

건물내 전체 인원분포를 고려한 실내 보행자 최적 대피모형

An Optimal Model for Indoor Pedestrian Evacuation considering the Entire Distribution of Building Pedestrians

곽수영* · 남현우** · 전철민***

Kwak, Suyeong · Nam, Hyunwoo · Jun, Chulmin

요 旨

일반적인 실내 보행자 대피모형 및 대피시뮬레이터는 보행자 특성(예, 이동속도, 방향, 기동성, 성별, 나이, 몸무게, 신체사이즈 등)을 고려하여 개개인이 출구까지 대피할 때의 최단거리나 최소시간, 즉, 국지적(local)인 해를 구한다. 따라서 이러한 모델을 이용해서는 대상 공간 전체(예, 건물 전체)의 재실자들이 모두 대피한다고 할 때, 전체 대피시간을 줄이는 전역적인 최적해를 얻기 힘들다. 본 연구는 건물내의 전체 인원분포를 고려하여 건물 내 재실자들의 총 대피시간을 최소화할 수 있는 전역적인 실내 보행자 최적 대피모형을 제시하고자 한다. 총 대피시간을 줄이는 전역적인 최적해는 다항식으로 찾기 힘든 문제로, 본 연구에서는 메타 휴리스틱기법 중 유전자 알고리즘을 이용하였다. 다양한 분포 상황을 염색체로 표현하고 해를 반복적 필터링하여 최적에 가까운 대피경로 및 대피시간을 산출하였다. 설계된 알고리즘을 표현하고 실험하기 위해서 CA(cellular automata) 기반의 대피 시뮬레이터를 이용하였으며, 다양한 실내 인원분포에 적용하여 그 결과를 제시하였다.

핵심용어 : 실내 대피, 대피경로, 유전자 알고리즘, 최단 경로, 대피시뮬레이션

Abstract

Existing pedestrian and evacuation models generally seek to find locally optimal solutions for the shortest or the least time paths to exits from individual locations considering pedestrian's characteristics (eg. speed, direction, sex, age, weight and size). These models are not designed to produce globally optimal solutions that reduce the total evacuation time of the entire pedestrians in a building when all of them evacuate at the same time. In this study, we suggest a globally optimal model for indoor pedestrian evacuation to minimize the total evacuation time of occupants in a building considering different distributions of them. We used the genetic algorithm, one of meta-heuristic techniques because minimizing the total evacuation time can not be easily solved by polynomial expressions. We found near-optimal evacuation path and time by expressing varying pedestrians distributions using chromosomes and repeatedly filtering solutions. In order to express and experiment our suggested algorithm, we used CA(cellular automata)-based simulator and applied to different indoor distributions and presented the results.

Keywords : Indoor Evacuation, Evacuation Path, Genetic Algorithms, Shortest Path, Evacuation Simulation

1. 서 론

대규모 건축물들이 증가함에 따라 화재 등 재난 발생으로 건축공간에서 방재에 대한 관심이 증가하고 있다. 따라서 재난이 발생했을 경우, 인명피해를 최소화하기 위한 방법으로 사전에 모의로 재난 발생 및 대피상황을 파악하고 재실자의 대피경로, 대피양상에 대한 분석이 가능한 대피시뮬레이터의 연구가 진행되고 있다(Blue

and Adler 1999; Burstedde et al., 2001; Klupfel et al., 2002). 대피시뮬레이터는 건축물의 공간적인 구조와 재실자의 물리적 특성, 심리적 특성을 반영하여 건물 내 재실자의 다발적인 움직임을 산출하고 결과를 제시(김운형과 김종훈, 2004; 김치겸 외, 2009, 서동구 외, 2008, 신동철과 박형주, 2008)하며, 더 나아가서 시뮬레이션 결과를 토대로 재실자들에게 대피경로를 안내하는 라우팅 또한 제공한다.

2012년 4월 10일 접수, 2012년 6월 4일 채택

* 정희원 · 서울시립대학교 공간정보공학과 박사과정(ksykk0@uos.ac.kr)

** 서울시립대학교 공간정보공학과 석사과정(nhw612@uos.ac.kr)

*** 교신저자 · 정희원 · 서울시립대학교 공간정보공학과 교수(cmjun@uos.ac.kr)

그러나 대부분의 대피시뮬레이터는 개인이나 일부 집단의 대피시간을 줄이기 위한 국지적(local) 해를 구한다. 모든 보행자들의 상황을 고려하는 것이 아니라 각각의 보행자들마다의 최단거리 혹은 최소시간에 따른 대피경로를 산출하게 된다. 이는 개개인의 움직임에 집중되어 건물 전체에 따른 최적에 가까운 결과를 얻기에 한계가 있다. 따라서 건물내 재실자들의 총 대피시간을 줄이는 전역적(global)인 결과를 산출하기에는 어려움이 있다.

본 연구에서는 실내 대피상황에서 총 대피시간을 최소화하여 모든 재실자들이 빠르게 대피할 수 있는 대피경로를 산출하는 실내 보행자 대피모형을 제시하고자 한다. 다수의 방과 다수의 출구로 이루어진 건물이 있을 때, 재실자들은 일반적으로 실내 공간내에 불균등하게 분포하게 된다. 이 때, 어떤 방의 재실자가 어떤 출구로 대피하느냐에 따라서 총 대피시간에 영향을 주게 된다. 따라서 본 연구는 이러한 공간들과 대피 출구들 간의 다양한 조합들 중에서 최적의 조합을 찾아내고, 탐색된 조합에 따른 대피경로 및 대피시간을 산출하고자 한다. 이를 적용하기 위해 대피상황을 하나의 해로 표현하고, 적합도 평가와 설계전략을 통해 좋은 해를 탐색하는 유전자 알고리즘을 이용한다. 실내 대피에 관련된 모든 조건과 변수들을 고려하여 수학적 함수로 모형화하고 이를 통한 최적 대피경로 산출은 현실적으로 불가능하기 때문에, 메타휴리스틱기법인 유전자 알고리즘을 이용하여 이를 해결한다. 실내공간을 격자형으로 분할하고 재실자들의 움직임을 계산하는 CA기반의 Floor field model을 기본 보행모델(Kirchner and Schadschneider, 2002)로 하고, 이를 기반으로 산출한 대피시뮬레이션 결과를 유전자 알고리즘의 파라미터로 이용한다. 즉, 본 연구에서는 CA기반 보행모델에 유전자 알고리즘을 적용하여 대피에 유리한 전역적인 해를 탐색하여 재실자의 분포에 따른 방 별 대피경로 및 우회경로와 같은 구체적인 대피모형을 제시한다. 이는 개개인의 보행자에게는 최적의 대피결과가 아니라 하더라도 전역적인(global) 대피시간의 감소를 가져오는 최적에 가까운 대피모형이라 할 수 있다.

본 논문은 2장 기존 관련연구 분석에서 최적화기법에 대한 분석을 수행한다. 3장에서는 유전자 알고리즘을 이용하여 최적해를 얻기 위한 설계 및 각 연산을 정의한다. 또한, CA 시뮬레이터와 유전자 알고리즘의 연계기법을 제시한다. 4장에서는 본 연구에서 제시한 대피모형을 적용·테스트를 수행한다. 임의의 공간을 생성하여 기존 보행모델을 이용하여 산출한 시뮬레이션 결과와 실내 보행자 최적 대피모형을 통해 산출한 결과의 비교·분석을 수행한다. 위를 종합한 본 연구의 전

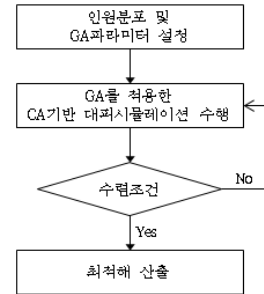


Figure 1. Flow chart

체적인 흐름도는 Figure 1과 같다.

2. 기존 관련연구 분석

최적화란 주어진 제약조건을 위배하지 않으면서 목적함수를 최대화, 최소화, 목표화하는 과정이다. 최적화 기법에는 크게 수학적 기법(Mathematical Programming), 발견적 기법(Heuristic), 탐색적 기법(Search) 등이 있다. 수학적 기법은 선형계획법(Linear programming), 비선형계획법(Nonlinear programming), 동적계획법(Dynamic programming)이 있다. 발견적 기법(Heuristic)은 정보가 완전하지 않은 상황에서 시행착오를 거치거나 경험을 통해 문제를 해결하는 기법이다. 이러한 발견적 기법(Heuristic)에는 해결하고자 하는 문제마다 자기 그 특성에 맞추어 개발해야하는 어려움이 있다. 이에 특정문제가 갖는 정보에 크게 구속되지 않고 다양한 문제에 적용가능한 상위수준의 발견적 기법을 메타 휴리스틱 기법(Meta-Heuristic)이라 한다. 메타 휴리스틱 기법에는 Genetic Algorithm, Simulated Annealing, Tabu Search 등이 있다(김여근 등, 1997).

본 연구는 건물 내 다수의 출구가 존재할 때, 실내 인원분포를 고려하여 총 대피시간을 최소화하는 대피시간 및 경로를 찾는 것이 목적이다. 이를 해결하기 위해서 연역적인 해석방법으로 접근하려는 연구들이 일부 진행되었다. 교통공학의 All-or-Nothing 기법으로 부하량을 계산하는 대피알고리즘에 관한 연구(이현진, 2011), 공간을 네트워크 구조로 구성하여 병목 지역을 추정하는 연구(박인혜와 이지영, 2009), 거주밀도와 출구의 유출속도를 고려하여 대피자의 경로선택을 유도하는 연구(윤성환 등, 2009) 등이 있다. 그러나 대피에 일어나는 모든 요소를 수식으로 해석하기에는 한계가 있으며 특히, 복잡한 공간적인 구조와 재실자 분포에 따라 유동적인 최적 대피경로를 산출하기에는 한계가 있다. 따라서 연역적 최적화 기법이 아닌 귀납적으로

접근하는 메타 휴리스틱기법을 이용해서 해결하고자 한다.

본 연구에서는 최적화 기법 중 메타 휴리스틱기법에 속하는 유전자 알고리즘을 이용하여 최적화문제를 해결하고자 한다. 유전자 알고리즘은 풀고자 하는 문제를 자연의 진화과정과 유전법칙을 모방하여 염색체로 표현하고, 해공간을 탐색하여 우수해를 찾아내고 선택, 교배, 돌연변이, 진화 등 연산에 따라 세대를 거듭하여 가장 우수한 해를 찾아내는 기법이다. 유전자 알고리즘의 설명 및 본 연구에의 적용은 3장에 자세히 설명되어 있다.

3. 유전자 알고리즘을 이용한 대피모형 설계

3.1 유전자알고리즘

유전자 알고리즘(Genetic Algorithm : GA)은 Holland (1975)에 의해 개발된 병렬적이고 전역적인 알고리즘으로 다윈이 주장한 자연 진화 법칙인 적자생존과 자연도태의 원리를 토대로 해 공간에 대한 확률적 탐색을 통해 복잡한 문제의 근사 최적해를 비교적 합리적인 시간에 제공하는 메타 휴리스틱 기법이다(나호영과 이상현, 2008). 염색체(chromosome)는 Figure 2와 같이 복수 개의 유전자(gene)로 구성되며 개체라고도 한다.

유전자 알고리즘은 진화 전략에 기반을 두며, 각 개체는 주어진 문제를 해결하는 잠정적인 해로 표현되고 이들을 점차적으로 변형함으로써 점점 더 좋은 해들을 생성한다(De Jong, 1975; Grefenstette, 1986; Goldberg, 1989). 유전자 알고리즘을 어떤 문제에 적용하기 위해 개체표현과 적합도함수를 정의해야 하며, 선택, 교배, 돌연변이, 설계상수(예를 들어, 개체군의 크기, 교배확률, 돌연변이 확률, 수렴기준 등) 등을 설계해야 한다.

유전자 알고리즘 연산과정은 Figure 3과 같다.

- ① 설계상수를 결정
- ② 대상문제를 개체로 표현
- ③ 개체군의 크기(M)만큼 초기집단을 생성
- ④ 초기집단 개체들을 적합도 값으로 평가
- ⑤ 적합도 값에 비례하여 다음 세대에서 선택될 확률을 부여

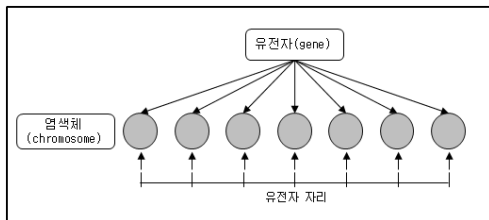
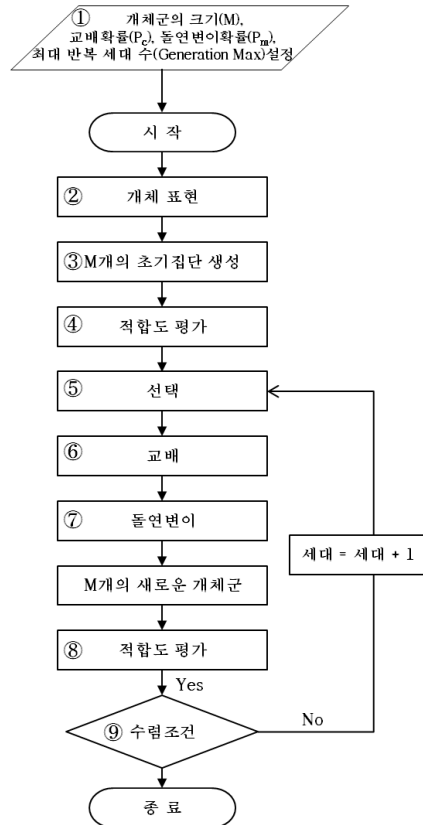


Figure 2. Chromosome, gene, and gene locus



출처: 조영임(2009)

Figure 3. Genetic algorithms process

- ⑥ 교배확률에 의해 선택된 부모의 유전정보를 교환하여 새로운 정보를 갖는 자식 개체를 생성
- ⑦ 돌연변이 확률로 선택된 개체의 각 유전자 단위로 유전자를 변형
- ⑧ 새롭게 생성된 개체군을 재평가
- ⑨ 새롭게 생성된 자식세대가 수렴조건을 만족하면 종료, 그렇지 않으면, ③단계 과정부터 반복하여 초기에 설정한 수렴범위를 만족할 때까지 계산을 수행

3.2 유전자 알고리즘 설계

3.2.1 개체표현

하나의 염색체는 각 방 별로 지정된 출구로 구성되어 하나의 대피양상을 나타내고 이는 하나의 해가 된다. 출구의 배열로 이루어진 염색체는 다양한 대피경로를 나타낸다. 염색체의 길이는 방의 개수, 유전자의 종류는 출구의 종류가 된다.

Table 1. Parameters setting

Para-meter	수렴기준	개체군 크기	교배 확률	돌연변이 확률
Values	최소 반복 세대수 : 20 최소 연속 1등 회수 : 10	20	75%	2%

출처: 곽수영(2011)

3.2.2 설계상수 설정

유전자알고리즘의 설계상수는 Table 1과 같다. 이미 연구되어 실험에 의해 설계된 초기 설계상수를 이용하여 실험을 수행한다.

3.2.3 초기집단 생성

설계상수에 의해 정해놓은 개체군의 크기만큼 염색체들의 초기집단이 생성된다. 모집단 내에서 랜덤하게 염색체들이 추출되어 초기집단이 생성된다.

3.2.4 적합도

CA기반 보행모델을 이용하여 time step을 통해 보행자들이 대피하는데 걸리는 시간을 time tick으로 나타낸 연구가 진행된 바 있다(Kirchner, 2002; 조용주 등, 2009). 이렇게 계산된 값(time tick)은 대피시간에 비례하기 때문에 본 연구에서는 이를 염색체를 평가하는 적합도 값으로 이용한다. 적합도 값을 통해 짧은 대피시간은 좋은 해, 긴 대피시간은 안 좋은 해로 간주하여 해당 세대에서 결정된 염색체들이 다음 세대로 진화하기 적합한지, 아니면 도태되어야 할지를 결정한다.

3.3 유전 연산자 처리기법

3.3.1 선택

선택연산은 각 세대에서 각각의 개체가 가지는 적합도에 따라 그 개체를 선택하여 복제하는 것이다. 본 연구는 염색체들 중에서 대피시간이 빠른 염색체 즉, 상위 1등은 보존되어야 하므로 엘리트 보존 선택법을 이용하여 세대가 반복되어도 가장 빠른 대피시간을 갖는 염색체가 보존되도록 하였다. 나머지 염색체들은 룰렛 휠 선택법(roulette wheel selection)을 이용한다. 룰렛 휠 선택법은 적합도에 비례해서 선택확률을 부여하는 방법으로써 본 연구에 적용시키기 위해서 대피시간이 작은 값일수록 더 높은 선택확률을 부여해야 하므로 변형된 룰렛 휠 선택법을 이용하였다.

3.3.2 교배

교배연산은 두 개의 부모 염색체로부터 특성을 결합

하여 자손을 생성하는 것이다. 본 연구는 교배가 이루어진다고 해도 개체의 적합도 값, 즉 대피시간이 더 좋아지리라는 보장이 없으므로 높은 교배확률인 75%로써 다양한 개체들이 생성될 수 있도록 하였다.

3.3.3 돌연변이

돌연변이 연산은 교배연산과 함께 개체군의 다양성을 제공하며 유전자들을 무작위로 바꾸는 과정이다. 교배연산 후, 비트별로 수행되며 해당비트의 유전자를 바꾸어 준다.

3.4 유전자 알고리즘을 적용한 대피시뮬레이터

본 연구에서는 CA기반 대피시뮬레이터에 유전자 알고리즘을 적용하여 최적에 가까운 대피시간 및 경로를 산출하기 위해 시뮬레이터를 구현한다. 시뮬레이터 인터페이스 화면은 Figure 4와 같다. 시뮬레이션 실행 전, 각 방 재실자 인원 및 CA 보행모델에 대한 각종 파라미터들과 GA의 파라미터들을 설정할 수 있게 구성하였다. Figure 3을 보면, 설정한 세대수, 최소 반복 세대수, 연속 최소 1등 회수, 교배확률, 돌연변이 확률과 같은 설계상수를 확인할 수 있으며(①), 현재 산출되고 있는 염색체와 시뮬레이터 소요시간 등을 확인할 수 있다(②). 또한, 설계한 실내공간을 시각화하였으며, 설정한 인원분포와 설계상수에 따른 재실자들의 대피모습을 가시화하였다(③). 여기에 세대별 염색체, 대피시간, 선택확률 등도 함께 포함시켰다(④). 이 때, 열은 회색으로 표시된 곳은 엘리트 보존 법칙에 의해 보존된 염색체를 나타낸 것이며, 진한 회색으로 표시된 곳은 돌연변이에 의해 생성된 염색체를 나타낸다. 시뮬레이션이 시작되면, 방 별 지정된 출구로 이동하는 보행자들의 모습을 볼 수 있으며, 수렴기준에 도달할 때까지 세대별로 반복 수행되고, 수렴기준을 만족하는 최종 시뮬레이션 결과가 산출된다. 방 별 최적대피경로가 염색체

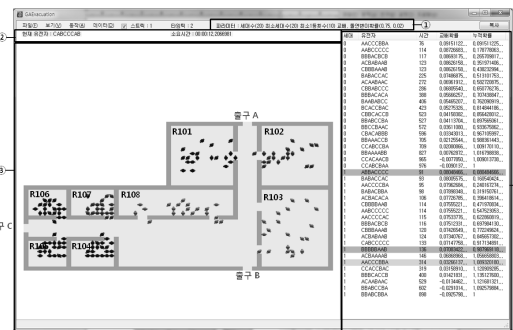


Figure 4. Evacuation simulation interface applying GA

로 산출되며 대피시간 및 방 별 지정된 대피출구를 확인할 수 있다.

4. 적용테스트

4.1 건물유사구조 설계 및 시나리오 설정

보행자가 위치한 그리드셀(grid cell)에서 출구까지 최단거리로 계산되어 수행되는 CA기반의 대피시뮬레이션 결과와 GA를 이용하여 산출된 검색체의 대피시간, 대피경로의 결과를 비교한다. 테스트를 위한 공간 구조는 Figure 5와 같다.

3개의 출구 A, B, C와 8개의 방 R101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108로 건물과 유사한 구조로 설계하였다. Figure 5와 같은 공간구조에서 재실자 분포에 따른 최적 대피경로를 산출하기 위해 Table 2와 같이 CASE를 설계하였다. CASE 1은 모든 방에 재실자가 각각 20명씩 고르게 분포한 경우이다. CASE 2는 R105, R106 각각 45명씩 설계하여 출구 C에 대피자가 병목 되어있는 경우로 설계하였다. CASE 3은 CASE 2에 특정 한방인 R103에 재실자가 150명이 있어 출구 B와 C에 병목이 발생하는 경우 대피양상을 산출하기 위해 설계하였다.

4.2 실험결과 및 분석

CASE별로 GA를 적용하지 않았을 경우와 적용했을 경우로 나누어 적합도가 가장 좋은 검색체를 도출하고 그 검색체의 대피시간 및 검색체가 가지는 대피경로를 산출한 결과는 다음과 같다.

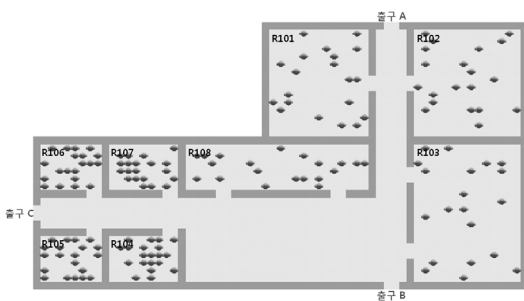


Figure 5. The spatial structure for testing

Table 2. Cases according to the Occupants distribution

	101	102	103	104	105	106	107	108	총
	호	호	호	호	호	호	호	호	인원
CASE 1	20	20	20	20	20	20	20	20	160
CASE 2	20	20	20	20	45	45	20	20	210
CASE 3	20	20	150	20	45	45	20	20	340

CASE 1의 경우, 결과는 Figure 6과 같다. 재실자가 각 방에 20명씩 모두 고르게 분포한 경우로 출구별 부하량이 고르게 걸리도록 설정한 것이다. GA를 적용하지 않을 때 최단거리에 있는 출구로 이동하였고, 총 대피시간은 98로 산출되었다. 그러나 GA를 적용하였을 경우 R104에 있는 재실자를 출구 B로 대피하는 결과가 도출되었고, 이 경우 총 대피시간이 72로 산출되었다.

CASE 2의 경우, 결과는 Figure 7과 같다. R105, 106에 45명으로 출구 C에 과부하가 걸리도록 설정한 경우인데, GA를 미적용할 경우에는 인원분포에 상관없이 CASE 1과 마찬가지로 재실자들이 이동하게 되고, 총 대피시간은 148로 산출되었다. GA를 적용한 경우에는 R104, R107의 재실자는 출구 C로 이동할 경우 이미 부하가 많이 걸려있기 때문에 출구 B로 우회할 때, 더 좋은 대피시간이 산출됨을 확인할 수 있었고, 총 대피시간은 103으로 산출되었다.

CASE 3은 R103에 재실자를 150명 설정하여 출구 B에 과부하를 유도하고, R105, R106에도 45명의 재실자를 설정하여 출구 C에도 과부하를 유도한 경우이다. 그 결과는 Figure 8과 같다. GA를 적용하지 않았을 경우 R108에 있는 재실자의 대부분은 최단거리에 있는 출구 B로 나가기 때문에 R103에 있는 150명의 재실자와 합쳐져 출구 B에 대한 과부하를 더욱 가중시키게 되고 총 대피시간이 184로 산출된다. 그러나 GA를 적용했을 경우 R104, R108의 재실자가 과부하가 걸려있

		CASE 1
	시간	98
	검색체	-
GA 미적용	산출 대피 경로	
	시간	72
	검색체	AABBCCCB
	산출 대피 경로	

Figure 6. Test results applied to GA in CASE 1

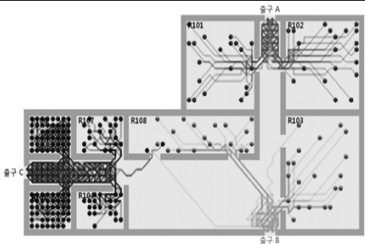
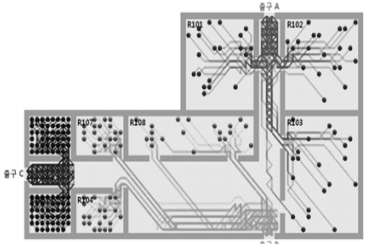
		CASE 2
GA 미적용	시간	148
	염색체	-
	산출 대피 경로	
GA 적용	시간	103
	염색체	AAABCCBB
	산출 대피 경로	

Figure 7. Test results applied to GA in CASE 2

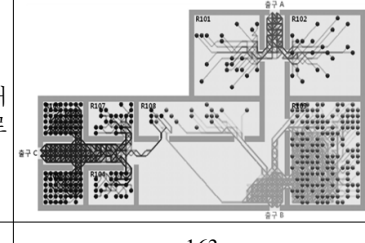
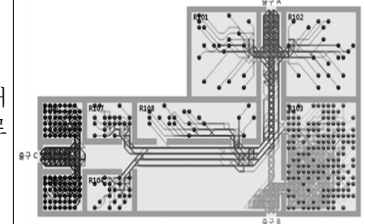
		CASE 3
GA 미적용	시간	184
	염색체	-
	산출 대피 경로	
GA 적용	시간	163
	염색체	AABACCAA
	산출 대피 경로	

Figure 8. Test results applied to GA in CASE 3

는 출구 B, 출구 C보다는 부하가 적은 출구 A로 우회하여 대피하는 경우의 해가 계산되었고, 총 대피시간은 163으로 산출되었다.

5. 결론

본 연구는 재실자들의 인원분포에 따른 다양한 대피 상황에서 유동적이고 전역적인 최적 대피경로를 산출하기 위한 것이다. 최적 대피경로 산출은 하나의 다항식으로 찾기 힘든 문제로, 본 연구에서는 메타 휴리스틱 기법 중 유전자 알고리즘을 이용하여 다양한 대피양상을 염색체로 표현하여 이를 반복적으로 필터링하여 최적에 가까운 해를 얻을 수 있게 하였다. 제시된 알고리즘은 CA기반 대피시뮬레이터를 이용하여 보행자들의 움직임을 모형화하고, 대피시간 및 대피경로를 산출한다. 기존 CA기반 보행알고리즘은 최단거리에 있는 출구로 보행자들이 대피하도록 계산되는데, 이는 출구에 과부하를 유발시킬 수 있음을 실험을 통해 확인할 수 있었고, GA를 적용하면 출구의 과부하를 최소화하고, 총 대피시간을 줄일 수 있는 경로를 산출할 수 있었다.

본 연구의 특징은 크게 두 가지로 정리할 수 있다. 첫째, 기존 CA기반 대피모델에 유전자 알고리즘을 적용하여 최단거리에 있는 출구로 대피경로가 산출되는 것이 아니라 우회하더라도 총 대피시간을 최소화하는 경우를 탐색하여 인원분포에 따른 최적에 가까운 대피시간 및 대피경로를 산출하는 기법을 제시하였다. 둘째, 공간별 인원배치를 달리하며 인원분포 상황에 따라 서로 다른 최적 대피경로를 산출할 수 있다. 기존 CA기반 대피모델은 인원분포에 대한 고려를 하지 않기 때문에 인원분포가 변하더라도 언제나 같은 대피경로를 산출하게 되지만 본 연구에서는 설정된 인원분포에 따라 최적에 가까운 대피경로를 산출하게 된다.

향후 실시간 인원감지센서와 연동하는 기술로 발전한다면, 실시간 인원분포에 따른 최적에 가까운 대피경로 산출에 활용 가능할 것이다. 또한, 본 연구에서는 인원분포에 따라 대피경로를 탐색하는 기본적인 알고리즘을 제안하는데 한 방의 재실자는 하나의 출구로 이동하도록 가정하였다. 이는 중앙관제형 가변유도등, 유도음과 같은 시스템과 연동하여 각 방 별로 서로 다른 대피경로안내가 가능할 것이다.

감사의 글

이 논문은 공간정보 전문인력 양성사업의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

참고문헌

1. 박수영, 2011, 유전자 알고리즘을 이용한 실내 보행자 최적 대피모형, 석사학위논문.
2. 김여근, 윤복식, 이상복, 1997, 메타 휴리스틱, 영지문회사.
3. 김운형, 김중훈, Michael Spearpoint, 2004, "Simulex 모델의 피난개시시간 분석", 한국화재소방학회 추계학술논문발표회 논문집, pp.252-257.
4. 김치겸, 이성원, 허남건, 남성원, 2009, "화재 발생 지하철 역사에서의 여객 대피 해석에 관한 연구", 대한설비공학회 하계학술대회 논문집, pp.142-147.
5. 나호영, 이상헌, 2008, "유전자 알고리즘을 이용한 도시 공간형태별 입지선정 모델", 한국시뮬레이션학회지, 제17권, 제3호, pp.1-109.
6. 박인혜, 이지영, 2009, "시공간 데이터베이스를 활용한 실내공간 최적경로 탐색", 한국지형공간정보학회 학술대회, pp.211-212.
7. 서동구, 황은경, 황금숙, 조정훈, 권영진, 2008, "EXODUS, SIMULEX를 활용한 피난모델 분석에 관한 연구", 한국화재소방학회 춘계학술논문발표회 논문집, pp.33-36.
8. 신동철, 박형주, 2008, "출구유출성능 기반의 통과 피난자 적정분배기법을 적용한 최적피난모델링기법의개발", 대한건축학회지, 제24권, 제12호, pp.345-352.
9. 윤성환, 이정재, 이민정, 2009, "buildingEXODUS를 활용한 행위기반 피난시뮬레이터의 신체 및 심리적 변수에 대한 민감도 분석", 대한건축학회지, 제25권, 제9호, pp.347-355.
10. 이현진, 2011, "공간구조와 이동부하를 고려한 실내 대피 경로 알고리즘", 서울시립대학교 석사학위논문.
11. 조영임, 2009, 인공지능시스템, 홍릉과학출판사, pp. 177-235.
12. 조용주, 김혜영, 전철민, 2009, "실내위치기반서비스를 위한 공간데이터베이스 활용기법", 한국지형공간정보학회지, 제17권, 제1호, pp.157-166.
13. Blue, V. J. and Adler, J. L., 1999, "Using cellular automata microsimulation to model pedestrian movements", In A. Ceber (Ed.), Proceedings of the 14th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, Jerusalem, Israel, pp. 235-254.
14. Burstedde, C., Klauck, K., Schadschneider, A., and Zittartz, J., 2001, "Simulation of pedestrian dynamics using a two-dimensional cellular automaton", Physica A, Vol. 295, No. 3-4, pp.507-525.
15. De Jong, K. A., 1975, "Analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems", University of Michigan, Doctoral dissertation Technical Report - No.185.
16. Grefenstette, J. J., 1986, "Optimization of control parameters for genetic algorithms", IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, SMC, Vol. 16, No. 1, pp.122-128.
17. Goldberg, D. E., 1989, *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley.
18. Holland, J.H., 1975, *Adaptation in natural and artificial systems*, University of Michigan Press.
19. Kirchner, A., and Schadschneider, A., 2002, "Simulation of evacuation processes using a bionics-inspired cellular automaton model for pedestrian dynamics", Physica A, Vol. 312, pp. 260-276.
20. Klupfel, H., Konig, T., Wahle, J., and Schreckenberg, M., 2002, Microscopic simulation of evacuation processes on passenger ships, In Proceedings of Fourth International Conference on Cellular Automata for Research and Industry, Karlsruhe, Germany.