

# 실내공간의 연결성 분석을 통한 고립지역 탐색

## Finding Isolated Zones through Connectivity Relationship Analysis in Indoor Space

이슬지<sup>1)</sup> · 이지영<sup>2)</sup>  
Lee, SeulJi · Lee, Jiyeong

### Abstract

In Korea, u-City has been constructed as IT-based new city with introduction of the ubiquitous concept. However, most currently provided u-services are just monitoring services based on the USN(Ubiquitous Sensor Network) technology, so spatial analysis is insufficient. Especially, buildings have been rapidly constructed and expanded in multi-levels, and people spend a lot of time in indoor space, so indoor spatial analysis is necessary. Therefore, connectivity relationship in indoor space is analyzed using the topological data model. Topological relationships could be redefined due to the dynamic changes of environment in indoor space, and changes could have an effect on analysis results. In this paper, the algorithms of finding isolated zones is developed by analyzing connectivity relationship between space objects in built-environments after changes of environment in indoor space due to specific situation such as fire. And the system that visualizes isolated zones as well as three-dimensional data structure of indoor space is developed to get the analysis result by using the analysis algorithms.

Keywords : 3D Indoor Space, Spatial Analysis, Topological Relationships, Connectivity.

### 초 록

유비쿼터스 환경을 구축하기 위하여 우리나라에서는 IT 기반 신도시 건설의 프로젝트인 u-City 사업이 추진되고 있지만, u-City에서 제공해주는 u-service는 USN(Ubiquitous Sensor Network)기반으로 모니터링에 치중하여 공간 분석에 관한 서비스가 부재하다. 특히 대규모 복합 건물이 증가로 실내공간에서의 활동시간이 늘어남에 따라 단순한 모니터링이 아닌 3차원 실내 공간분석이 필요하다. 따라서 위상학적 데이터 모델을 기반으로 하여 실내 공간에서의 연결성을 분석하였다. 실내공간에서는 실외공간과 달리 공간 객체간의 연결이 제한적이기 때문에 환경변화에 따라 연결성이 바뀔 수 있고, 이에 따라 공간분석 결과 또한 달라질 수 있다. 본 연구에서는 연결성을 변화시키는 긴급 상황의 대표적인 예로 화재가 발생하였을 경우 연결성을 분석하고, 연결성 변화를 통해 생성될 수 있는 고립지역을 탐색하는 알고리즘을 개발하였다. 개발한 알고리즘을 적용하여 분석 결과를 도출하기 위하여, 실내공간의 3차원 구조뿐만 아니라, 고립지역을 가시화하는 시스템을 구현하였다.

핵심어: 3차원 실내공간, 공간 분석, 위상 관계, 연결성.

## 1. 서 론

### 1.1 연구 배경 및 목적

2000년도에 들면서부터 유비쿼터스 개념을 도입한 IT

기반 신도시를 건설하려는 프로젝트가 추진되고 있다. 우리나라의 경우에는 u-City 사업으로 화성 동탄을 시작으로 유비쿼터스 서비스(u-Service)가 제공되고 있지만 현재 제공되는 u-Service들은 센서 네트워크를 통한 모니터링 서

1) 정희원 · 서울시립대학교 공간정보공학과 석사과정(E-mail:lsj228@uos.ac.kr)

2) 교신저자 · 정희원 · 서울시립대학교 공간정보공학과 부교수(E-mail:jlee@uos.ac.kr)

스에 치중하고 있고, 이에 따라 사용자의 공간적 환경에 따른 공간분석에 대한 서비스가 부재하다는 한계점이 있다. 기존 u-Service의 한계점을 극복하기 위해서는 모니터링 서비스와 더불어 공간 데이터 분석을 통한 사용자 맞춤형 공간정보 서비스가 제공되어야 한다.

특히 코엑스와 같은 대규모 복합 실내 공간이 증가함에 따라 실내 공간에서의 활동시간이 늘어나고 있고, 무선인터넷 기술과 스마트폰과 같은 단말기의 보급화로 무선인터넷을 통한 위치 기반 서비스 제공이 용이해지면서, 이제는 실외뿐만 아니라 실내 공간에서의 실시간 위치기반 서비스(location based service, LBS)에 대한 요구가 증가하고 있다. 따라서 소비자 맞춤형 공간정보 서비스로서의 u-Service는 3차원 실내공간에서 사용자 위치에 대한 주변 환경과 공간을 인지하고, 발생가능한 공간질의에 대한 공간분석 결과를 제공하여야 한다.

3차원 실내공간은 방, 복도, 계단, 엘리베이터 등의 3차원 공간객체들로 구성된다. 실내공간에서의 공간분석은 이러한 3차원 공간 객체들 사이의 관계성을 분석하는 것을 의미한다. 공간간의 관계성은 일반적으로 인접성과 연결성이 있고, 두 관계성은 근린 분석과 최단 경로 탐색 분석에 활용될 수 있다. 건물과 같은 구조적 실내 환경에서의 공간객체들은 벽 등으로 서로 폐쇄되어 있기 때문에 실내 공간의 공간객체들은 실외공간에 비해서 객체들의 단위가 작을 뿐만 아니라 주변의 공간객체들과의 연결성이 매우 제한적이다. 때문에 실내공간에서는 작은 환경 변화에도 공간객체간의 연결성이 변화될 수 있다. 실내공간에서 환경변화는 화재발생, 무단침입, 내부공사 등의 비상시의 경우에 주로 발생할 수 있다. 화재 발생의 경우에는 화재로 대피 불가능하게 고립된 지역에 대한 질의, 외부 침입이 발생하였을 경우에는 침입자를 고립시킬 때 차단되어야 할 비상문에 대한 질의, 내부 공사의 경우에는 특정 지점까지 공사구간을 피해 접근이 가능한지에 대한 공간질의가 발생할 수 있으며, 발생하는 공간질의에 대하여 공간분석을 통한 맞춤형 서비스를 제공할 수 있어야 한다.

본 연구에서는 실내공간에서 발생할 수 있는 공간질의에 대한 공간분석을 수행함으로써 공간의 연결성을 이해하고, 분석하여 위치기반 서비스로 활용하고자한다. 특히 화재발생이나 침입자발생 등의 긴급 상황에서 발생하는 고립지역 탐색의 공간질의에 관한 서비스 제공 활용을 위하여 3차원 위상학적 데이터 모델에 따른 실내공간의 위상학적 데이터를 구축하고, 고립지역을 탐색하기 위한 알고리즘을 구현 및 적용하여 공간질의 결과를 도출하였다. 그

리고 도출한 결과를 가시화하였다.

## 1.2 연구 범위

본 연구는 실내공간에서 발생하는 공간질의 해결을 위한 공간 관계성을 분석함으로써 위치기반 서비스로 활용함을 그 목적으로 하고 있다. 따라서 실내공간에서 발생할 수 있는 긴급 상황에 대한 공간질의를 범위로 하여 연구를 수행하였다. 실내공간에서 발생할 수 있는 긴급 상황으로는 화재발생과 외부침입이 있으며, 이에 대한 대응서비스를 위해서 공간 관계성 분석을 통한 고립지역을 도출해냈다. 관계성 분석에 효율적인 실내공간의 위상학적 데이터를 선정 및 적용하여 구축하고, 고립지역을 탐색하기 위한 공간분석 알고리즘 구현 방안을 제시하고, 이를 적용하여 실내공간 관계성 분석을 수행하였다.

공간 관계성을 분석하기 위하여 3차원 위상학적 데이터 모델에 따른 실내공간의 위상학적 데이터를 구축하였다. 본 연구에서 수행하는 고립지역 탐색을 위해서는 공간간의 연결성(Connectivity) 분석이 필요하기 때문에 위상관계의 인접성, 연결성, 포함성의 속성 중에서 연결성으로 공간 관계성을 정의하였다. 정의된 공간과 관계성의 위상학적 데이터는 실내공간의 연결성 관계를 정의하고, 공간분석에 효율적인 위상학적 데이터 모델을 적용하여 구축하였다.

실내공간에서 환경변화로 공간객체간의 연결성이 변화했을 때, 전체 실내공간은 연결성이 끊어진 공간객체로부터 하나 이상의 서브존(subzone)들로 나누어지게 되고, 나누어진 서브존 중에서 외부공간과 연결되지 않는 영역을 고립지역으로 정의하였다. 고립지역을 찾기 위해서 연결성 변화에 따라 서로 접근 가능한 공간 영역의 집합인 서브존을 생성하고, 건물 내의 서브존과 외부공간의 연결성을 판단하는 공간 연결성 분석 알고리즘을 구현하였다.

연결성 분석 알고리즘은 실내공간의 연결성과 관련된 공간질의에 적용시켜서 다양한 분석을 할 수 있다. 실내공간에서 연결성 변화를 일으키는 긴급상황은 대표적으로 화재발생, 외부침입자 발생, 내부공사 등이 있을 수 있으며, 연결성 분석을 통해서 연구배경에서 제시한 각 상황에 따른 공간질의의 결과를 도출할 수 있다. 본 연구에서는 연결성 변화를 일으킬 수 있는 가장 대표적인 상황으로 건물 내 화재 발생을 적용하여 연결성 분석 알고리즘을 통한 공간질의 결과를 도출하였다. 실내공간에서 특정 공간에 화재가 발생하였을 때, 화재로 인해 외부공간으로 대피가 불가능한 실내 영역을 고립지역으로 정의하고, 이를 탐색

하는 공간질의를 수행하였다. 고립지역 탐색은 건물 내부 공사로 인해 보행자가 이동할 수 없는 지점을 찾는 공간질 의와 동일하게 적용될 수 있는 공간분석으로써 다양한 상황에 따른 결과가 될 수 있다. 화재발생으로 인한 고립지역 도출이라는 공간분석을 응용하여 건물 내 외부침입자 발생이라는 상황에서의 공간질의를 추가적으로 도출해냈다. 건물 내의 특정 공간에 침입자가 위치하였을 경우, 침입자가 외부공간으로 빠져나갈 수 없게 침입자가 속한 공간을 고립지역으로 만들기 위한 공간질의를 수행하였다. 이 때 고립지역은 건물 내에 위치한 비상문이 폐쇄됨으로써 연결성을 끊어져 생성되며, 결과적으로 침입자를 공간적으로 고립시키기 위한 개폐장치인 비상문들을 도출해냈다.

본 연구의 두 가지 공간질의의 결과는 실내공간 뷰어를 구현함으로써 가시화하였다. 건물의 실내공간 데이터는 ArcScene10을 이용하여 생성하였으며, 생성된 데이터에 대한 알고리즘 및 뷰어는 JAVA 프로그램 언어를 사용하였다. 개발된 뷰어에서 OpenGL을 이용하여 실내공간을 네트워크 구조와 동시에 각 공간질의의 결과를 가시화하였다.

## 2. 관련연구

실내공간에서의 최단경로와 같은 공간분석은 이러한 3차원 공간 객체들 사이의 관계성을 분석하는 것을 의미한다. 공간객체들의 공간 관계성, 즉, 위상관계를 분석하고 표현하기 위해서는 공간에 대한 위상학적 데이터가 정의되어야 한다. 지리정보체계에서의 3차원 위상학적 데이터 모델은 위상학적 기본 요소(topological primitives) 기반, 그래프 기반, 그리고 행렬 기반 접근방법 3가지 방법으로 분류되어 정립된다(Ellul 등, 2006). 위상학적 기본 요소 기반은 B-rep(Boundary Representation)을 사용한 위상학적 데이터 모델로써 가장 널리 사용되고 있으며, 최근까지 관계 파악을 위한 공간 분석은 주로 B-rep 기반 위상학적 모델이 이용되었다. 하지만 B-rep 기반 위상학적 모델이 가지는 복잡한 기하학적 연산, 일관성 유지의 비효율성, 명확하지 않은 연결성 관계, 데이터의 저장 공간 등의 문제점들이 제기됨에 따라서, 네트워크 기반 위상학적 데이터 모델이 그래프 기반 접근방법으로써 개발되었다(Lee, 2005). 그리고 개발된 네트워크 기반 위상학적 데이터 모델을 적용하여 근린 지역을 찾는 연구 방법이 제안되었다(이석호 등, 2010). 실외공간에 대한 공간분석이 아닌 3차원 실내공간

에서 공간의 관계성을 파악하는 연구로써 그 의의가 있다. 공간의 관계성은 인접성, 연결성, 포함성으로 분류되며, 실내공간에서 제공되는 서비스에 따라서 관계성을 분석하게 되는데, 본 연구는 인접성에 기반을 둔 근린 공간 탐색 연구에서 나아가 연결성과 관련된 공간질의의 결과를 도출하였다.

근린 지역을 찾는 연구에서 네트워크 기반 데이터 모델을 적용하였지만, 공간객체의 위상학적 관계성 파악을 통한 실질적인 서비스를 제공하기에 앞서 네트워크 기반 데이터 모델이 B-rep 기반 데이터 모델 보다 효율적이라는 가정에 대한 실제적인 검증 연구의 필요성이 제기됨에 따라 두 위상학적 모델간의 실제적인 공간질의의 효율성을 비교 검증하는 연구가 수행되었다(이석호, 2011). 그 결과 3차원 연결성 및 인접성 공간질의의 결과 저장용량과 공간질의에 따른 응답시간에서 B-rep 기반 데이터 모델보다 2차원과 3차원 공간에서 모두 공간질의의 측면에서 효율성이 높은 결과를 보여주었다. 따라서 본 연구에서는 3차원 공간객체간의 연결성을 표현하고 분석하기 위한 모델로써, 데이터 저장용량과 3차원 연결성 질의의 두 측면에서 효율성이 검증된 네트워크 기반 위상학적 모델을 사용하여 고립지역을 도출하는 연결성 분석을 수행함으로써 고립지역 탐색을 위한 연결성 분석의 효율적으로 가능하게 하였다.

위상학적 데이터 모델로 실내공간과 공간객체간의 관계성을 정의하고, 정의된 공간상에서의 고립지역을 도출하였다. 고립지역 도출을 위해서는 먼저 실내공간을 연결성에 따라 서브존(subzone)으로 분류해야 한다. 본 연구에서의 서브존은 연결성이라는 공통된 원소를 갖지 않는 상호배타적인 집합이다. 다시 말해서 집합  $S_1, S_2, \dots, S_k$  중에 임의의 두 집합  $S_i$ 와  $S_j$ 가 공통된 원소를 가지고 있지 않을 때, 두 집합은 서로 분리관계(disjoint relation)를 가졌다고 하며,  $S_1, S_2, \dots, S_k$ 를 분리집합으로 정의한다. 그리고 하나 이상의 분리집합들의 집합을 컬렉션(Collection)으로 구성한다. 분리집합의 분류 연산을 정확하고 효율적으로 수행하기 위한 데이터의 표현 구조를 정의하는 분리집합 데이터구조(Disjoint set data structure)는 다양한 응용분야에 이용되고 있다. Undirected graph에서 연결된 요소들을 찾을 때 주로 사용하는 구조로써, union-find 알고리즘은 높은 성능으로 유용하게 활용되고 있으며(Galler와 Fisher, 1964). 다른 응용분야에 활용이 되는 기본적인 자료 구조로써, 대표적으로 최소 신장 트리 그래프를 구하기 위한 크루스칼(Kruskal) 알고리즘(kruskal, 1956)이 개발되어 사용되었다.

본 연구에서는 위상관계에 따른 공간들간의 연결성을 분석하고, 연결이 되는 공간끼리 그룹화하여, 외부공간간의 연결성으로 그룹화된 공간의 고립화를 탐색한다. 이를 위하여, 3차원 실내공간을 네트워크 구조로 표현하고, 네트워크 구조로 표현된 공간과 관계성 데이터를 분리집합의 포리스트 데이터구조를 적용함으로써 효율적이고 간단하게 공간들 간의 연결성을 분석하였다.

### 3. 방법론 및 알고리즘

#### 3.1 실내 공간 데이터 구조

실내 공간을 표현 및 저장하는 위상학적 데이터 모델로 네트워크 기반 위상학적 데이터 모델을 정의하였다. 네트워크 기반 위상학적 데이터 모델은 Node-Relation Structure(NRS)를 이용하여, 공간객체와 공간객체간의 관계성을 각각 노드와 에지로 표현하였다. NRS는 위상 공간을 이원공간으로 변환하기 위해서 Poincaré duality 법칙(Munkres, 1984)을 적용하여 이원성 그래프로 표현하였다. Poincaré duality 법칙에 따라서 주 공간(Primal space)에서 정의된 공간객체를 이원 공간(Dual Space)으로 변환하기 위한 원리이다. Poincaré duality에 따르면 3차원 객체는 0차원 점 객체로, 2차원 객체는 1차원 선 객체로, 1차원 객체는 2차원 면 객체로, 0차원 점 객체는 3차원 입체 객체로 역차원 변환을 통하여 객체들이 표현된다.

따라서 에지는 3차원 공간객체간 사이의 공유면에서 정의된다. 위상학적 데이터 모델 중에서 그래프 기반 접근법에서 표현하는 관계성에는 연결성과 인접성이 있음을 살펴보았다. 실내공간의 모든 공유면은 면이 속한 두 공간이 인접함을 의미하기 때문에 인접성 에지를 정의할 수 있다. 하지만 공간간의 연결성은 공유면을 이루는 두 공간객체

의 속성에 따라서 문이나, 창문 등으로 두 공간을 서로 접근할 수 있을 때 생성 여부가 결정된다. 이는 다시 말해서 모든 2차원 공유면은 1차원 인접성 에지로 변환되며, 변환된 인접성 에지 중에서 두 공간의 속성에 따라 연결성 에지가 될 수 있으므로 연결성은 인접성에 포함관계를 형성한다(그림 1).

본 연구에서는 고립지역 탐색을 위한 연결성을 분석하는 알고리즘을 구현하기 위해서 공간객체를 나타내는 노드와 연결성을 나타내는 에지로 네트워크 데이터를 구축하였다. 구축하는 네트워크 데이터는 노드와 에지 데이터들의 집합이며, 노드 데이터는 각 노드의 식별자와 3차원 x, y, z좌표로 정의되며, 에지 데이터는 식별자와 에지의 양 끝 노드 정보로 정의된다(그림 2).

```

Node{
  string NodeID;
  double x;
  double y;
  double z;
}

Edge{
  string EdgeID;
  Node prevNode;
  Node nextNode;
}
    
```

그림 2. 공간 분할에 따른 네트워크 구조

실내공간은 방(Room), 복도(Hallway), 계단(Stair), 엘리베이터(Elevator) 등의 공간 종류를 가질 수 있으며, 문으로 연결된 방들, 문으로 연결된 방과 복도, 서로 다른 층의 계단 공간들이나 엘리베이터 공간들이 인접하여 있을 때, 인접면에 대하여 연결성을 정의하였다. 이 때 복도는 방, 계단, 엘리베이터 등의 공간과 달리 한 공간객체의 모양이 길고, 이에 따라 여러 공간객체들과 연결되어있기 때문에 복도를 그대로 네트워크 데이터 구조로 표현하면, 긴 복도는 하나의 노드로 표현되고, 그림 3(a)와 같이 복도를 나타내는 노드를 중심으로 연결된 노드와의 에지가 방사형으로 표현된다. 하지만 방사형으로 표현된 연결성은 실제 보행자가 복도와 연결된 공간 사이를 이동하는 경로와 차이를 보인다. 이는 최단경로와 같이 실제 공간상의 기하학적인 거리를 이용하는 공간분석에서 잘못된 결과를 도출하게 된다. 그림 3(b)는 이를 해결하기 위한 방법으로 복도를 공간 분할하여 분할된 하위공간의 하위노드와 연결성을 가진 노드를 연결하는 에지를 생성하는 방법을 보여주며, 그 결과 네트워크 구조는 그림 3(c)과 같이 바뀌게 된다. 복도는 미디얼 액시스(Medial Axis) 형태를 최대한 유지할 수 있도록 만들어 줌으로써, 연결성 에지들이 실제 공간간의 이동 경로를 대표하여 표현할 수 있게 하였다.

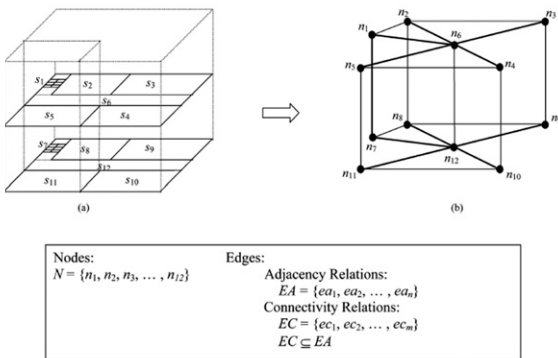


그림 1. 건물(a)과 Node-Relation Structure(NRS)(b)(Lee 등, 2005)

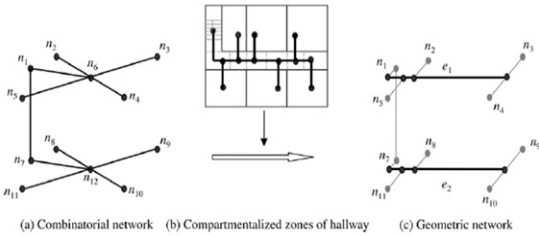


그림 3. 공간 분할에 따른 네트워크 구조(Lee 등, 2004)

### 3.2 연결성 분석 알고리즘

#### 3.2.1 분리집합 데이터 구조

고립지역을 찾기 위해서 연결성 변화에 따라 서로 접근 가능한 공간 영역의 집합인 서브존(subzone)을 생성하고, 생성된 서브존들과 외부공간 간의 연결성을 판단하는 공간 연결성 분석 알고리즘을 구현하였다. 서브존이라는 공간 영역을 간의 분석을 위하여 분리 집합의 개념을 이용한 분리 집합(disjoint-set) 자료구조를 적용하였다. 분리 집합 자료구조는 대표적으로 연결 리스트(Linked-list)와 포리스트(Forest) 두 종류로 표현할 수 있고, 본 연구에서는 포리스트 트리 구조를 이용하여 연결성을 분석하였다.

포리스트는  $n(\geq 0)$ 개의 분리 트리들의 집합인 컬렉션 트리구조이다. 하나의 컬렉션에는 하나 이상의 분리 트리들이 있고, 각 분리 트리에는 최상위 루트노드와 하위 노드로 구성 원소가 구조화된다(그림 4). 각 분리 트리의 최상위 루트노드가 분리 집합의 대표원소로써 집합을 식별하였다. 포리스트 구조에서 모든 원소는 부모에서 자식으로 연결하는 일반적인 방법 대신 자식에서 부모로 링크를 연결하는 방식이다. 이때 최상위 루트 노드의 경우에는 자기 자신을 부모로 가리킨다. 이는 포리스트의 노드들 중에서 자기 자신을 부모로 가리키는 노드들을 찾음으로써, 컬렉션을 구성하는 분리집합의 개수를 알 수 있으며, 각 분리집합을 식별할 수 있다.

따라서 본 연구에서 컬렉션에는 실내공간의 모든 연결성 에지를 원소로 갖고, 이 원소들은 포리스트에서 트리의 원소로 표현된다. 각 연결성 원소가 형성하는 분리 트리는 실내공간을 이루는 서브존을 의미한다. 즉, 연결성의 집합으로 서브존을 구성하고, 이를 위하여 3.1에서 정의한 구조체에서 식별자 ID(EdgeID), 시작 노드(prevNode) 및 끝 노드(nextNode) 외에 자신이 가리키는 부모 원소에 해당하는 에지를 저장하도록 구조화하고, 공간분석을 위하여 필요한 속성들을 추가한다(그림 5).

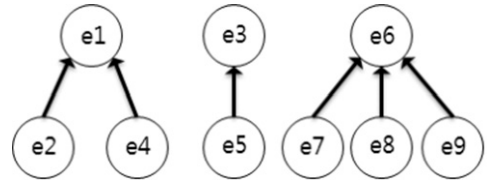


그림 4. 포리스트 구조 예시

```

Node{
    string NodeID;
    double x;
    double y;
    double z;
}

Edge{
    string EdgeID;
    Node prevNode;
    Node nextNode;
}
    
```

그림 5. 노드 및 에지 구조체

#### 3.2.2 서브존 생성 및 고립지역 탐색 알고리즘

연결성 분석은 실내 공간을 이루는 공간들의 연결 관계에 따라서 전체 공간을 서브존(subzone)들로 구분하는 서브존 생성 알고리즘과, 구분된 서브존 중에서 실외공간과 연결되지 못 하는 고립지역을 탐색하는 고립지역 탐색 알고리즘으로 나뉜다. 제시할 알고리즘은 3.2.1에서 정의한 노드와 에지의 분리집합 데이터 구조를 적용하였다.

하나의 건물은 포리스트에 해당하고, 건물을 구성하는 실내공간의 연결성 에지들은 컬렉션의 구성 원소인 트리 원소들에 해당한다. 그리고 실내공간의 서브존은 연결성 에지들로 이루어진 트리(집합)에 해당한다. 각 트리는 다른 트리에 있는 원소와 동치 관계(equivalence relation)를 이루지 않는 최대 크기의 트리를 형성한다. 그림 6을 보면, 각 공간객체는 노드로 표현하고, 연결되는 공간의 노드를 양 끝의 버텍스(vertex) vi로 가지는 에지(ei) 데이터가 있을 때, 연결되는 에지끼리 트리를 결합시킴으로써, 최종적으로

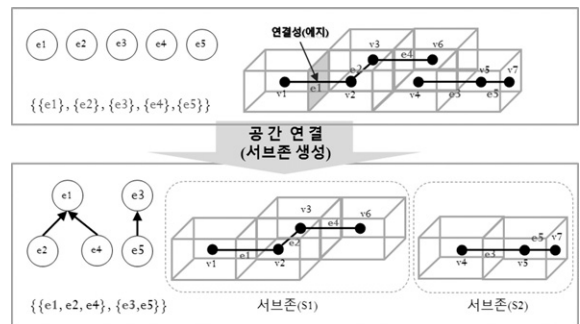


그림 6. 서브존(subzone) 생성 예시

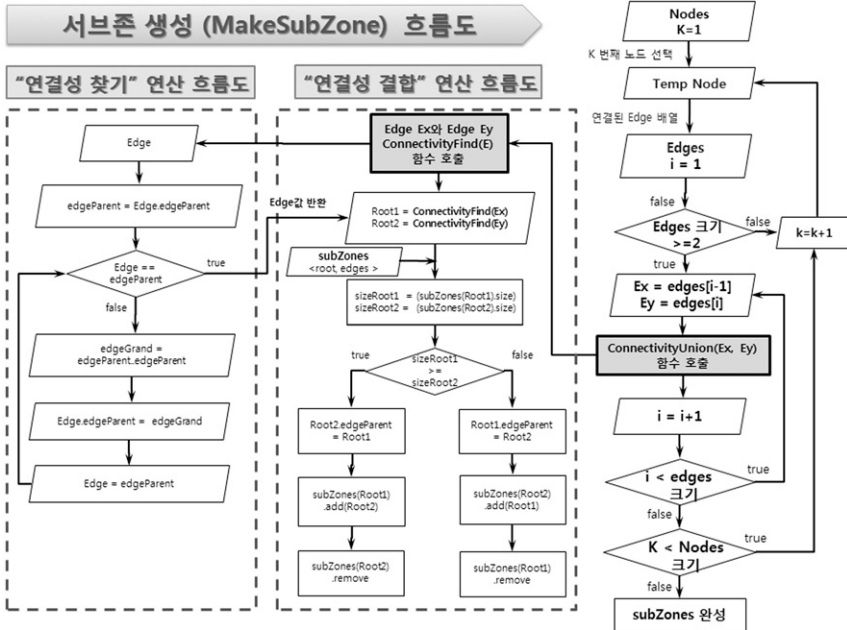


그림 7. 서브존 생성 알고리즘 흐름도

분리 트리를 형성하고, 각 분리 트리는 실내공간의 구분된 서브존을 의미한다. 서브존 생성 알고리즘은 두 가지 기본 연산이 필요하다. 첫 번째는 에지가 속하는 트리를 찾는 연결성 찾기 연산이며, 두 번째는 각 에지가 속한 트리를 결합하는 연결성 결합 연산이다. 그림 7은 서브존 생성 알고리즘 흐름도로, 두 가지 연산이 적용되어 있다.

먼저 첫 번째 연결성 찾기 연산은 해당 에지가 속하는 트리를 찾는 연산으로써, 포리스트 구조에서 각 트리는 최상위 루트윈소가 대표하기 때문에, 해당 에지가 속한 트리의 루트 에지를 찾아 반환한다. 트리구조를 사용하는 연산의 속도향상을 위하여 트리의 경로 압축(Path compression)을 수행하였다. 트리의 높이가 높을수록 속도가 느려지는 것을 개선하기 위하여 연결성 찾기 연산이 호출될 때, 해당 에지에서 루트 에지까지의 높이를 낮추도록 재구성함으로써 연산 비용을 절감하였다. 경로 압축은 해당 에지(edge)에 대한 부모 에지(edgeParent)를 한 단계 상위 에지(edgeGrand)를 가리킴으로써 트리의 높이를 방법으로 해결할 수 있다(그림 8). 경로 압축을 수행함과 동시에 에지는 부모 에지와 식별자는 비교하여 부모 에지의 식별자와 해당 에지의 식별자가 같을 때까지 반복 수행함으로써, 최상위 에지를 도출하였다.

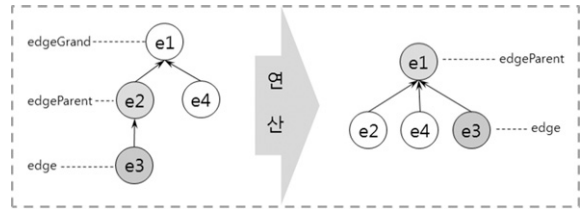


그림 8. 연결성 찾기 연산 결과 예시

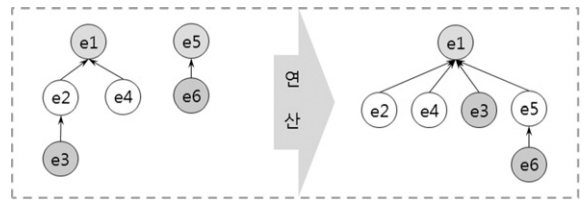


그림 9. 연결성 결합 연산 결과 예시

두 번째 연결성 결합 연산은 두 에지를 결합하는 연산으로, 동치 관계에 따라 각 에지가 속한 트리를 결합하는 연산이다. 서로 다른 세 원소 a, b, c에 대하여, a와 b가 동치관계이고, b와 c가 동치관계일 때, a와 c 또한 동치관계에 있다는 동치집합의 전이적 특성을 적용하여 연산을 수행하였다. 연산은 결합하고자 하는 두 에지에 대하여 각각 연결성 찾기 연산을 통하여 최상위 루트 에지를 찾고, 두 루

트 에지가 같지 않을 때, 즉, 결합하고자 하는 에지가 서로 다른 트리에 속해 있을 때, 한 루트에지를 다른 루트 에지의 부모 에지로 가리킴으로써 두 트리를 결합한다. 두 트리를 결합 시에 두 트리의 크기를 비교하여 크기가 작은 트리를 큰 트리의 하위트리로 구성함으로써 결합된 하나의 트리의 높이가 높아지는 것을 방지하였다(그림 9).

서브존 생성 알고리즘에 대한 pseudo code는 그림 10과 같다. 실내공간의 노드와 에지 데이터를 소스자료로 제시한 두 연산을 호출하여 전체 실내공간을 이루는 연결성에 대한 분석 결과로 서브존을 도출하였다.

알고리즘의 결과로 단일공간들이 하나 이상의 서브존으로 실내공간이 구분되면, 구분된 서브존 중에서 실외 공간과 연결되지 못 하는 고립지역을 탐색하는 고립지역 탐색 알고리즘을 수행함으로써, 실내 공간 연결성 분석의 결과로 고립지역을 도출하였다. 각 서브존들과 외부공간과의 연결성을 찾는다. 이 때 외부공간은 출구에 해당하는 노드로 표현하였다. 앞에서 제시한 연결성 찾기 연산을 이용하여, 각 서브존들의 대표 에지와 출구가 속한 서브존의 대표

```

makeSubZone (node dataset ND,
edge dataset ED,
<root, edges> dataset SubZones)
FOR each node Nx from ND
  For each edges from Nx
    IF(edges.size >=2) Then
      For(Ei, Ei+1 from edges)
        fuction connectivityUnion (Ex, Ey)

fuction connectivityUnion (Edge Ex, Edge Ey)
  Edge Root1 connectivityFind (E1)
  Edge Root2 connectivityFind (E2)
  IF(Root1!=Root2) Then
    int sizeRoot1 = SZ(Root1).size
    int sizeRoot2 = SZ(Root2).size
    IF(sizeRoot1 >= sizeRoot2) Then
      Root2.edgeParent = Root1
      SZ(Root1) ← add(SZ(Root2))
      SZ(Root2) ← remove
    IF(sizeRoot1 < sizeRoot2) Then
      Root1.edgeParent = Root2
      SZ(Root2) ← add(SZ(Root1))
      SZ(Root1) ← remove

function connectivityFind (Edge edge)
  WHILE(edge.edgeParent == edge)
    Edge edgeGrand = edge.edgeParent.edgeParent
    edge.edgeParent = edgeGrand
    edge = edge.edgeParent
  return edge
    
```

그림 10. 서브존 생성 알고리즘 pseudo code

에지의 식별자를 비교함으로써 간단하게 연결성을 판별할 수 있다. 그 결과, 고립지역인 서브존은 해당 서브존에 저장되어있는 에지들을 불러와서 각 에지들의 양 끝 노드를 고립지역 리스트에 넣는다. 하지만 고립지역이 아닌 서브존에 대해서는 서브존과 연결된 출구들을 표시함으로써, 고립되지 않은 서브존에 접근할 수 있는 출구들의 목록을 알 수 있다. 그림 11은 고립지역 탐색 알고리즘에 대한 흐름도이고, 흐름도에 따른 pseudo code는 그림 12에 제시하였다.

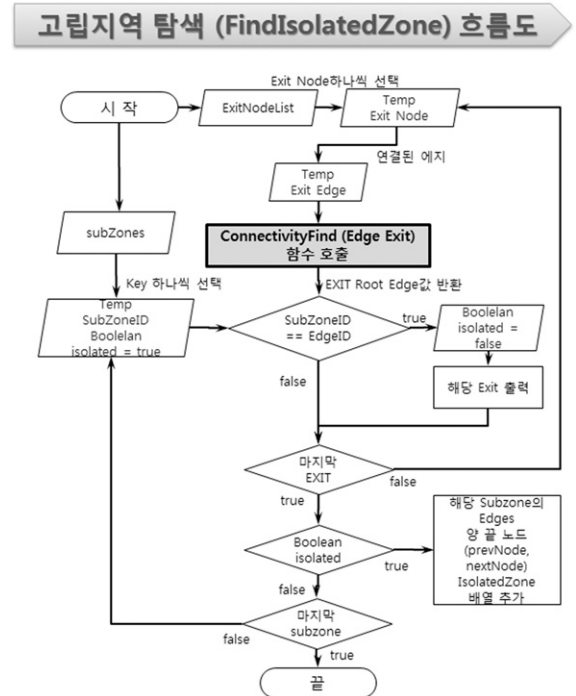


그림 11. 고립지역 탐색 알고리즘 흐름도

```

findisolatedZone (<root, edges> dataset SubZones,
exit node dataset EXIT)
Initialize(nodes dataset IsolatedZones)
FOR each SZ from Subzones SubZones
  FOR each edge e of node ex from EXIT
    root ← connectivityFind (e)
    IF(SZ root is same with root of e) Then
      boolean isolated ← false
      Print(EXIT)
    IF(isolated is false) Then
      IsolatedZone ← add(nodes of SZ <edges>)
RETURN IsolatedZones
    
```

그림 12. 고립지역 탐색 알고리즘 pseudo code

### 3.3 고립지역 공간질의 기능

서브존 생성 및 고립지역 탐색 알고리즘을 적용하여 실내공간에서 발생할 수 있는 긴급 상황의 두 가지 공간질의 알고리즘은 제시하였다. 연구범위에서 언급하였듯이 화재발생에 따른 고립지역 탐색 기능과 침입자 고립을 위한 차단 비상문 탐색 기능을 구현할 수 있다.

실내공간에서 가장 빈번하게 발생하는 긴급상황은 화재이다. 실내공간의 어느 특정 위치에 화재가 발생하면, 보행자가 접근할 수 없는 영역이 생기게 된다. 이는 실내공간이 실외공간과 달리 각 공간객체가 벽으로 폐쇄되어 있기 때문에 공간간의 연결성에 제한이 있기 때문이다. 특히 화재발생이 복도나 계단과 같이 다른 공간과의 연결성이 밀집된 공간에 발생하였을 때는 외부공간과 연결되지 않는 공간들이 발생할 수 있다. 다시 말해, 화재가 공간의 연결성을 끊고, 건물의 변화된 연결성으로 실내공간은 하나 이상의 서브존(subzone)으로 구분될 수 있다. 그리고 서브존들 중에는 외부공간과의 연결통로인 출구와 연결되어 있는 서브존이 있고, 서브존 내의 어떠한 공간으로도 출구로는 연결되지 못하는 영역이 발생할 수 있다. 구조자의 경우에는 화재발생이 일어난 지역을 알았을 경우, 이로 인해 대피가 불가능한 공간에 있는 사람들을 구조하기 위하여 고립지역을 파악할 수 있어야 한다. 또한 고립지역이 아닌 지역에서는 연결된 출구를 알아냄으로써, 구조자가 인명구조를 위한 루트를 미리 계산하고, 효율적으로 인명구조를 할 수 있게 된다. 이를 위하여 화재 발생 시의 고립지역을 탐색하는 공간질의 기능을 구현하였다.

그림 13은 화재발생에 따른 고립지역 탐색 흐름도이다. 탐색하고자하는 건물의 실내공간 네트워크 데이터는 노드와 연결성 예지로 구성된다. 그리고 화재발생 위치 공간에 대한 노드 데이터가 입력되면, 기존의 실내 공간 데이터 중에서, 화재 공간과 화재 지점과 연결된 공간간의 연결성 예지는 없어지게 된다. 이로 인해 실내 공간 데이터는 처음 입력 데이터보다 줄어들고, 현재 존재하는 각 노드에 대해서 서브존 생성 알고리즘을 수행하면, 화재지점을 중심으로 한 개 이상의 서브존이 구성된다. 그리고 각 출구가 속한 서브존의 대표 예지와 서브존과의 비교를 통해서 각 서브존에 연결된 출구를 찾고 출력하였다. 출구가 연결되지 않은 서브존의 경우에는 고립지역으로 판단하고, 해당 고립지역에 속하는 노드정보들을 저장하였다. 알고리즘 수행결과로써, 고립지역에 대한 노드 집합과, 고립지역이 아닌 서브존에 포함된 출구노드 집합이 도출된다.

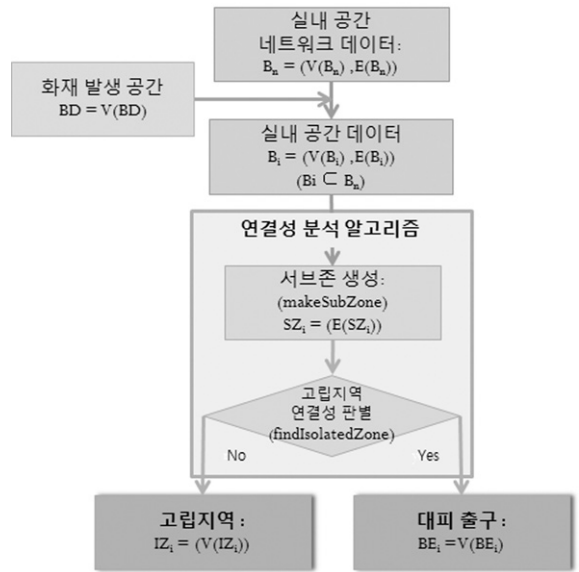


그림 13. 화재발생에 따른 고립지역 탐색 흐름도

화재발생이 아니더라도 공간의 연결성을 변화시키는 요인이 생기고, 그 위치를 알면, 이로 인한 고립지역을 탐색해 낼 수 있다. 탐색에 사용되는 알고리즘은 연결성을 찾고, 연결성을 결합하는 기본적인 연결성 분석 연산이기 때문에 여러 실내공간 분석에 이용될 수 있다. 그 중에 한가지로, 실내공간에 외부 침입자가 발생하였을 경우, 침입자가 건물 밖으로 빠져나가지 못하게 공간을 고립화 시켜야 되는 상황이 있다. 침입자의 위치가 센서 등을 통해서 인지되었을 때, 인지된 공간을 고립시킬 개폐장치의 비상문을 작동시켜야 하며, 침입자 공간으로부터 최소한의 비상문 폐쇄가 되어야 한다. 연결성 분석 알고리즘을 사용하면, 고립지역을 도출 할 뿐만 아니라, 특정 지역을 고립지역으로 만들기 위한 건물요소, 예를 들어, 비상문들을 도출해 내는 기능을 구현할 수 있다. 그림 14는 고립지역 탐색 알고리즘은 응용하여 침입자 고립을 위한 차단 비상문 탐색 기능에 대한 흐름도이다. 기존의 알고리즘에서는 화재발생 지역에 대한 연결성을 제거하고, 서브존을 생성하였다면, 이 알고리즘에서는 침입자로부터 가까운 비상문을 차단해나가면서 서브존을 생성하고, 생성된 서브존 중에서 침입자가 위치한 서브존의 고립여부를 판단함으로써 차단 비상문들을 도출하였다.



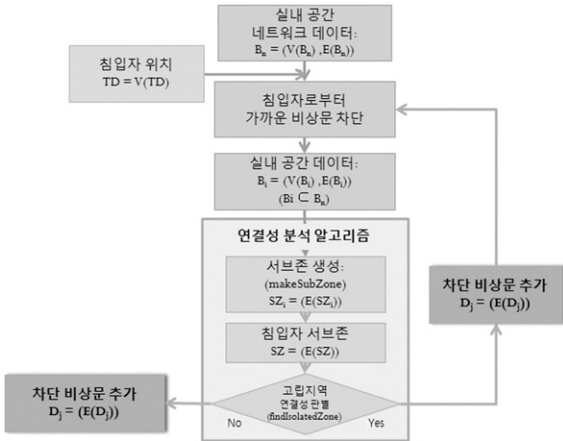


그림 14. 침입자 고립을 위한 차단 비상문 탐색 흐름도

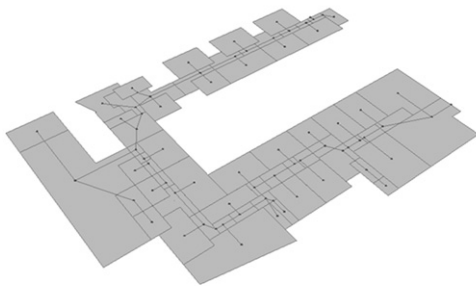
### 4. 실험 및 결과 분석

#### 4.1 위상학적 네트워크 데이터 구축

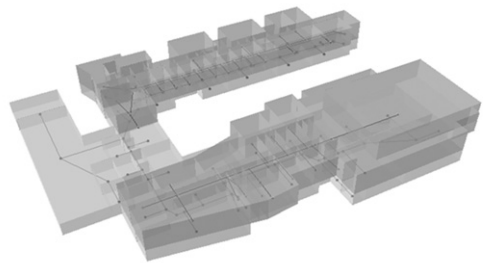
본 연구에서 분석할 건물로 서울시립대학교 21세기관을 사용하였다. 전체 7층 중에서 1층, 2층에 대한 데이터를 구축하였다. 건물에 대한 평면도를 가지고, ESRI에서 제공하는 ArcGIS Desktop의 ArcScene10을 이용하여 네트워크 데

이터를 구축하였다. 네트워크 데이터는 노드 생성과 에지 생성 두 가지로 나누어 수행하였다.

먼저 노드 생성을 위하여, 건물의 실내를 구성하는 단일 공간에 대하여 폴리곤(Polygon) 셰이프파일(SHP)을 생성한다. 건물을 구성하는 방, 복도, 계단, 엘리베이터의 3차원 공간객체들은 모두 밑면과 윗면의 footprint가 동일한 3차원 다각형이므로, 생성된 폴리곤은 3차원 공간객체의 정사투영면에 해당하며, 각 폴리곤을 점 데이터로 변환함으로써 0차원 노드 데이터를 구축할 수 있다. 이를 위하여 ArcScene10에서 제공하는 분석 툴 중에서 폴리곤 셰이프파일을 이용하여 포인트를 생성하는 툴을 이용하였다. 각 폴리곤마다 폴리곤을 대표하는 위치에 포인트가 생성되는데, 본 연구에서는 폴리곤 중심(centroid) 위치에 포인트를 생성하였다. 생성된 포인트 중에서 복도를 3.1에서 제시한 하위공간분할 방법에 따라 복도 분할에 따른 추가 노드 생성이 필요하다. 각 층의 복도를 나타내는 노드는 복도를 제외한 공간(방, 계단, 엘리베이터)과 복도의 중앙선이 수직으로 만나는 지점마다 생성하였다. 추가적으로 고립지역 탐색과 공간 고립을 위한 차단 비상문 도출 공간질의 위해 비상개폐장치가 설치된 위치마다 노드를 생성하였다. 최종적으로 모든 포인트가 생성되면, 건물의 노드 속성에 4자리의 연속적인 숫자로 ID를 할당하고, 각 노드마다 x, y,



(a) 네트워크 데이터 가시화 (1층)



(b) 네트워크 데이터 3차원 가시화

FID	Shape	ID	X	Y	Z	RoomType
0	Point	1001	1078016,80713	164833,080078	0	room
1	Point	1002	1078016,80713	170133,080078	0	room
2	Point	1003	1046891,18182	171046,121704	0	room
3	Point	1004	1056292,37708	172133,080078	0	elevator
4	Point	1005	1084279,30713	169133,080078	0	room
5	Point	1006	1062276,08862	173433,080078	0	room
6	Point	1007	1069176,08862	173433,080078	0	room

(c) 네트워크 노드 데이터 (1층)

FID	Shape *	Id	PreNode	NextNode	Distance
0	Polyline	10001	1037	1042	3292.431189
1	Polyline	10002	1042	1043	2482.568838
2	Polyline	10003	1043	1044	5775
3	Polyline	10004	1044	1045	5175
4	Polyline	10005	1045	1046	8625
5	Polyline	10006	1046	1047	3450
6	Polyline	10007	1047	1048	10350

(d) 네트워크 에지 데이터 (1층)

그림 15. 위상학적 네트워크 데이터 구축

z 좌표값을 추가하고, 각 포인트가 대표하는 공간의 종류를 속성값으로 추가하면, 본 연구에서 필요한 노드데이터가 구축된다.

다음으로 에지 생성은 위의 과정을 통해서 생성된 포인트를 연결하는 폴리라인을 생성하였다. 이 때 폴리라인은 인접한 포인트끼리의 연결이 아닌, 포인트가 대표하는 공간과 공간사이에 문 등의 공간요소를 통해서 이동 가능한 공유면이 있을 시에 두 노드를 잇는 라인을 생성하였다. 본 건물에서는 복도-방, 복도-비상문, 복도-엘리베이터, 복도-복도, 방-방의 종류로 에지가 생성되었다. 에지의 속성 테이블에서는 노드와 구별하기 위하여 5자리의 연속적인 숫자로 ID를 할당하고, 에지의 길이를 추가하고, 에지의 양 끝 노드의 ID를 추가한다. 이 때 에지는 방향성이 없기 때문에 시작과 끝의 구별 없이 입력한다. 그림 15(a)는 21세기관 1층의 평면도를 가지고 만든 폴리건 레이어와 네트워크 데이터 구축 과정을 통해서 생성된 노드(포인트) 및 에지(폴리라인)를 ArcScene10 상에서의 가시화한 결과이다. 노드 데이터에는 기본적인 식별자와 좌표값들을 제외하고, 공간 종류를 넣고(그림 15(c)), 에지에는 기본적인 식별자와 양쪽 노드 정보 외에 에지 길이 속성을 추가하였다(그림 15(d)). 그리고 완성된 1층과 2층의 건물 셰이프파일을 3차원으로 가시화 하면 그림 15(b)와 같다.

#### 4.2 연결성 분석 시스템 구현

네트워크 기반으로 위상학적 데이터를 구축하였고, 구축한 노드와 에지 데이터로 서브존 생성 및 고립지역 탐색 알고리즘을 적용하여 실내공간에서 발생할 수 있는 긴급상황 두 가지의 공간질의를 실행할 수 있는 연결성 분석 시스템을 구현하였다. 시스템은 실제 긴급 상황 발생을 가정하여 분석결과를 가시화하기 위한 뷰어로 개발하였다. 뷰어는 Netbeans 6.8 소프트웨어를 사용하여, java 기반 언어와 OpenGL으로 구현하였다. 네트워크 데이터를 불러오면, 오른쪽 화면에 실내공간의 공간들과 관계성이 노드와 에지 그래픽으로 그려진다. 3차원 데이터를 2차원 평면에 표현하기 때문에 2층과 1층의 노드 크기를 달리하여 구분할 수 있도록 가시화하였다. 뷰어는 3절에서 제시한 화재발생과 침입자발생의 두 가지 공간질의 기능을 적용할 수 있게 설계하였다. 또한 추가적으로 ArcScene10에서 기하학적으로 가시화함으로써 결과를 정확하게 시각적으로 확인하고, 해당 공간과 연결성에 대한 정보를 확인할 수 있다.

그림 16은 불러진 네트워크 데이터에서 두 노드(ID = 1066, 1051)를 화재발생지점으로 설정하였을 때의 고립지역 탐색 결과이다. 첫 번째 텍스트박스에는 선택한 차단 공간과, 차단 공간에 따라 제거될 연결성 에지 정보가 표시되고, 두 번째 박스에는 변화된 연결성에 따라 나누어진 실내공간 서브존들과 서브존들에 속한 연결성 에지 정보를 표시하였다. 세 번째 박스에는 각 서브존들에 연결된 출구 정보를 표시하고, 출구와 연결되지 않는 고립지역을 명시하였다. 그리고 도출된 고립지역에 대해서는 고립지역에 해당하는 공간 노드들을 그래픽으로 표시하여 준다. 본 예시에서는 총 3개의 서브존 중에서 1개의 서브존이 고립지역으로 나타났고, 고립지역은 3개의 방으로 이루어져있다. 그림 17에서 화재발생 노드뿐만 아니라 3차원 기하학적 공간을 가시화함으로써 불연속적인 노드가 아닌 연속적인 영역으로 가시화됨을 확인할 수 있다.

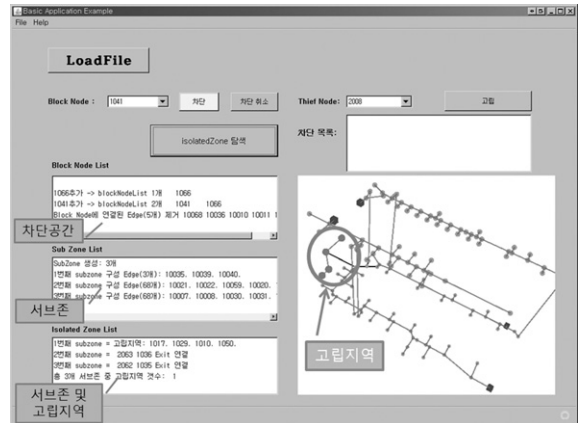


그림 16. 화재발생에 따른 고립지역 탐색 시스템 결과 예시

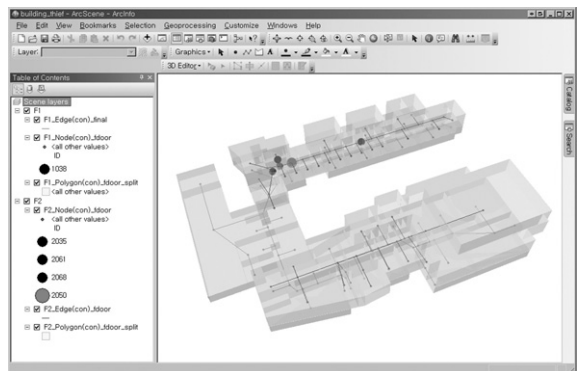


그림 17. 기하학적 가시화 결과 예시(화재발생)

## 5. 결론

그림 18은 한 노드(ID = 2050)를 침입자가 인식된 위치로 선택하였을 때 시스템 결과이다. 노드의 식별자 2050이 설정되면, 본 건물에서는 총 16개의 비상문이 오른쪽 텍스트 박스에 차례로 정렬된다. 정렬된 비상문은 침입자의 위치의 거리순으로 정렬되며, 시스템에서는 자동적으로 비상문을 순서대로 차단하여 서브존을 생성하였다. 하나의 비상문이 차단될 때마다 침입자가 위치한 서브존을 찾아 고립지역 여부를 판별하였다. 이 때 서브존과 고립지역에 대한 정보는 화재발생과 동일하게 왼쪽의 텍스트 박스에 출력됨을 확인할 수 있다. 건물 내에서의 침입자의 위치와 폐쇄되는 비상문의 위치는 그림 19에서 확인할 수 있다. 본 예시에서는 1층에 3개, 2층에 1개, 총 4개의 비상문이 차단됨으로써 침입자를 고립시킬 수 있다.

본 연구에서는 3차원 실내공간의 공간의 연결성을 분석하여 고립지역을 탐색하는 알고리즘을 개발하였다. 연결성 분석에 효율적인 네트워크 기반 위상학적 데이터 모델로 건물의 실내 공간 데이터를 구축하고, 구축된 공간과 연결성의 네트워크 데이터를 이용하여 긴급 상황에 발생할 수 있는 두 가지 공간 질의에 대한 기능을 구현하였다. 연결성 결합 연산과 연결성 찾기 연산을 바탕으로 서브존 생성 및 고립지역 탐색 알고리즘을 개발하여, 화재가 발생했을 때에 생성될 수 있는 고립지역을 탐색하는 공간 질의 기능을 구현하였고, 개발한 알고리즘을 응용하여 외부 침입자를 고립시키기 위해 차단시킬 비상문 리스트를 도출하는 공간 질의 기능까지 구현하였다. 본 연구를 통해서 구현한 두 가지 공간 질의 기능뿐만 아니라 서브존 생성 및 고립지역 탐색 알고리즘을 응용하면, 실내공간의 공간분석과 관련된 다양한 분야에 활용하여 여러 분석 툴을 개발할 수 있다. 건물 설계 시 방범창 및 비상문 등의 건물 구성요소 공간배치에 필요한 공간분석이나, 실내공간에서의 최단경로 등의 경로 분석 시 필요한 연결성 분석 서비스를 제공할 수 있다. 다시 말해 실내 공간에 대한 위치기반 서비스(LBS) 제공시에 필수적인 공간 분석 알고리즘으로 이용될 수 있다.

구현한 공간 질의 기능은 네트워크 연결성 뷰어 시스템을 구현함으로써 분석결과를 텍스트뿐 아니라 그래픽으로 가시화하였다. 또한 평면 그래픽로 단순화된 실내공간을 기하학적으로 표현함으로써, 실제 세계 실내공간의 3차원 그래픽으로 나타내어 도출한 결과의 가시화했을 뿐만 아니라 실내공간의 속성 정보를 확인할 수 있게 함으로써, 관계성 분석에 효율적이지만 기하학적 표현이 불가능한 네트워크 기반 구조의 한계점을 보완하였다. 연결성 뷰어로 화재발생 지점 또는 외부 침입자 위치를 입력받아 연결성 분석을 수행하고, 그 결과를 확인하며, 도출된 고립지역 및 차단 비상문 결과를 3차원 기하학적으로 시각화함으로써, 실제 건물 내에서의 위치 및 형태 파악에 용이하게 하고, 실제적인 구조 활동 등 긴급 상황에 활용할 수 있겠다.

향후 연구에서는 사용자에게 입력받은 화재발생 지점 및 외부침입자 위치를 모니터링 시스템과 연계하여 자동으로 입력받고, 동적 환경 변화를 적용한 분석을 추가하여 시스템을 보완하였다. 그리고 분석 결과를 좀 더 정확하고 자동적으로 구현하기 위해서 실내공간의 평면도로 위상학적 데이터를 자동 생성된 실내공간 위상관계 구조를 적용하면, 데이터 구축에 필요한 시간을 줄일 수 있을 뿐만

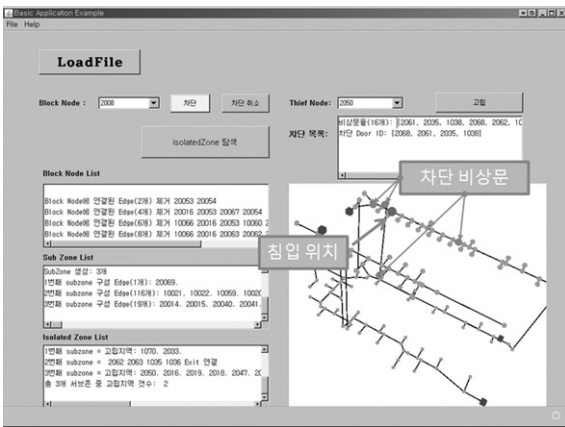


그림 18. 침입자 고립을 위한 차단 비상문 탐색 시스템 결과 예시

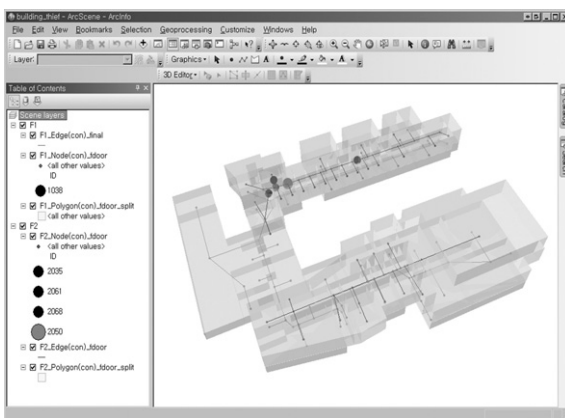


그림 19. 기하학적 가시화 결과 예시 (침입자발생)

아니라 좀 더 정확한 결과를 도출해 낼 수 있다. 이러한 추  
가 연구가 수행된다면 실내공간의 분석 시스템으로 서비  
스화 될 수 있겠다.

## 감사의 글

본 연구는 2012년도 정부재원(교육과학기술부 학술연  
구조성사업비)으로 한국연구재단의 지원을 받아 연구되  
었음(NRF-20120002348).

## 참고문헌

- 이석호, 박세호, 이지영 (2010), 3차원 네트워크 기반 위상  
학적 데이터 모델을 이용한 3차원 인접성 공간질의, 한  
국공간정보학회지, 제 18권, 제 5호, pp. 93-105
- 이석호, 이지영 (2011), 3차원 공간 질의를 위한 위상학적  
데이터 모델의 검증, 한국공간정보학회지, 제 19권, 제 1  
호, pp. 93-105
- Becker, T., C. Nagel and T.H. Kolbe (2008), A multilayered  
space-event model for navigation in indoor spaces, In Jiyeong.  
Lee and Sisi Zlatanova, (eds.), *3D Geo-information Sciences*,  
Springer-Verlag, Berlin, pp. 61-77.
- Ellul C., Haklay M. (2006), Requirements for Topology in 3D  
GIS, *Transactions in GIS*, Vol. 10, No. 2, pp.157-175
- Galler, B.A., and Fisher, M.J. (1964), An improved equivalence  
algorithm, *Commun.ACM*, Vol. 7, No. 5, pp.301-303
- Kruskal, J.B., (1956), On the Shortest Spanning Subtree of a  
Graph and the Traveling Salesman Problem, *Proceedings of  
the American Mathematical Society*, Vol. 7, No. 1, pp.48-50
- Lee J. (2005), A combinatorial data model for representing topo-  
logical relations among 3D geographical features in micro-spa-  
tial environments, *International Journal of Geographical  
Information Science*, Vol. 19, No. 10, pp.1039-1056
- Lee, J. (2001), *A 3D Data Model for Representing Topological  
Relationships Between Spatial Entities in Built-Environments*,  
unpublished Ph.D.Dissertation, Department of Geography, The  
Ohio State University
- Lee, J. (2004), *A Spatial Access Oriented Implementation of a  
Topological Data Model for 3D Urban Entities*,  
*GeoInformatica*, Vol. 8, No. 3, pp 235-262
- Lee, J. and Kwan, M-P. (2005), A Combinatorial Data Model for  
Representing Topological Relations among 3D Geographic  
Features in Micro-spatial Environments. *International Journal  
of Geographical Information Science*, Vol. 19, No. 10, pp.  
1039-1056.
- Lee K, and Lee H. (1996). A new algorithm for graph-theoretic  
nodal accessibility measurement. *Geographical Analysis*, Vol.  
30, pp. 1-14.
- Molenaar, M. (1990), A formal data structure for 3D vector maps,  
*In: Proceedings of EGIS' 90*, Vol. 2, Amsterdam, The  
Netherlands, pp. 770-781.
- Munkres, J. R. (1984), *Elements of Algebraic Topology*.  
Addison-Wesley, Menlo Park, CA
- Pilouk, M., (1996), *Integrated modelling for 3D GIS*, Ph.D.  
Dissertation, ITC
- Tarjan, R. E., 1975. Efficiency of a good but not linear set union  
algorithm. *Journal of the ACM*, 22, pp. 215-225.
- Zlatanova, S. (2000), On 3D topological relationships, In: *pro-  
ceedings of the 11th International Workshop on Database ad  
Expert System Applications*, Greenwich, London, UK, pp. 913-  
919.