

화재시 가시도 변화에 따른 대피속도 산정에 관한 연구

이동호[†] · 박종승^{*}

인천대학교 안전공학과 · *인천대학교 컴퓨터공학과

(2007. 8. 9. 접수 / 2007. 10. 12. 채택)

A Study on the Evacuation Time by the Influence of Decreasing Visibility on Fire

Dong-Ho Rie[†] · Jong-Seung Park^{*}

Department of Safety Engineering, University of Incheon

^{*}Department of Computer Science Engineering, University of Incheon

(Received August 9, 2007 / Accepted October 12, 2007)

Abstract : The computer program is developed to simulate the evacuation time for a building which is made geometrically complex. The program is intended for use both as a search and a design tool to analyze the evacuation safety through a wide range of structure environments. The computer program has a function of importing FDS's result to each individual resident in the building. These attributes include a walking speed reduction by producing visibility reduction for each person on the fire. A* pathfinding algorithm is adopted to calculate the simulation of escape movement, overtaking, route deviation, and adjustments to individual speeds due to the proximity of crowd members. Finally, a case study for a theater is presented to compared the calculated evacuation time with SIMULEX in detail. This program contribute to a computer program that evaluates the evacuation time of individual occupants as they walk towards, and through the exits especially for building, underground spaces like a subway or tunnel.

Key Words : PBD, building fire, FDS, evacuation time

1. 서 론

PBD(Performance Based Design)는 이해당사자들의 의견을 종합하여 방호범위 및 정도를 결정한 후, 방재공학적 분석결과를 토대로 필요한 방재시스템을 구축하는 것으로 관련법규 및 기준을 적용하여 수행하는 기존 CBD(Prescriptive Code Based Design) 설계방식에 비하여 보다 효율적이고 다양하다. 또한, 컴퓨터 고성능화와 더불어 화재위험성평가는 보다 정량화가 가능하여 젊으며 시뮬레이션기술의 발달로 정확도가 날로 높아지고 있다. 따라서 선진각국에서는 PBD와 관련된 기초분야에 대한 연구를 지속하여 법 제도화를 추진하고 있는 현실이다. 본 연구는 컴퓨터를 활용한 성능위주 화재위험 성평가의 중요한 요소로서 화재시 발생하는 연기에 의

한 가시도의 영향을 고려한 대피시간 산출 프로그램 개발에 관하여 기술하며 개발된 프로그램을 사용하여 가시도 저하가 대피시간에 미치는 영향에 대해 기술한다.

2. 계산 프로그램의 구성

개발 프로그램은 맵 편집 모듈과 대피 시뮬레이션 모듈로 구성된다. 맵 편집 모듈은 건축물의 각 층의 내부 구조와 대피 출입구 및 계단 등을 지정할 수 있는 기능을 포함하며, 대피 시뮬레이션 모듈은 시간의 흐름에 따른 대피 시뮬레이션을 위한 대피자의 배치 및 조건 설정 등의 기능을 포함한다.

본 계산 프로그램의 시스템 구현은 Microsoft Windows의 Visual Studio.NET 환경에서 C++ 언어를 사용하였으며 대피자의 입체적인 3차원 대피 시뮬레이션 가시화를 위해서 DirectX 9.0 SDK를 사용하였다.

[†] To whom correspondence should be addressed.
riedh@incheon.ac.kr

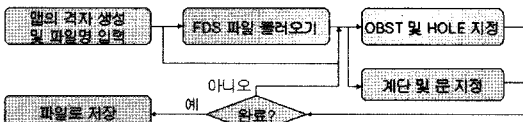


Fig. 1. Sequence of map editing.

2.1. 맵 편집 모듈(Map editor module)

맵 편집 모듈에서는 건축물 내부의 전체 공간을 셀 단위의 격자 형태로 분할하여 내부 구조를 명확히 명시할 수 있는 기능을 포함하는 프로그램이며 주요 지원 기능은 다음과 같다.

- (1) 건물의 층수 지정 및 각 층에 대한 단면 격자 크기 지정.
- (2) 각 층의 높이 지정 및 각 셀의 실제크기 지정.
- (3) FDS 파일 importing 및 맵 자동 구성.
- (4) 계단 및 출구 삽입 및 삭제.
- (5) 구성된 맵 도면 데이터 출력 파일 저장.

Fig. 1은 맵 편집 프로그램의 데이터 입력 및 구동순서를 나타낸다.

2.2. FDS 코딩 파일로부터 맵(map) 구성

맵 구성 프로그램은 FDS의 코딩 데이터를 import 하여 건축물의 모든 맵을 자동으로 구성할 수 있도록 구성되었다. 또한, FDS의 fds2ascii.exe 파일 실행하여 얻어진 결과파일을 읽어서 맵의 격자를 자동 구성하며 입력데이터는 FDS좌표 (x,y,z)에 대응하는 좌표값으로 구성된다. 높이에 해당되는 z좌표를 참조하여 건축물의 해당 층을 결정할 수 있도록 하였으며 OBST의 정보로부터 OBST로 설정된 영역의 모든 셀은 장애물로 지정된다. HOLE의 경우 해당 영역의 셀은 보행 가능한 공간으로 지정하도록

설정하였다. 따라서, 구조물의 맵은 FDS의 OBST와 HOLE을 import하여 구성하게 되므로 별도의 작업을 필요로 하지 않으며 Fig. 2에 FDS파일로부터 자동 구성한 맵의 예를 나타내었다.

2.3. 재실자의 배치 및 편집

맵의 구성이 완료되면 시뮬레이션을 위한 재실자의 배치가 이루어진다. 사람은 성인남성, 성인여성, 아이, 노인의 4가지 부류로 나누어 배치할 수 있도록 설정되며 각 부류에 대해서 사람의 외형에 대한 치수값이 지정된다^{1,2)}.

본 연구에서 사용한 재실자의 외형에 대한 기준으로 한국표준연구소의 통계를 활용하여 성별, 아이, 노인의 구분에 따라 사람의 실제 크기인 가슴의 두께와 어깨 너비가 적용되었다. Table 1은 본 연구에서 적용한 재실자 신체 기준값을 나타낸다. 사람의 배치방식은 현재 속성 값에 따라 마우스가 클릭된 지점을 중심으로 사람을 입력할 수 있도록 하였으며 입력된 사람의 정보를 확인할 수도 있도록 하였다. 대파자의 공간배치는 설정된 장애물의 유무를 고려하여 사람의 중심과 크기로 입력된 사람이 장애물에 걸리지지는 않은지 검사하여 장애물에 걸리지 않을 경우에 한하여 입력할 수 있도록 하였다. Fig. 3은 재실자의 공간 배치의 예를 나타낸다.

Table 1. Shoulder and chest dimension for a human torso

구분	어깨 폭	가슴 폭	기준
성인남성	0.50	0.32	한국표준 연구소
성인여성	0.44	0.28	
아이	0.38	0.24	
노인	0.46	0.30	

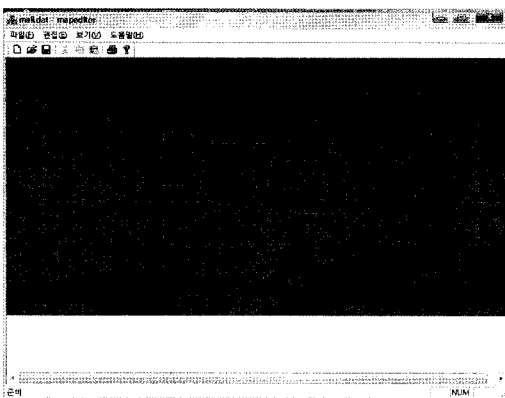


Fig. 2. Example for the formation of map from FDS coding file.

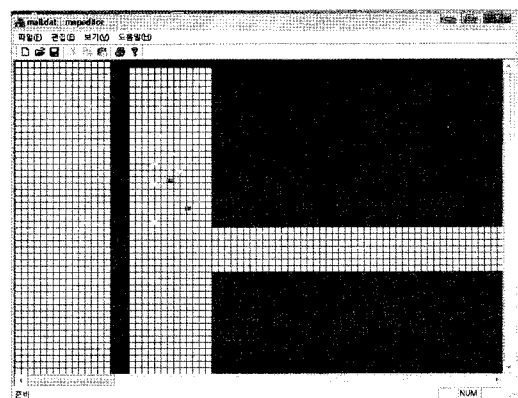


Fig. 3. Example for the location of resident.

2.4. 시뮬레이션 데이터 설정

대피 시뮬레이션을 위해서는 시뮬레이션을 수행하고자 하는 대피 환경을 정확히 묘사할 수 있는 다음의 기초 환경 데이터가 요구된다.

- (1) 대피자 타입별로 대피 속도 설정.
- (2) 대피자 타입별로 연기농도에 따른 대피 속도 계산을 위한 계산식 설정.
- (3) 가연물 설정에 따른 연기농도의 시간적 공간적 정보값.

기초데이터의 (2)와 (3)은 설정된 화재시나리오에 따라 FDS로부터 계산되며 파일로 출력된다. 파일 출력시에 샘플링 시간 단위와 시작 시간 및 종료 시간을 설정하여 해당 수만큼의 파일이 생성된다. 대피 시뮬레이터 시스템은 FDS에서 출력된 파일을 import 하여 연기농도에 대한 모든 샘플링 데이터가 확보 가능하다. 대피자의 대피속도는 대피 시에 이동의 한계속도를 적용하기 위해서 설정된다. 연기가 없는 정상적 상황에서 대피 한계속도는 Table 2와 같으며 대피자 타입별로 최대 보행속도값 S_{max} 를 나타낸다³⁾.

이격 거리가 0.7678m 이상의 조건에서 대피자는 최고 속도를 낼 수 있으며 0.2909m 이하의 조건에서는 최저 속도인 0m/s의 값을 갖는다. 위의 두 조건 사이의 경우는 식 (1)에 의해 대피자의 속도를 계산한다.

$$S = k - ak \frac{1}{d^2 \pi} \quad (1)$$

- S : 각 사람의 간격에 따른 속도(m/s)
- k : 성별에 따른 상수(-) a: 상수(0.266)
- d : 가장 가까운 사람과의 이격거리(m)

본 계산 모듈에는 연기농도에 의한 속도 저하 모듈이 적용되었다. 따라서, 대피자 위치별 연기에 의한 가시도 저하에 따라 대피속도감소에 기인한 대피시간 증가 모듈을 적용하였다. Fig. 4는 PIARC

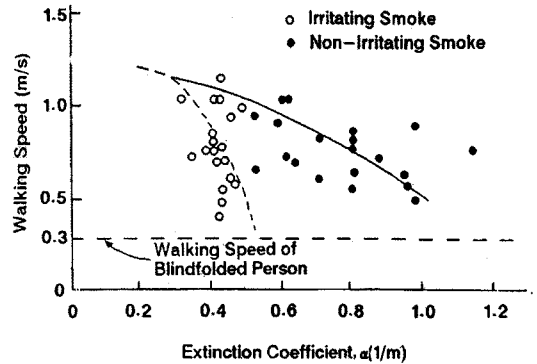


Fig. 4. Relation between the visibility and walking speed.

및 SFPE의 연구결과로 제시된 가시도와 보행속도의 관계를 나타내며 본 프로그램에 데이터베이스화하여 적용되었다⁴⁾.

2.5. 대피 시뮬레이션의 작업 흐름

시뮬레이션 기초 환경 데이터가 설정되면 시뮬레이션 대기 모드로 전환되고 시뮬레이션을 수행할 수 있는 조건이 된다. 따라서 프로그램 시작과 더불어 대피자의 대피 상황을 실시간으로 모니터링하여 관찰할 수 있으며 대피자 개개인의 대피에 따른 대피 동선을 파악 할 수 있다. 대피 시뮬레이션이 완료되면 모든 결과값을 파일로 저장함으로써 시뮬레이션 결과의 분석 자료로 사용된다. Fig. 5는 시뮬레이션의 순서를 나타낸다.

2.6. 대피 시뮬레이션의 3차원 가시화

대피 시뮬레이션은 많은 계산량을 요하므로 대부분의 시뮬레이션 시스템에서 2차원적인 시각화를 다루고 있다⁵⁾. 본 연구에서는 2차원적인 시각화에 비해서 3차원적인 시각화의 도입으로 대피 상황을 시각적으로 모니터링하면서 화재시의 안전성 판단과 건물의 대피 장애요소 판단을 직관적으로 할 수 있도록 하였다. 본 논문에서 구현된 시뮬레이션 시스템은 건물의 모든 기하정보 및 대피자, 탈출구, 계단 등을 3차원적으로 묘사하는 가시화 모듈을 포함하고 있으며 가시화를 위해서 3D 객체들을 생성한다. 먼저 맵의 가시화를 위해서 셀에 기반을 두어 건물의 각 층을 큐브들의 집합으로 생성한다. 큐브의 높이는 해당 층의 높이와 일치하며 미지정시에는 디폴트로 2m를 기준으로 한다. 큐브의 가로 세로 크기는 셀의 실제 크기와 일치하도록 하였으며 전체 층의 모습이 실제크기에 해당하도록 하였다.

Table 2. Maximum evacuee's walking speed

구분	S_{max}	k	기준
성인남성	1.35	1.581481438	Simulex
성인여성	1.15	1.357187892	
아이	0.9	1.054320959	
노인	0.8	0.9341865571	

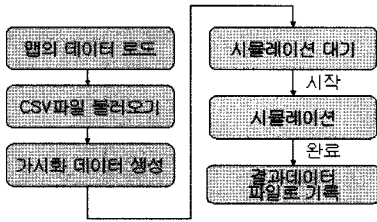


Fig. 5. Sequence of evacuation simulation.

시뮬레이션 환경의 가시화 모듈의 실행은 3차원 가시화 모드에서 시뮬레이션 계산 모듈의 실행과 별도로 컴퓨터 그래픽 카드에서 자동으로 렌더링 된다. NVIDIA GeForce 7600 GT 그래픽 카드가 장착된 2.4GHz Intel Core2 CPU환경 조건하에서 400×200 격자로 40명에 대한 대피 시뮬레이션을 수행했을 경우 약 230FPS(frames per seconds)의 렌더링 속도를 얻을 수 있었다. 이러한 결과는 렌더링을 위한 계산이 시뮬레이션 계산에 영향을 미치지 않음을 의미한다.

시뮬레이터 시스템에는 시뮬레이션 상황을 시각적으로 원하는 위치와 방향에서 관찰할 수 있도록 건물의 각 층에 대한 공간 네비게이션 기능을 구현하였다. 관찰자는 가상 카메라의 위치와 방향을 조정함으로써 대피자의 대피 모습을 관찰할 수 있으므로 출입구나 계단 등의 위치와 크기가 대피에 미치는 영향을 시각적으로 인지할 수 있도록 하였다. 가상 카메라는 관찰자의 현재 시점에 해당하며 각축에 대한 방향 조절 및 위치 이동이 가능하도록 하였다. Fig. 6은 편집 프로그램의 출력 파일에 대한 3차원 렌더링 예를 나타낸다.

3.대피 동선 계산 알고리즘

3.1. A* pathfinding 알고리즘

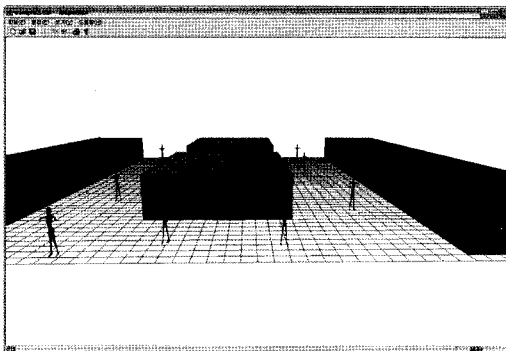


Fig. 6. 3D rendering example by using map editing program.

대피자의 대피 상황을 시뮬레이션하기 위해서는 각 대피자의 대피 경로를 계산하는 알고리즘의 개발이 필요하다. 본 논문에서는 A* pathfinding 알고리즘을 적용하였으며 이 방법은 경로탐색에 있어서 가장 적절한 경로를 효율적으로 계산하는 특성을 갖는다^{6,7)}.

A* pathfinding 알고리즘의 최적 경로 계산은 두 지점 사이의 최적 경로를 결정하는 인공지능 이론에서 사용되고 있으며 두 지점 사이의 최적 경로를 찾을 수 있는 특징을 갖는다. 따라서 A* pathfinding 알고리즘은 목표 지향적이며 가장 적절한 최적경로찾기의 방법으로 널리 사용되고 있다. A* pathfinding 알고리즘의 적용을 위해서는 맵 상의 위치를 표현하는 자료구조인 노드(node)를 정의해야 하며 노드의 적합성을 평가하기 위해 거리(distance)와 휴리스틱(heuristic)이 정의되어야 한다. 거리와 휴리스틱의 정의를 위해서는 노드의 비용(cost)을 목적에 맞게 추정할 수 있도록 설정되어야 한다. A* heuristic 알고리즘의 목표는 비용이 가장 낮은 경로를 찾는 것으로서 본 연구에 적용되었으며 이동거리에 비례하도록 비용을 정의한다. 이동거리는 시작노드와 목표노드 사이의 유클리드 거리(Euclidean distance)나 가로 세로의 길이를 의미하는 시티-블록 거리(city block distance)를 사용할 수 있다⁹⁾. 두 노드간의 경로가 평탄하고 이동에 대한 방해요인이 없다면 이동거리에 비례하도록 비용을 정의해도 무방하다. 그러나 동일한 거리이지만 화재와 관련된 위험요소나 이동을 저해하는 방해요인이 잠재한다면 그 위치에 대한 노드는 높은 비용을 가지도록 가중치를 배정해야 한다. 따라서 화재시의 최단시간에 탈출구로 도달하는 것이 가장 중요한 목표이므로 거리에 우선순위를 두어 비용을 계산하는 방식을 채택하였다. 또한 A* pathfinding 알고리즘의 설계에 있어서 컴퓨터의 CPU 계산 비용 및 메모리 사용 비용이 비중있게 고려되어야 한다. 경로의 탐색을 위해 격자맵의 셀 정보가 주어지며 격자의 크기에 따라서 A* pathfinding 알고리즘에 필요한 계산량과 메모리량이 달라진다. 따라서 경로를 찾는 과정에서 나중에 더 이상 진행이 어렵거나 더 좋은 경로가 있음을 알게 된다면 현재의 경로를 포기하고 새로운 경로를 찾아야 하므로 본 연구에서는 되추적(backtracking) 기법이 적용되었다. 본 프로그램에서는 되추적을 위해서 최종 해답을 찾기 전까지는 현재의 지점에 도달하는 과정에서 찾은 모든 방법을 저장해 두는 기능이 부여되었다^{8,10)}.

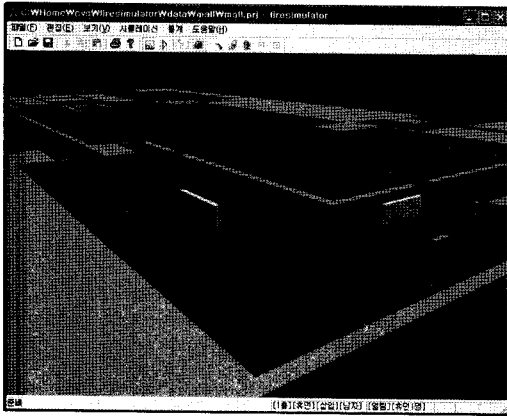


Fig. 7. A view of 3D Pathfinding process.

Fig. 7은 Pathfinding의 수행을 통해 탈출구로 이동하는 시뮬레이션의 3차원적 모습을 나타낸다.

3.2. 대피 동선에 따른 이동

대피 시뮬레이션이 시작되면 각각의 대피자는 자신의 경로를 탐색하고, 목적지 노드는 현재 층에서 도달 가능한 탈출구의 유무를 파악하도록 구성하였다. 탈출구가 존재하는 경우에 대해서는 탈출구로의 경로를 탐색하게 되며 현재 층에 탈출구가 존재하지 않는 경우 및 탈출구로의 도달 경로가 없다면 현재 층에서 아래층으로 이동 가능한 계단의 유무를 파악하고 경로를 탐색하도록 구성되었다. 경우에 따라 어떠한 도달 경로도 탐색되지 않는다면 고립된 상황으로 간주하여 대피를 포기하도록 설정되었다.

대피자가 알고리즘에서 구현된 대피 경로를 따라 이동하여 대피 최종 목적지에 도달하면 도달한 목적지가 설정된 최종 탈출구인 경우에는 대피에 성공한 것으로 판단되며 도달한 목적지가 계단인 경우에는 아래층으로 이동을 실시하도록 구성되었다. 계단으로의 이동은 층간 고도에 기반한 계단의 이동거리에 따라서 이동 시간이 계산되며, 아래층의 계단 중단에 도달했을 때, 아래층에서의 새로운 대피 경로를 탐색하도록 자동으로 설정되었다. 탐색은 이전에서 수행한 pathfinding과 동일한 방법으로 반복된다.

Fig. 8에서와 같이 3층에 있는 대피자는 우선적으로 근접 계단을 찾아 2층으로 내려온 다음 출입구가 없으므로 다시 계단을 찾고 1층으로 내려오게 된다. 1층에서 탈출구를 발견할 수 있으므로 탈출구를 통해서 대피하게 된다. 이 경우에서 대피자는 총 5번의 경로를 통해서 이동하게 된다. 탈출구는 중간층

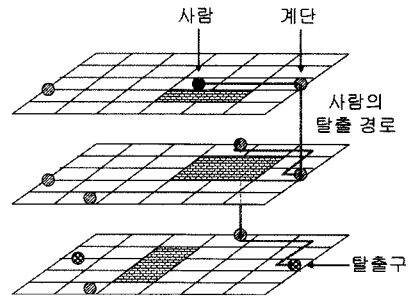


Fig. 8. An example of a escape route for 3 stories building.

에도 존재할 수 있으므로 경로 탐색 시에는 매 층에서 탈출구의 유무를 우선 탐색하도록 설정하였다.

4. 건축구조물에 적용사례

4.1. 기존 프로그램과의 비교

Table 3은 기존 상용 대피 시뮬레이션 프로그램인 SIMULEX와의 비교를 나타낸다. 대피 시뮬레이션 조건은 440명 재실 상태의 강당을 대상으로 재실자가 화재발생과 동시에 대피하는 조건하에서 SIMULEX와의 대피시간 비교 결과를 나타냈다. 본 결과는 SIMULEX와의 객관적인 비교를 위해 개발된 본 프로그램의 가시도에 따른 속도저하 모듈은 적용하지 않았으며, 두 프로그램 모두 재실자의 우치 및 성별을 동일하게 적용하였다. 시뮬레이션 결과로서 강당을 최종 대피하는 시간으로 SIMULEX의 경우 95.8 sec, 개발된 본 프로그램의 경우 94.8sec의 시간이 각각 소요되었다. 두 프로그램의 대피 소요시간 차는 1sec로서 SIMULEX 대피시간기준 1.04%의 차이가 발생하는 것으로 거의 동일한 결과를 얻을 수 있었다.

Table 3. Comparison between developed program and SIMULEX(Decreasing escape walking speed is not applied by the influence of fire smoke)

구조물 대상	SOS		SIMULEX		명/시간		시간비
	대피 인원	총대피 시간	대피 인원	총대피 시간	SOS	SIMULEX(sm-so)/sm	
강당	440	94.8	440	95.8	4.641	4.593	1.04%

Table 4. Comparison between developed program and SIMULEX(Decreasing escape walking speed is applied by the influence of fire smoke)

구조물 대상	SOS		SIMULEX		명/시간		시간비
	대피 인원	총대피 시간	대피 인원	총대피 시간	SOS	SIMULEX(sm-so)/sm	
강당	440	98.0	440	95.8	4.490	4.593	-2.29%

Table 4는 개발된 프로그램을 사용하여 가시도에 따른 대피속도 저하 모듈을 적용한 결과와 SIMULEX로 계산된 총 대피시간의 비교를 나타낸다. 본 개발된 계산 프로그램은 연기에 의한 가시도 저하에 기인한 대피속도 모듈이 내장되어 있으므로 SIMULEX로 얻어진 최종 대피시간 95.8sec 보다 2.29% 증가된 98sec로 계산되었다. 이러한 값은 가시도에 따른 대피속도 저하 미적용 결과와 비교하여 3.2sec 증가된 결과로서 대피자 개개인에 대한 위험성평가에 반영되는 절대시간의 증가를 의미한다.

5. 결론

본 연구의 결론은 다음과 같다.

- 1) 본 프로그램의 개발로 화재구역 통과 시 연기에 따른 가시도 저하 영향을 고려한 대피시간산정이 가능하다.
- 2) 건축물의 설비기준 등에 관한 규칙 [2006.2.13 497]의 제14조에 의거 6층 이상의 건축물에는 배연설비의 의무화에 따라 화재시 배연설비검증 수단으로 활용가능하다.
- 3) FDS의 코드로부터 맵에디터의 자동구성 되며 화재성상에 따라 대피자 위치에 따른 대피속도 구현이 가능하다.
- 4) 본 프로그램의 개발은 화재발생 시 인명피해를 최소화함은 물론, 대형화재사고 발생시 대피안정확확보에 기여한다.

감사의 글 : 본 연구는 2007년도 한국건설기술연구원 “국내외 건설구조물의 제·배연시스템 분석 연구”의 지원으로 이루어 졌으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) 이창민 외 다수, “제5차 한국인 인체치수조사사업 보고서(2차년도 최종보고서)”, 산업자원부 기술표준원, 2004.11.
- 2) 박창영 외 2명, “인체 모듈과 특성을 고려한 인간의 피난 행동에 관한 연구”, 대한건축학회 창립 60주년기념 학술발표대회논문집, pp. 231 ~ 234. 2005.
- 3) P.A. Thompson and E.W. Marcahnt, “simulex; Developing New Computing Modelling Techniques For Evaluation”, Proceedings of the Fourth International Symposium on Fire Safety Science, (T. Kashiwagi, ed.), International Association for Fire Safety Science, pp. 613~624, 1994.
- 4) Harold E. “Bud” Nelson and Frederick W. Mowrer “The SFPE handbook of Fire Protection Engineering, chapter Emergency Movement”, Third Edition, National Fire Protection Association, pp. 3-367 ~ 380, 2002.
- 5) E. D. Kuligowski, R. D. Peacock, Review of Building Evacuation Models, NIST Technical Note 1471, 2005.
- 6) Avron Barr, Edward Feigenbaum, The Handbook of Artificial Intelligence, William Kaufmann, 1981.
- 7) Richard E. Korf, Artificial Intelligence Search Algorithms, Algorithms and Theory of Computation Handbook, CRC Press, 1999.
- 8) Richard E. Korf, Space-efficient search algorithms, ACM Computing Surveys, Vol. 27, No. 3, pp. 337 ~ 339, 1995.
- 9) P. P. Das and P. P Chakrabarti, “Distance functions indigital geometry”, Information Sciences, Vol. 42, pp. 113 ~136, 1987.
- 10) R. E. Korf, Depth-First Iterative Deepening: An Optimal Admissible Tree Search, Artificial Intelligence, Vol. 27, pp. 97 ~109, 1985.