

활동기반 교통모형 MATSim을 이용한 실내 피난 분석

A Study on the Indoor Evacuation Using Matsim

김주영* · 이승재** · 안치원***

* 주저자 : 서울시립대학교 도시과학연구원 연구교수

** 공저자 : 서울시립대학교 교통공학과 교수

*** 교신저자 : 서울시립대학교 교통공학과 석사과정

Joo young Kim* · Seung jae Lee** · Chi won Ahn**

* Institute of Urban Science Univ. of Seoul

** Dept. of Transportation Eng., Univ. of Seoul

*** Dept. of Transportation Eng., Univ. of Seoul

† Corresponding author : Chi won Ahn, chiwon90@uos.ac.kr

Vol.17 No.2(2018)

April, 2018

pp.18~31

ISSN 1738-0774(Print)

ISSN 2384-1729(On-line)

<https://doi.org/10.12815/kits.2018.17.2.18>

2018.17.2.18

Received 6 March 2018

Revised 14 March 2018

Accepted 21 March 2018

© 2018. The Korea Institute of Intelligent Transport Systems. All rights reserved.

요약

실내 재난은 심각한 인명피해를 초래할 수 있기 때문에 재실자의 신속한 피난을 위해 사전에 다양한 분석을 하는 것이 매우 중요하다. 따라서 실내에서 발생할 수 있는 예측 가능한 모든 시나리오에 대한 분석이 필요하다. 본 연구에서는 활동기반 교통모형 MATSim을 이용하여 실내 재난 대피 상황을 분석하는 방법을 제시한다. 연구의 분석 대상지는 대학 건물이며 약 5,000명의 재실자를 시뮬레이션 하였다. 분석 시나리오는 기본 대피 조건, 외부출구 폐쇄 상황, 비상계단 폐쇄 상황으로 설정하였으며 각 시나리오 분석 결과 기본 시나리오에서 평균 피난시간이 약 5분 40초로 분석되었으며 외부 출구가 폐쇄되는 경우 약 15%, 비상구가 폐쇄되는 경우 약 23%로 피난시간이 증가하는 것을 알 수 있었다. 본 연구의 결과로 신속한 피난을 위해서 비상계단의 불법적치물에 대한 관리가 중요하며 고층부의 인원은 옥상으로 피난하는 등 건물의 효과적인 방재 전략을 수립하는데 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심어 : MATSim, 활동기반교통모형, 실내피난, 실내재난

ABSTRACT

It is important to conduct various analyzes to evacuate occupants in advance, because the disaster can cause serious injury. Therefore, it is necessary to analyze all the predictable scenarios that may occur. In this study, we propose a method to analyze the evacuation of indoor disaster using activity - based transport model MATSim. We have developed the university building as target area and simulated about 5,000 occupants. The analysis scenarios are set as basic evacuation conditions, exit closures and emergency stair closures. As a result of analysis of each scenario, the evacuation time was analyzed to be about 5:40(340s) in the base scenario, increased by 15% in the scenario 2 and increased by 23% in scenario 3. As a result of this study, we suggest that it is important to manage illegal obstacles of emergency stairs for rapid evacuation. Therefore, this study can contribute to the effective disaster prevention strategy of the building.

Key words : MATSim, Activity based model, Evacuation, Indoor disaster

I. 서 론

1. 개 요

최근 도시 재난에서 화재 등 건축물에서 일어나는 사고가 빈번하게 발생하여 재산 피해 및 인명 피해를 유발시키고 있다. 실내 재난 사고는 건축물의 규모의 대형화, 내부의 복잡화, 고밀화로 인해 더욱 가중되고 있다(Back and Shin 2010; Ahn et al. 2016). 복잡한 구조의 실내 재난 상황에서 재실자들은 안전하게 피난하지 못할 수 있으며 이러한 건물에 화재 등 재난이 발생한다면 진압의 어려움이 따르고 대형 인명피해가 우려 된다(Bang and Jo, 2009). 그러나 실내 재난 상황에서는 예측하지 못하는 수많은 경우의 수로 다양한 상황이 발생할 수 있다(Park et al., 2012). 따라서 재난 상황의 피해를 줄이거나 최악의 사고를 예방하기 위해서는 다양한 시나리오에 대한 분석이 필요한 상황이다. 실제로 건물에 화재가 발생하면 예측하지 못한 돌발 상황으로 인해 탈출에 어려움을 겪을 수 있으며 비상계단 등의 통로에 비치된 불법 적치물들에 의해 재실자들의 탈출에 어려움을 가중시킬 수 있다. 이러한 점에서 화재로 인한 피난경로의 폐쇄, 비상계단의 불법 적치물로 인한 경로 단절 등 발생 가능한 다양한 시나리오를 분석할 수 있는 방안이 필요하다.

그러나 실내 건물에서 피난은 다양한 시나리오를 분석하는데 한계가 있다. 또한 기존의 연구에서는 다양한 시나리오에 대한 분석의 제약에 따라 정성적인 분석의 연구가 수행되고 있다. 국내의 선행연구로 Kim et al.(2015)는 초고층 건물에서의 화재 발생의 다양한 특성을 분석하고 화재의 법적·제도적 검토를 통해 초고층 건축물의 사고원인 및 예방방안을 제시하였으며 Son(2015)는 국내·외에서 발생한 초고층 건축물의 화재 사례를 조사하여 취약성 및 개선방안을 제시하였다. 따라서 앞선 연구 사례에서는 화재에 대한 정성적인 분석을 수행함에 따라 피난 시뮬레이션을 이용한 정량적인 분석이 필요함을 알 수 있다. 또한 화재 성능평가를 위해 재난 상황에서의 다양한 시나리오 분석이 가능한 시뮬레이션의 수행이 필요한 것을 시사한다.

따라서 본 연구에서는 실내 피난 상황을 시뮬레이션하기 위해 스위스 ETH에서 개발된 MATSim (Multi-Agent Transport Simulation)을 활용하였다. MATSim은 다양한 시나리오를 설정하여 비교 분석할 수 있으며, 결과 분석 시에 개별 Agent의 움직임과 패턴의 변화를 시각적으로도 쉽게 볼 수 있다. 무엇보다도 MatSIM에 쓰이는 모든 Module 설명 및 명령어가 Open Source이기 때문에 사용자가 보다 쉽게 조작할 수 있다는 점이 가장 큰 장점이다(Kim, 2012). MATSim은 행위자 기반의 동적 확률적 시뮬레이션으로서, 점진적 최적화 기법을 도입하여 주어진 조건에 따른 각각의 행위자의 경로와 출발 시간 선택을 최적화 하는데 근거를 두고 있다(Yoo et al., 2012). MATSim은 국내·외에서 교통 수요를 분석하기 위해 활발하게 활용되고 있으며 다양한 연구에서의 활동기반 교통모형을 분석하기 위해 사용되고 있다. 국내의 선행 연구로 Kim et al.(2011)는 MATSim을 이용한 활동기반 교통모형을 분석하기 위한 기초 연구를 수행하여 활동기반 교통모형을 이용하여 기존 교통모형이 가지는 한계점을 극복하고자 했다. Yu et al.(2012)는 MATSim을 이용하여 도로에 유고상황 발생 시 교통 통제 정책을 판단하기 위한 기초 연구로 활동기반 교통모형을 분석하였다. Kim et al.(2013)는 MATSim을 이용하여 도로 침수를 가정한 시나리오에서 이용자들의 상습 침수지역 통행 시 우회 교통패턴 및 피난경로 분석을 수행하여 도시부 대피 경로 설정에 관한 연구를 수행하였다. Kim et al.(2016)는 MATSim과 SNS 트위터의 데이터를 이용하여 활동기반 교통모형을 분석하는 연구를 수행하였다.

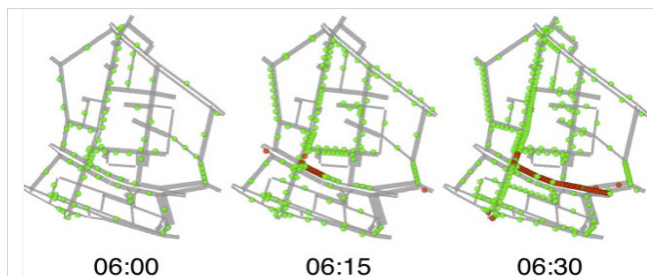
국내 연구를 정리해보면 국내에서는 MATSim을 이용하여 다양한 연구가 수행되고 있으며 실내보다는 도로에서 운전자기 기존 조건에서 특정한 조건이 주어졌을 때 어떻게 경로를 변경하는지에 대해 활동기반 교통모형으로 연구를 수행했다고 볼 수 있다. 국외의 선행연구로 Lämmel et al.(2010)는 MATSim을 이용하여 스위스 Sihlsee댐의 붕괴 상황을 가정한 피난 실험을 진행했으며 실험을 통해 병목현상 및 혼잡이 예상되는

지점을 분석하였다. Lämmel et al.(2010)는 인도네시아 Padang시의 쓰나미 상황을 가정한 피난 연구를 MATSim을 이용하여 분석하였다. 한편 Goetz and Zipf(2012)는 MATSim을 이용하여 건축물에서 피난 상황을 시뮬레이션 하였다. 그러나 단순한 네트워크에서 시뮬레이션을 수행하였다는 한계점이 있다. 또한 Weihao et al.(2014)는 마이애미 데이드 카운티에서 허리케인 발생상황을 가정한 피난 연구를 MATSim을 이용하여 분석하였다. Kim et al.(2017)의 연구에서도 부산 해운대에서 쓰나미가 발생하는 것을 가정하여 차량 대피 경로 분석에 MATSim을 이용하였다. 국외의 연구사례에서도 현재까지 MATSim은 실내 피난 시뮬레이션보다는 도로에서 차량의 피난 시뮬레이션을 수행하는데 많이 사용되었다. 따라서 세계적으로 MATSim은 재난 상황에서 피난을 시뮬레이션 하는 활동기반 교통모형으로 알 수 있다. 대부분의 연구는 차량의 움직임을 분석하여 각 링크별 통행량, 병목현상이 발생하는 링크 등을 분석하여 재난 상황을 대비하기 위한 연구를 수행하였음을 알 수 있다. MATSim을 이용하여 실내 재난 상황에서 피난에 대한 연구는 수행된 사례는 적지만 앞선 연구사례와 같이 활용가능성이 있다고 판단된다. 본 연구의 목표는 활동기반 교통모형을 이용하여 대학건물에서의 재실자의 피난시간을 분석하는 것이다. 피난은 화재 발생을 가정하여 화재 발생 인지 후 건물 외부로 탈출하는 것으로 정의한다. 또한 연구의 범위는 공간적 범위로는 3층의 대학건물이며, 시간적 범위로는 시뮬레이션 시간으로 30분간 수행하였다. 본 연구는 1장에서 MATSim을 이용한 활동기반 교통모형의 선행연구에 대해 검토해본다. 2장에서는 MATSim의 통행배정과정 등 이론적 토대를 파악하고 Input 데이터를 설정하여 기초자료를 정리한다. 3장에서는 화재 시나리오 설정을 통한 시뮬레이션을 구동한다. 4장에서는 각 시나리오의 결과를 해석한다. 마지막으로 5장에서는 연구의 결론을 정리한다.

II. 활동기반 교통모형 MATSim

1. MATSim

본 연구에서는 실내 피난 시뮬레이션을 위해 MATSim을 활용한다. MATSim은 인간 활동기반의 통행 시뮬레이션이다. MATSim은 개별 Agent의 경로에 따른 이동과 시나리오 설정에 의한 다양한 분석을 수행할 수 있다. 또한 MATSim에서 쓰이는 모든 Module의 설명 및 명령어가 Open source이기 때문에 분석자는 의도에 적합하도록 유연하게 변경하여 다양한 결과를 분석할 수 있는 장점이 있다(Kim et al., 2013). Open source 기반의 MATSim을 이용하여 실내 피난 상황을 시뮬레이션하면 현재 상용화된 소프트웨어인 BuildingEXODUS 및 Pathfinder 등이 가지는 한계점으로 지목되는 정해진 파라미터만을 조정 가능하다는 한계점을 극복할 수 있을 것으로 기대 된다.



(Fig. 1) MATSim simulation example (<http://www.matsim.org>)

또한 MATSim의 분석을 위해서 반드시 필요한 3가지의 Input 파일이 있다. 각각의 Input파일을 구축한 방법은 2절에서 Controller의 구축 방법, 3절에서 분석 Network 구축 방법, 4절에서 Plan파일 구축 방법을 각각 설명한다.

<Table 1> MATSim input files

Input	Contents
Controller	Input&output file control, Simulation module
Network	Node and link data
Plan	Travel time, Travel path, Travel Information

2. 기본 Controller 구축

MATSim 시뮬레이션을 구동하기 위해서 가장 기본이 되는 입력 자료로 Controller가 있다. Controller는 입력 자료와 출력 자료의 위치 및 파일 지정, 시뮬레이션 수행 알고리즘 설정, 분석 모듈 설정 등 시뮬레이션 수행을 위해 기본설정을 수행한다. 또한 MATSim에서는 최단경로 탐색을 위해 다양한 알고리즘을 제공한다. Wang(2011), Sabri(2015), Samah(2015)등 실내 피난과 관련한 다수의 연구에서는 Dijkstra 알고리즘 기반의 실내 피난 연구를 수행하였으며 Dijkstra 알고리즘이 실내 피난에 상황 적용에 적합한 것으로 설명하고 있다. 따라서 본 연구에서는 앞선 연구와 같이 MATSim의 기본 최단거리 알고리즘인 Dijkstra 알고리즘을 이용하였다. 한편 MATSim이 제공하는 최단경로탐색 알고리즘은 Table 2와 같다. 알고리즘의 설정은 Controller에서 설정하는데 설정방식은 Fig. 2와 같다.

```

<module name="controller">↓
  <param name="routingAlgorithmType" value="Dijkstra" />
```

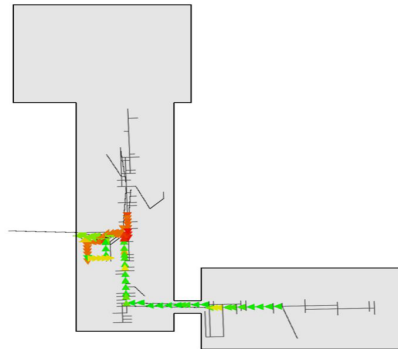
<Fig. 2> The shortest path algorithm module

<Table 2> The Shortest path algorithm in MATSim (Horni et al., 2016)

Algorithm	Contents	Remarks
Dijkstra	MATSim basic routing algorithm	Basic module
FastDijkstra	Performance optimized Dijkstra algorithm	
A*Landmarks	Navigate the Networklayer's shortest cost path using marker nodes algorithm	Additional module (installation Necessary)
FastA*Landmarks	Performance optimized Dijkstra algorithm of Dijkstra and A*Landmarks	

3. 분석 Network 구축

본 연구는 대학 건물에서의 피난 상황을 모델링하기 위해 대학 건물을 대상으로 선정하였다. 앞서 Goetz and Zipf(2012)의 연구에서는 Fig. 3과 같이 IndoorOSM을 사용하여 실내 공간의 Network구축을 하였는데, IndoorOSM의 경우 국내 건물의 모델이 존재하지 않고 실제 실내 피난 분석을 원하는 건물에 적용하기 힘든 문제점이 있다.



〈Fig. 3〉 MATSim indoor network
(Goetz and Zipf, 2012)

이는 앞선 연구에서 한계점으로 밝히고 있다. 따라서 본 연구에서의 Network의 구축은 CAD도면을 기반으로 GIS Network를 생성한 뒤 Node와 Link로 구성된 MATSim 네트워크를 Over-lap하여 구축한다. Node의 구성은 각 Node의 ID와 x, y 좌표로 구성되며 Link의 구성은 각 Link의 ID와 연결되는 두 노드의 ID, Link의 길이, Link의 자유속도, 용량, Mode로 구분된다. MATSim에서는 3차원 표현에 제약이 있기 때문에 2차원의 평면에서 3차원의 이동을 표현하였다. MATSim Network 파일의 구조는 Fig. 4와 같다. 네트워크에서 자유속도 Freespeed는 kph의 단위로 표현된다. 본 연구에서는 보행속도 2.0mps를 적용하여 7.2kph로 적용하였다. 네트워크의 기본 length 단위는 meter단위이다. 분석 네트워크에서 계단 Link는 Network의 Length를 조절하여 구축하였다. 즉, 상부로 올라가는 계단은 length의 1.2배, 하부로 내려가는 계단은 length의 0.8배로 길이를 조절하여 계단의 특성을 반영하였다.

```
<links capperiod="00:00:00" effectivecellsize="0.5" effectivelanewidth="1.50">↓
<link id="10001" from="110050" to="110051" length="50" freespeed="7.2" capacity="6360" permlanes="1" oneway="1" modes="walk" />
<link id="10002" from="110051" to="110050" length="50" freespeed="7.2" capacity="6360" permlanes="1" oneway="1" modes="walk" />
<link id="10003" from="110051" to="110052" length="50" freespeed="7.2" capacity="6360" permlanes="1" oneway="1" modes="walk" />
<link id="10004" from="110052" to="110051" length="50" freespeed="7.2" capacity="6360" permlanes="1" oneway="1" modes="walk" />
```

〈Fig. 4〉 MATSim Network file structure

〈Table 3〉 MATSim parameter input range

Division	Input range	Basis
Cell size (m ²)	0.5	SizeKorea Korean 7 th database
lanewidth (m)	1.50	Floor plan of building
Speed (m/s)	Ave. : 0.73 ~ 1.10 Male : 1.13 , Female : 1.06	SizeKorea 2016 walking pattern measurement data
Capacity (ped/hour)	6,360	Korea highway Capacity Manual 2013

본 연구에서는 네트워크 구축단계에서 위와 같은 파라미터 조정범위를 설정한 후 실험을 수행하였다. Cell Size의 경우 Sizekorea DB 7차 한국인인체치수 데이터를 이용하여 0.5m²으로 설정하였으며, 보행속도는 Sizekorea DB 2016년 보행패턴 측정 보고서에서 제시하는 한국인의 평균 보행속도를 설정하였다. lanewidth는 분석 대상 건물 도면에 입력된 복도의 폭으로 설정하였다. Capacity의 경우 국토교통부 2013 도로용량편람에서 제시하는 보행자 서비스 수준의 용량 값으로 설정하였다.

4. Plan 파일 구축

Plan 파일은 개별 agent의 통행 시간, 통행 경로, 통행 수단 등 통행 정보가 포함되어 있는 파일이다. Fig. 5은 구축된 Plan 파일의 임의의 Agent의 통행 정보이다. Plan에서는 Agent의 Act type을 설정할 수 있는데, 본 연구에서는 건물 내부 도면에서 명시된 이용현황(강의실, 사무실 등)을 바탕으로 act type을 설정하였다. 따라서 최초로 강의실에 위치한 agent의 경우 Class로 초기 act를 설정하였으며, 최초로 사무실에 위치하고 있는 agent의 경우 work로 최초 act type을 설정하였다. 또한 모든 agent의 경우 화재가 발생한 후 10초 뒤 피난이 시작하는 시점부터 act type을 Evacuation으로 변경하여 재실자의 위치 및 피난 시작점을 시각화하였다.

Plan 파일에서는 각 Agent가 지정된 링크를 이동하도록 설계할 수 있다. 그러나 본 연구에서는 Plan 파일에서 각 Agent의 시·종점만을 입력하여 최단경로 알고리즘을 통해 현재 위치에서 최적 경로를 선택하도록 설정하였다. 또한 건물 외부의 지정한 노드에 도착하는 것을 최종 피난이 완료된 것으로 가정하였다.

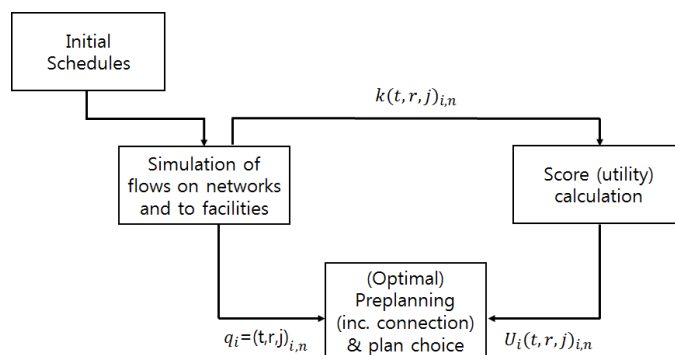
```

<person id="1338" sex="f" age="27" employed="no">↓
  <plan selected="yes">↓
    <act type="Class" link="51486" x="341889.5" y="408040.9" end_time="15:00:00" />
    <leg mode="walk" dep_time="15:00:10">↓
  </leg>↓
    <act type="Evacuation" x="309915.1" y="553983.5" />
    <leg mode="walk">↓
  </leg>↓
</plan>↓
    
```

〈Fig. 5〉 MATSim Plan file structure

5. MATSim의 통행배정 및 수립과정

MATSim의 통행배정과정은 확률적 이용자 평형 배정 기법(Stochastic User Equilibrium : SUE) 및 동적 통행 배정 기법(Dynamic Traffic Assignment : DTA)에서 근거 한다(Homi. et al., 2016). 구체적으로 MATSim은 Fig. 6의 과정을 통해 통행배정 단계를 수행하게 된다.



〈Fig. 6〉 Equilibrium process in MATSim (Axhausen, 2017)

먼저 초기에 주어진 plan 파일의 행동에 따라 출발시간, 행동 지속시간, 경로 정보에 기초해 모든 행위자에 대해 초기 시뮬레이션을 수행하며 이후 각 Iteration별 scoring과정을 수행한다. scoring과정은 Plan파일에 입력된 행위자에 따른 통행정보에 따라 효용함수를 이용하여 최적화된 경로로 배정하는 과정이며, replanning

과정을 통해 출발 시각, 경로, 수단선택 등 행위자의 Plan 데이터에 있는 통행 정보를 수정하여 Plan의 재구성을 통해 개별 행위자의 새로운 통행 정보를 도출한다. Balmer(2007)에 따르면 Plan의 효용(score)을 계산하기 위한 효용함수는 식(1)과 같이 표현된다.

$$U_{total} = \sum_{t=1}^n U_{perf,i} + \sum_{t=1}^n U_{travel,i} + \sum_{t=1}^n U_{late,i} \quad (1)$$

여기서 n : 활동의 수 (number of activities)

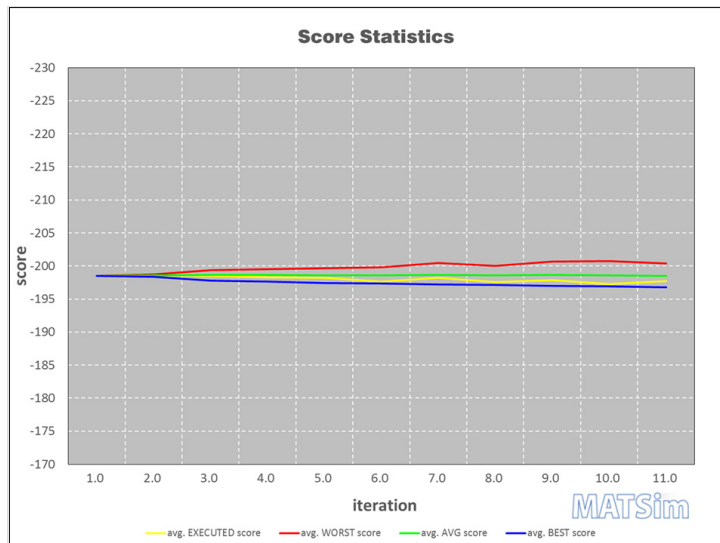
$U_{total,i}$: Input Plan의 총 Utility의 합,

$U_{perf,i}$: 활동 I를 수행하여 얻은 양의 효용 ($U_{perf,i}(t_{perf,i}) = \max[0, \beta_{perf} \cdot t_i^* \cdot \ln(\frac{t_{perf,i}}{t_{0,i}})]$)

$U_{travel,i}$: 활동 I에서 얻은 음의 효용 ($U_{travel,i} = \beta_{travel} \cdot t_{travel,i}$)

$U_{late,i}$: 활동 I에서 늦게 도착한 시간의 음의 효용 ($U_{late,i} = \beta_{late} \cdot t_{late,i}$)

MATSim의 통행배정과정에서 수렴 여부는 각 Iteration횟수와 scoring에 의해서 결정된다. MATSim은 score 값이 iteration의 반복에서 변하지 않는 상태가 되면 네트워크 평형상태로 인식되어 더 이상 반복하지 않고 iteration을 종료 한다(Kim et al., 2012). 따라서 각 시나리오에서 통행배정은 Scoring이 이전 iteration과 다음 iteration에서 값이 변하지 않는 상태에서 종료된다. Fig. 7은 Iteration별 Score를 나타내고 있으며 초기 Iteration 이후로 수치가 변하지 않으므로 시스템이 평형을 이룬 것으로 판단된다.



<Fig. 7> MATSim convergence of trip assignment

Ⅲ. 분석 시나리오

1. 분석 시나리오 설정

본 연구는 대학건물에서 화재가 발생하여 재실자가 피난하는 시나리오를 설정하였다. 또한 다양한 조건을 가정하여 가장 큰 피해가 예상되는 시나리오를 설정하였다. 화재 시나리오는 모든 상황을 분석할 수 없기 때문에 그 중에서 더 중요하고 큰 피해가 예상되는 시나리오를 골라서 설정하고 분석해야한다(Yoo et al., 2011). 따라서 본 연구의 가정은 다음과 같다. 첫째로 화재 발생 시간은 오후 3시로 설정하였다. 대학건물의 특성상 오후 시간대에 수업이 가장 많아 건물 내 재실자가 가장 많다. 따라서 초기 조건으로 5,000명의 재실자를 설정하였다. 둘째로 건물 내 모든 인원은 재난 발생에 따른 비상벨을 듣고 동시에 탈출을 시작한다고 가정했다. 셋째로 화재 발생 및 비상벨이 울려 모든 인원이 피난하는 경우 건물 내 모든 승강기는 사용이 중단되는 것으로 가정했다. 총 시뮬레이션 시간은 1800(s)로 설정하였으며, 위의 세 가지의 기본 가정과 함께 연구의 시나리오는 외부 출입구가 폐쇄되는 상황, 건물 내 비상계단이 차단되는 상황의 두 가지 시나리오를 설정하여 분석의 다양성을 두었다. 시나리오의 구현을 위해 기본 분석 네트워크의 수정을 하였다. Table 4는 분석의 가정 및 분석 시나리오 설정에 대한 내용을 설명한다.

〈Table 4〉 Basic assumptions and scenarios setting for experiments

Scenario	Contents
Scenario 1	Basic evacuation scenario
Scenario 2	External door closures
Scenario 3	Emergency stairway blocking situation

1) 시나리오 1 - 기본 시나리오

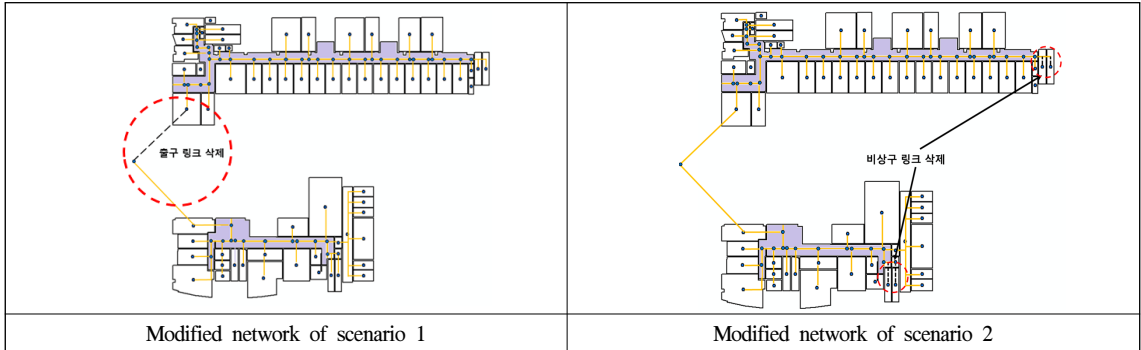
시나리오1은 가장 기본이 되는 시나리오로 설정하였다. 따라서 화재가 발생하여 비상벨이 울리면 모든 재실자가 외부로 탈출하는 시나리오이다.

2) 시나리오 2 - 출입구 폐쇄 상황

화재가 발생하면 화재뿐만 아니라 연기에 의해 다수의 인명피해가 발생한다. 특히 기숙사 등 대학건물에서 발생하는 화재는 발생 후 일정시간 이후 출입문이 폐쇄되는 특성으로 인한 연기에 의한 질식사를 유발하여 높은 인명 피해를 발생할 위험성을 가지고 있다(Jeong et al., 2010). 따라서 건물 1층의 외부 주 출입구를 폐쇄하여 탈출 시간을 비교해본다.

3) 시나리오3 - 비상계단 차단 상황

화재가 발생하면 개개인의 피난 행동 및 피난동선을 예측할 수는 없다. 그러나 화재가 발생하면 대부분의 재실자는 피난을 위해 비상계단을 이용하는 것으로 분석된다(Lee et al., 2014). 따라서 화재상황에서 비상계단이 폐쇄되거나 이용할 수 없다면 실내 공간의 평면구성에 매우 익숙한 재실자일지라도 피난시간이 매우 길어질 수 있다. 따라서 시나리오2에서는 Fig. 8과 같이 건물 내 1층으로 내려오는 비상계단을 폐쇄하는 상황을 가정하여 건물의 중앙계단으로 수직이동만을 고려하여 모든 인원이 피난하는 상황을 가정하였다.



〈Fig. 8〉 Evacuation time of each floor

2. 시뮬레이션 분석 결과

본 연구에서는 기존 피난 시뮬레이션에서 화재 상황을 가정한 분석사례를 참고하여 재실자의 피난을 분석하였다. Ham and Roh(2010), Roh(2011), Kim and Rie(2016)는 피난 시뮬레이션을 이용하여 네트워크에 존재하는 재실자의 총 피난시간을 분석하였다. 또한 본 연구에서는 MATSim을 이용하여 건물 내부의 각 층별 재실자의 총 피난시간 및 시간에 따른 피난인원의 변화를 분석하였다.

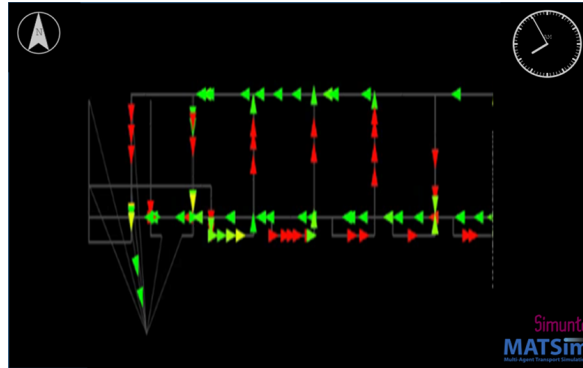
1) 시간에 따른 피난인원 분석

화재가 발생하면 화재가 전 층으로 확산되는 시간 내에 탈출하는 것이 매우 중요하다. 따라서 피난시간에 따른 피난인원을 분석하였다. MATSim에서는 각 Agent별 총 통행시간이 Output으로 계산되어진다. 분석결과 각 시나리오에 따른 평균 피난Plan 파일에서는 각 Agent가 지정된 링크를 이동하도록 설계할 수 있다. 그러나 본 연구에서는 Plan 파일에서 각 Agent의 시·종점만을 입력하여 최단경로 알고리즘을 통해 현재 위치에서 최적 경로를 선택하도록 설정하였다. 또한 건물 외부의 지정된 노드에 도착하는 것을 최종 대피한 것으로 가정하였다. 시간은 시나리오1에서 5분 40초, 시나리오2에서 6분 34초, 시나리오3에서 6분 59초로 분석되어 출구가 폐쇄되는 상황인 시나리오 2의 경우 총 피난시간이 시나리오 1 대비 약 16% 증가하였으며, 시나리오 3의 경우 시나리오 1 대비 23% 증가하는 것으로 분석되어 비상계단이 차단되는 경우 피난시간이 길어지는 것을 알 수 있었다. 또한 시간에 따른 피난인원을 분석하기 위해 시간에 따른 누적 분포를 분석했다.

〈Table 5〉 Evacuation time of each scenario

Scenario	Total evacuation time	The number of people evacuation by time
Scenario 1	5 : 40	
Scenario 2	6 : 34	
Scenario 3	6 : 59	

화재가 발생하고 피난이 시작되면 초기에는 모든 시나리오에서 피난시간에 따라 피난인원이 비슷한 양상을 보인다. 그러나 약 6분 이후부터 Fig. 9에서 볼 수 있듯이 상층에서 외부 출구를 향해 내려오는 인원들이 합류하면서 교착 및 병목현상이 발생하여 피난시간이 길어지는 상황이 발생하였다.



〈Fig. 9〉 MATSim simulation of indoor evacuation

2) 시뮬레이션 분석결과 검증

본 연구에서 분석한 기본 시나리오인 시나리오1의 결과를 일본 건설성고시의 피난계산방법에서 제시하는 수 계산에 의한 허용피난시간과의 비교를 통해 시뮬레이션 결과를 검증하였다. Park and Lim(2000), Hagiwara(2001), An(2005)에 따르면 허용 피난시간(T_f)은 화재가 발생한 층에서 부터 최후의 재실자가 피난하기까지의 시간으로, 피난시간에 대한 평가는 식(2)에 의해 판정한다.

$$\text{허용피난시간}(s T_f) = 8 \sqrt{A_{1+2}} \tag{2}$$

where, A_{1+2} : 화재 발생 층의 모든 거실 및 복도의 면적 합계(m^2)

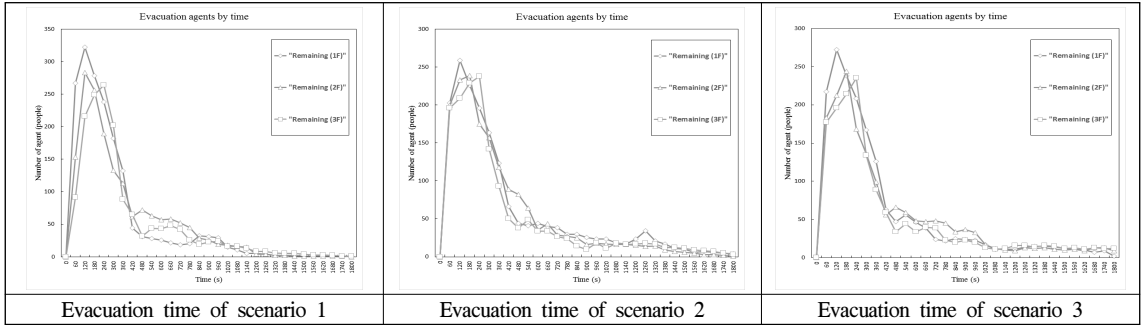
기본 시나리오에서는 3층에서 발생한 원인을 알 수 없는 화재에 따라 피난을 시작한다고 가정하였다. 따라서 3층의 바닥면적의 합은 1766 m^2 로 총 피난시간 T_f 는 약 5분 36초 (336s)로 분석되어 MATSim으로 분석한 상황과 약 1.2%의 차이를 보여 매우 유사하게 분석됨을 알 수 있다.

〈Table 6〉 Basic assumptions and scenarios setting for experiments

Scenario	Floor Area (m^2)	$s T_f$ (s)	MATSim result (s)	Gap (%)
Scenario 1	1766	336	340 (s)	1.2%

3) 층별 재실자의 피난시간 분석

시나리오 1을 기준으로 최초 위치에 따른 층별 피난인원 분석을 수행한 결과, 출구와 가까운 1층에 있는 재실자들은 전원 피난하는데 약 5분 09초가 소요되어 상대적으로 신속하게 탈출한 것으로 분석된다. 각 층별 피난인원 및 피난시간을 분석한 결과는 Fig. 10와 Table 7와 같다. 2층 및 3층에 있는 재실자는 수직 이동 및 1층에서의 혼잡으로 인해 피난시간이 약 5:21분, 6:31분으로 각각 분석됐다. 따라서 실제 화재 상황이 발생하면 옥상과 가까운 층에 위치한 재실자들은 신속하게 옥상으로 피난하면 건물 내 총 피난시간이 단축 될 것으로 예상된다.



〈Fig. 10〉 Evacuation time of each floor

〈Table 7〉 Result of experiments

Scenario	Division	Total Evacuees (ped)	Avg. Evacuation Volume (ped/min)	Avg. Evacuation Time (min)
Scenario 1	Floor 1	1,756	56.0	4:56
	Floor 2	1,677	54.0	5:57
	Floor 3	1,567	50.0	6:09
	Avg.	1,666	53.5	5:40
	Total	5,000	-	-
Scenario 2	Floor 1	1,756	56.0	6:57
	Floor 2	1,677	54.2	6:16
	Floor 3	1,567	50.5	6:31
	Avg.	1,666	53.5	6:34
	Total	5,000	-	-
Scenario 3	Floor 1	1,756	56.0	6:28
	Floor 2	1,677	54.2	7:07
	Floor 3	1,567	50.5	7:22
	Avg.	1,658	53.5	6:59
	Total	5,000	-	-

IV. 결 론

1. 결 론

본 연구는 활동기반 교통모형에 근거한 오픈소스 프로그램 MATSim을 이용한 실내 건물에서의 화재 등 재난상황에서의 재실자 피난 시뮬레이션 방법을 제안하였다. 구체적으로 재난 상황에서 발생할 수 있는 시나리오를 적용시켜 출구 폐쇄 상황, 경로 폐쇄 상황을 설정하여 총 피난시간을 분석하였다.

따라서 분석 네트워크로 구축된 대학 건물에서는 최악의 상황을 가정한 재난 상황에서 5,000명의 재실자가 피난하는 상황을 모델링하여 시나리오별 평균 피난시간, 층별 피난시간을 분석할 수 있었다. 연구의 결과로 대상 건물에서는 각 시나리오별 평균 피난시간이 5분 40초, 6분 34초, 6분 59초로 분석되어 비상계단이 폐쇄되는 경우 피난시간이 약 23% 길어지는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 상층부의 재실자는 피난상황에서 저층부 및 옥상으로 탈출하면 총 피난시간이 줄어들 것으로 판단된다.

시뮬레이션의 각 Agent는 MATSim의 내장된 최적경로 탐색 알고리즘인 Dijkstra 알고리즘을 이용하여 최

적 피난경로를 계산하여 피난경로를 선택하였다. 따라서 분석가는 경로별 통행량, 출구별 통행량, Agent별 통행경로 분석 등 다양한 분석과 다양한 시나리오에 적용이 용이하여 피난 시뮬레이션을 사용하기에 적합한 것으로 판단된다. 본 연구의 방법 및 결과는 화재 등 재난 상황이 발생할 경우 신속하게 피난할 수 있는 효과적인 방재전략을 수립하는데 근거 자료로 활용할 수 있으며 비상계단의 폐쇄 등 차단된 피난경로가 건물의 재난 상황에서 피난시간에 어떠한 영향을 미치는지에 대해 분석이 가능하여 건물의 안전관리 등 도시의 방재 및 안전 분야의 피해를 저감 하고 예방하는데 사용할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 대상지로 설정한 대학건물은 시나리오에 따른 효용성을 나타내기에는 규모면에서 부족한 부분이 있다는 한계점이 존재한다. 따라서 향후 연구에서는 초고층 건물, 복합 건축물 등 대규모의 건물에서의 시뮬레이션 수행이 필요할 것으로 판단된다. 또한 본 연구에서 살펴본 결과 본 연구의 방법 중 초기에 분석을 위한 Network를 만드는 과정이 복잡하다는 한계성이 존재하였다. 추후의 실험에서는 선행 연구에서 제시한 방법인 IndoorOSM과 실제 CAD기반의 건축물 도면을 연계하여 분석한다면 보다 현실적인 시뮬레이션을 위한 좋은 방법이 될 수 있을 것으로 예상된다.

2. 향후 연구 과제

향후 연구 과제로 현실적인 시뮬레이션을 위해서 본 연구의 방법 중 초기에 분석을 위한 Network를 만드는 과정이 복잡하다는 한계점을 극복하는 후속 연구가 필요할 것으로 판단된다. 선행 연구에서 제시한 방법인 IndoorOSM과 실제 CAD기반의 건축물 도면을 연계하여 분석한다면 보다 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 또한 본 연구에서 분석을 위해 설정한 가정을 해소하여 현실성을 제고하는 방안에 대한 후속적인 연구가 필요할 것으로 판단된다. MATSim을 이용하여 보다 현실적인 시뮬레이션을 위해 승강기를 이용한 수직 이동을 고려한 네트워크 생성이 필요할 것으로 판단되며 최종 도착지를 한 곳으로 설정하여 불필요한 이동경로가 발생하는 현상을 없애는 후속 연구가 필요할 것으로 판단된다.

ACKNOWLEDGEMENTS

본 연구는 국토교통부 국토교통연구촉진개발사업의 연구비지원(17CTAP-C116368-02)에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

- An E.(2005), "A Study on Egress Routes Design Depending on Human Evacuation Behavior in Multi-Plex Theater," *Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design*, vol. 21, no. 10, pp.131-138.
- Axhausen K. W.(2017), "MATSim", presentation at Resource System Group, White Water Junction.
- Back, M. and Shin, H. (2010), "A Study on the Emergency Stairway Evacuation of Skyscraper," *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, vol. 10 no. 4, pp.55-61.
- Balmer M.(2007), "Travel demand modeling for multi-agent transport simulations," Doctoral dissertation, ETH Zurich.
- Bang S. and Jo H.(2009), "Fire and evacuation performance evaluation at the design stage," *The Magazine of the Korean Society of Hazard Mitigation*, vol. 9 no. 3, pp.52-58.

- Ahn C., Kim J. and Lee S.(2016), “An analysis of evacuation under fire situation in complex shopping center using evacuation simulation modeling,” *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, vol. 218, pp.24-34.
- Goetz M. and Zipf A.(2012), “Using crowdsourced geodata for agent-based indoor evacuation simulations,” *ISPRS International Journal of Geo-Information*, vol. 1, no. 2, pp.186-208.
- Hagiwara I.(2001), “New Evaluation Method of Egress Safety in the Japanese Building Standard Law,” *In Proceedings of the Korea Institute of Fire Science and Engineering Conference. Korean Institute of Fire Science and Engineering.*
- Ham E. and Roh S.(2010), “A Study on the Design of Evacuation Route at Subway Station Using Simulation Analysis,” *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, vol. 10, no. 5, pp.1-7.
- Horni A., Nagel K. and Axhausen K. W.(Eds.)(2016), “The multi-agent transport simulation MATSim,” *Ubiquity Press*, London, p.618.
- Jeong H., Jeong G. and Ahn Y.(2010), “Study on the escape safety of university dormitory with the consideration of plan types,” *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, vol. 10, no. 6, pp.1-7.
- Kim H., Lim Y. and Baek S.(2001), “Path-based Dynamic User Equilibrium Assignment Model using Simulation Loading Method,” *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 19, no. 3, pp.101-113.
- Kim H., Min B. and Choi S.(2015), “Fire cause analysis on high-rise apartments,” *Architectural Institute of Korea*, vol. 5, no. 432, pp.23-28.
- Kim J. and Rie D.(2016), “A Comparative Study on Evacuation Time According to Guidance Lighting for Walkway When Visibility Level is Down,” *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, vol. 16 no. 3, pp.17-22.
- Kim J., Lee S. and Lee S.(2017), “An evacuation route choice model based on multi-agent simulation in order to prepare Tsunami disasters,” *Transportmetrica B: Transport Dynamics*, vol. 5, no. 4, pp.385-401.
- Kim J., Yu Y. and Lee S.(2013), “A Study on the Evacuation Route of Areas Prone to Floods Using Disaggregate Behavioral Model,” *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, vol. 13, no. 3, pp.61-67.
- Kim J., Yu Y., Lee S., Hu H. and Sung J.(2012), “Application of multi-agent transport simulation for urban road network operation in incident case,” *International Journal of Highway Engineering*, vol. 14, no. 4, pp.163-173.
- Kim S., Min B. and Choi S.(2015), “Fire Cause Analysis of High-rise Apartments,” *Review of Architecture and Building Science*, vol. 59, no. 5, pp.23-28.
- Kim T., Lee S. and Kim T.(2011), “A study of Activity based Traffic Model by Using MATSim,” *In Proceeding of the 65th Conference of Korean Society of Transportation*, Korean Journal of Society of Transportation, pp.117-122.
- Lämmel G., Grether D. and Nagel K.(2010), “The representation and implementation of time-dependent inundation in large-scale microscopic evacuation simulations,” *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 18, no. 1, pp.84-98.
- Lämmel G., Rieser M. and Nagel K.(2008), “Bottlenecks and congestion in evacuation scenarios: A

- microscopic evacuation simulation for large-scale disasters,” *In Proceeding of 7th International Conference on Autonomous Agents and Multi-agent Systems*, Estoril, Portugal.
- Lee H., Lee S. and Hong W.(2014), “A Study on the Escalator Evacuation Model Using the buildingEXODUS,” *Journal of the architectural institute of Korea planning & design*, vol. 30, no. 4, pp.191-198.
- Park J., Kim H., Yoon S., Seo S., Ha H. and Lee S.(2012), “Development of Fire Scenarios for PBD Fire Safety Design in High-Rise Structures,” *In Proceedings of the Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering Conference, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, pp.258-260.
- Park Y. S. and Lim D. J.(2000), “A study on the planning for fire evacuation of the high-rise buildings using the fire evacuation simulator,” *In Proceedings of the KIEE Conference. The Korean Institute of Electrical Engineers*.
- Roh H.(2011), “Performance-based Fire Protection Design of Domestic Super High-rise Buildings-Evaluation by ASET and RSET,” *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, vol. 11, no. 2, pp.9-13.
- Sabri N. A. M., Basari A. S. H., Husin B. and Samah K. A. F. A.(2015), “The utilisation of Dijkstra’s algorithm to assist evacuation route in higher and close building,” *Journal of Computer Science*, vol. 11, no. 2, pp.330-336.
- Samah K. A. F. A., Hussin B. and Basari A. S. H.(2015), “Modification of Dijkstra’s algorithm for safest and shortest path during emergency evacuation,” *Applied Mathematical Sciences*, vol. 9, no. 31, pp.1531-1541.
- Seo S., Choi J. and Hong W.(2008), “How Visual-Field Obstruction from Fire Smoke Influences a Resident’s Necessary Time to Reach Fire Escape and Evacuation Route in a High-rise Apartment Housing,” *Journal of the Korean Housing Association*, vol. 19, no. 5, pp.103-110.
- Son B. (2015), “A Study on Fire Safety of High-rise Buildings,” *Magazine of the SAREK*, vol. 44, No. 5, pp.16-22.
- Wang T. Y., Huang R., Li L., Xu W. G. and Nie J. G.(2011), “The application of the shortest path algorithm in the evacuation system. In Information Technology,” *Computer Engineering and Management Sciences (ICM), 2011 International Conference*, vol. 2, pp.250-253.
- Yoo Y., Park H., Cho K., Kweon O. and Kim H.(2011), “A Case Study on Evaluation Criteria for Performance Based Design,” *In Proceedings of the Korea Institute of Fire Science and Engineering Conference. Korean Institute of Fire Science and Engineering*, pp.384-387.
- Yu Y., Kim J., Lee S. and Kim T.(2012), “A Study of Applicability of Activity based Model By using MATSim,” *In Proceeding of the 67th Conference of Korean Society of Transportation, Korean Journal of Society of Transportation*, pp.82-92.