Key Elements | Modeling Object | IFC Object | Purpose | LOD |
|---------------------|------------------------------|---|---|----------|
| Door Center point | Door Object | IfcDoor, IfcWindow, IfcOpeningElement | Act as nodes in graph | 200 |
| Space Boundary | Wall | IfcRelSpaceBoundary, IfcSpaceIfcWall, IfcWallStandard | Setting location of nodes and representation of buffered space boundary | 200 |
| Column | Column | IfcColumn | | 200 |
| Stair | Stair | IfcStair, IfcStairFlight | Utilized in vertical circulation analysis | 200 |
| Ramp | Ramp | IfcRamp, IfcRampFlight | | 200 |
| Virtual door object | Room Separator, Virtual Wall | IfcVirtualElement, IfcConnectionSurface Geometry | Utilized MRP in virtually separated spaces | Over 300 |
| Space | - | IfcZone, IfcSpace | Space Grouping | 100 |

Table 2에서 그래프 이론 기반의 동선분석을 위해 모델링 되어야 하는 핵심 요소는 주로 LOD(Level of Detail) 200 수준에 분포한다. LOD 200은 계획 설계단계로서 설계 초기 단계에 해당하는데 이는 대부분의 그래프 이론 기반의 동선 분석이 설계 초기 단계에서 가능함을 알 수 있다. 다만, 기본적인 동선 그래프를 표현하기 위해서는 IfcSpace와 IfcRelSpaceBoundary를 반드시 포함하고 있어야 한다. 특히 IfcRelSpaceBoundary의 경우에는 공간의 토폴로지 추출 및 벽, 개구부의 연결 관계를 정의 하므로 동선 그래프 생성에 필수적이라고 볼 수 있다(Yeom 2009).

4. UCN 그래프 및 추가 구성요소의 필요성

4.1 UCN(Universal Circulation Network) 그래프

UCN은 BIM 모델에서 컴퓨터를 사용하여 정확한 보행 거리의 계산을 목적으로 연구 및 구현되었으며, 활용 가능한 항목이 다양하다(Table 3). UCN은 시각성과 보행자의 신체조건을 고려하여 보행자가 이동할 수 있는 가장 현실적인 최단 동선을 표현한다. 위상기하학적 연결 관계 그래프나, 건물 정보 기반 기하학적 그래프 방식을 따르는 카날라(Kannala 2005)나 중심선 기반 그래프와는 달리 BIM모델 기반 자동 생성 알고리즘이 공개되어 있다(Lee et al. 2010). UCN의 특징을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 건물 정보 기반 기하학적 그래프(Metric Graph)
- 2) 보행자의 신체를 고려한 벽면으로부터의 완충영역
- 3) 효율적인 동선을 위한 최단 거리 알고리즘 적용
- 4) 가시성 고려
- 5) 문 객체 사이의 중심점 연결
- 6) 공간의 볼록 점(Concave point)을 추출하여 모퉁이 및 기둥 등 장애물이 있는 공간에서의 동선 추출
- 7) 그래프의 BIM모델 기반 자동 생성 알고리즘
- 8) 정확한 최단 보행거리 계산
- 9) 중심선 기반의 수직 동선 고려

UCN의 동선 생성을 위한 핵심 요소 세 가지는 문과 벽체, 공간 객체 등으로써 높은 LOD를 요구하지 않는다는 점이다. 이는 개략적인 초기 설계 상태의 낮은 LOD의 모델로도 평가가 가능하다는 장점이 있다. 또한, 생성된 그래프는 시각화가 가능하고 동선에 관한 정량적인 수치를 도출해 낼 수 있다. 도출된 수치는 설계된 BIM 모델의 정량적인 평가에 활용 가능하며 기존의 수작업으로 진행되던 방식 보다 오류가 적고 정확하다. 이러한 장점으로 UCN은 BIM 기반 건축 모델 분석 프로그램으로 가장 일반적으로 알려진 솔리브리 모델 체커(SMC: Solibri Model Checker)에 적용되어 사용되고 있으며, 미국 조달청(GSA)의 법원 청사 건물 동선 분석에 활용되었다(Eastman et al. 2008, 2009).

4.2 UCN 그래프의 추가 구성요소의 필요성

본 연구에서는 기존의 다양한 BIM기반 동선 분석을 위한 그래프 표현방법을 취합하여, 국내 규칙 및 법규에 적용하기 위해 필요한 추가적인 요소를 제안하고자 한다. 해당 그래프들은 분석의 목적과 특성에 따라 분석 가능한 항목들이 다른데, 분석 가능 항목들은 Table 3과 같다. UCN은 일반적인 동선 분석을 목적으로 할 때 검토 가능한 다양한 항목들을 다룰 수 있으며, 본 연구에서는 UCN의 해당 요소를 활용함과 동시에 두 종의 요소를 추가 정의하고자 한다. 이는 1) 3.3단락 Table 1의 '실 내부에서 출구까지 가장 먼 점에 대한 고려 (Most remote point in a room; 이하 MRP)'를 위한 요소, 그리고 2) BIM 모델 작성 시 활용될 수 있는 가상 공간 분할 선이나 가상 벽 객체 등과 같은 가상 객체를 고려한 MRP에 대한 요소이다. UCN을 기반으로한 해당 그래프를 "MRP 그래프"로 칭한다.

Table 3. Comparison between utilizable items by several graphs

| Utilizable items | SCGC | Visibility ERAM | Topological | Canter line | Kannala | UCN |
|----------------------|------|-----------------|-------------|-------------|---------|-----|
| Auto-generation | | | | | ○ | ○ |
| Visibility | | ○ | | | | ○ |
| Spatial depth | ○ | | | | | ○ |
| Number of turns | | | | | | ○ |
| Distance measurement | | | | | ○ | ○ |
| Visualization | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |

5. MRP 그래프의 정의

5.1 공간객체에서의 MRP 그래프

MRP(Most-Remote Point)는 출입구로부터 가장 먼 실내의 지점을 뜻하며, 이를 통해 관련 법규에서 지칭하는 정확한 피난거리의 계산이 가능하다. MRP 그래프는 실 간의 연결을 나타내는 UCN 그래프를 실 내부로 확장시킴으로써 피난 및 방화 관련 규칙들을 평가할 수 있다. MRP는 Choi et al.(2013)에서 'Outermost Node'라는 명칭으로 피난 경로 그래프를 위한 개념으로 활용되기도 하였다.

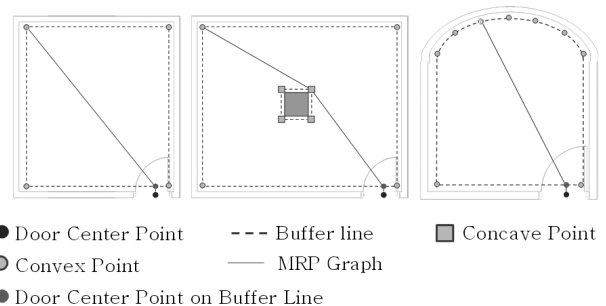


Fig. 3. MRP graph generation in a: 1) rectangle space, 2) space with a column (as an obstacle), 3) round-shape space

MRP 그래프는 BIM 모델에서 시공 전 평가되는 항목으로 사전에 더 나은 피난 계획을 수립할 수 있고, 설계 변경으로 인해 재시공 되는 낭비 요소를 줄일 수 있다는 측면에서 의의가 있다. 다만 영국 IES 사의 시뮬렉스(Simulex)나 미국 썬더 헤드 엔지니어링의 패스파인더(Path finder)와 같은 행위자 기반 모형에 비해 피난 행위자에 대한 정보를 포함하지 않고, 순수 건물객체만으로 그래프를 생성하므로 병목 현상 및 피난시간 등과 같은 내용을 다루지 않는다. 하지만 BIM 모델에서 정확한 피난 시뮬레이션을 수행하기 전에, 단순한 방식을 통해 빠른 계산을 할 수 있다는 점에서 차별성이 있다. Fig. 3은 MRP 그래프의 기본 형태로, UCN과 같이 문 객체의 중심점에서부터 그래프가 시작되며, 그래프의 끝점은 실 내부의 특정한 오목 점이 된다는 점에서 UCN과 차이점이 존재한다. 그래프는 가능한 모든 동선 중 다이스트라외의 최단 거리 알고리즘(Gross et al. 1998)을 활용하여 가장 짧은 거리를 가지는 동선의 선택을 통해 구하게 된다. 이는 보행자의 자유의지를 배제하고 가장 효율적인 동선을 선택하기 위함이다. 문 객체에서 가장 멀리 위치한 오목 점을 구하기 위해서는 공간 객체 경계선 위의 모든 오목 점을 구하고 문에서 출발하는 모든 가능한 동선을 생성한 후, 가장 긴 거리를 가지는 오목 점의 동선을 찾는다. Fig. 3.2)는 MRP까지 도달하는 동선이 볼록 점을 지나게 되는 경우로, 이는 기둥이나 모퉁이가 존재하는 공간에서 발생한다. 이 때 문 객체에서 볼록 점, 볼록 점에서 오목 점 순으로 동선이 생성되며 지날 수 있는 볼록 점의 수는 공간의 형태에 따라 차이가 있다. 기둥이나 벽체 같은 구조체 뿐만 아니라 고려해야 할 장애물이 실 내에 존재하는 경우 또한 마찬가지로의 방식으로 계산 된다. 반면, Fig. 3.3)과 같이 공간에 곡선이 존재하는 경우 둥근 경계선을 일정한 각도로 분할 한 후 추출되는 모든 오목 점들을 구하여 그 오목 점들을 그래프 생성에 활용한다. 분할 각도는 모델의 세밀도나 평가 방식에 따라서 다르게 지정될 수 있다. MRP 그래프를 생성하는 알고리즘을 요약하자면 다음과 같다.

1) 공간 객체 경계선의 안쪽으로 완충 거리 영역을 생성한다. 완충 거리는 사람 어깨의 절반 정도에 해당하는 길이며, 기둥 등의 장애물이 존재 하는 경우 필요에 따라 추가적으로 공간 객체 경계선을 설정한다.

2) 완충 거리 영역이 주어진 공간 객체 경계선 위에서 오목 점, 볼록 점, 문 객체 중심점을 찾는다(곡선이 존재하는 경우는 곡선을 분할하여 점을 생성한다).

3) 각 오목 점에서 문 객체 중심점까지 그래프를 직선으로 그린다. 가) 실 내부에 기둥이나 모퉁이가 있는 경우: 볼록 점을 활용하여 그래프를 그리며 볼록 점의 개수는 실 내부에 존재하는 기둥이나 모퉁이의 수, 위치에 따라 다르다. 문 중심점, 볼록 점(한 개 또는 이상), 오목 점 순, 나) 실 내부에 기둥이나 모퉁이가 없는 경우: 문 중심점에서 오목 점까지 직선

연결 한다.

4) 최단거리 알고리즘을 적용하고 서로 교차하지 않는 유효한 동선 중 가장 긴 거리를 가지는 동선이 MRP 그래프가 된다.

해당 프로세스를 구현한 상위레벨 메소드를 $MGraph()$ 로 정의할 때, 다음과 같이 수식화된다.

$$s_i = \{(v_{si})_m, (e_{si})_n\} \tag{1}$$

$$Buffer(s_i, b) \rightarrow sb_i^{1)} \tag{2}$$

$$Buffer(d_i, b) \rightarrow db_i \tag{3}$$

$$cx_i \in vs_i \tag{4}$$

$$MGraph(sb_i, db_i, cx_i) \rightarrow G_{Mi} \tag{5}$$

s_i : 공간 객체 경계선²⁾

v : vertex

e : edge

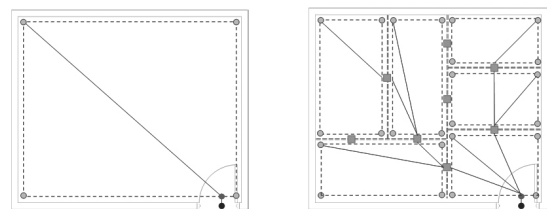
sb_i : 완충거리 영역 적용 공간객체 경계선

db_i : 완충거리 영역 적용 문 객체

cx_i : 실 내부의 오목점

5.2 가상공간객체를 고려한 MRP 그래프

BIM 모델의 공간은 하나의 온전한 공간객체로 정의되는 경우와 가상의 분할선으로 두 개 이상의 공간객체로 정의되는 경우가 있다. 가령 가상 분할선을 통해 분할되는 공간은 오토 데스크 사의 레빗(Autodesk Revit)에서 공간 구분선(Room separator)을 이용하여 모델링 하였을 때 하나의 공간이 여러 공간 객체를 생성하며, BIM 모델 상에 존재하는 가상의 벽을 통해 개방된 형태의 공간을 분할하여 여러 관련 속성을 개별적으로 부여할 수 있는 공간을 말한다. 개방형 점(Open Node)(Choi et al. 2013)은 이러한 가상공간으로 인해 생겨난 개념으로, 가상 벽 객체의 중심점을 말한다. Choi et al.(2013)의 연구에서는 점(Node)의 정의에 초점을 맞추고 있으며 그래프 시각화 과정에 대해서는 생략되어 있다. 따라서 본 단락에서는 이에 대한 개념을 바탕으로 가상공간 객체를 포함한 MRP 그래프의 표현을 위한 접근 방법을 다루고자 한다.



● Convex Point --- Buffer line — MRP Graph ● Door Center Point
● Door Center Point on Buffer Line ■ Virtual Door Center Point

Fig. 4. Examples of MRP graph in: 1) a single space object and 2) several space objects composed of virtual spaces

1) Buffer()는 완충영역을 구하는 메소드(Lee et al. 2010)

2) Table 2의 벽 및 기둥 객체 정보를 바탕으로 공간 객체 경계선 생성

Fig. 4는 5개의 공간 구분선이 생성된 모델의 예시이다. 위의 그림과 같이 분할된 공간에서의 MRP 그래프는 문 객체의 중심점을 시작으로, 분할 된 각 공간에서 가장 먼 지점을 찾아 그래프를 생성한다. 가상으로 분할된 공간에서의 MRP 그래프는 앞서 5.1에서 서술된 방식과 같은 과정으로 생성되나, 각 공간구분선이 서로 맞닿는 부분에서는 추가적인 고려가 필요하다. 본 논문에서는 공간구분선의 중심점을 가상 문 객체로 임의 선정하고 앞서 다른 방식과 마찬가지로 가장 먼 점과 문과의 연결, 문과 문의 연결의 방식을 취한다. 가상 벽 객체의 중심점을 활용함은 보행자가 피난 시 택하는 동선 중 가장 평균적인 점이기 때문으로, 이는 Choi et al.(2013)에서 가상 문 객체 점을 중심점으로 한 연구의 결과를 반영한다.

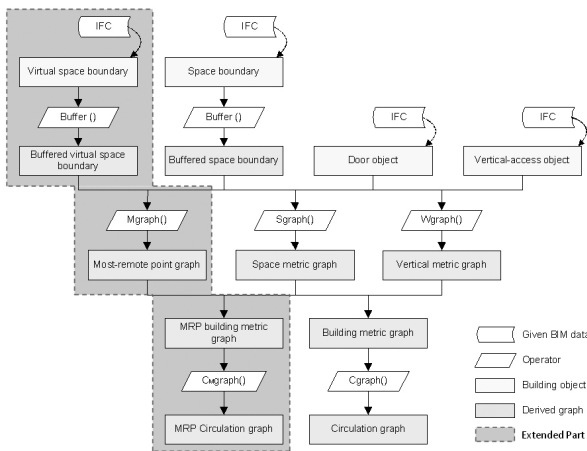


Fig. 5. Extended process of UCN generation(Lee 2010)

Fig. 5는 확장 된 UCN 생성을 위한 프로세스 다이어그램으로, 기존 UCN 생성 프로세스에 MRP와 가상공간 객체가 추가되었다(좌측의 음영 부분). $CMGraph()$ 는 MRP 그래프를 포함하는 동선 그래프를 생성하는 상위레벨 메소드를 지칭하며, 이는 MRP 그래프와 공간 객체 그래프, 수직 동선 그래프에 대한 메소드들을 포함하며 아래와 같이 정의된다.

$$CMGraph() = \{MGraph(), SGraph(), WGraph()\} \quad (6)$$

- $CMGraph$: MRP 포함 동선 그래프
- $MGraph$: MRP 그래프
- $SGraph$: 공간 객체 동선 그래프
- $WGraph$: 수직 동선 그래프

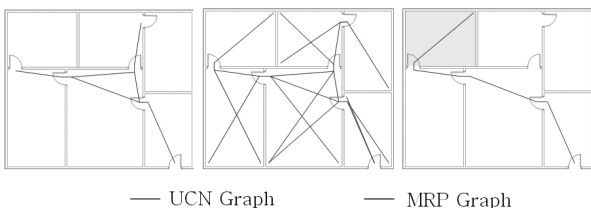


Fig. 6. Example of extended UCN graph, Red lines are extended parts 1) UCN Graph 2) MRP Graph 3) MRP Graph of specific room

6. 결론

본 논문은 국내의 동선 분석 요구사항을 중심으로 UCN의 추가 구성요소를 제시하고, 그를 바탕으로 UCN을 확장한 MRP 그래프를 정의하였다. 확장된 구성요소의 핵심은 다음과 같다.

1) 피난 동선 분석을 위한 그래프 표현 방법의 하나로 MRP 그래프를 제안하였으며, MRP 그래프는 기존의 UCN을 기반으로 BIM 모델의 공간 객체 경계선상의 가장 먼 지점을 이용하여 그래프가 실 내부로 확장 된 형태이다. (5.1 장의 수식 (1)~(5))

2) 가상으로 분할 된 공간에서의 MRP 그래프는 가상 벽 객체의 중심점으로 그래프를 생성하며, 이는 BIM 모델의 하나의 공간객체가 여러 공간객체로 분할되는 경우에도 동선그래프의 표현과 분석에 적용할 수 있다.

본 연구에서 제안한 동선의 표현과 분석 접근 방법은 BIM으로 생성된 모든 건물모델에 적용 가능하다. 이러한 일반화된 방식을 실제 다양한 건물 및 시나리오별 동선 분석에 적용할 수 있을 것이다. 본 MRP 그래프를 활용한 여러 IFC기반의 동선 분석 소프트웨어 개발이 진행 중이며, 보다 다양한 요구사항을 반영한 접근방법을 기반으로 향상된 동선의 표현과 분석이 가능할 것으로 기대한다.

감사의 글

이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 연구되었음 (NRF-2013S1A5A8024262)

References

Alexander, C., Ishikawa, S. and M. Silverstein, (1977). "Pattern languages", *Center for Environmental Structure 2*.

Choi, J.H. (2006). "A Study on Patterns of Spatial Connection and Visitor's Circulation Path in Museum Exhibition Space", *Journal of Korean institute of interior design*, 15(3), pp. 155-162.

Choi, J.P., Kang, B.J., and Kim, M.S. (2006). "Pedestrian Circulation Analyses Based on Visibility ERAM - For the Winning Entries of Asian Culture Complex Project Competition", *Journal of the architectural institute of Korea planning & design*, 22(12), pp. 163-170.

Choi, J.S., Choi, J.H., and Kim, I.H. (2013). "Development of BIM-based evacuation regulation

- checking system for high-rise and complex buildings”, *Automation in Construction*, in press, <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2013.12.005>
- Eastman, C.M., Lee, J.K., Sheward, H., Sanguinetti, P., Jeong, Y.S., Lee, J.M., and Abdelmohsen, S. (2009). “Automated assessment of early concept designs”, *John Wiley & Sons Ltd*.
- Eastman, C.M., Teicholz, P. Sacks, R. and Liston, K. (2008). “BIM Handbook – A guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers, and Contractors”, *John Wiley & Sons Inc*.
- Gross, J., and Yellen, J. (1998). “Graph Theory and its Applications”, *Discrete Mathematics Series (CRC Press, Boca Raton, FL)*, <http://www.crcpress.com>
- Hillier, B., and Hanson, J. (1984). “The social logic of space”, *Cambridge University Press*, Cambridge
- Virtual builders Co., <http://www.abimo.co.kr/>
- Solibri Inc., <http://www.solibri.com/>
- Korea Ministry of Government Legislation, <http://law.go.kr/main.html>
- Korea online E-Procurement System, <http://www.g2b.go.kr>
- Kannala, M. (2005). “Escape route analysis based on building information models: design and implementation”, *MSc thesis, Department of Computer Science and Engineering*, Helsinki University of Technology, Helsinki
- Kim, C.J. (2005). “A Study of building the Spatial Configuration Graphic of Circulation”, *Journal of the architectural institute of Korea planning & design*, 21(10), pp. 139–146.
- Kim, H.S., Lee, H.S., Park, M.S., Lee, K.P., and Pyeon, J.H. (2010). “Hazardous Area Identification Model Using Automated Data Collection (ADC) based on BIM”, *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, 11(6), pp. 14–23.
- Kim, U.H. (2010). “Establishment, design and simulation of evacuation planning”, *Korean Fire Protection Association*, 91, pp. 6–15.
- Lee, H.J., and Park, J.S. (2013). “A Study of Vertical Circulation System in General Hospitals by Using Space Syntax”, *Journal of Korea Institute of Healthcare Architecture*, 19(4), pp. 47–60.
- Lee, J.k. Jeong, Y.S., and Lee, J.M. (2008). “A Case Study of the Building Information Modeling Enabled Universal Design Evaluation Methods and Applications”, *Journal of Society of Design Convergence*, 7(1), pp. 17–29.
- Lee, J.K., Eastman, C.M., Lee, J.M., Kannala, M. and Jeong, Y.S. (2010). “Computing walking distances within building using the universal circulation network”, *Environment and Planning B : Planning and Design*, 37, pp. 628–645.
- Lee, Y.G., and Park, C.H. (2011). “A Study on the Development of Automatic Generation System of Navigation Graph for Dynamic User Simulation Using Artificial Intelligence for Game based on BIM”, *Journal of the architectural institute of Korea planning & design*, 27(12), pp. 63–70.
- NY Building Code (2004). “Building Code of the City of New York Department of Citywide Administrative Services New York”, <http://www.nyx.gov/dcas/>
- NFPA 101 (2006). “Life Safety Code: Measurement of Travel distance to Exits NFPA101.7.6 and chapters 12–42”, National Fire Protection Association, <http://www.nfpa.org/catalog>
- Park, Y.S. (2010). “The Development of the Spatial Layout Evaluation Model (SLEM) for the Integrated Design Environment based on BIM Technologies”, *Journal of the architectural institute of Korea planning & design*, 26(4), pp. 143–150.
- Shin, H.J., Choi, J.H., and Hong, W.H. (2009). “Guidelines on Performance-based Egress Design Criteria Considering the Risk Factors of a High-rise Building”, *Journal of the architectural institute of Korea planning & design*, 25(7), pp. 139–148.
- Yeom, J.H., Lee, S.K., and Kim, S.A. (2009). “An IFC Model-based Spatial Reasoning Platform for Indoor Spatial Awareness”, *Journal of the architectural institute of Korea planning & design*, 25(4), pp. 73–80.

요약 : 본 연구는 BIM을 활용한 그래프 기반의 동선 표현과 분석 접근 방법 제안을 목적으로 한다. 접근 방법의 제안을 위해 건물 동선 관련 요구사항 파악과 공간 네트워크, BIM에 관한 선행연구를 분석하였다. 또한, 본 연구는 선행연구인 UCN(Universal Circulation Network)을 기반으로 연구를 진행하였으며, 본 연구를 통해 UCN에 추가적으로 고려해야 할 사항을 파악하고 이를 확장하였다. 본 연구에서는 UCN을 기반으로 두 가지 관점에서 동선의 표현과 분석 접근 방법을 제안하고자한다: 1) UCN의 그래프 기반 동선 분석의 주요 요소를 파악한다, 2) 국내 건축법 등의 요구사항을 적용하여 UCN을 재구성한다. 결과적으로, 본 연구에서는 출구에서 가장 먼 점 (MRP) 기반의 동선 표현과 가상공간에서의 동선 분석이 추가적으로 제안되었다.

키워드 : 건물정보모델링, 건물동선, 그래프, UCN
