

## 실내공간에서의 시간 가변적 최적경로 탐색

박인혜\* · 이지영\*\*

### Time-Dependent Optimal Routing in Indoor Space

Inhye Park\* · Jiyeong Lee\*\*

#### 요 약

최근 몇 년 사이 공간정보에 대한 관심이 증대됨에 따라 실내공간데이터 모델링 및 활용에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 특히 대규모 실내공간에서 방재 알고리즘 및 실시간방재시스템에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 재난 발생 시 요구될 수 있는 최적경로는 대피자를 위한 것과 구조자를 위한 것, 두 가지로 나뉠 수 있다. 본 연구에서는 구조자를 위한 최적경로를 산출하였는데 이는 실내의 어떠한 공간에서 출구까지의 경로가 아닌 출구에서 구조대상지역까지의 경로를 의미한다. 실시간 방재시스템에 적합한 최적경로는 시간에 대해 가변적이어야 한다. 이러한 최적경로를 산출하기 위해서는 최적경로 산출에 필요한 시간에 따라 변화하는 변수가 고려되어야 한다. 즉, 복도 또는 방과 같은 공간의 수용능력 및 흐름정도 등을 포함하는 동적인 공간적 엔티티를 관리할 수 있는 시공간 데이터베이스와 연동되어 있어야 한다. 공간상에서 동적객체의 흐름을 측정하고 분석을 통해 추정된 시공간 데이터베이스는 최적경로 산출과 대피상황에서의 병목현상 예측에 사용될 수 있다. 본 연구에서는 실시간 방재시스템 개발을 위한 시공간 데이터를 적용한 최적경로 산출 알고리즘을 제시하였다. 제안된 알고리즘을 테스트하기 위하여 건물 내부의 이동이 가능한 공간을 표현하는 네트워크데이터를 사용하였다.

**주요어** : GIS, 네트워크모델, 시간 가변적, 최적경로, 실내공간데이터모델, 방재

**ABSTRACT** : As the increasing interests of spatial information for different application area such as disaster management, there are many researches and development of indoor spatial data models and real-time evacuation management systems. The application requires to determine and optical paths in emergency situation, to support evacuees and rescuers. The optimal path in this study is defined to guide rescuers, So, the path is from entrance to the disaster site (room), not from rooms to entrances in the building. In this study, we propose a time-dependent optimal routing algorithm to develop real-time evacuation systems. The network data that represents navigable spaces in building is used for routing the optimal path. Associated information about environment (for example, number of evacuees or rescuers, capacity of hallways and rooms, type of rooms and so on) is assigned to nodes and edges in the network. The time-dependent optimal path is defined after concerning environmental information on the positions of evacuees (for avoiding places jammed with evacuees) and rescuer at each time slot. To detect the positions of human beings in a building per time period, we use the results of evacuation simulation system to identify the movement patterns of human beings in the emergency situation. We use the simulation data of five or ten seconds time interval, to determine the optimal route for rescuers.

**Keywords** : GIS, network model, time-dependent, optimal route, indoor space, data model, emergency response Interoperability, Ubiquitous GIS

\*서울시립대학교 공간정보공학과 박사과정(ihpsm@uos.ac.kr)

\*\*교신저자, 서울시립대학교 공간정보공학과 교수(jlee@uos.ac.kr)

## 1. 서 론

1980년대부터 여러 분야에서는 재난, 재해를 방지하고 피해를 줄이기 위한 많은 연구가 진행되어 왔다. 인구의 증가와 기술의 발달로 생활공간이 수직방향으로 확대되고 대규모 복합구조의 건물이 증가하고 있다. 이는 최근 발생빈도가 증가하고 있는 지진, 폭발, 테러 등 많은 재난, 재해의 피해의 규모가 커지는데 영향을 미친다. 단순 재난, 재해의 영향이 아닌 공간구조에 의한 피해가 늘어나면서 공간정보 분야에서도 방재서비스에 대한 관심이 증대되었고 방재 알고리즘 및 실시간 방재 시스템과 관련한 많은 연구가 진행되고 있다 (Cahan and Ball 2002; Cutter et al 2003; Kwan and Lee 2005; Pu and Zlatanova 2005; Winter et al. 2005; Lee 2007). 측위기술, 통신기술 및 IT기술 등이 발달하면서 실시간 방재시스템의 연구에 대한 요구가 증가하였고 다양한 연구를 가능하게 하였다.

이러한 방재 시스템은 비상시 사용자의 의사결정을 지원해 주어야 하므로 시간을 중요시 하는 시스템이라 할 수 있다. 공간정보기술은 공간데이터를 사용함으로써 여러 비상 상황에서의 의사결정을 지원할 수 있다. GIS기반의 실시간 의사결정 시스템은 유용한 데이터를 개발·관리하고 의사결정자가 필요시 언제나 사용할 수 있도록 시스템과 통합된 형태여야 한다.

실시간 방재 시스템을 개발하기 위해서는 비상시 시간에 따른 동적인 상황의 변화와 대피 현황을 나타내는 공간정보데이터와 연계되어야 한다. 동적 변화와 불확실한 재난·재해 환경을 다루고 효과적인 대피를 유도하는 실시간 방재 시스템을 개발하기 위해서는 GIS 데이터, 시공간 데이터베이스, 실시간 데이터 탐색, 분석이 가능한 공간데이터 모델 등의 기능들이 충족되어야 한다(Pu and Zlatanova 2005; Lee 2007).

위와 같은 실시간 방재시스템 개발을 위한 기반연구의 일환으로 본 연구에서는 시간에 대하여 가변적인 최적경로 탐색(Time-dependent Optimal Routing) 방법을 모색하였다. 최적경로 탐색 방법은 시간에 따른 동적 객체의 변화와 공간의 상태 변화를 관리하기 위해 시공간 데이터베이스와 연계되어 있어야 하며 시공간 데이터베이스는 실내 측위시스템이나 센서와 연계되어 동적객체의 움직임, 재난 발생 상황에 대한 정보를 취득하고 관리할 수 있어야 한다. 앞서 언급했듯이 재난·재해 발생 시 최적경로를 탐색하는 것은 대피자(evacuees)와 소방관, 구조대 등 구조자(rescuers)를 위한 최적경로인 두 가지의 목적이 있는데 본 연구에서는 후자인 구조자를 위한 최적경로 탐색을 실시하였다. 연구를 통해 산출

되는 최적경로는 재난 발생지역에서 출구가 아닌 출구에서 재난발생지로 향하는 경로가 산출된다.

따라서 본 연구에서는 실내공간에서의 시간 가변적 최적경로 탐색을 위해 공간분석이 가능한 네트워크 구조의 공간정보데이터를 활용하고 실시간 데이터 형태의 시간 가변적 데이터를 설계하였다. 이러한 데이터를 구조자를 위한 최적경로 탐색 알고리즘에 적용하는 방법으로 연구를 진행하였다.

## 2. 관련연구

도시환경에서 인간의 행태를 분석하는 연구의 범위는 점차 도시 전체 범위에서 건물과 같은 작은 범위로 축소되고 있으며 그 대상도 인간의 집합에서 개별단위로 세부적인 분석이 이루어지고 있다(Church and Marston 2003; Kwan and Weber 2003; Lee 2007). 건물단위와 같은 소규모(microscale)에서 긴급 상황 발생 시 인간의 행태를 분석하기 위해서는 건물 모델과 교통문제를 고려해야 하는데 실제로 비상 대응의 효율을 높이기 위한 3차원 실내공간데이터 모델이 많이 연구되고 개발되고 있다(Lee 2007) 접근성은 교통 계획, 토지 이용 계획, 건물 설계 등 분야에서 중점적으로 다루는 공간적 특성으로 간주되는데 이러한 접근가능성을 측정하는 것은 피난 모델을 개발함으로써 도시 환경에서 재난·재해 발생 시 문제를 해결하는 데에 사용될 수 있다.(Cova and Church 1997; Cova 1999; Shen 2005; Lee 2007) 그리고 건물과 공공장소의 여러 공간 설계를 비교하여 불리한 조건의 사람들이 어떠한 영향을 받는가를 판단할 수 있다. (Church and Marston 2003)

따라서 본 연구에서는 실내공간을 대상으로 하여 재난·재해 발생 시 최적경로를 탐색하는 방법을 모색하였는데 최근 실내공간 또는 소규모 는데 최의 공간데이터 모델에 관한 여러 연구 또한 진행되고 있다. Kwan과 Lee(2005)는 소규모 는데 최 신속한 대피를 가능하게 하는 데에 3차원 GIS모델어떠한 영향을 미치는지를 평가하기 위해 네트워크 모델을 이용하여 재난는데 최의 상대적인 접근성을 측정하였고 그 결과 고층 빌딩의 내부 구조에 대해 2차원 GIS를 3차원 GIS로 확장 했을 때 전반적인 구조시간이 현저하게 줄어든다는 결과 모델에 되었다. 또한 Lee(2007)는 건물이나 소규모 는데 최 재난·재해 발생 시 사람들의 행태를 표현하기 위해 3D Geometric Network Data Model에 기반 한 3D Navigable Data Model(3D NDM)을 개발하였다. 이 모델은 지능형교통정보시스템(Intelligent Transportation System,

ITS) 기술과 결합된 형태로 지능형재난대응(Intelligent Emergency Response, IER) 시스템이라 할 수 있다(Lee 2007).

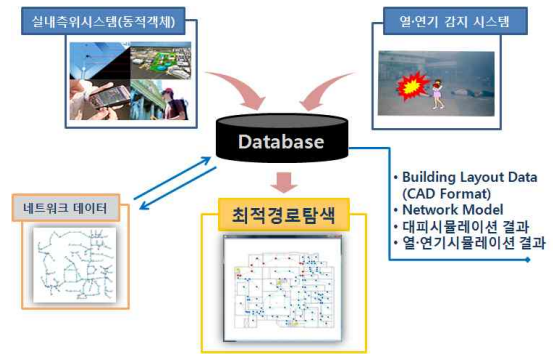
지능형재난대응(IER) 시스템은 건물이나 소규모 지역에서 대피와 구조와 같은 재난 대응에 적합한 공간적 의사결정지원 시스템이다. 최근 대부분의 방재 시스템들은 실시간으로 일어나는 상황이나 변화하는 환경적인 요인은 배제한 이상적인 상황을 고려하여 대피계획을 미리 정의하는 형태로 개발되었는데 이들은 지능형 재난대응 시스템이라 하기 어렵다(Pu and Zlatanova 2005; Lee 2007). 지능형재난대응 시스템은 시간에 따른 상태 변화를 포함하는 재난 상황에 대한 동적 공간 데이터와 연계되어야 한다(Lee 2007). 앞에서 소개한 바와 같이 본 연구는 지능형재난대응시스템의 핵심 기능 구현의 일환으로 건물단위의 공간에서 재난·재해 발생 시 시간의 흐름에 따른 변화를 고려한 최적경로 탐색 알고리즘을 개발하였다.

최적경로 탐색을 위해 네트워크 기반의 공간정보 데이터모델을 사용하였다. 기존 네트워크 모델을 활용한 시공간 데이터 분석에 관한 연구로는 동적 교통 네트워크의 시간적 변수설정에 관한 연구(Ding, 2004)와 경험적 교통 데이터를 이용하여 시간에 따른 node와 edge 정보의 변화를 표현하는 time-aggregated graph를 제안한 연구(George et al., 2007)가 있다. 이들은 네트워크 전체에 대한 경험적 조사에 의해 구축된 시공간정보를 이용하여 최적경로를 탐색하였다. 교통의 흐름은 유사한 상황에 대한 통계적 자료를 이용하는 것이 가능하나 화재나 테러와 같은 예측이 불가능한 상황에서는 실시간 데이터를 이용하는 것이 효과적인 분석과 정확하고 효율적인 정보의 가공 및 제공이 가능할 것이다.

본 논문에서는 데이터를 실시간으로 입력받아 위급 상황에서 피해자를 구조하는 최적경로를 탐색 방법론을 연구하였다.

### 3. 시간 가변적 최적경로탐색 알고리즘

어떠한 건물내부에서 화재가 발생했다고 가정했을 때, 화재발생으로 인해 당황한 대피자 간의 충돌, 화기와 연기의 영향으로 인한 위험지역 발생 등 여러 가지 상황이 발생 할 것이다. 이러한 상황에서 방재 시스템은 시시각각 변화하는 비상 상황에서 효율적인 대피와 구조를 위해 실시간적인 상황통제와 경로 안내가 가능하여야 한다. 최적경로를 탐색하기 위해서 시스템은 건물 내부의 이동이 가능한 공간의 구조를 표현하는 실내공간모델과 시간에 따른 동적 객체와 환경의 변화를 관리



[그림 1] 최적경로 산출에 사용되는 데이터의 흐름 및 구조

하는 데이터베이스를 필요로 한다.

따라서 본 연구에서는 시공간별 대피자의 위치 및 연기의 움직임을 고려한 최적경로 탐색을 목표로 하여 실내 공간의 구조를 표현하는 네트워크 모델과 열·연기의 움직임을 고려한 이동객체의 상태 및 위치에 대한 정보와 방재 발생 시 시간의 흐름에 따른 환경적 변화를 담고 있는 시공간데이터베이스를 본 연구에서 고안한 최적경로탐색 알고리즘에 적용하였다. 그림 1은 최적경로 산출에 사용되는 데이터의 흐름 및 구조를 보여준다. 동적 객체 및 환경의 변화를 적용하기 위해 실내측위시스템과 열·연기시스템과의 연계를 통해 시간에 실시간으로 데이터를 취득하고 이를 단위시간 마다 네트워크 데이터의 업데이트와 알고리즘에 적용하여 최적경로를 산출하였다. 시뮬레이션 데이터를 활용하여 실시간으로 측위시스템과 감지시스템을 통한 동적객체와 화재 발생 상황을 단위시간으로 입력받는 형태의 데이터베이스를 설계하였다. 이를 활용하여 제안한 알고리즘의 적용가능성을 실험하여 보았다.

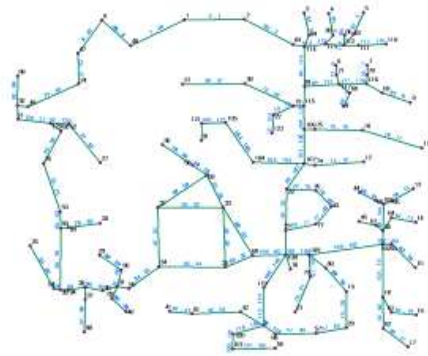
#### 3.1 건물 내부 모델

건물의 내부구조를 표현하기 위해서는 두 가지의 모델이 요구된다. 하나는 건물의 물리적인 구조를 표현하는 기하학적 모델(Geometric model)이고 다른 하나는 필요한 정도로 분할된 건물 내부 공간들 간의 접근성을 표현하는 접근성 모델(Accessibility model)이다 (Pu and Zlatanova 2005) (그림 2).

기하학적 모델은 방, 벽, 창, 계단, 출구 등과 같은 여러 형태의 객체로 건물의 내부를 표현하는데 이는 대피자 또는 구조자 등 시스템의 사용자가 건물 내부구조를 파악할 수 있도록 한다. 그러나 이는 공간 간의 위상학적 관계를 표현해주지 못하기 때문에 이 모델만으로는 최적경로산출과 같은 공간분석에 활용될 수 없다

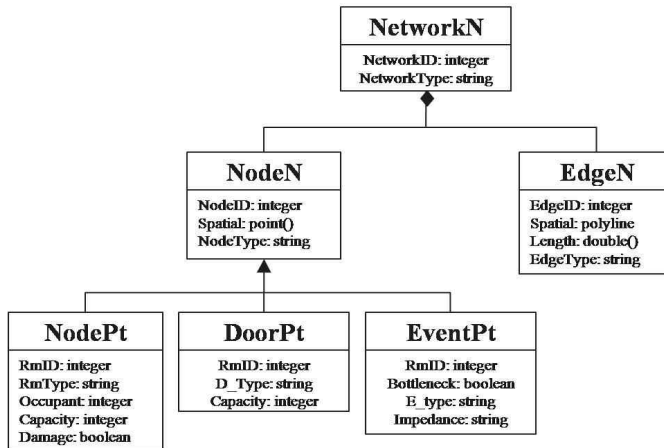


(a) 기하학적 모델(Geometric model)



(b) 접근성 모델(Accessibility model)

[그림 2] 기하학적 모델과 접근성 모델



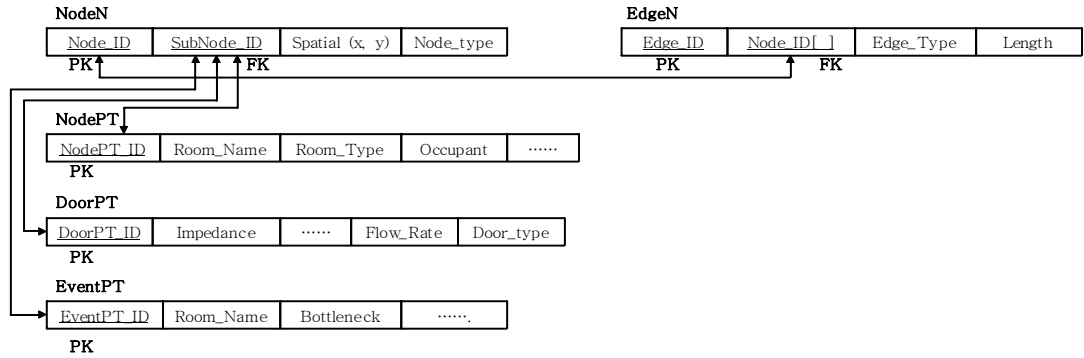
[그림 3] 접근성 모델의 UML 다이어그램

(Lee and Kwan 2005).

접근성 모델은 네트워크 모델로 표현되는데 이 모델은 Node-Relation Structure(NRS)에 기반 한 모델로 node와 edge로 구성된다(Lee and Kwan 2005). 논리적인 네트워크 모델인 NRS는 Poincare Duality 이론을 적용하여 3차원 엔티티들 간의 위상학적 관계를 벡터형식의 그래프로 표현한 것이다. 본 연구에서는 사용된 네트워크 모델의 구조는 단순하다. 이는 NRS를 기반으로 하여 공간간의 위상학적 관계의 하나인 접근성을 표현하는 그래프이다. 그림 2(a)의 기하학적 모델의 구조를 고려하여 방과 복도 등을 이루는 공간을 표현하고 공간 간의 접근성을 표현한 것이 그림 2(b)의 접근성 모델인 것이다. 그림 3은 접근성 모델을 UML 다이어그램으로 표현한 것이다. NodeN과 EdgeN 클래스는 NetworkN을 구성하는 클래스이고 NodeN은 NodePt, DoorPt, EventPt 세 개의 자식클래스를

가진다. NodePt 클래스는 복도나 방을 적당한 크기의 단위공간으로 분할한 공간을 표현하고 DoorPt는 문을, EventPt는 건물 안에서 병목현상이나 재난 발생 지점 등을 표현하기 위한 클래스이다. 이러한 자식 클래스들과 NodeN은 상속관계를 갖는다(Lee 2007).

그림 4는 관계 데이터베이스에서 접근성 모델의 구조를 보여준다. 그림 3의 다이어그램에서 최상위 클래스인 NodeN과 EdgeN이 초기의 테이블이 되고 NodeN은 식별자(Node\_ID), 하위 클래스에 해당하는 테이블과의 관계설정을 위한 SubNode\_ID, 공간정보(Spatial (x, y)), 노드의 종류(Node\_Type)등의 정보를 갖는다. EdgeN은 식별자 Edge\_ID와 연결된 노드의 정보, Edge\_Type, 길이(Length) 등의 정보를 갖는다. 이 외에도 NodeN의 하위클래스를 표현하는 세 개의 테이블이 존재한다. 테이블 NodePt의 각 노드는 식별을 위한 ID와 해당하는 방



[그림 4] 관계 데이터베이스에서 접근성 모델의 구조

의 정보(Room\_Name, Room\_Type) 노드에 해당하는 공간에 속해 있는 사람의 수(Occupant), 이들의 특성(나이, 상태 등), 공간의 상태 등 실내측위를 통해 얻을 수 있는 해당 공간에 대한 정보를 갖는다. DoorPt는 해당 출입구의 식별자(DoorPT\_ID)와 장애물의 유무여부(Impedance), 출입구의 형태(Door\_Type), 통행의 흐름에 대한 정보(Flow\_Rate) 등을 지니고 병목현상이나 재난 발생 지점을 위한 EventPT 또한 식별자(EventPT\_ID)와 방의 정보, 병목현상 및 재난 발생에 대한 정보 등을 지닌다.

레이션의 결과로 산출된 데이터를 활용하였는데 이는 연기와 대피 두 가지로 나뉜다. 시간당 감지기별 연기 농도와 시간별 대피자의 위치로 산출되는 데이터를 최

### 3.2 시물레이션 데이터

실시간 시스템을 구축하기 위해서는 대피자 등 사람의 움직임과 열·연기의 확산을 단위시간 마다 감지하여 최적경로 산출에 환경적 요소로 적용하여야 한다. 이를 위해서는 RFID 등 실내 측위, 센서 기술과의 접목으로 측정된 데이터를 이용해야 하지만 본 논문에서는 시물레이션 데이터를 활용하여 실시간으로 측위시스템과 감지시스템을 통한 동적객체와 화재 발생 상황을 단위 시간으로 입력받는 형태의 데이터베이스를 설계하여 활용하였다.

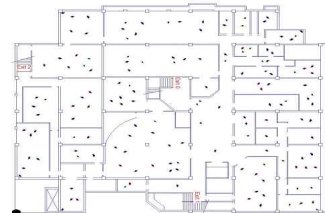
실내공간 네트워크 모델과 열 연기의 움직임을 고려한 이동객체의 상태를 담고 있는 시공간데이터베이스를 본 연구에서 고안한 시간 가변적(time-dependent) 알고리즘에 적용하는 방법으로 진행되었다. 화재가 발생했다고 가정했을 때 당황한 대피자들이 인지하고 있던 출구를 향해 무질서하게 움직이게 되고 그때 연기의 농도가 높아지는 공간은 차단막이 내려오고 이러한 곳은 자연스럽게 이동속도가 느려지게 된다. 그리고 이는 구조를 하러 들어가는 소방관의 움직임에도 영향을 미치게 되는데 이때, 미리 파악된 사람들의 움직임과 연기의 퍼짐 정도를 고려하면 효율적인 구조 경로를 제공할 수 있을 것이다.

따라서 본 연구에서는 시공간 데이터베이스로 시물

1	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
2			위치1							위치2
3			C	C	C	C	C	C	C	C
4	FDS Time	probe_16	probe_19	probe_20	probe_24				probe_10	probe_3
5	0.00E+00	2.00E+01	2.00E+01	2.00E+01	2.00E+01	2.00E+01	2.00E+01	2.00E+01	2.00E+01	2.00E+01
6	6.72E-01	2.00E+01	2.00E+01	2.00E+01	2.00E+01	2.00E+01	2.00E+01	2.00E+01	2.00E+01	2.00E+01
7	1.94E+00	2.00E+01	2.00E+01	2.00E+01	2.00E+01	2.00E+01	2.00E+01	2.00E+01	2.00E+01	2.00E+01
8	2.02E+00	2.00E+01	2.00E+01	2.00E+01	2.00E+01	2.00E+01	2.00E+01	2.00E+01	2.00E+01	2.00E+01
9	2.69E+00	2.00E+01	2.00E+01	2.00E+01	2.00E+01	2.00E+01	2.00E+01	2.00E+01	2.00E+01	2.00E+01
10	3.96E+00	2.00E+01	2.00E+01	2.00E+01	2.00E+01	2.00E+01	2.00E+01	2.00E+01	2.00E+01	2.00E+01
11	4.03E+00	2.00E+01	2.00E+01	2.00E+01	2.00E+01	2.00E+01	2.00E+01	2.00E+01	2.00E+01	2.00E+01
12	4.68E+00	2.00E+01	2.00E+01	2.00E+01	2.00E+01	2.00E+01	2.00E+01	2.00E+01	2.00E+01	2.00E+01

(a) 연기시물레이션

1	A	B	C	D	E	F	G	H
2	time(sec)	HID	HTYPE	LAYER	X	Y	RAD	
3	0	0	일반인	Floor 1	37.89521	3.458966	5.585054	N
4	0	1	일반인	Floor 1	40.22227	2.418914	1.623156	N
5	0	2	일반인	Floor 1	43.22294	5.17464	2.216568	N
6	0	3	일반인	Floor 1	39.36493	6.27693	1.029744	N
7	0	4	일반인	Floor 1	38.81378	5.54207	3.874631	N
8	0	5	일반인	Floor 1	41.32456	6.766837	3.438299	N
9	0	6	일반인	Floor 1	39.24245	7.624173	1.972222	N
10	0	7	일반인	Floor 1	14.50216	5.848262	5.410521	N
11	0	8	일반인	Floor 1	19.70742	5.480832	5.602507	N
12	0	9	일반인	Floor 1	24.23906	5.419593	2.146755	N
13	0	10	일반인	Floor 1	23.87163	13.31934	3.473205	N
14	0	11	일반인	Floor 1	27.11726	14.0542	4.869469	N
15	0	12	일반인	Floor 1	25.64754	11.84962	0.977384	N
16	0	13	일반인	Floor 1	27.85212	15.95259	3.787364	N



(b) 대피시물레이션

[그림 5] 시물레이션 결과 예시

적경로 산출과정에 가중치로 적용하였다.

연기 시뮬레이션은 FDS(Fire Dynamic Simulator)를 통해 수행되었고 대피자의 움직임은 모의 시스템 기반 PSO(Particle Swarm Optimization)을 통해서 수행 하였는데 이때 연기 시뮬레이션의 결과를 적용하여 대피자의 움직임을 추정하였다. 위의 방법을 통해 산출된 결과들이 시공간 데이터베이스의 엔티티로 저장되고 이들이 동적 매개변수로 작용하여 시간의 흐름에 따른 변화를 고려한 최적경로가 산출된다.

대피시뮬레이션의 결과는 매 초마다 대피자의 위치정보를 지니고 연기시뮬레이션의 결과는 시간 별 감지기 별 연기 농도를 보여준다(그림 5). 우리는 시뮬레이션을 통해 비상 시 대피자의 움직임과 연기의 농도를 통해 위험지역과 병목현상이 발생하는 지역을 추정할 수 있다.

### 3.3 시간 가변적 최적경로탐색 알고리즘

구조자를 위한 최적경로를 산출하기 위해서는 건물의 구조 뿐 만 아니라 시시각각 변화하는 동적 매개변수도 고려해야 한다. 따라서 최적경로를 산출하는 방법에 복도의 수용능력과 현재 점유정도 등 공간상황의 동적 변화를 관리 할 수 있는 시간의 개념을 적용한 데이터베이스와 연계하여야 한다.

알고리즘에 사용되는 매개변수는 크게 물리적인 환경과 인간의 행태 두 가지로 분류할 수 있다(Pu and Zlatanova 2005). 이들은 주로 위험지역, 연기농도, 인구 밀도, 보행자의 흐름 등이 될 수 있다.

본 연구에서는 링크(EdgeN)에 가중치를 준 형태의 Dijkstra's 최단경로 알고리즘(Dijkstra 1959)을 사용하였다. 가중치는 해당 링크를 통해서 노드에서 그 다음 노드로 이동하는 시간으로 표현되는데 이는 해당 링크에 속해있는 보행자의 속도와 링크의 길이를 비교하여 산출한다. 다음은 가중치를 산출하는 방법을 보여준다.

$$t(l_{ij}) = \frac{len(l_{ij})}{s(l_{ij})} \quad : \text{링크의 가중치} \quad (1)$$

$$s(l_{ij}) = \frac{s(n_i) + s(n_j)}{2} \quad (2)$$

$$s(n_i) = k(tp(n_i)) - 0.266 \times k(tp(n_i)) \times d_s(n_i) \quad (3)$$

$$d_s(n_i) = \frac{vm_n(n_i)}{cp(n_i) \times 0.16} \quad (4)$$

<상수>

- 한사람이 점유하는 평균 면적 (한국표준과학연구원 조사 (1999)):  $0.16m^2$
- Speed-density 산출 상수 (Pu and Zlatanova 2005) : -0.266
  - 복도/출입구:  $1.6m/s$
  - 방 :  $1.4m/s$

<매개변수>(단위)

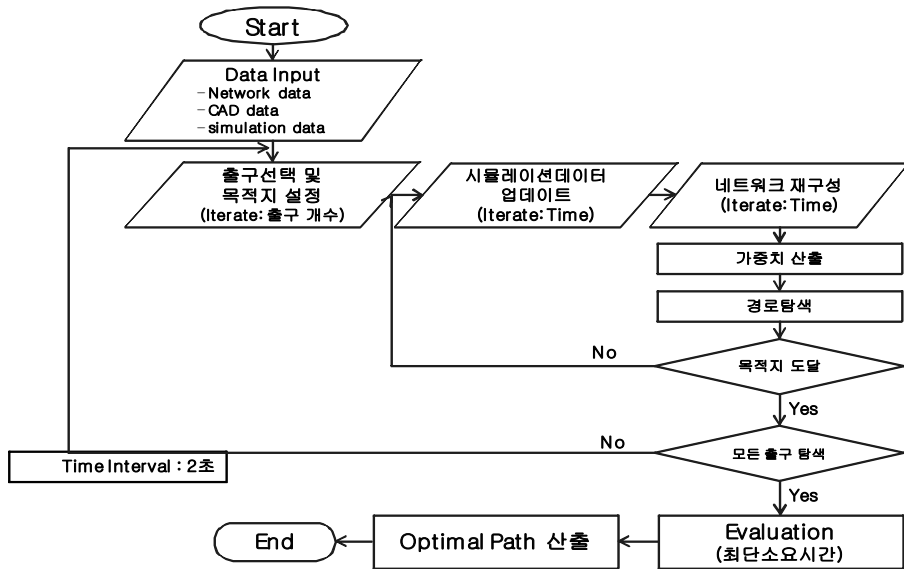
- $n_i$  : node (i)
- $l_{ij}$  : node (i)와 node (j)로 이루어진 link (edge)
- $len(l_{ij})$  : link (i, j)의 길이
- $t(l_{ij})$  : link (i, j)의 이동소요시간(sec)
- $s(n_i)$  : node (i)에서의 보행자의 속도(m/s)
- $s(l_{ij})$  : link (i, j)에서의 보행자의 속도(m/s)
- $d(n_i)$  : 보행자의 밀도( $p/m^2$ )
- $d_s(n_i)$  : 연기농도(%/m)
- $cp(n_i)$  : node (i)의 수용능력  
(단,  $d(n_i)$ 가  $cp(n_i)$ 보다 크면  $cp(n_i)$ 는 3)

위의 수식에서 알 수 있듯이 node와 link를 제외한 대부분의 매개변수는 단위시간마다 갱신된다. 이러한 매개변수는 시공간 데이터베이스를 활용하여 갱신될 수 있다. 시공간 데이터베이스는 시간의 흐름과 보행자의 흐름을 분석해서 측정한 것으로 이는 단위시간별 최적경로와 병목현상을 예측할 수 있어 실시간에 가까운 경로탐색이 가능하다. 앞서 언급했듯이 본 연구에서 대피자의 움직임과 연기의 흐름 및 농도 데이터는 최적경로를 찾는 데에 동적 변수로 사용된다.

이 변수들을 이용하여 분할된 공간별 시간별 점유율이 산출된다. 분할된 공간은 Node를 설정하는데 참조되고 공간을 분할 할 때에는 센서의 위치를 고려하여 수행된다. 연기의 농도와 대피자 및 동적 객체의 점유율은 단위시간(여기서는 '초')마다 갱신된다. 다시 말해 네트워크데이터는 최적경로를 산출하는 동안 매 초 갱신되는 것이다.

건물 실내공간에서 시간의 흐름에 따른 최적경로를 산출하는 방법은 크게 두 단계로 분류 할 수 있다. 첫 번째 단계는 초기 상태에서 출구로부터 구조 대상지까지의 최적경로를 찾는 것이다. 그 다음에는 목적지에 도달할 때까지 단위시간마다 동적 객체의 값을 갱신하며 최적경로를 찾는 과정을 반복하는 것이다. 그림 6은 최적경로를 찾는 과정을 보여주는 흐름도이다.

입력데이터는 건물의 내부에 대한 기하학적 모델 및 위상학적 모델 그리고 시뮬레이션의 수행의 결과이다. 이들 데이터를 입력 받은 뒤 먼저 출구 및 목적지를 설



[그림 6] 최적경로 탐색 과정

<표 1> 출구별 최적경로 탐색 과정

```

Time-dependent Dijkstra's Algorithm
input: Network N, Number of Exit E, People P, Density of Smoke S
output: Optimal Path from exit to danger area R

Dijkstra(Network, start)
while(every 2 sec)
    examine the Ei and Sk
    if (Ei>MaxNumber Ei || Si>Threshold Si)
        don't go Ri-1
        Dijkstra(Network, start)
    update and notify to rescuer
    until find dangerous people

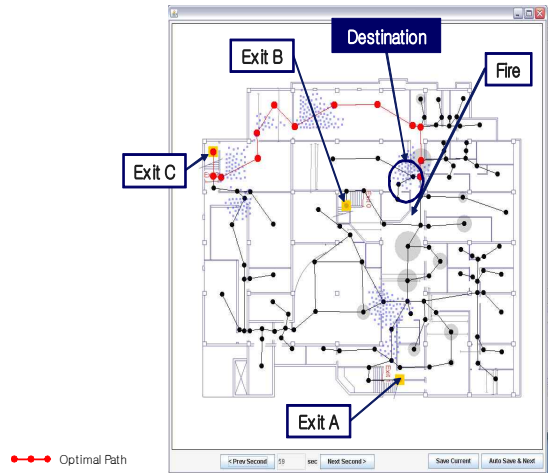
Dijkstra(Network, start):
for each node n in Network:
    dist[n] := infinity
    previous[n] := undefined
for each edge e in Network:
    weight[e] := calculated
dist[source] := 0
Q := the set of all nodes in Network
while Q is not empty:
    u := node in Q with smallest dist[]
    remove u from Q
    for each neighbor v of u:
        alt := dist[u] + dist_between(u, v) * weight[e,(u,v)]
        if alt < dist[v]
            dist[v] := alt
            previous[v] := u
    return previous[]
    
```

정한다. 이때 출구의 개수는 건물의 구조에 따라 한 개 이상이 될 수 있고 출구 별로 2초단위로 앞에서 설명한 경로탐색 방법으로 출구 별 최적경로가 산출된다. 출구 별 최적경로가 산출되면 이들을 비교하여 가장 적은 시간이 걸리는 경로가 최종 최적 경로로 결정된다. 표 1은 출구별 최적경로 탐색 과정을 간단한 의사코드로 pseudo-code) 나타낸 것이다. 출구별 최적경로 산출을 위해 필요한 입력 데이터는 실내공간을 표현하는 네트워크 데이터, 출구의 개수, 대피자의 위치와 연기의 농도가 필요하다. 앞에서 언급한 바와 같이 기본 알고리즘은 Dijkstra's 최단경로 알고리즘을 사용하였다. 2초 단위로 네트워크 모델이 재구성되고 그에 따라 산출되는 최적 경로도 재탐색 된다. 경로탐색과정에서 노드와 노드 사이의 거리가  $dist[n]$  변수로 합산되는데 거리는 노드사이의 링크를 이동하는데 걸리는 시간으로 표현된  $weight[e]$ 의 값을 이용하고 이 값은 앞서 설명한 링크의 가중치를 계산하는 방법으로 산출된 것이다. 첫 번째 산출된  $dist[1]$ 과 2초 뒤 산출된  $dist[2]$ 와 비교하여 적은 값을 남기고 그 다음 산출된 경로에 대해서도 같은 과정을 반복하여 매 2초 마다 출구별 최적경로가 산출되고 이들을 비교하여 전체 최적경로와 진입로(출입구)가 결정되는 것이다.

#### 4. 시공간 데이터베이스를 이용한 실내 공간 최적경로 탐색

제안한 최적경로 탐색 알고리즘을 테스트하기 위해 2차원 데이터에 위의 방법론을 적용하여 경로탐색 시스템을 구축하여보았다. 시스템은 Java 개발환경에서 구축되었고 실험 대상지는 서울시립대학교 내에 위치한 학생회관 지하1층으로 하였다. 건물의 내부 구조에 대한 기하학적 모델은 CAD 기반 건물의 설계도면으로부터 추출하였고 위상학적 모델은 실험 대상지에 포함된 이동이 가능한 공간들 간의 관계를 표현하는 네트워크 모델을 활용하였다. 3장에서 언급한 바와 같이 네트워크 모델은 건물의 기하학적 구조와 센서의 위치를 참조하여 구축하였다.

그림 7은 테스트 시스템의 인터페이스를 보여주는데 건물의 내부 구조와 산출된 경로(회색의 큰 노드로 이루어진 경로)를 표현하였고 시간에 따른 변화를 파악하기 위해 수동으로 시간의 흐름을 제어할 수 있고 현 상태를 저장할 수 있도록 하였다. 건물의 내부의 표현은 기하학적 모델, 네트워크 모델, 시공간 데이터베이스를

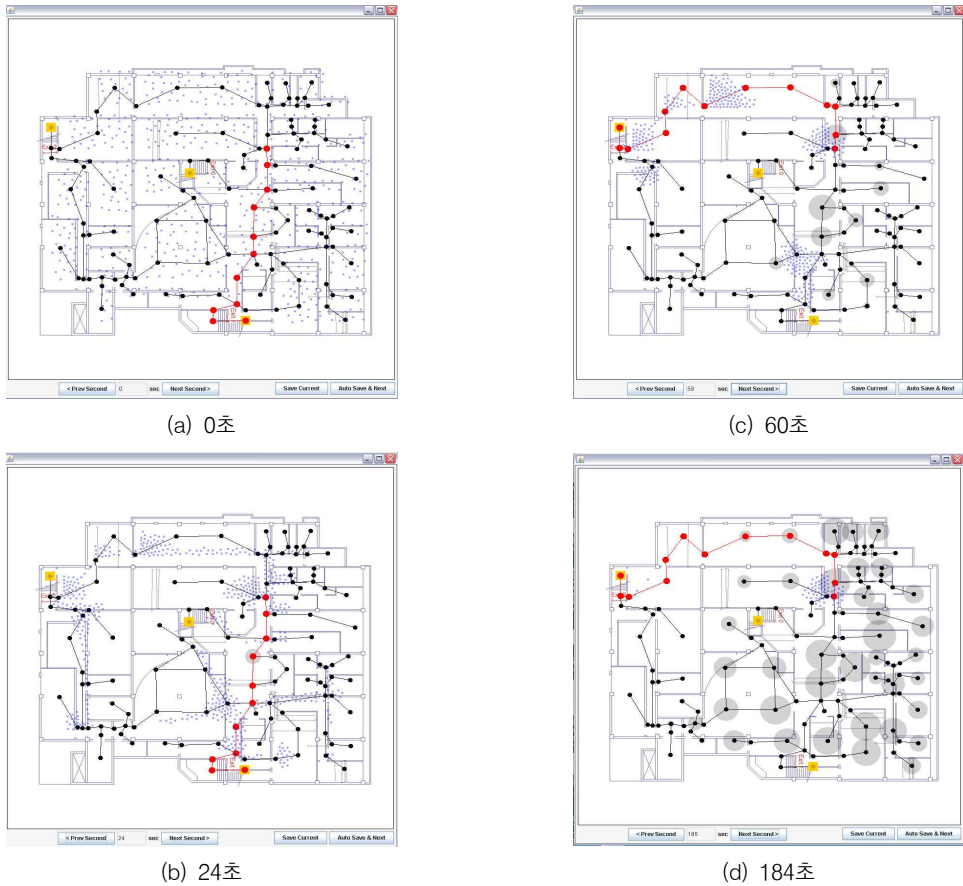


[그림 7] 테스트 시스템의 레이아웃

결합한 형태로 보여준다. 우선 내부로 들어갈 수 있는 출입구는 세 개가 있고 목적지는 대피시물레이션 결과에서 일정 시간이 지난 뒤에 대피자가 몰려서 거의 고립되는 지점을 목적지로 하였다. 이 지역은 연기의 농도와 주변 상황을 고려하여 대피자 스스로 대피할 수 없는 지역을 의미하고 따라서 도움이 필요하다고 가정하였다. 구조자는 출입구 중 하나를 택해서 목적지로 들어가게 되는데, 목적지로 향하는 과정에서 출구로 대피하려는 사람들의 방해로 받게 된다. 그런 상황이 여러 번 발생하면 상대적으로 오랜 시간이 걸리게 되는데 이러한 시간낭비를 줄이는 것이 본 연구에서 탐색하고자 하는 최적경로의 목적이 된다. 시간이 지나면서 어떻게 루트가 달라지는지를 테스트 하였다.

화재 발생 뒤 30초 뒤 대피자가 움직이기 시작한다고 가정하고 움직이기 시작하는 시간을 0으로 설정하였다(그림 8 (a)). 초기에 산출된 경로는 아래쪽에 위치한 출입구로부터 목적지로 가는 경로가 산출된다. 24초가 지난 뒤 대피자들이 방의 출입구와 건물의 출입구 방향으로 몰린 것을 볼 수 있고(그림 8 (b)) 경로는 초기의 경로가 유지되고 있다. 이때 초기에 설정된 루트를 중심으로 살펴보면 많은 대피자가 몰려있고 연기의 농도가 짙어지고 있는 것을 볼 수 있다. 시간이 더 흐른 뒤 약 1분 정도가 되었을 때 최적경로는 왼쪽에 위치한 출구에서 진입하는 경로로 바뀌게 된다. 그림 8의 (b), (c)와 같이 초기에 설정된 경로를 중심으로 연기의 농도가 짙어졌고 경로가 바뀐 것은 이러한 여건을 반영한 결과로 볼 수 있다. 결과적으로 그림 8 (d) 184초에 산출된 경로가 최종 최적경로로 산출되었다.





[그림 8] 시간에 따른 최적경로 산출 결과

## 5. 결 론

본 연구에서는 구조자를 위한 시간 가변적(time-dependent) 알고리즘을 개발하였는데 이는 실시간 방재 시스템 개발의 기반연구라고 할 수 있다. 개발된 알고리즘을 테스트하기 위해 응용시스템을 개발하였다. 이는 제안된 알고리즘과 네트워크 모델과 동적 객체를 지니는 시공간 데이터베이스를 이용하여 구축하였으며 연기, 대피자 등 동적 객체를 다루기 위해 FDS 시뮬레이션과 대피시뮬레이션의 결과 데이터를 활용하였다. 그 결과 시시각각 변화하는 재난 발생 상황을 반영한 결과를 얻을 수 있었다. 본 연구에서 제안된 방법론은 완전한 실시간 분석이라 할 수 없다. 우선 본 연구에서 사용한 시뮬레이션 데이터는 여러 가지 상황을 고려하여 수행된 것이기는 하나 불확실한 재난 상황을 온전히 반영할 수는 없다. 그리고 구조자 뿐 만 아니라 대피자를 위한 경로탐색 또한 산출되어야 실시간 방재 시스템을

위한 경로탐색 기능의 구현이 가능할 것이다. 따라서 본 연구를 실시간 데이터의 적용, 대피자를 위한 경로탐색, 3차원 공간으로의 확대 등을 통한 개선이 필요하다고 판단된다.

본 연구는 실시간 방재시스템의 개발을 위한 부분적 기반 연구로써 진행되었다. 따라서 실시간 방재시스템의 개발을 위해서는 재난발생시 운용이 시스한 실내측위기술, 사용자(구조자측위기술, 재난관리자 등) 사용자(응용시스템)의 구축을 위한 가시화 기술, 통신 기술 등의 연구 또한 주요 연구 과제라 할 수 있다.

## 감사의 글

이 논문은 2008년도 서울시립대학교 교내학술연구비에 의하여 연구되었음.

## 참고문헌

- Cahan, B., and M. Ball. 2002. GIS at ground zero: Spatial technologies bolsters World Trade Center response and recovery. *GEOWorld* 15:26-29.
- Church, R. L., and J. R. Marston. 2003. Measuring accessibility for people with a disability. *Geophysical Analysis* 35 (1): 83-96.
- Cova, T. J. 1999. GIS in emergency management. In *Geographical information systems, Vol. 2: Applications and management issues*, 2nd ed., ed. P. A. Longley, M. F. Goodchild, G. J. Maguire, and D. W. Rhind, 845-58. New York: Wiley.
- Cova, T. J., and R. L. Church. 1997. Modeling community evacuation vulnerability using GIS. *International Journal of Geographic Information Science* 11:763-84.
- Cutter, S. L., D. B. Richardson, and T. J. Wilbanks, eds. 2003. *The geographical dimensions of terrorism*. New York: Routledge.
- Dijkstra, E. W. 1959. A note on two problems in connection with graphs. *Numerische Mathematik* 1:269-71.
- Ding, Z., R.H. Guting, 2004. Modeling temporally variable transportation networks. *Proc. 16th Intl. Conf. on Database Systems for Advanced Applications*. 154-168.
- George, B., S. Kim, and S. Shekhar 2007. Spatio-temporal Network Databases and Routing Algorithms: A Summary of Results. *SSTD 2007. LNCS 4605*. pp.460-477.
- Kwan, M.-P., and J. Lee. 2005. Emergency response after 9/11: The potential of real-time 3D GIS for quick emergency response in micro-spatial environments. *Computers, Environment and Urban Systems* 29:93-113.
- Kwan, M.-P., and J. Weber. 2003. Individual accessibility revisited: Implications for geographical analysis in the twentyfirst century. *Geographical Analysis* 35 (4): 341-53.
- Kolbe, T. H., T. Becker and C. Nagel. 2008. 1st Technical Report Discussion of Euclidean Space and Cellular Space and Proposal of an Integrated Indoor Spatial Data Model.
- Lee, J. 2007. A Three-Dimensional Navigable Data Model to Support Emergency Response in Microspatial Built-Environments. *Annals of the Association of American Geographers*. 97(3): 512-529.
- Lee, J., and M.-P. Kwan. 2005. A combinatorial data model for representing topological relations among 3D geographical features in micro-spatial environments. *International Journal of Geographical Information Science* 19(10): 1039-1056.
- Pu, S., and S. Zlatanova. 2005. Evacuation route calculation of inner buildings. In *Geo-information for disaster management*, ed. P. J. M. van Oosterom, S. Zlatanova, and E. M. Fendel, 1143-61. Heidelberg: Springer Verlag.
- Shen, T.-S. 2005. ESM: A building evacuation simulation model. *Building and Environment* 40:671-80.
- Winter, S., G. Iglesias, S. Zlatanova, and W. Kuhn. 2005. GI for the public: The terrorist attack in London. *Geoinformatics Magazine* Oct./Nov.:18-21. <http://www.gdmc.nl/zlatanova/publications.htm>.

접수일	(2009년 10월 22일)
최종수정일	(2009년 11월 24일)
게재확정일	(2009년 11월 24일)