

재난지역에서의 대피 · 대응 동시수행을 위한 다중목적 긴급대피경로 최적화

강창모* · 이종달** · 송재진*** · 정광수****

Kang, Changmo*, Lee, Jongdal**, Song, Jaejin***, Jung, Kwangsu****

Route Optimization for Emergency Evacuation and Response in Disaster Area

ABSTRACT

Lately, losses and damage from natural disasters have been increasing. Researchers across various fields in Korea are trying to come up with a response plan, but research for evacuation plans is still far from satisfactory. Hence this paper proposes a model that could find an optimized evacuation route for when disasters occur over wide areas. Development of the model used methods including the Dijkstra shortest path algorithm, feasible path method, genetic algorithm, and pareto efficiency. Computations used parallel computing (SPMD) for high performance. In addition, the developed model is applied to a virtual network to check the validity. Finally the adaptability of the model is verified on a real network by computing for Gumi 1st National Industrial Complex. Computation results proved that this model is valid and applicable by comparison of the fitness values for before optimization and after optimization. This research can contribute to routing for responder vehicles as well as planning for evacuation by objective when disasters occur.

Key words : Evacuation route, Optimization, Multi-objective, Genetic algorithm, Dijkstra's shortest path

초록

최근 들어 재난 발생으로 인한 재산 및 인명피해가 속출하고 있다. 이에 따라 국내 여러 분야에서 분야별 대응방안 모색을 위해 노력하고 있지만 대피매뉴얼 작성을 위한 연구는 미비한 실정이다. 본 연구에서는 공단과 같은 산업지역에서 대규모 대피가 필요한 사고가 발생하였을 때, 대응방안에 따른 최적의 대피경로를 산정하는 모형을 개발하였다. 모형개발에는 Dijkstra 최단경로 알고리즘, 가능경로법, 유전자 알고리즘 및 파레토 최적해 산정 등을 통하여 모형을 개발하였고, 병렬처리를 통하여 연산시간을 단축시킬 수 있도록 하였다. 뿐만 아니라 개발된 모형을 가상네트워크에 대한 적용을 통해 타당성을 검증하였고, 구미 국가산업 1단지를 대상으로 적용하여 실제 지역을 대상으로 한 모형의 적용성을 검증하였다. 모형을 이용하여 목적함수별 최적경로를 산출한 결과, 최적경로 산출 이전보다 좋은 결과를 얻을 수 있어 타당성이 검증되었고, 실제 지역을 대상으로 연산한 결과를 통해 모형의 적용성도 검증되었다. 본 연구 결과는 재난을 대비한 대응목적별 대피매뉴얼의 작성뿐만 아니라, 재난 발생 시 대응차량의 진입경로 산정에도 도움이 될 것으로 판단된다.

검색어 : 대피 경로, 최적화, 다중-목적함수, 유전자 알고리즘, Dijkstra 최단경로

* 정회원 · 경상북도의회 전문위원, 공학박사 (cmkang@korea.kr)

** 정회원 · 교신저자 · 영남대학교 건설시스템공학과 교수, 공학박사 (Corresponding Author · Yeungnam University · jdlee@ynu.ac.kr)

*** 정회원 · 영남대학교 건설시스템공학과 대학원 박사과정 (sjjman@nate.com)

**** 대구광역시 북구청 교통전문직, 공학박사 (gojks@korea.kr)

Received September 30, 2013/ revised October 31, 2013/ accepted November 25, 2013

1. 서론

최근 자연재해와 테러 등에 의한 위협이 커지면서 재난에 대한 대처방안의 필요성이 커지고 있지만 국내실정에 적합한 대피경로 산정에 대한 방안 및 연구는 미비한 실정이다. 특히 연이은 화학물질 누출사고로 인하여 공단인근에 거주하는 주민들의 불안은 날로 커지고 있다. 하지만 적합한 대피매뉴얼이 작성되어 있지 않아 사고발생 시 많은 혼란을 겪을 수 있다. 본 연구에서는 재난 발생 시 목적에 맞는 대피매뉴얼의 작성에 기여할 수 있는 국내실정에 적합한 대피모형을 개발하는 것을 목적으로 연구를 수행하였다.

연구의 수행을 위해 국내외 선행연구를 살펴보고, 국내실정에 맞는 최적의 대피경로 산정 모형을 구성하였다. 개발된 대피모형은 패턴기반 대피경로 산정 알고리즘과 유전자 알고리즘을 복합적으로 사용하여 연산시간은 줄이면서 좋은 결과를 도출 할 수 있도록 구성되었다. 가상네트워크와 가상의 대피수요를 모형에 적용하여 연산을 실시한 뒤, 연산결과를 통해 최적의 대피경로 산정알고리즘을 검증하였다. 또한 실제지역을 대상으로 분석하여 모형의 국내 실정에 적합한지를 확인하였다.

2. 기존연구 고찰

최근의 연구동향을 살펴보면 국내보다는 해외에서 더욱 활발하게 연구되고 있다. 특히 미국과 같이 태풍과 토네이도가 빈번히 발생하는 나라에서는 자연재난에 의한 대피 연구가 활발히 이루어지고 있고, 최근 원자력사고를 겪은 일본과 같은 나라에서는 인적재난에 의한 대피 연구가 활발히 이루어지고 있다. 뿐만 아니라 9·11테러 이후 테러에 대한 대피연구도 지속적으로 이루어지고 있어 다양한 상황에 따른 대피 방법에 대한 연구가 이루어지고 있다.

허리케인과 같은 자연재난에 대한 연구(Balakrishna et al., 2008; Barrett et al., 2000 등)를 살펴보면 대상지역의 가로망이 거주자의 수에 비해 월등히 부족한 수준이기에 대피 시 큰 정체가 야기되고, 이러한 문제점을 경로별 통행량 배정을 통하여 최적의 대피가 이루어지도록 연구하였다. 뿐만 아니라 자연재난이 발생하였을 때 병원과 같은 의료시설에서의 대피 연구(Duanmu et al., 2010; McGlown, 2001 등)를 통하여 교통약자와 통행에 제약이 따르는 사람을 효율적으로 대피시킬 수 있는 방안에 대한 연구가 이루어졌다.

핵 시설 사고와 같은 인적재난에 대한 연구(Urbanik II, 2000; Zeigler et al., 1981 등)를 통하여 짧은 시간동안 많은 인원을 대피시키기 위해 최적 대피경로 산정을 통하여 총 대피 시간을 단축시킬 수 있도록 하는 방안에 대한 연구가 이루어졌다. 핵 시설 사고, 위험물질 누출사고, 폭발 및 테러 등은 사전에 예측 불가능한

재난으로, 재난발생 시 즉각적인 대피가 이루어져야하는 특성을 가진다. 이러한 특성에 의해 순간적으로 과도한 교통량이 집중되는 현상이 발생하고, 최대한 효율적인 대피를 위해서는 최적경로 산정이 가장 중요한 요소이다.

대피수단 역시 대피에 있어서 중요한 요소로 작용된다. 허리케인과 같이 사전에 예측 가능한 재난의 경우 버스, 열차 등의 대중교통수단을 이용하여 다수의 대피가 가능하다. 특히 버스와 같은 경우 차량을 보유하지 못한 대피자에게 중요한 대피수단으로 작용하며 높은 대피효율을 가지므로 버스 중심의 대피계획에 관한 연구(Bish, 2011; Naghawi and Wolshon, 2012 등)가 활발히 이루어졌다.

가로망의 효율적인 사용도 대피상황에서 중요한 요소로 작용한다. 교차로에서 상충을 소거하여 교차로 지체시간을 줄이고 대피방향의 반대편 도로를 이용하는 역주행을 허용함으로써 도로의 용량을 늘릴 수 있다. 교차로의 상충을 줄이는 연구는 Cova et al. (2003)에 의하여 이루어졌으며 교차로에서 차로별로 교차로를 방지하며 주행방향을 결정하는 방식으로 대피경로를 최적화 하였다.

정보통신기술의 발달에 따라 유비쿼터스를 이용한 대피방법에 관한 연구가 이루어지고 있다. 재난이 발생하면 유비쿼터스 통신 및 센서네트워크 기술을 이용하여 최적의 대피경로를 개별차량에 전송할 수 있는 기술을 개발 중이다. 이러한 기술을 위해 동적 최단경로 탐색기법과 동적 통행배정 모형을 기반으로 우회경로 산정 알고리즘을 개발하는 연구가 이루어졌다(Yang et al., 2009).

뿐만 아니라 건축물과 같은 실내에서 화재와 같은 재난이 발생했을 경우 최적의 경로를 찾아 최적의 대피가 이루어 질 수 있게 하는 연구도 진행되었다. 유전자 알고리즘과 CA (cellular automata) 기반 대피 시뮬레이터를 이용하여 실내에 대피자의 분포 상황에 따라 최적의 대피경로를 찾을 수 있는 연구가 이루어졌다(Kwak et al., 2012).

3. 대피 모형 개발

본 연구에서는 공단지역에서 위험물질이 누출되는 사고가 발생한 상황을 가정하여 빠른 시간 내에 대피가 이루어질 수 있도록 하는 모형개발을 목적으로 연구하였다. 공단지역에서 위험물질이 누출되는 사고는 사전에 미리 예고가 이루어지지 않아 위험지역 외부에서 운송수단을 투입하여 대피시키는 것이 불가능하다고 판단된다. 이러한 특성을 반영하여 사고 발생 시 대상지역 내부에서 운행 중인 노선버스, 공장직원 출퇴근용으로 이용되는 셔틀버스, 승용차 및 도보를 이용하여 대피하도록 하였다.

3.1 대피수요의 생성과 수단 선택(Step 1)

본 연구에서의 대피수요는 크게 2가지로 구분된다. 첫 번째는

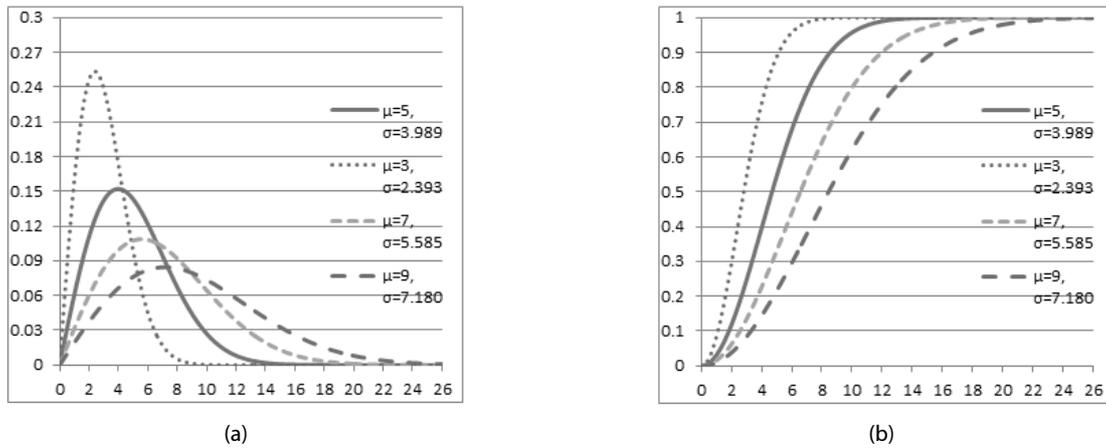


Fig. 1. An Evacuation Probability Curve(a) and a Cumulative Curve(B) by Rayleigh Distribution

재난발생 시 대상지역 내부에서 근로, 여가, 재택, 교육 및 기타 활동을 행하던 인구가 재난이 발생한 것을 인지한 이후 대피통행을 시작하는 대피수요(ED; Evacuation Demand)이다. ED의 경우 재난발생 이전에는 통행수단을 이용하고 있지 않지만 재난발생 이후 Rayleigh분포에 따라 수요가 발생되며 선입선출에 의해 노선 버스와 셔틀버스를 이용하여 대피하게 된다. 용량제약에 의해 노선 버스와 셔틀버스를 선택하지 못한 인구는 무작위로 승용차에 배정되고 승용차에 배정되지 못한 인구에 대해서는 도보로 이용하여 대피한다. 이때 대피수요의 발생은 평균 5분 동안 완료된다(Eq. (3)).

$$f(x; \sigma) = \frac{x}{\sigma^2} e^{-x^2/2\sigma^2}, \sigma > 0 \quad (1)$$

$$F(x) = 1 - e^{-x^2/2\sigma^2}, x \in [0, \infty) \quad (2)$$

$$\mu(X) = \sigma \sqrt{\frac{\pi}{2}} = 1.253\sigma = 5 \text{ min} \quad (3)$$

두 번째는 재난발생 시 대상지역을 통과하거나 대상지역내의 목적지로 이동하기 위해 주행 중이던 차량과 보행자가 재난발생을 인지하고 대상지역 외부로 빠져나가기 위해 대피하는 기초수요(BD; Base Demand)이다. BD의 경우 재난발생을 인지하는 즉시 이용 중이던 수단으로 즉각적인 대피가 가능하므로 재난발생시점의 ED에 BD의 수요량을 더하여 연산하였다.

3.2 네트워크 구축 및 가능경로 추출(Step 2)

해석을 위한 네트워크는 링크별로 사중점 노드, 제한속도, 링크의 길이 및 차로 수 등으로 구성하였다. 한 교차로 영역을 보았을 때, 수요가 발생하는 출발노드 i 를 설정하고 교차로노드 n 을 거쳐

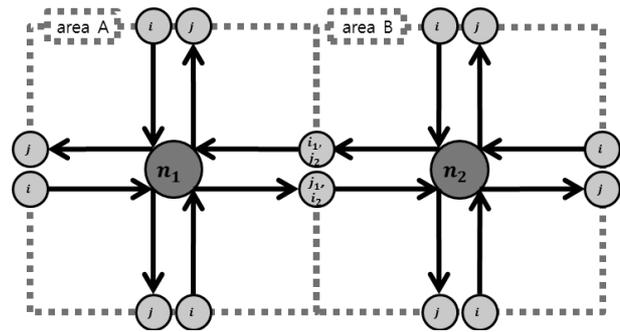


Fig. 2. Presentation of Relationship Between Intersections and Nodes

도착노드 j 로 도착하는 형태로 네트워크를 구성하여 여러 개의 교차로 영역을 지나 통행이 이루어지는 형태로 네트워크를 구성하였다.

Fig. 2에서처럼 교차로영역 B의 출발노드 i 에서 생성된 수요는 교차로노드 n_2 를 거쳐 도착노드 j_2 에 도착하게 된다. 이때의 j_2 는 교차로영역 A의 i_1 에 해당되고, j_2 에 도착한 수요는 i_1 에서부터 n_1 을 거쳐 교차로영역 A의 j 에 도착하게 된다. 이러한 과정이 반복적으로 이루어짐으로써 대상지역 외부로의 대피가 이루어진다.

교차로의 통행 패턴은 Fig. 3과 같이 총 17개로 구성된다. #1~#12는 대피상황을 위해 상충을 소거한 4지 교차로의 패턴이고, #13~#15는 상충을 소거한 3지 교차로의 패턴이다. #16과 #17은 상충을 소거하지 않은 교차로의 패턴이다. 이러한 교차로의 패턴은 차후 유전자 알고리즘을 이용한 연산에서 인구의 크로모솜으로 적용되어 최적의 해를 찾는데 사용된다.

최적의 대피경로를 찾기 위해 패턴이 적용되어 상충이 소거된 네트워크를 Dijkstra 모형으로 연산하여 최단경로를 산정하였다. Dijkstra 모형을 이용하여 산정된 최단경로는 각각의 출발노드에

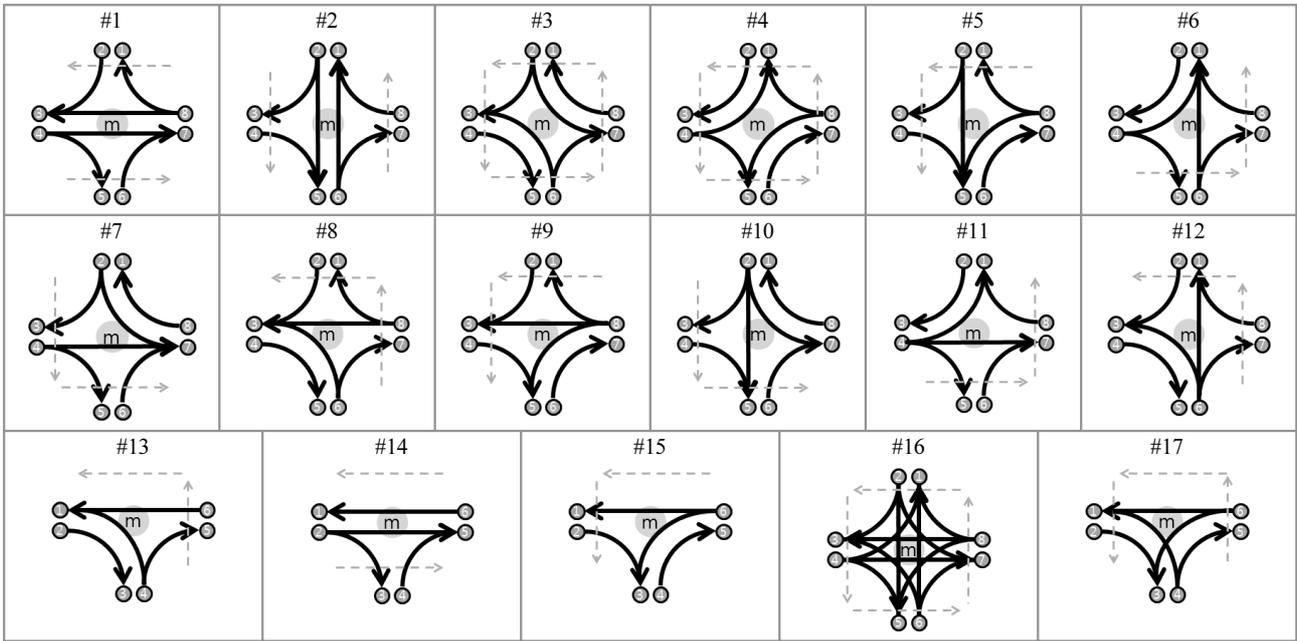


Fig. 3. Patterns of the Intersection as a Result of Conflict Elimination

대한 최적의 대피경로가 되지만 연산시간이 오래 걸린다는 단점을 가진다. 이러한 문제를 해결하기 위해 가능경로법을 적용한 뒤 유전자알고리즘을 이용하여 연산시간을 단축 시켰다. 가능경로법은 다음의 순서에 의해 적용된다.

- Step 1 : 교차로 패턴 결정. 노드 간 연결 행렬(adjacency matrix)결정
- Step 2 : 노드 간 연결 행렬로부터 Dijkstra 모형에 의한 O-D간 최단경로 결정
- Step 3 : 최단 O-D pair 결정
- Step 4 : 무한루프 발생 검사 및 무한루프 해제

3.3 목적함수와 제약조건(Step 3)

본 연구에서 개발한 모형은 다중목적함수를 만족시킬 수 있는 최적화방법을 적용하였고, 목적함수에는 f_1 , f_2 , f_3 3가지를 선택하였다.

목적함수 f_1 은 총 통행시간으로서 대피 시작 시점부터 최후 대피자가 대상지역을 벗어날 때까지의 시간으로 f_1 을 최소화시킴으로써 실제 재난발생 시 최적의 통행패턴을 적용하여 빠른 시간 내에 모든 대피자들을 대피시킬 수 있다.

목적함수 f_2 는 총 통행거리최소화로 재난 발생 시 교통약자의 통행거리를 줄이는 것은 물론 재난의 발생 원인인 위험물질에 오염된 사람의 통행거리를 줄여 건강상태의 악화를 방지하기 위한 것이다.

목적함수 f_3 는 대응차량의 진입시간 최소화로 재난발생 시 재난의 확산방지 및 구조작업을 위한 대응차량의 신속한 진입을 통해 2차 피해 확산을 방지하여 피해를 최소화하기 위한 것이다. 본 연구에서 고려한 위험물질 누출사고의 경우 확산방지 대응이 신속히 이루어지지 않으면 대피대상지역이 확대될 가능성이 높아지고, 교통약자의 대피지원이 신속하게 이루어지지 않게 되면 사상자의 수가 증가하기 때문에 대응차량 진입시간을 목적함수로 반영하지 않으면 대피모형으로서의 중요한 기능을 잃게 된다. 또한 대응차량의 사고지점 접근을 위한 역방향 진입경로를 확보하지 못할 경우 대피차량이나 대피보행자들과 상충으로 인하여 적절한 대응(사고수습)이 불가능하기 때문에 이러한 점을 고려하여 대피와 대응이 동시에 이루어진다고 판단하였다.

위에서 제시한 3가지의 목적함수와 NSGA-II 모형을 이용하여 파레토 최적해를 구할 수 있다. 의사결정자는 재난발생 시 파레토 최적해의 상충관계를 의사결정 참고 자료로 사용가능하다.

$$\text{Minimize } f_1 = \sum_i \sum_j \sum_m t_{ijm}^e x_{ij}^e \quad (4)$$

$$f_2 = \sum_i \sum_j \sum_m d_{ijm}^e x_{ij}^e \quad (5)$$

$$f_3 = \sum_i \sum_j t_{ij}^r x_{ij}^r \quad (6)$$

where,

$$t_{ij}^e = \begin{cases} \frac{1}{\alpha} (t_{in}^e + \phi t_{nj}^e) & \text{right turn} \\ \frac{1}{\beta} (t_{in}^e + \phi t_{nj}^e) & \text{through} \\ \frac{1}{\gamma} (t_{in}^e + \phi t_{nj}^e) & \text{left turn} \end{cases} \quad (7)$$

$$t_{in,nj}^e = d_{in,nj} / v_{in,nj}^e \quad (8)$$

$$v_{in,nj}^e = 1.1(v_{\max})_{in,nj}^e - (v_{\max})_{in,nj}^e \times (V_{in,nj}^e / C_{in,nj}^e) \quad (9)$$

단, $v \leq v_{\max}$, $V/C \leq 1.0$

$$C_{in,nj}^e = l_{in,nj} \times d_{in,nj} / 7.5 \quad (10)$$

$$C_{ij}^p = k \times w_{in,nj} \times d_{in,nj} \quad (11)$$

$$\sum_i \sum_j d_{ij} \neq inf ; \text{pareto constraint} \quad (12)$$

위의 식에서 t_{ij}^e 는 e대피자가 i노드에서 j노드로의 통행(대피) 시간을 의미하는 것이고, x_{ij} 는 i노드에서 j노드까지 대피자의 수, d_{in} 은 i노드에서 n노드까지의 거리, α, β, γ 는 교차로에서 회전방향별 상층에 의한 통행시간 지체계수, ϕ 는 합류에 의한 통행시간 증가계수, v_{in}^e 은 통행속도, $(v_{\max})_{in}^e$ 은 대피자의 최대통행속도, V_{in} 은 i노드에서 n노드로 통행하는 대피차량의 수, C_{in} 은 도로용량, l_{in} 은 차량의 수, k 는 대피상황에서의 대피보행자 밀도, w_{in} 은 보행자도로의 폭을 의미한다. Eq. (12)는 통행거리가 무한히 길어질 수 없다는 제약으로 패턴적용 후 무한루프가 발생하는 것을 방지하기 위하여 적용한 것이다.

3.4 유전자 알고리즘과 파레토 최적화(Step 4)

본 연구에서 개발한 모형의 경우 교차로의 수와 패턴의 수에 따라 대피 가능경로 경우의 수가 기하급수적으로 증가하게 된다. 대상지역의 특성에 따라 다르게 나타나지만 패턴의 수는 제한되기 때문에 교차로의 수가 연산시간에 큰 영향요소로 작용하게 되고 연산에 많은 시간이 소요되기 때문에 패턴을 결정변수로 설정하여 유전자 알고리즘에 적용하였다.

세대 수, 세대별 인구, 결정변수, 목적함수, 제약조건의 수, 결정 변수의 상하한을 결정한 뒤 초기인구의 교차로별 패턴을 무작위로 설정하여 초기인구를 생성하였다. 생성된 초기인구와 주어진 목적 함수 3개를 이용하여 적합도를 평가한 뒤 파레토 최적해를 생성한다. 파레토 최적해는 NSGA-II 알고리즘을 이용하여 3차원 파레토 도면으로 도시하고, 앞에서 계산된 파레토 최적해의 적합도 순서별

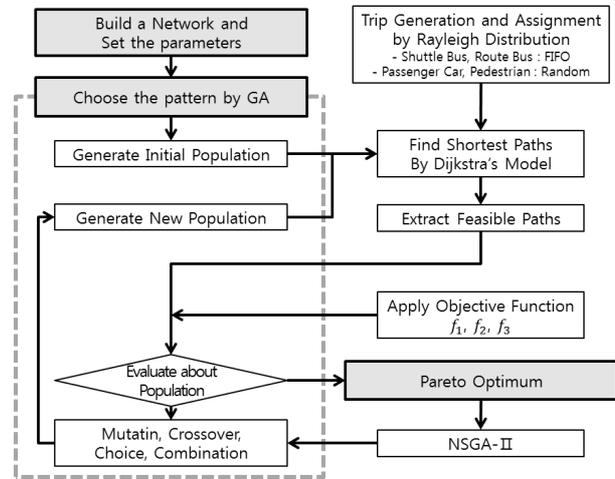


Fig. 4. Flowchart of the Evacuation Model in this Paper

로 선택, 교배 및 돌연변이과정을 거쳐 다음세대를 만들게 된다. 생성된 다음세대는 다시 적합도 평가, 파레토 최적해 생성 및 다음세대 생성과정을 세대 수만큼 반복하여 세대 수가 초기 설정 값에 도달할 때까지 반복계산을 하게 된다. 최종적으로 목적함수별 최적 패턴과 파레토 최적해를 찾게 되면 결과로서 사용 가능하다.

3.5 모형구축과 병렬처리

본 연구에서 개발된 모형은 Matlab R2013a 버전에서 구축되었다. 기존의 통행기반 수요예측 모형은 차량의 통행을 기반으로 수요를 분석하기 때문에 모형의 분석을 위해 필요한 수요예측은 기존의 통행기반 수요예측 모형으로는 분석이 어려웠다. 이러한 이유로 활동기반수요 예측모형인 TRANSIMS를 이용하여 사전 수요를 예측하였다. 예측된 수요를 행렬형태로 저장하고, 저장된 정보를 모형에 적용하여 연산하였다.

연산시간의 단축을 위하여 Matlab parallel toolbox에서 제공하는 SPMD (Single Program Multiple Data)를 적용하였다. Matlab parallel toolbox에는 GPU를 이용하여 연산속도를 증대시키는 gpuArray, for구문을 병렬처리 하여 반복계산시간을 증대시키는 parfor, 작업영역을 CPU 코어별로 할당하는 SPMD의 3가지가 제공되는데, 본 연구에서는 SPMD를 이용하여 최단경로 산정에 사용되는 Dijkstra 모형을 병렬처리 하였다.

3.6 가상네트워크 적용을 통한 모형의 검증

개발된 모형의 검증을 위하여 4x4 (직경 0.8km) 형태의 가상네트워크에서 최적 대피 분석을 실시하였다. 실험을 위한 가상네트워크는 교차로노드를 16개, 도착노드를 16개로 구성하였다. 출발노드는 내부블록별 4개씩 36개와 외부블록별 1개씩 12개로 구성하여 총 48개로 구성하였다. 내부블록(200x200m)은 9개, 외부블록

(100× 200m)은 12개로 구성된다. 16개의 교차로 $X_1 \sim X_{16}$ 까지 12개의 교차로 패턴을 적용할 수 있도록 결정변수로 설정하여 유전자 알고리즘을 적용하였다.

대피수요와 대피수단은 다음의 3단계를 거쳐 발생 및 선택되도록 하였다.

3.6.1 Step 1 : 블록 수요교통량 발생

내부블록에서는 500명, 외부블록에서는 150명의 인구가 생성되고, 생성된 대피인구는 블록에 위치한 각 노드에서 통행이 발생된다.

3.6.2 Step 2 : 기초 수요교통량 발생

사고발생 이전에 대상지역을 통과하던 차량이 사고발생 이후 대피통행으로 전환되는 통행으로 차량의 경우 도로용량의 50%, 보행자의 경우 도로용량의 3%를 적용하였다. 도로용량은 도로의

길이와 차로를 곱하고 차량의 길이(7.5m; 여유 공간 포함)를 나누어 산정하였다. 보행자도로의 경우에는 보도의 길이에 보도 폭을 곱하고 LOS D의 보행자 밀도(0.3~0.6m²/인)에 해당하는 2.0 인/m²을 곱하여 산정하였다.

Table 1. A legend of Virtual Network and Features

Number	Symbol	Type	Feature
17~32	●	Intersection	4×4=16
33~80	○	Origin	(3×4×2)×2=48
1~16	◎	Destination	4×4=16
1~12		External block	Quarter of internal block demand
13~21		Internal block	

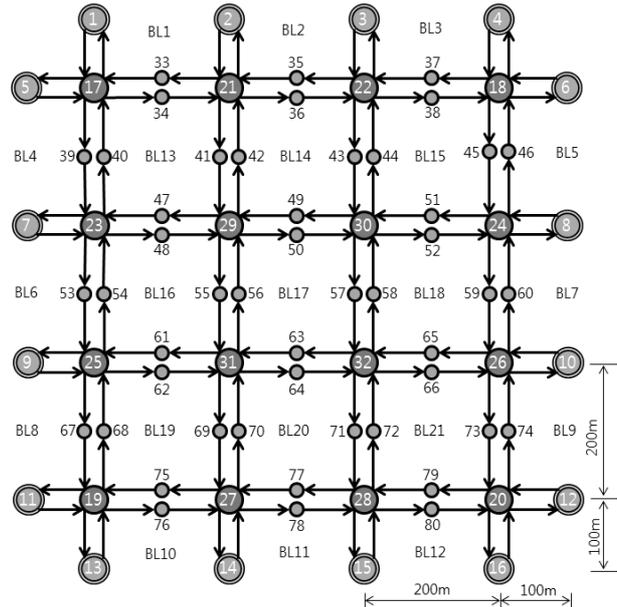


Fig. 5. Virtual Network for Model Validation

Table 2. Demands and Capacities of Evacuation Modal (Whole Network)

Total number of Evacuees	Demand distribution	Modal	Modal choice	Capacity of Modal	Number of Modal	Number of Evacuees
6,000 persons	Rayleigh distribution $\mu=5.0$ min	Route bus	FIFO	30 persons per vehicle	10	300 persons
		Shuttle bus	FIFO	40 persons per vehicle	2	80 persons
		Passenger Car	Random	3~5 persons per vehicle	50	150~250 persons
		Pedestrian	Random	-	-	5,370~5,470 persons

Table 3. Optimized Intersection Patterns and Optimum Values About Each Objective Functions – Virtual Network

Intersection	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	Fit. 1 ¹⁾	Fit. 2 ²⁾	Fit. 3 ³⁾
optimized pattern for Obj. 1	7	4	4	12	7	4	1	1	9	4	2	2	3	3	4	2	25.143	11.093	60.893
optimized pattern for Obj. 2	6	4	8	5	6	6	3	7	8	7	9	5	4	3	3	4	31.247	7.200	69.867
optimized pattern for Obj. 3	6	4	8	5	3	5	2	6	9	5	6	7	4	4	2	7	27.915	13.203	23.821
no action	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	39.385	8.764	264.649

1) Fit. 1 : Fitness of objective function 1(×10⁴persons-min)
 2) Fit. 2 : Fitness of objective function 2(×10⁶persons-meter)
 3) Fit. 3 : Fitness of objective function 3(×10⁴min)

3.6.3 Step 3 : 발생노드별 수단 선택

노선버스와 셔틀버스는 대상지역내 무작위적인 위치에 각각 10대, 2대씩 배정하였고, 승용차는 블록별로 대피인구의 10% (50대)를 적용하여 배정하였다.

가상네트워크를 구축한 뒤 수요와 수단까지의 설정이 완료된 자료를 이용하여 최적대피모형에 대한 검증을 실시하였다. 가상네트워크에 대하여 인구수 50, 세대수 70으로 분석하였을 때, 목적합수별 최적의 대피패턴과 적합도는 Table 3과 같이 나타났다. 목적합수별 최적화 패턴을 적용했을 때와 최적패턴을 반영하지 않았을 때의 적합도를 비교해보면 최적패턴을 적용했을 때 유리한 결과를 보이는 것으로 확인되었다. 목적합수 1의 경우 1인당 평균 23.7분, 목적합수 2의 경우 1인당 평균 260.7미터, 목적합수 3의 경우 240.8분을 줄일 수 있다는 것을 확인하였다.

4. 대피모형의 적용

4.1 적용 대상지역과 대피수요의 생성 방법

개발된 모형을 실제지역에 적용하여 그 적용성을 검증하였다. 적용 대상지역은 구미시 국가산업 1단지에 위치한 구미소방서를 중심으로 직경 2km×2km로 설정하였다. 대상지역은 2012년 구미 불산 누출사고가 발생한 국가산업 4단지와 인접하며 산업단지 조성이 완공된 지 40년 이상 경과하여 사고발생의 위험이 높을 뿐만 아니라 유해물질 취급업체도 밀집되어 있고, 지리적으로 낙동강과 인접하여 사고발생 시 2차 피해가 매우 클 것으로 예상된다. 대피대상지역의 범위는 해당 대상지역이 보유하고 있는 위험물질과 사고대비물질 Key Infor Guide (국립과학원, 2012)의 초기이격거리를 참고하여 설정하였다. 현재 대피계획의 완비 및 체계적인 대피훈련이 이루어지지 않은 상태이기 때문에 사고가 발생하게



Fig. 6. An Aerial Photograph of Study Area - Gumi City 1st National Industry Complexity

Table 4. Demands, Base Traffics and Number of Vehicles of Whole Network

Modal	Demand	Base traffic	number of vehicles
pedestrian	9,654	4,301*	-
passenger car	22,877	11,683*	10,522
route bus	574	-	5
shuttle bus	-	-	2
total	33,105	15,984	10,527

* If link could not had base traffic, virtual base traffic is applied to link : 3% of sidewalk capacity and 10% of road capacity

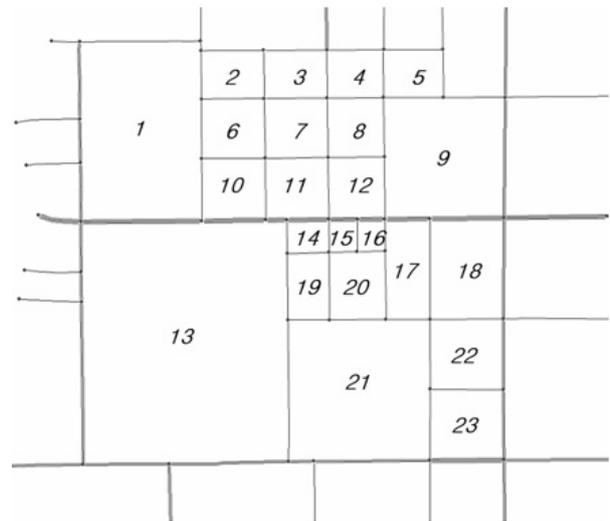


Fig. 7. Network and Block Shapes of Object Area

되면 위험지역의 외부로 대피시키는 것이 우선시되어야 하므로 대피소는 대상지역의 외부지역으로 설정하고 정확한 위치는 설정하지 않았다.

대상지역의 네트워크는 KTDB 도로망 자료를 바탕으로 구성하였고, 대상지역에 대한 수요는 TRANSIMS를 이용하여 예측하였으며, 예측된 수요 자료를 바탕으로 블록별로 수요를 발생시켰다. 대상지역내의 교차로는 3지 교차로 30개, 4지 교차로 17개로 구성되어 있으며, 발생된 수요는 교차로를 연결하는 링크의 중심에서 발생되도록 설정하였다. 대피통행은 대상지역의 외부로 통행이 이루어지도록 하였고, 사고발생시점은 주중 14:00시로 가정하였으며, 14:00시 이전의 차량통행 및 보행자통행을 기초교통량으로 반영하였다.

Table 4는 수요예측결과를 이용하여 대피분석에 반영한 대피수요이며, Fig. 7은 대상지역에 대한 네트워크와 블록번호이다.

Table 5. Optimized Intersection Patterns and Optimum Values About Each Objective Functions – Gumi

Intersection	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	Fit. 1 ¹⁾	Fit. 2 ²⁾	Fit. 3 ³⁾
	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52			
	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67				
optimized pattern for Obj. 1	14	14	14	13	14	14	9	14	14	13	13	14	15	13	6	12	159.321	110.162	20.512
	13	4	14	5	4	10	14	6	12	7	14	7	6	13	15	13			
	9	4	3	3	14	14	15	14	14	6	15	14	13	15	13				
optimized pattern for Obj. 2	14	13	14	13	14	14	8	15	14	13	13	15	15	13	6	12	196.578	87.258	21.688
	13	7	13	6	6	10	14	6	12	7	14	7	6	13	14	14			
	11	7	3	5	14	14	15	14	14	6	15	14	13	14	13				
optimized pattern for Obj. 3	14	14	14	13	14	14	9	14	14	13	13	14	15	13	6	12	159.321	110.162	20.512
	13	4	14	5	4	10	14	6	12	7	14	7	6	13	15	13			
	9	4	3	3	14	14	15	14	14	6	15	14	13	15	13				
no action	17	17	17	17	17	17	16	17	17	17	17	17	17	17	16	16	434.534	117.963	26.853
	17	16	17	16	16	16	17	16	16	16	17	16	16	17	17	17			
	16	16	16	16	17	17	17	17	17	16	17	17	17	17	17				

- 1) Fit. 1 : Fitness of objective function 1($\times 10^4$ persons·min)
- 2) Fit. 2 : Fitness of objective function 2($\times 10^6$ persons·meter)
- 3) Fit. 3 : Fitness of objective function 3($\times 10^4$ min)

4.2 대피모형의 적용과 결과

대상지역은 네트워크의 규모가 비교적 크기 때문에 각 세대별 150인구를 적용하여 317세대에 걸쳐 연산을 실시하였다. Table 5는 연산결과 획득한 목적함수별 최적 교차로패턴과 적합도이다. 패턴을 적용했을 때와 적용하지 않았을 때를 비교해보면 최적패턴을 적용했을 때 유리한 결과를 보이는 것을 확인하였다. 목적함수 1의 경우 1인당 평균 47.2분, 목적함수 2의 경우 1인당 평균 604.4미터, 목적함수 3의 경우 5.8분을 줄일 수 있다는 것을 확인하였다.

Figs. 8~10은 목적함수별 누적대피곡선을 비교한 것으로 Fig. 8에서 목적함수 1과 2를 비교했을 때 목적함수 1의 소개(疏開)시간(CT; Clearance time, 대상지역의 모든 대피자가 대피를 완료하였을 때까지의 소요된 시간)이 약 4분정도 적은 것을 알 수 있으며, Fig 9에서 목적함수 1과 3을 비교하였을 때에는 소개시간이 동일하게 나타난다. 또한 Fig. 8에서 목적함수 1과 2의 곡선이 대피가 시작되고 15분이 경과한 시점에서 교차하는 것을 알 수 있는데, 이는 도로의 용량제약에 의한 것으로 도로가 혼잡해짐에 따라 목적함수 1이 대피시간에 더 유리해 지는 것을 알 수 있다. Fig. 10에서 목적함수 1과 패턴을 적용하지 않았을 때의 소개시간을 비교하면 목적함수 1을 최적화시킨 패턴의 소개시간이 약 26분정도로 나타나고 대피모형의 효율성이 입증되며, 대피가 시작될 지 10분정도 경과되었을 때 목적함수 1과 패턴미적용 곡선의 교차점이 발생하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 실제 상황 발생 시 교차로 통제를 시작하는 시점으로 사용가능하다. 실제 상황이 발생한다면

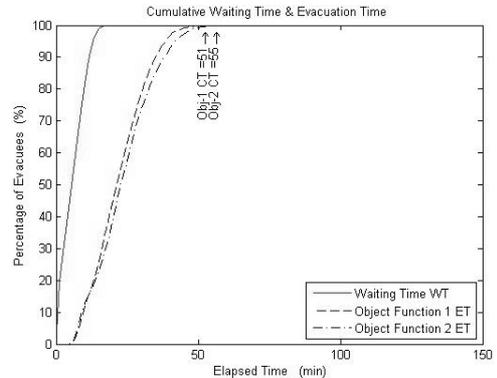


Fig. 8. Cumulative Evacuation Curves of Objective Function 1, 2 - Gumi

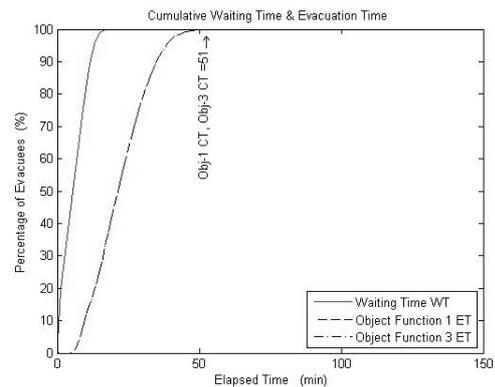


Fig. 9. Cumulative Evacuation Curves of Objective Function 1, 3 - Gumi

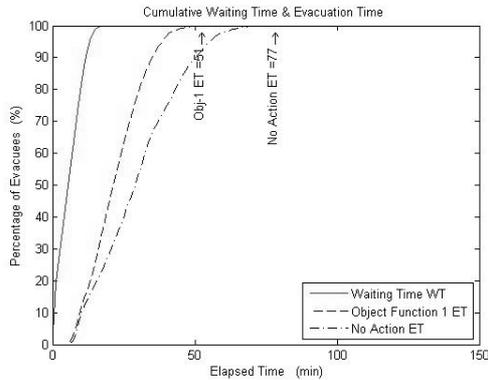


Fig. 10. Cumulative Evacuation Curves of Objective Function 1 and no Action - Gumi

대피시작 10분 이전에는 교차로 패턴을 적용하지 않는 것이 좋지만 10분 이후에는 패턴을 적용하여야 더욱 효율이 좋기 때문에, 대피시작 10분에 교차로 통행 패턴을 적용하면 시뮬레이션 값보다 더욱 효율이 좋을 것으로 기대된다.

5. 결론 및 향후연구과제

5.1 결론

본 연구에서는 재난발생 시 신속한 대피가 이루어질 수 있도록 교차로 내에서의 통행패턴을 결정하여 최적의 대피경로를 찾는 대피모형을 개발하였다. 대피모형을 이용하여 가상네트워크를 통해 모형을 검증하고, 실제 지역을 대상으로 분석하여 적용성을 확인하였다. 개발된 모형을 이용한 분석결과는 다음과 같다.

- (1) 개발된 대피모형은 총 대피시간, 총 대피거리, 대응차량 진입시간을 최소화할 수 있도록 3가지의 목적함수를 적용하였고, 적합한 분석결과가 도출되었다고 판단된다. 대응차량 진입시간 최소화는 선행연구에서 찾아보기 힘든 목적함수이며, 대피상황 발생 시 반드시 고려하여야 할 중요한 요소로 판단된다.
- (2) 기존의 최단경로 산정방법인 Dijkstra 모형은 비교적 경로산정에 많은 시간이 소요되므로 연산시간 단축을 위해 가능경로법을 적용하였고, 유전자 알고리즘과 더불어 병렬처리방법인 SPMD를 적용하여 빠른 시간 내에 최적의 대피경로를 산정할 수 있도록 유도하였다.
- (3) 모형의 적합성 검증을 위해 가상네트워크를 이용하여 분석하였고, 그 결과를 살펴보면 각 목적함수별 최적의 통행패턴을 찾아낼 수 있었다. 뿐만 아니라 구미 국가산업 1단지를 대상으로 한 분석에서는 목적함수 1과 2의 곡선이 대피가 시작되고 15분이 경과된 시점에서 교차점이 생기는 것을 확인할 수 있다.

이는 도로의 용량제약에 의한 결과로 판단되며 모형의 적합성을 입증하는 결과이다.

- (4) 구미지역을 대상으로 한 분석 결과에서 대피 최적 교차로패턴을 적용한 것과 적용하지 않은 결과를 비교하였을 때, 패턴 적용 시 목적함수 1, 2, 3 모두 월등히 좋은 결과를 보여 대피모형의 적합성이 검증되었다.

본 연구를 통해 개발된 모형은 위의 4가지와 같은 결과를 도출할 수 있었고, 이는 재난사고 발생가능성이 높은 공단이나 원자력발전단지 및 기타 위험지역에 적용하여 분석하면 재난사고 발생 시 대피실행 결정자의 의사결정에 도움이 되는 근거자료로 활용 가능할 것으로 판단된다.

5.2 향후연구과제

본 연구를 통해 개발된 대피모형이 재난발생 시 활용가능할 것으로 판단되지만 더욱 효율적인 대피계획 수립을 위하여는 다음과 같은 모형의 개선이 필요하다.

- (1) 차량-보행자 간의 상충에 의한 통행시간 지체계수인 α , β , γ 의 지역별 통행 특성에 맞는 값을 산정하여 실제 상황발생 시 지체계수의 상이함에 의하여 발생하는 오차를 줄여야 한다.
- (2) R-NSGA-II 모형을 적용하여 사고발생 인근지점에서 우선적인 대피가 이루어질 수 있도록 하여야 하며, 대피경로 산정 시 사고발생지점으로 접근하는 형태의 대피경로가 산정되는 것을 방지하여야 한다.
- (3) 현재 수립되어 있는 대피계획과 연계시켜 보다 현실성 있는 대피모형을 구축하여야 하며, 차후 대응매뉴얼에 포함될 수 있도록 모형의 체계적인 정립이 필요하다.

위의 3가지 사항을 보완한 모형을 개발하게 될 경우 더욱 실제 대피상황과 근접한 모형을 구축할 수 있을 뿐만 아니라, 앞으로 더욱 많은 긴급대피 연구에 이바지할 수 있을 것으로 판단된다.

References

- Balakrishna, R., Wen, Y., Ben-Akiva, M. and Antoniou, C. (2008). "Simulation-based framework for transportation network management in emergencies." *Transportation Research Record*, No. 2041, pp. 80-88.
- Barrett, B., Ran, B. and Pillai, R. (2000). "Developing a dynamic traffic management modeling framework for hurricane evacuation." *Transportation Research Record*, No. 1733, pp. 115-121.
- Bish, D. R. (2011). "Planning for a bus-based evacuation." *OR Spectrum*, Vol. 33, No. 3, pp. 629-654.

- Cova, T. J. and Johnson, J. P. (2003). "A network flow model for lane-based evacuation routing." *Transportation Research (A)*, Vol. 37, No. 7, pp. 579-604.
- Duanmu, J., Taaffe, K. and Chowdhury, M. (2010). "Minimizing patient transport times during mass population evacuations." *Transportation Research Record*, No. 2196, pp. 150-158.
- Kwak, S., Nam, H. and Jun, C. (2012). "An optimal model for indoor pedestrian evacuation considering the entire distribution of building pedestrians." *Journal of the Korean Society for Geo-Spatial Information System*, Vol. 20, No. 2, pp. 23-29 (in Korean).
- McGlown, J. K. (2001). "Evacuation of health care facilities: A New Twist to a Classic Model." *ASCE Natural Hazards Review*, Vol. 2, No. 2, pp. 90-99.
- Naghawi, H. and Wolshon, B. (2012). "Performance of traffic networks during multimodal evacuations: Simulation-based assessment." *ASCE Natural Hazards Review*, Vol. 3, No. 13, pp. 196-204.
- Urbanik II, T. (2000). "Evacuation time estimates for nuclear power plants." *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 75, No. 2-3, pp. 165-180.
- Yang, C., Son, Y., Yang, I., Kim, H. (2009). "Developing algorithms for providing evacuation and detour route guidance under emergency conditions." *Journal of the Korean Society of Road Engineers*, Vol. 11, No. 3, pp. 129-139 (in Korean).
- Zeigler, D. J. Brunn, S. D. and Johnson J. H. Jr. (1981). "Evacuation from a nuclear technological disaster." *The Geographical Review*, Vol. 71, No. 1, pp. 101-153.