

건축물 화재에 따른 군중 피난 시뮬레이션 시스템 개발

이동호, 박종승*, 조준성*, 김정엽**

인천대학교 안전공학과

*인천대학교 컴퓨터공학과

**한국 건설기술연구원

Development of Crowd Evacuation Simulation System for Building Fire

Dong-Ho Rie, June-Seong Joe*, Jong-Seung Park*, Jung-Yup Kim**

Dept. of Safety Engineering, University of Incheon

*Dept. of Computer Science and Engineering, University of Incheon

**Korea Institute of Construction Technology

요 약

본 논문은 기존 개발된 재실자의 탈출 계획 및 예측 프로그램 개발에 대해 길 찾기를 위한 알고리즘으로는 Dijkstra 알고리즘^[5], Best-First Search 알고리즘^[6], Johnson 알고리즘^[7] 등이 있으며 가장 안정적으로 알고리즘 구현이 가능한 A*알고리즘^[8] 을 적용하였다. 따라서, 본 개발 프로그램은 재실자가 대피 목적지를 향한 최적의 길 찾기를 이용하여 가장 가까운 거리에 있는 탈출구를 효율적으로 찾을 수가 있으며 재실자의 사실감 있는 대피 이동 동선의 구현을 위해 기존의 경직된 경로를 매끄럽게 구현하였다. 탈출구는 흐름율과 정체 반경을 적용하여 재실자가 탈출구에 밀집하였을 경우 병목 현상이 발생하도록 하여 대피현상이 실제 상황과 유사하도록 프로그램을 구축하였다. 본 대피프로그램은 실제 건물의 CAD도면을 import 가능하도록 구축함으로써 대피평가시간을 절약할 수 있도록 하였다.

1. 서 론

최근 산업 발전과 인구의 급격한 증가에 따라 건축물은 고층화 대형화 되고 있다. 건축물의 규모가 커질수록 많은 유동인구 발생한다. 유동인구의 동시 발생과 고층화 대형화에 따라 건축물 설계에 있어서 화재 등과 같은 재난 발생 시 건물 내부의 재실자의 효율적 대피 유도 및 피해 여부를 예측하고 사전에 공간위험성을 제거할 수 있도록 설계에 반영하는 첨단방재기법이 요구된다.

본 연구는 이러한 건축물의 화재시 인명 피해를 최소화하기 위해 성능위주의 방화설계에 대한 대피자의 대피시간 및 이동특성에 대한 기초 데이터의 확보가 필수적이다. 재실자 공간이동 평가는 화재 거동 및 연기 이동과의 연계함으로서 정량적 화재위험성평가의 정확도를 증대시킬 수 있다. 기존 성능위주의 방화설계에 활용되고 있는 상용 대피 프로그램으로는 SIMULEX^[1], EXODUS^[2], EXITT^[3], BuildingEXODUS^[4] 등이 있다.

본 논문에서는 2차원 및 3차원 구조를 병행하여 건축물을 편집하고 건축물 내부에 사람들을 배치 가능한 구조를 갖는다. 이러한 2차원의 Viewer 기능은 사용자가 보다 쉽고 편리한 건축물을 생성할 수 있도록 CAD도면을 import하여 대피구조물이 생성 가능하도록 하였다. 또한 본 프로그램에서는 3차원 Viewer 기능을 제공함으로써 사용자에게 보다 사실감 있는 가상 현실 구현이 가능하도록 하였다. 실제 대피이동현상에 기초한 사실적 구현은 대피시간 산정에 영향을 끼치므로 본 논문에서는 대피시간의 정확도를 높이기 위한 방안으로 길찾기(path finding) 알고리즘, 경로 매끄럽기(path smoothing) 알고리즘, 병목현상(bottle neck)알고리즘을 적용함으로써 이동경로에 기초한 대피시간 산정을 체계화 하였다. 길 찾기를 위한 알고리즘은 Dijkstra 알고리즘^[5], Best-First Search 알고리즘^[6], Johnson 알고리즘^[7] 등이 있으며 본 연구에는 안정적으로 구현되는 A* 알고리즘^[8]을 적용 하였다. 피난 대상자는 A* 알고리즘에 의해 시뮬레이션에서 자동으로 목적지를 향한 최적의 길을 찾도록 구성되었다.

2. 본 론

본 프로그램 개발은 건축물의 구조를 생성하는 것을 우선으로 하였다. 건축물의 구조는 1.셀 단위의 편집 방법을 이용하여 사용자가 직접 편집하는 방법과 2. FDS의 코딩파일과 CAD의 DXF 파일을 읽어 들여 구축된 데이터를 직접 가져올 수 있는 방법으로 2분화 하였다. 건축물의 부속 구조물인 문, 계단은 완성된 화면에서 추가로 배치가 가능하도록 하였다. 문, 계단과 같은 위치지정 구조물은 최종 탈출 목적지로 사용되거나 탈출 목적을 위한 중간 경유로 사용되며 배치 완료 후 남성, 여성, 노인, 아이의 4가지 형태로 재실자를 구분하여 배치 가능하도록 구성하였다.

프로그램의 구동은 길찾기 알고리즘으로 분산 배치된 재실자들이 각자 가장 가까운 출구 또는 계단으로 인공 지능적으로 찾아 이동하도록 되어있으므로 최종목적지를 설정하면 길 찾기 알고리즘을 사용하여 경로를 설정하고 부드러운 경로 처리 알고리즘을 통해 생성된 경로로 이동한다. 프로그램의 전체 흐름도는 그림1과 같다.

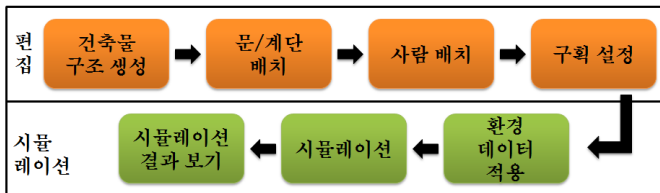


그림 2. 전체 시스템 흐름도

2.1 부드러운 경로 시뮬레이션

경직된 경로를 매끄럽게 하기위한 알고리즘으로 Catmull-Rom 알고리즘, B-Spline 알고리즘 등이 있으나 본 연구에서는 Bezier 곡선 알고리즘을 적용하였다. Bezier 곡선은 벡터 방식의 곡선을 형성하는 알고리즘이며 Bezier 곡선은 제어점(control point)이라고 하는 몇 개의 점들을 이용하여 형태를 만든다. 곡선의 최초의 제어점인 기점에서 시작하여 최후의 제어점인 종점에서 종료되며 기점과 종점 사이의 제어점이 곡선의 모양을 결정하게 된다. 기점에서 시작한 곡선은 인접한 제어점 방향으로 진행하므로 그 주변에 있는 제어점의 영향을 받아 최초의 제어점 위를 지나가지 않고 다음의 제어점 방향에 곡선이 형성된다. 수학적으로 N차 Bezier 곡선은 식 (1)과 같이 정의된다.

$$\vec{B}_N(t) = \sum_{k=0}^N \vec{P}_{k_N} C_k t^k (1-t)^{N-k} \quad (0 \leq t \leq 1) \quad (1)$$

t가 0에서 1까지 일 때, 벡터 \vec{B}_N 이 그리는 궤적이 Bezier 곡선이 되며 이때 벡터 \vec{P}_k 는 제어점이고, ${}_N C_k$ 는 조합 $N!/k!(N-k)!$ 을 의미한다.

본 연구에서는 2차 Bezier 곡선 알고리즘을 사용하였으며 식 (2)에 2차 Bezier 곡선을 수식으로 나타내었다. 식에서 P_0, P_1, P_2 는 경로상의 제어점을 의미한다.

$$\vec{B}(t) = (1-t)^2 P_0 + 2t(1-t)P_1 + t^2 P_2 \quad (0 \leq t \leq 1) \quad (2)$$

따라서 2차 Bezier 곡선은 3개의 제어점으로 구성되므로 부드러운 이동경로를 만들어 낼 수 있게 된다. 길 찾기를 통해 생성된 경직된 경로들을 매끄럽게 하기 위한 절차는 다음과 같다.

1. 연속하는 세 점 P_1, P_2, P_3 이 있고 P_1 의 좌표를 (x, z) , P_3 의 좌표를 (x', z') 라고 할 때, $x \neq x', z \neq z'$ 인 P_2 를 찾는다.
2. P_2 와 P_1 의 중점 P_2' 와 P_2 와 P_3 의 중점 P_2'' 를 찾는다.
3. 구해진 P_2', P_2, P_2'' 를 10등분하여 새로운 경로를 생성한다.
4. 새롭게 생성된 경로를 기존 경로의 P_1 과 P_3 사이에 삽입하고 P_2 를 제외시킨다.

그림 3. 경직된 경로를 매끄럽게 하는 절차

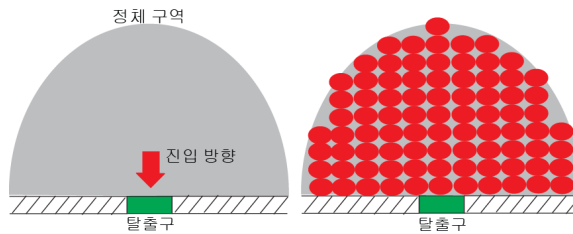
2.2 정체 현상의 시뮬레이션

사실적인 시뮬레이션을 위해 탈출구의 크기에 따라 탈출 가능 인원의 제한이 필요하게 되며 병목현상의 구현은 실제적인 대피 상황을 재현하기 위해 반드시 필요한 요소이다.

병목현상의 구현은 첫번째로 문, 계단 등 탈출구에 따른 흐름율(flow rate)을 적용한다. 흐름율이란 person/(sec · m)의 단위로 정의되며 단위시간(sec)에 단위길이(m)를 몇 명이

이동할 수 있는 가로 정의된다. 따라서, 1m 폭의 문에서 0.1명/(sec · m)의 값으로 설정하게 되면 첫 번째 사람이 통과한 후 두 번째 사람은 10초가 지날 때까지 탈출구를 통과할 수 없게 됨을 의미한다. 이와 같이 병목현상의 구현은 흐름율을 적용하여 시간당 통과 가능 인원을 제한함으로써 현재 대피자가 출구를 통과할 때까지 그 밖의 대피자는 출구 직전 경로에서 정지되므로 병목현상의 구현이 가능하다.

두 번째로 필요한 것은 정체 반경과 정체 반경에 따른 정체 경로를 구하는 것으로서 먼저, 탈출구에 정체 반경을 적용하였다. 정체 반경은 병목현상이 발생하는 정체 구역을 설정하기 위해 필요하며 사람이 정체 반경 안에 들어와 있을 경우에만 발생하도록 설정하였다. 그림3은 정체 반경을 나타내며 정체 구역은 탈출구의 출입 방향을 고려하여 가능한 방향에만 생성하도록 설정하였다.



**그림 4. 탈출구의 정체 구역(좌)과
정체 구역내에 생성된 정체 경로들(우)의 모습**

정체 구역이 확정되면 정체 구역 내에 정체 경로들을 생성한다. 경로들은 남성, 여성, 노인, 아이 중 가장 큰 크기를 이용하여 경로들 간의 간격을 설정한다. 최초 기준 경로는 최후 대피 경로를 타나낸다. 그림 3(우)는 생성된 정체 경로들의 모습을 나타내며 빨간색의 경로들안에서는 기준속도 이하의 값으로 일정시간 이상 지체 될 시 옆걸음을 고려하게 된다. 시뮬레이션이 진행되면 정체 구역에 진입한 사람은 자신의 기존 계산된 경로가 아닌 정체 경로를 통해서만 이동이 가능하다. 경로 이동시에는 충돌을 고려하여 비어있는 경로로만 이동이 가능하며 정체구역에서의 이동 순서는 정체 구역에 진입한 순서에 따른다. 이러한 정체 현상의 구현은 재실자의 체류시간을 증가에 따른 탈출시간의 산출에 효과적으로 적용가능하다.

3. 실험 결과

그림 4는 CAD 파일을 통해 작성된 경기장 설계도면을 DXF로 변환 후 import한 결과를 나타낸다. 본 프로그램은 사용자가 직접 건물구조를 생성할 수 있고 실제 설계 도면을 이용하여 복잡한 건물을 쉽게 구축 가능할 수 있다. 그림 5는 생성된 건물 구조를 3차원으로 변화시킨 결과를 나타내며 3차원 viewer 기능은 시뮬레이션에 사실감을 증대 시켜주는 역할을 한다.

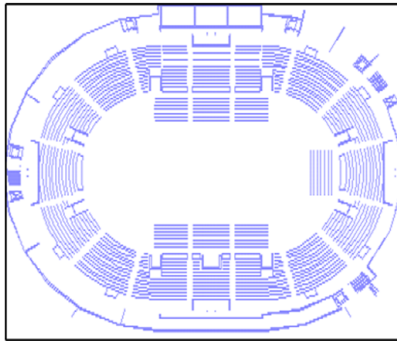


그림 5. DXF 파일을 불러들여
생성된 경기장의 모습

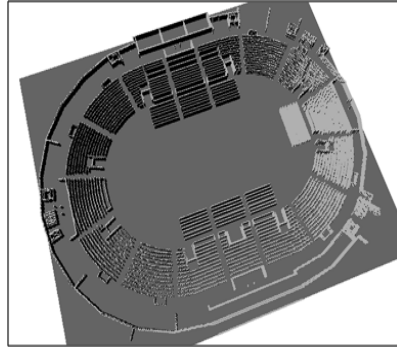


그림 6. 3차원 경기장 모습

시뮬레이션이 시작되면 길 찾기를 통해 경로 생성 후 이동을 하게 된다. 그림 6은 경직된 경로를 가지는 모습과 본 논문에서 제안한 방법을 통한 부드럽게 생성된 경로의 차이를 나타내며 경직된 경로에 비해 매끄럽게 생성된 경로는 대피자들이 이동시 부드럽고 자연스럽게 이동이 가능하게 됨을 알 수 있다.

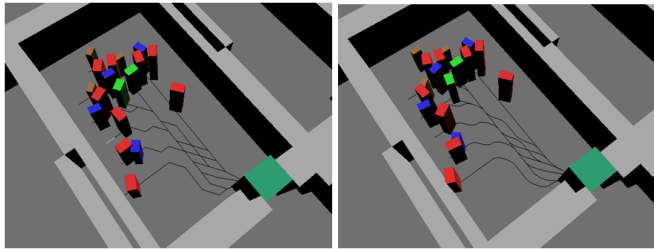


그림 7. 길 찾기를 통해 생성된 최초의 경직된
경로(좌)와 매끄럽게 변형된 시뮬레이션 경로(우)의 모습

그림 7은 본 연구에서 도입한 병목현상을 구현한 결과를 나타낸다. 본 결과는 정체반경을 5m로 설정하여 생성된 병목구역 내에 정체 경로들이 있고 정체 경로들을 이용하여 병목현상이 발생하는 결과를 나타낸다. 병목현상의 구현은 정확한 이동현상의 계산을 위하여 해결되어야 할 한 요소이며 병목 현상을 통해 출구를 통과한 대피 현상의 가시화 구현이 가능하다.

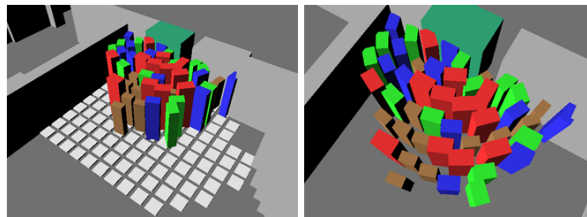


그림 8 병목 현상 모습

4. 결론

본 논문은 재실자 대피에 따른 위험성 평가의 일환으로 보다 현실적인 대피의 시뮬레이션이 가능하도록 다양한 알고리즘을 적용한 결과 다음의 결론을 얻었다.

1. 대피현상의 현실감을 높이기 위해 길 찾기, 경로 매끄럽게 하기, 병목현상을 구현하였으며 길 찾기를 위한 A* 알고리즘, 경로를 매끄럽게 하기 위해 Bezier 곡선 알고리즘이 적용된 결과는 매우 효과적임을 확인하였다.

2. 병목현상 구현 알고리즘을 통해 실제 상황과 유사한 대피시뮬레이션 결과를 얻을 수 있었다.

3. 실제 CAD건물도면을 import하여 시뮬레이션이 가능함으로서 대피평가시간이 단축되었다.

4. 향후, 사실감을 증대시키기 위해 길 찾기에 사용되는 A* 알고리즘의 속도를 효율적으로 증대 시킬 방안이 필요하다.

참고 문헌

1. Thompson P. A., Marchant E. W., "Testing and Application of the Computer Model 'SIMULEX'," Fire Safety Journal, Vol. 24, No. 2, pp. 149-166, 1995.
2. E. R. Falea and J. M. P. Galparsoro, "EXODUS : An Evacuation Model for Mass Transport Vehicles," Fire Safety Journal, Vol. 22, pp. 341-366, 1994.
3. Levin, B. N., "EXITT - A Simulation Model of Occupant Decisions and Actions in Residential Fires : Users Guide and Program Description," US Department of Commerce, Gaithersburg, MD, 1987.
4. Gwynne S., Galea e. R., Lawrence P. J., Filippidis L., "Modeling Occupant Interaction with Fire Conditions Using the BuildingEXODUS Evacutaion Model," Fire Safety Journal, Vol 36, No. 4, pp. 327-357, 2001.
5. E. W. dijkstra, "A Note on Two Problems in Connection with Graphs," Numerische Mathematik, pp. 269-271, 1959.
6. Russel S. J., Norvig P., "Artificial Intelligence : A Modern Approach 2nd Edition," Pearson Education, Inc, pp. 94-95, 2003.
7. Donald b. Johnson, "Efficient Algorithms for Shortest Paths in Sparse Networks," Journal of the ACM, Vol. 24, No. 1, pp. 1-13, 1977.
8. P. E. Hart, N. J. Nilsson, B. Raphael, "A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths," IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics, SSC4, No. 2, pp. 100-107, 1968.
9. Catmull, E., and Rom, R. "A Class of Local Interpolating Splines," Computer Aided Geometric Design, pp. 317-326. 1974.