

보행류 기반 도시철도역사 평가 시뮬레이터를 활용한 대피 시나리오 분석

An Analysis on Evacuation Scenario at Metro-stations using Pedestrian Movement-based Simulation Model

유 소 영*	정 래 혁**	정 진 혁***
(So-young You)	(Rea-hyuck Jung)	(Jin-hyuck Chung)
(Korea Railroad Research Institute)	(Jungdo UIT)	(Yonsei University)

요 약

도시 철도는 도시 광역권 교통수단으로, 주요 노선들이 만나는 환승역사의 경우, 역사내 보행 통행시 극심한 혼잡을 야기하며, 승강장 내 교통약자를 포함한 이용객들의 안전사고 위험이 높게 나타난다. 반영구적 도시교통 기반시설로의 도시철도역사는 초기 건설 당시 장기 이용 수요 예측을 실시하지만, 향후 신설 노선 및 환승(예정)역을 정확히 파악할 수 없고 건설완료 이후 토지이용계획이 급변할 경우, 예측 수요와 실제 수요는 상이하게 나타날 수 있으며, 확장이 제한적이고 대규모 추가공사 비용이 요구되기 때문에 도시철도 역사가 지닌 물리적 특성 및 이용자 요구에 따라 효율적인 개선이 필요하다. 본 연구에서는 도시철도역사 구조, 이동 동선 등 물리적 요소와 시시각각 변하는 도시철도 내 이용수요 등 변수를 고려하여 다양한 시나리오에 대한 효과분석이 가능한 도시철도역사 평가용 시뮬레이터 핵심 모형을 소개하고, 해당 시뮬레이터를 활용하여, 사당역 대피 시나리오를 분석하였다. 분석결과, 시뮬레이터 활용하여 유사상황 발생시 입체 공간 상에서 다양한 조건을 고려한 다수의 대피 경로 탐색이 용이하였으며, 사당역의 경우, 대피경로 정보 제공을 통해 기존 대비 약 60% 대피시간을 절감할 수 있는 것으로 분석되었다.

핵심어 : 보행 통행, 시뮬레이션, 도시철도, 대피 시나리오 분석

ABSTRACT

A subway system is one of the major transportation modes at a metropolitan area. When it meets the other lines, the metro station, so-called transferring station, is usually threatened by severe pedestrian congestion and safety issue of transit users including the transportation vulnerable. Although transportation planners forecast travel demand at the beginning, it is not easy to predict pedestrian flows precisely for a long term if land use plans have dramatically changed. Due to expensive costs, structural extension of metro stations is limited. Therefore, it requires efficient and technical improvements as meeting the demand of pedestrian and physical characteristics. In this study, the core mechanism of pedestrian movement-based simulation model was introduced and evacuation scenarios were analyzed with the developed model. As a result, the multiple optimal routes for unexpected events at the solid space of the multiple stories are easily searched through the simulator and in the case of Sadang Station, travel time can be reduced by 60% when the evacuation information and intuitive design are provided.

Key words : Pedestrian Movement, Mesoscopic Simulation, Metro-station, Evacuation Scenario Analysis

† 본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업의 연구비 (15RTRP-B067918-03) 지원으로 수행하였습니다.

* 주저자 및 교신저자 : 한국철도기술연구원 녹색교통물류시스템공학연구소 교통체계분석연구팀 선임연구원

** 공저자 : 정도 UIT 사원

*** 공저자 : 연세대학교 도시공학과 교수

† Corresponding author : So-young You(Korea Railroad Research Institute), E-mail syyou@krii.re.kr

† Received 2 February 2016; reviewed 10 March 2016; Accepted 31 March 2016

I. 서론

도시 철도는 정시성을 보장하는 대량수송 제도 시스템으로 주요 교통수단으로 자리 잡고 있으며, 꾸준한 이용객 증가로 이어지고 있다. 특히, 배차간격이 포화상태인 노선들이 만나는 환승역사의 경우, 도시철도 역사내 보행자간 극심한 혼잡을 야기하며, 승강장 내 교통약자를 포함한 이용객들의 안전사고 위험이 높게 나타난다. 반영구적인 도시교통 기반시설로의 도시철도역사는 초기 건설 당시 장기 이용 수요 예측을 실시하지만, 장래 신설 노선 및 환승(예정)역을 정확히 파악할 수 없고 건설 이후 토지이용계획이 급변할 경우, 예측 수요와 실제 수요는 다른 양상으로 나타난다. 특히, 도시철도역사 및 선로 시스템 등의 기반시설은 일단 구축이 완료되면 확장이 매우 제한적이고 대규모 추가공사 비용이 요구되기 때문에 도시철도 역사가 지닌 물리적 특성 및 이용자 요구에 따라 적합한 도시철도역사 개선이 필요하다. 보행환경 개선사업 및 도시환경 정비사업과 관련하여, 최근 철도역사 개선사업으로 2008년~2015년까지 7개역 (신도림역 2호선, 시청역 1-2호선, 서울역 1-4호선, 교대역 2-4호선 개선사업에 1,404억원 예산이 투입되었으며, 향후 10개 역사 (사당역 4호선, 을지로4가역 2호선, 종각역 1호선, 종로 4가 1호선-4호선, 동대문역사문화공원 2호선-4호선, 을지로4가 2호선, 고속터미널 4호선, 역삼 2호선)의 개선사업이 진행 예정이다. 실제로 국가통합체계효율화법에 의하면 도시철도역사는 환승시설로 분류되고 환승시설은 교통시설에 포함되기 때문에 교통시설투자계획에 의거하여 계획이 수립되고 분석되어야 하지만, 일반적으로 도시철도는 지방자치단체 관할로 분류되기 때문에 법적 근거가 모호하며, 객관적이고 과학적인 분석기법 부재로 인해 해당 사업에 대한 유효성 검증이 체계적으로 이루어지지 않고 있는 실정이다.

이에 본 연구는 도시철도역사 구조, 이동 동선 등 물리적 요소와 시시각각 변하는 도시철도 내 이용수요 등 변수를 고려하여 사전에 시스템 설치 전후, 운영정책 및 제도 변화에 대한 효과분석을 지원

하기 위해 개발된 도시철도역사 평가용 시뮬레이터 모형의 핵심 구조를 소개하고자 한다. 도시철도역사 평가용 시뮬레이터는 도시철도역사 출입구부터 승강장까지 실내지도를 노드-링크 체계의 보행네트워크로 구축하는 정적DB와 보행행태를 반영한 역사내 이용객 편의성을 판단하는 동적DB로 구성된다. 두 DB 통합하여 도시철도역사 평가용 시뮬레이터라 정의하였으며, 동적DB에 탑재된 보행알고리즘은 미시적 보행 행태분석을 하여 대기행렬 이론에 접목한 Hybrid 보행류 모형이 적용되었다[1-2]. 마지막으로, 본 프로그램을 활용한 해당역의 대피 시나리오에 대한 사례 분석을 통해 보행 시뮬레이터 활용을 통한 연구에 대한 시사점을 도출하였다.

II. 관련 연구 동향

1. 보행행태 분석 기반 평가 프로그램

혼잡한 보행시설 및 대규모 복합용도 시설 내 보행행태 혹은 보행 교통류 모형 개발에 대한 연구는 수십 년간 꾸준히 진행되어 왔지만, 타 교통수단과는 달리 매순간 사람의 의사결정에 기반을 두고 발생하는 보행행태 분석 연구의 특성 상 깊이 있는 이론적 연구보다는 다양성에 초점을 맞추고 있다. 실제로 보행행태 관련 연구는 밀폐된 공간구조 혹은 광장 등 개방된 공간구조를 채택여부에 따라 모형 적용 범위, 보행행태 혹은 보행류를 설명하기 위한 이론적 근거 (보행 기종점, 보행 경로 선택 또는 배정, 보행 속도, 보행 혼잡도, 보행자 간 보행회피 등), 모형 정산 및 검증, 확장성 등을 고려해야 하는 공학 뿐만 아니라 다양한 학문에 기반을 둔 다학제적 접근 (Multidisciplinary approach)이 필요한 분야이다. 과학적이고 객관적인 연구결과를 바탕으로 한 범용적인 보행행태 분석을 위해 VISSM, Urban Analysis Framework, Legion, GAMMA, SimWalk, P-Sim 등 상업화된 국내의 보행행태 분석 프로그램이 개발되었다. 미시적 교통분석 프로그램으로 잘 알려진 VISSM은 차량 시뮬레이션을 주 분석 대상으로 하며, 장애물은 회피하고 도착지에 도달하고

자 하는 힘으로 정의된 Social Force 모형 (SFM)을 기반으로 한 보행자 시뮬레이션을 추가하였다[3]. Urban Analysis Framework 또한 Paramics의 차량 기반 시뮬레이션에 추가 기능으로 탑재하기 위해 구현되었으며, 4가지 행태규칙(최대 속도, 최단 경로, 최소 보행자간 거리, 반응시간)과 1개 배치규칙(목표지점 도달)을 기반으로 한 Agent-based 모형으로 구분할 수 있다. 또 다른 보행시뮬레이션인 Legion은 Agent-based 모형으로 연속된 공간 위에 출입구 혹은 시설물을 독립된 요소(entity)로 보고 경로 방향, 속도와 안정감 등을 비교하여 entity 탐색을 통해 단계별로 이동하도록 구성하였다[4]. 노스캐롤라이나 대학교의 GAMMA 그룹은 에너지 효율성을 기반으로 한 보행으로 인한 충돌 및 상충을 최소화하는 최적화 기법[5]을 채택했으며, Simwalk은 미시적 보행모형을 기반으로 개별 행태 및 개개인의 구체적인 목표를 모형화하여 구축되었다. 국내에서 개발된 P-Sim은 미시적 행태 모형을 기반으로, 보행공간을 블록, 노드와 링크 체계로 구성하여 최단거리탐색알고리즘과 Space syntax이론을 적용한 최대인자 경로탐색알고리즘을 적용하였다[6, 7]. PEDSTREAM은 기본적으로 보행류 모형과 최단경로를 이용하는 방법론과 개별 보행자의 혼잡 허용치 등 개별행태 규칙을 반영하는 방법론을 접목하여 형식적인 mesoscopic 방식을 채택하였으나 에스컬레이터, 엘리베이터 등 보행시설에 관한 구체적인 처리방법에 대해 정의되지 않았으며, 개별행태 적용 방법은 이용자가 직접 입력하는 형식을 채택함으로 분석과정 및 결과에 있어 주관적인 요소가 가미될 만한 소지가 있다[8].

본 연구에서는 기존의 미시적 보행 분석모형 기반 시뮬레이터가 지닌 모형 검증, 알고리즘 연산의 비효율성 및 프로그램의 구현과정에 대한 문제점(Gridlock 등)을 개선하여 사전 평가 과정을 합리적이고 객관적인 수준으로 간소화하는데 그 목적이 있다.

2. 평가지표 및 서비스 수준 분석

도시 철도역사 주변의 보행은 대중교통 및 주변

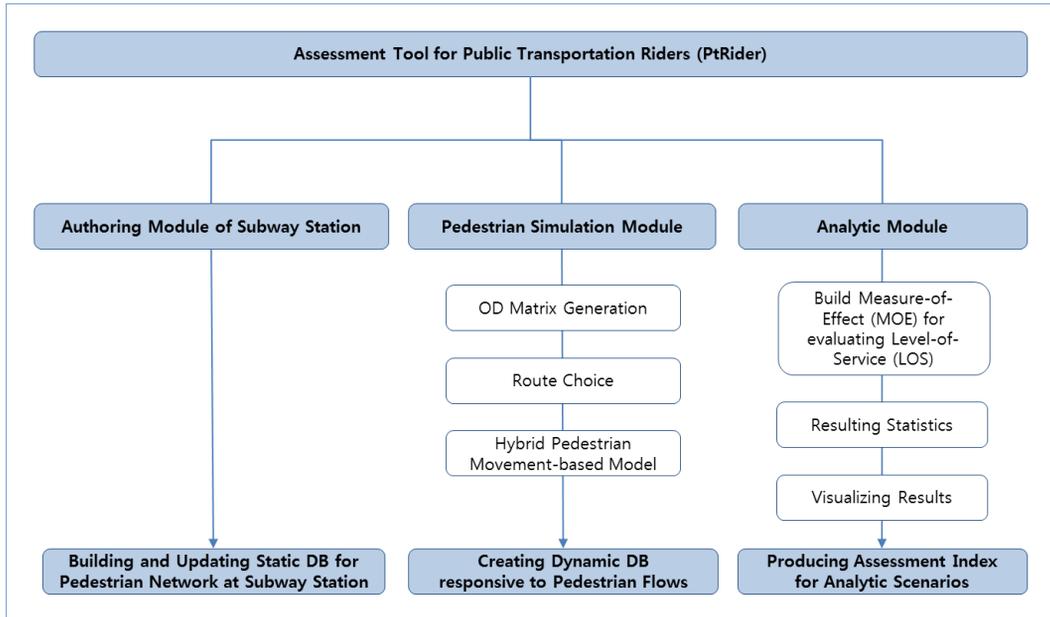
지역 시설과 원활한 연계를 위한 접근 교통수단 중 하나이며, 공간구조 및 대규모 이용시설이라는 특성으로 인해 다양한 법제도 (보행안전 및 편의증진에 관한 법률, 교통약자의 이동편의 증진법, 국가통합교통체계효율화법 中 복합환승센터 관련) 및 지방자치단체 주요 계획 수립 등과 밀접한 관계를 맺고 있다. 또한, 다수의 지방자치단체, 운영기관, 주거, 상업, 업무 시설 이용자 등 다양한 이해관계자를 고려해야 한다는 측면에서 해당 시설의 서비스 수준 (Level-of-Service) 분석하기 위한 적절한 평가 지표의 선정과 개발은 효과적인 보행인프라 구축을 위한 필수 요소이다. 보행자 서비스 수준 측정을 위한 평가 지표로는 보행점유공간 ($m^2/인$)과 보행교통류율(인/m/분), 보행 속도와 v/c ratio 등이 널리 사용되고 있으며, 이와 관련하여 변수 선정 및 유형별 적용 기준에 대한 연구가 꾸준히 진행되어 왔다 [9-16]. 도로용량편람 (KHCM: Korean Highway Capacity Manual)에서 보행자도로, 계단, 대기공간 및 신호횡단보도에서의 서비스수준을 분류하여 제시하고 있으며 한국표준과학연구원에서 제시된 국내의 인체 타원 면적을 적용하여 사용하고 있다[17]. 이러한 시설 설계 기준 제시를 위한 연구와 달리, 대중교통 환승시설 LOS 분석과 대규모 복합교통시설 보행 활성화 연구는 보행교통량을 고려하여 교통 시설의 서비스 수준을 평가하고 시설 개량 여부를 합리적으로 판단하기 위한 목적이 있다[18-20].

III. 평가 프로그램 소개

1. 프로그램의 기능 및 구성

도시철도역사 평가용 시뮬레이터는 3D 실내지도 저작 모듈, 보행류 기반 통행분석 모듈, 결과분석 및 평가 모듈의 4단계로 구성되어 개발되었으며, 본문을 통해 추가적으로 설명될 예정이다 (<Fig. 1> 참조).

실내지도 저작 모듈은 도시철도역사의 현 구조를 모사한 분석용 보행 네트워크 구축 뿐만 아니라 다양한 도시철도 역사 리모델링 시나리오 구현이



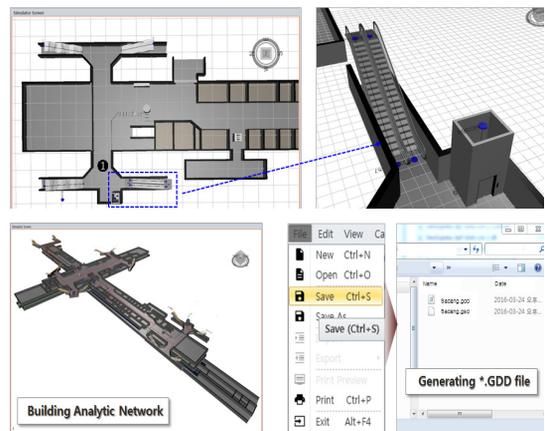
<Fig. 1> Framework for the Pedestrian Movement-based Simulation Model

가능하도록 편집기능을 포함하고 있다. 해당 모듈에서 구축된 보행네트워크의 물리적 속성값은 정적 DB라 일컬어지며, 보행 시뮬레이션 모듈에서 수행되는 보행알고리즘 연산시 입력값으로 자동 연계되어 연산 결과는 보행교통량에 의한 해당 링크별 통행시간, 속도 등 변화된 속성값은 동적DB로 저장·구축된다. 보행 시뮬레이션 모듈은 기중점 자료 생성, 경로 선택, Hybrid 보행류 기반 모델을 통해 보행통행분석을 수행하는 단계이며, 마지막 결과분석 및 평가 모듈에서는 보행 시뮬레이션 모듈을 통해 도출된 다양한 결과값을 그래프와 표로 제시하고 통합평가지표를 통해 해당 역사의 현재 서비스 수준과 역사 개선 시나리오 적용 후 서비스 수준을 제시하여 개선여부를 비교할 수 있도록 설계되었으며, 사용자 정의에 따라 평가지표 도출 방식을 차별화 할 수 있도록 하였다.

2. 도시철도역사 분석용 네트워크 구축을 위한 저작 모듈 개발

도시철도역사 평가용 시뮬레이터는 분석과 결과

표출의 이해도와 용이성을 확보하기 위해 간소화된 3D 형식을 채택하고 있다 (<Fig. 2> 참조). 3D 실내지도 구축 플랫폼은 이용자가 도시철도역사의 물리적 보행 네트워크를 손쉽게 구축할 수 있도록 CAD 도면 응용기능 (도면 불러오기→3D 전환), 객체 연결 스냅 기능, 시설물 컴포넌트 기능, 노드-링크 자동생성 등 주요 기능을 구현하였다.



<Fig. 2> Authoring Module for Creating Analytic Network

또한, 보행교통 분석용 네트워크라는 특성상 자동생성 기능의 일반화된 규칙 적용이 용이하지 않은 부분에 대해서는 사용자가 직접 속성을 편집할 수 있도록 설계되었다.

3. 보행류 기반 통행수요 분석 모듈

1) 기종점(OD) 자료 생성 단계

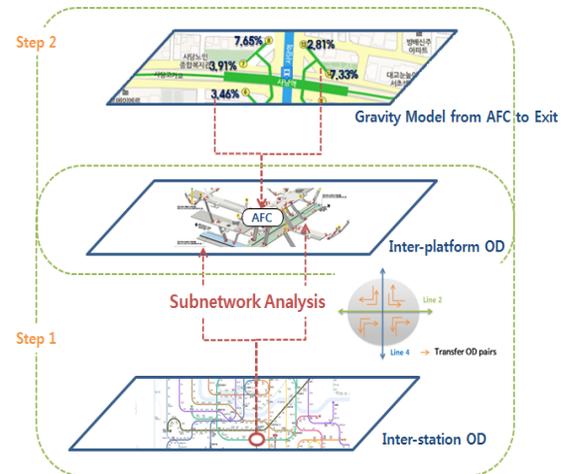
역사의 출입구 및 플랫폼 기종점 (OD) 자료는 보행 분석 모듈 구동을 위한 기초 입력자료로서 일반적으로 도시철도 이용 목적을 가진 보행 통행자, 도시철도 역사내 상업시설 이용 목적을 가진 보행 통행자, 횡단보도를 이용하지 않고 도시철도 역사를 통과하여 횡단하는 보행 통행자의 4가지 유형으로 구분된다. 하지만, 도시철도 이용 목적을 가진 보행 통행자 이외 유형의 보행 통행 자료는 분석대상 도시철도 역사별로 차별화된 구축방법이 요구되기 때문에 범용성을 갖춘 시뮬레이터 개발을 목표로 한, 본 연구에서는 도시철도 이용 목적을 가진 보행 통행자의 기종점 자료 구축에 대한 방법론에 초점을 맞춰 개발하여 모듈로 탑재하였으며, 이외 상업시설 이용자 및 통과 보행 통행 자료는 사용자에게 직접 입력이 가능하도록 설계되었다.

도시철도역사 출입구 및 플랫폼 기종점 자료는 2 단계 기종점 자료 구축과정을 거쳐 수행된다(<Fig. 3> 참조). 첫 번째 단계는 대중교통카드자료 기반

역의 방향성 정보를 가진 역간 기종점 자료로 확장하였다. <Fig. 3>의 Step 1으로, 역간 기종점 자료 (Inter-station OD)를 단일 역 기준으로 기종점 자료를 추출(Subnetwork Analysis)하여 해당 역사내 승강장-AFC를 기종점으로 하는 자료로 재구성하는 단계 (Inter-platform OD)이다. 해당역의 경우, 단일 환승 인원수가 아닌 2호선 방배역 방향, 낙성대 방향에서 4호선 충신대입구(이수) 방향, 남태령 방향 등 8가지 기종점 쌍에 따른 방향성을 가진 각 환승 인원수가 도출된다. 실제로 주요 도시철도 환승역사의 경우, 첨두시 환승인원이 승하차인원의 50% 이상 차지하는 경우가 존재하기 때문에 도시철도역사

보행 분석을 위해서 본 과정은 필수적이라 하겠다. 이 단계에서는 분석하고자 하는 대상역사 기준의 방향성을 가진 승하차인원 및 환승인원을 최종 추출한다.

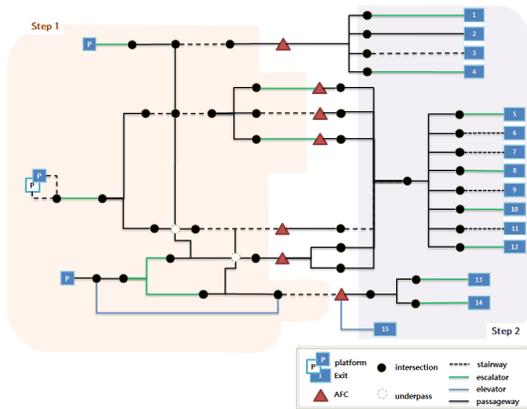
두 번째 단계는 <Fig. 3>의 Step 2로, 대상역사의 승하차 인원을 도시철도 역사 출입구별로 배분하는 단계이다. 대중교통카드 태그 자료를 이용하여 AFC (Automatic Fare Collection) 시스템 통과지점과 각 출입구를 기종점하는 중력모형 이론을 기반으로 한 모형식을 개발하였으며, 실제 사당역 조사 자료를 이용하여 파라메타 정산 과정을 수행하였다[21].



<Fig. 3> Framework for Estimating Pedestrian OD at each station

2) 경로선택 단계

2014년 주요 환승역을 중심으로 수행된 도시철도 환승역사 조사를 수행하였으며, 지하철 역사의 경로조사와 이용자 추적조사 자료를 이용하여 역사내 통행 분류와 경로에 대한 분석을 실시하였다. 우선, 지하철 역사내 경로선택시 의사결정요인으로 작용할 수 있는 변수를 선정하였고, 선정된 변수에는 이용자의 통행 기점에 따른 특성 변수, 경로 특성 변수, 이용자 특성 변수 등이 있다. 추정된 경로선택 모형은 와이블 분포를 가정하는 확률효용 기반 로짓모형이며, 관련 모형구축 연구는 Jung and Chung(2015)에 구체적으로 서술되어 있다[2].



<Fig. 4> Pedestrian Network for Route Choice

경로선택 단계에 활용된 분석용 네트워크는 <Fig. 4>과 같으며, 이는 앞서 <Fig. 2>에서 제시된 분석용 네트워크 구축용 저작도구의 노드-링크 자동생성 기능을 통해 구축되었다. 일부 4개 이상의 서로 다른 유형의 보행시설이 교차되는 지점 등 사용자의 주관적인 판단을 필요로 하는 노드-링크는 사용자 편집기능을 통해 손쉽게 편집이 가능하도록 구현하였다. 일반적인 도로 네트워크 구성과 달리, 보행 네트워크는 센트로이드 노드, 일반 노드 이외에 AFC/Gate 노드의 3가지 노드와 일반 링크, 센트로이드 커넥터 외 복합시설물 링크로 구성되어 있다. 복합시설물 링크는 경로선택 단계에서는 하나의 링크로 인식되고 연산되지만, 통행배정단계에서는 계단+에스컬레이터 등 2가지 이상의 보행시설물로 구성된 링크를 시설물 특성에 따라 보행통행량을 분리 배정하도록 설계되어 있다.

본 연구에서는 K-Shortest Path 알고리즘을 이용하여, 주어진 네트워크의 경로탐색을 수행하고 이를 바탕으로 주어진 기종점 자료의 통행배정을 수행하며, 1차에서 K차 경로에 관측된 사용 빈도 비율을 채택 적용하였다. Jung et al.(2016)에 의하면, 사당역의 선택 경로와 미선택 경로를 비교하였을 때, 전체 경로 158개 중 56개 경로가 실제 사용되었으며, 이용되지 않는 경로는 102개에 달했다. 사용된 경로의 평균은 157.45m이며, 이용되지 않는 경로의 평균은 295.97m로, 이용되지 않는 경로의 평

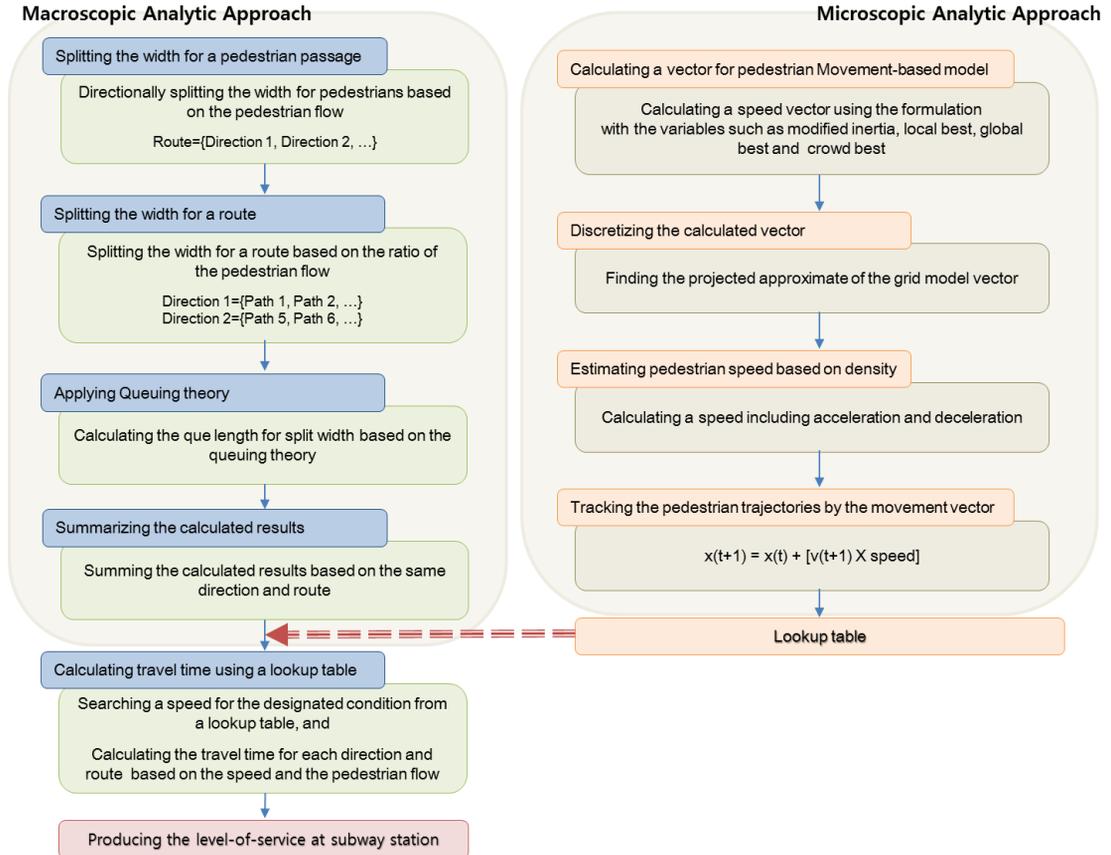
균 길이가 1.88배 가량 긴 것으로 나타났다. 이는 보행자가 최단경로를 선호하는 보편화된 논리를 다시 한번 입증하는 것이며, 전체 보행경로 분석 대신 K-shortest Path 알고리즘 적용이 합리적으로 논증하는 결과이다[22].

4) Hybrid 보행유동 알고리즘 적용 단계

지하철 역사 내 보행 교통류는 비교적 명확한 보행 동기 및 목적을 가지고 있으나 비교적 복잡한 방향성을 좁은 공간에 밀집된 상태로 이동한다는 특징을 가지고 있기 때문에 규범적 모형 (normative model)을 우선 정립하고, 실제 관측자료를 이용하여 모형을 정산하는 방법으로 지하철 역사 내 보행자의 유동 알고리즘을 개발하였다. Hybrid 보행유동 알고리즘의 개념도는 <Fig. 5>와 같다.

본 연구에서 제시하는 보행유동 알고리즘은 도시철도의 역사 개선 사업에 최적화된 모형으로 도시철도 정차시점을 기준으로 주기적으로 보행자 그룹이 생성·이동하고 소멸하는 일련의 과정을 재현하는데 중점을 두고 있으며, 거시적 관점과 미시적 관점을 통합한 Hybrid 적 성향을 지닌 보행류모형을 최종 도출하였다. <Fig. 5> 좌측 부분의 거시적 보행류 모형은 각 시설물을 노드 단위로 분류하여 대기행렬이론을 기반으로 대기시간 및 지체시간을 산정하고 보행흐름을 평가하는 방식을 채택하고 있으며, <Fig. 5> 우측 부분의 미시적 보행류 모형은 각 시설물을 연결하는 보행통로, 즉 링크 단위의 통행속도 및 통행시간을 Particle Swarm Optimization (PSO) 이론에 입각하여 연산하는 방식으로 미시적 분석을 수행하였다[1, 23].

이러한 Hybrid 보행유동 알고리즘 구성으로, 보행특성조사 및 미시적 통행알고리즘 연산 과정을 통해 보행시뮬레이터 파라메타는 교통 전문가에 의해 수정·보완 될 수 있으며, 갱신된 파라메타는 배치파일 등의 형태로 보행시뮬레이터에 주기적으로 업데이트 가능하도록 설계되어 있기 때문에 보행 알고리즘에 관한 전문적인 지식이 없이도 시뮬레이터 활용이 가능하다는 장점이 있다.



〈Fig. 5〉 Framework of Hybrid Pedestrian Movement-based Model

실제로 대부분의 보행시뮬레이터는 미시적 분석 기법을 기반으로 개발되고 상용화되었으나 파라메타 활용, 갱신, 정산에 있어서 검증으로 인한 한계를 지니고 있으며, 사용자 측면에서도 보행이론에 대한 전문적인 지식이 없이는 시뮬레이터를 완벽하게 이해하고 구현할 수 없다는 점이 시뮬레이터 활용에 제약이 되고 있다.

결과분석 및 평가 모듈은 통합평가지표 연산, 링크 및 노드에 따른 국지적 분석결과 표출, 그리고 그래프 등을 통한 결과의 시각화 부분으로 구분될 수 있다 (<Fig. 6> 참조, 추후 표출 기능 개선 예정).

통합평가지표는 대중교통환승시설 실태조사 및 LOS 분석 영역에서 제시된 이동편리성, 혼잡성, 정보제공 등 3가지 평가항목을 가중치를 적용하여 산정하는 방식을 채택하였으며, 각 평가항목의 연산식은 도시

철도역사 평가에 적합하게 수정·보완하여 적용하였다.

- 이동편리성: 도시내 통행 환승시설을 평면환산거리로 산정하여, 평면환산거리가 300m 이상인 경우 0점, 8m이내인 경우 10점으로 채택
- 혼잡성: 보행통로 (보행통로, 에스컬레이터, 엘리베이터, 계단 등 보행시설 기준) 밀도를 기준으로 서비스 수준 (LOS A-F, 국토교통부 기준)을 산정하고 0~10점으로 환산 (대기공간의 서비스 수준은 노드-링크 상의 결정점을 의미하며, 플랫폼, 대합실, 개표소 등에 대한 공간에 대한 산정은 별도로 하지 않음)
- 정보제공: 환승정보안내 표지판 적정설치기준을 만족하는 경우를 10점, 최소설치기준 미만일 경우를 0점으로 처리하며, 적정설치기준과 최소설치기준 사이는 내삽법을 이용하여 산정



(Fig. 6) Visualization of the Assessment Tool

4. 결과분석 및 평가 모듈

제시된 기존 방식의 평가지표 이외에, ‘경로 이탈도’, ‘가속력 크기’, ‘충돌 횟수’의 총 3개의 LOS 효과 척도가 추가 개발되어 구현 중에 있으며, 해당 연구의 구체적인 방법론 및 검증에 대한 내용은 Lee(2016)을 통해 확인할 수 있으며, 각 평가지표의 정의는 아래와 같이 정리 된다[24].

- 경로 이탈도: 보행자의 직선 통행을 기준으로 직선에서 벗어나 통행하는 각도를 정량적 나타내는 지표이며, 일직선 통행을 최단 거리로 볼 때 벗어난 각도에 따라 보행교통류율 차이 의미
- 가속력 크기: 보행자가 경로를 이동함에 있어서 링크를 통과할 때마다 속도 변화의 크기가 크게 나타날 경우, 빈번히 나타나는 stop-and-go 통행을 통해 보행교통류 불안전성을 평가하는 지표
- 충돌 횟수: 보행자가 반대 방향 통행자와 충돌하는 횟수를 의미하며, 0.1m 이하로 근접한 경우를 충돌로 정의하여 정량화한 지표임

본 시뮬레이터에 구현되어 있는 통합평가지표는 국토교통부 기준에 의거하여 표준화된 평가를

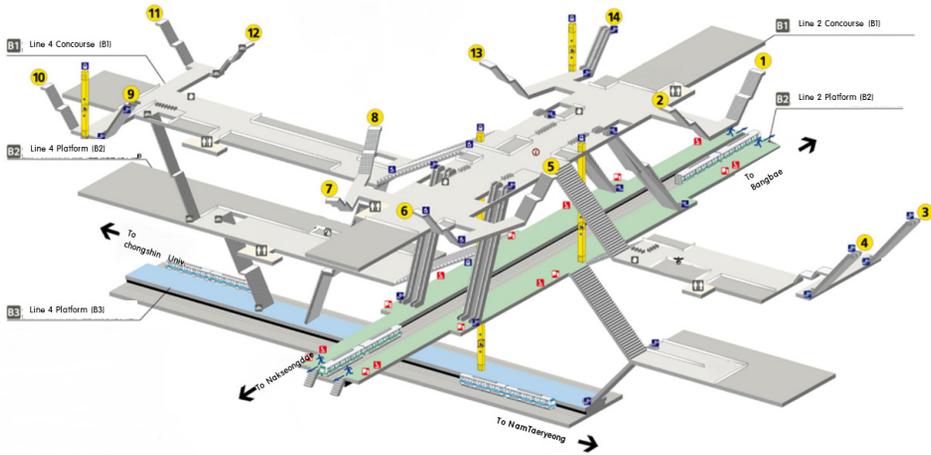
표로 분석대상 사업간 비교가 용이하며, 현재 구현 중인 경로 이탈도를 포함한 3가지 평가지표는 분석 대상역사의 열악한 보행환경을 보여줄 수 있는 상세 지표로 사용 가능하도록 설계되었다.

IV. 시나리오 분석

1. 시나리오 구성 및 현황 검증

보행류 기반 도시철도역사 평가 시뮬레이터를 활용한 현황 분석 및 대피 시나리오 분석을 통해, 현행 도시철도역사내 이동 동선과 대피시 이동 동선의 취약 지점을 도출하고 개선 방향을 제안하고자 한다. 분석 대상역사는 수도권 도시철도 2호선과 4호선 환승역사이며, 다수의 경기도·인천 광역버스 노선의 경유·중착 정류장을 보유하고 있는 사당역으로 선정하였다(<Fig. 7> 참조).

수도권 도시철도역사 스마트 카드 자료 및 게이트별 통과수요를 수집하여 역사내 보행 기종점 자료 구축시 활용하였으며, 사당역 출입구 및 승강장 플랫폼을 기종점 노드로 설정하였다. 사당역 보행 네트워크는 총 191개의 노드 (일반노드: 163개, 기종점 노드: 21개, AFC/Gate 노드: 7개)와 224개의 링크 (일반링크: 183개, 복합시설물 링크: 20개, 센트로이드 커넥터: 21개)로 구축되었으며, 평가 시뮬레이터 검증용으로 활용되었다. 사당역의 대피 시나리오는 관측 자료를 구득이 불가능한 관계로 시험군으로의 역할에 충실하도록 설계하였다. 대피 시나리오의 특성상 시뮬레이터 상에 설계된 평가지표 대신 통행시간 최소, 최대값을 활용하였다. 현황 시나리오의 검증은 2차에 걸쳐서 진행된 현장조사 자료를 활용하였다. 1차는 사당역 동선 조사, 출입구 보행통행량 조사, 보행동선 교차 지점, 사당역 구조조사 등 다양한 기초조사가 실시되었으며, 2차는 보행시설별 보행밀도 및 경로추적 조사 등을 포함한 영상 촬영 조사가 수행되었다. 해당 조사 결과 중, 보행통행량을 기준으로, 모형치와 실측치의 적합성을 검증하였으며, MAPE (Mean Absolute Percent Error, %)로 정량화하여 제시하였다.



〈Fig. 7〉 Map: Sadang Station

MAPE (%)의 계산식은 아래와 같다.

$$MAPE(\%) = \frac{\sum_{i=1}^n |PE_i|}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{X_i - F_i}{X_i} \times 100(\%) \right|}{n}$$

여기서,

PE_i : %Error

X_i : Observed counts on the i -th location

F_i : Estimated counts on the i -th location

n : Numbers of the locations that are compared

검증결과, 사당역을 대상으로 한 분석 시나리오의 관측 지점별 보행통행량 기준, MAPE는 16.58%로 나타나 개발된 시뮬레이터는 우수한 현황 설명력을 보였다.

분석 시나리오는 대조군인 현행 시나리오 외 3개의 대피 시나리오로 구성되며, 시나리오 1~3 공통으로 역사내 승객은 모두 역사 밖으로 대피시키는 것을 원칙으로 한다.

- 시나리오 1: 4호선 승강장 부근 유사상황 발생
- 시나리오 2: 2호선 대합실 부근 유사상황 발생
- 시나리오 3: 출구 11-12번 주변 유사상황 발생

시나리오 1의 경우, 승강장 부근 유사상황 발생시 모든 승강장에서 가장 빠른 출입구로 대피를 유도,

시나리오 2의 경우는 유사 상황이 발생한 대합실 부근의 링크를 사용하지 못하도록 보행 네트워크에서 편집한 후, 가장 빠른 출입구로 대피를 유도하는 방식이다. 마지막으로 시나리오 3은 유사 상황이 발생한 출입구와 근접 출입구, 링크를 사용하지 못하도록 편집한 후, 탈출구까지 최단경로를 이용하여 대피하는 것으로 정의하였다.

시간적 범위는 평일 오전 시간 기종점 자료를 기준으로 분석하였다. 직관적으로 비교가 용이하도록 대피 시나리오 분석용 지표는 각 출구를 종점으로 하는 보행 통행에 대한, 출구별 평균통행시간, 최소 통행시간, 최대통행시간으로 선정하였다.

대피분석 시나리오 분석을 위한 세 가지 가정을 아래와 같이 설정하였다.

- 가정 1: 유사 상황 발생 즉시 출입구를 통해 유입되는 승객은 우선 차단
- 가정 2: 유사 상황 발생 시점으로부터 최대 15분 이내에 역사 유입 인원은 완전 차단
- 가정 3: 유사 상황 발생시 시나리오별로 정의된 대피 경로가 역사 정보 시스템을 통해, 각 지점별 경로 이용에 혼동을 주지 않도록 단일 방향 정보로 제공되어 역사 이용객은 최적 대피 경로로 정확히 인지하고 탈출 (본 연구인 철도기술연구원 R&D 사업과 연계)

<Table 1> Travel Time and Path-Based Distance to Exits (Current Condition)

Destination	Travel Time (min)			Path-based Distance (m)		
	Min	Ave	Max	Min	Ave	Max
Exit 01	1.6	3.9	7.8	114.4	279.9	562.3
Exit 02	1.5	3.8	7.7	109.2	274.7	557.1
Exit 03	2.2	4.9	9.1	153.9	344.1	650.8
Exit 04	2.6	5.2	9.5	177.9	368.1	674.8
Exit 05	1.6	4.1	8.0	107.1	286.1	571.6
Exit 06	1.5	4.0	8.0	109.9	288.9	574.4
Exit 07	1.5	4.0	8.0	108.0	287.0	572.5
Exit 08	1.5	4.0	7.9	106.8	285.8	571.3
Exit 09	1.8	5.1	7.5	115.8	353.4	521.9
Exit 10	1.5	4.8	7.2	110.8	348.4	516.9
Exit 11	1.3	4.6	7.0	95.2	332.8	501.3
Exit 12	1.3	4.6	7.0	94.7	332.3	500.8
Exit 13	1.6	3.9	7.8	111.7	277.2	559.6
Exit 14	1.7	4.0	7.9	111.2	276.7	559.1
Summary	1.3	4.3	9.5	94.7	309.7	674.8

2. 시뮬레이션 분석결과

1) 현황 분석

사당역 보행 기종점 통행량을 입력자료로 설정하고, 도시철도역사 평가용 시뮬레이터의 경로선택 모듈, Hybrid 보행유동 알고리즘 모듈의 순차적 단계를 적용하여 분석한 결과, 4호선 중간 부근 승강장에서 연결되는 계단 과 4호선-2호선 환승연결 통로(계단 부근)의 보행통행량이 가장 많은 것으로 나타났다. 대피 시나리오와 비교분석을 위해, 승강장에서 출입구 방향 보행 통행량을 기준으로, 각 출입구를 종점으로 하는 경로별 통행시간 및 거리를 결과자료에서 추출하였으며, 2호선, 4호선 승강장에서 출구로 접근하는 최소 통행시간 1.3분에서 9.5분까지 소요되는 것으로 나타났다. 이와 연관된 경로별 거리는 최소 94.7m에서 674.8m에 이르는 것으로 나타났다. <Table 1> 는 경로선택 알고리즘에 의해 이용자가 선택 가능하다고 연산된 경로 조합 중 최소, 최대, 평균 통행시간을 정리한 결과이다. 유사상황 발생시 별도의 대피 이동경로 정보를 제공하지 않을 경우, 일반적으로 현재 사당역 통행자 기종점 패턴 (현황)에 근거하여 승강장에 도착하는 이용자가

역에서 완전히 대피하는 9.5분을 기준으로 대피 시나리오의 분석결과와 비교하고자 한다.

2) 대피 시나리오 분석

대피 시나리오 분석 결과는 <Table 2>와 같으며, 현황 시나리오와 동일한 기종점자료를 근거로, 기점에서 최단 경로에 위치한 출구로 지정하였다. 또한, 전력공급 차단을 포함하는 유사상황 시나리오 분석시, 역사내 엘리베이터는 사용하지 않는 것으로 가정하였으며, 에스컬레이터는 일반 계단과 동일하게 시간이 소요되는 것으로 편집하여 분석하였다. 대피 시나리오 분석은 도시철도역사 평가용 시뮬레이터에서 제시하고 있는 LOS 지표를 적용하는데 한계가 있어서 임의적으로 최소, 최대, 평균 통행시간과 통행거리를 비교항목으로 제시하였으나 추후 보다 단일화된 논리지표를 제공할 예정이다.

시나리오 1의 경우, 도시철도 이용객들이 모든 승강장으로부터 사용가능한 최단 경로에 위치한 출구로 탈출하였으며, 12번 출구와 4번 출구의 대피 이용객 수가 가장 많은 것으로 분석되었다. 2호선 승강장에서 1번-2번, 5번-8번, 13번-14번 출구로 대피하는 인원이 고르게 분포되는 양상과는 달리, 최

<Table 2> Travel Time and Path-Based Distance to Exits (Emergency Case 1-3)

Destination	Case1				Case 2				Case 3			
	Travel Time (min)		Path-based Distance(m)		Travel Time (min)		Path-based Distance(m)		Travel Time (min)		Path-based Distance(m)	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Exit 01	1.6	1.6	114.4	114.4	-	-	-	-	1.6	1.6	114.4	114.4
Exit 02	1.5	1.5	109.2	109.2	-	-	-	-	1.5	1.5	109.2	109.2
Exit 03	3.1	3.1	191.6	191.6	2.3	3.1	153.9	191.6	3.1	3.1	191.6	191.6
Exit 04	3.4	3.4	215.6	215.6	2.6	3.4	177.9	215.6	3.4	3.4	215.6	215.6
Exit 05	1.6	1.6	107.1	107.1	-	-	-	-	1.6	1.6	107.1	107.1
Exit 06	1.5	1.5	109.9	109.9	-	-	-	-	1.5	1.5	109.9	109.9
Exit 07	1.5	1.5	108.0	108.0	-	-	-	-	1.5	1.5	108.0	108.0
Exit 08	1.5	1.5	106.8	106.8	-	-	-	-	1.5	1.5	106.8	106.8
Exit 09	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Exit 10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Exit 11	1.5	2.7	95.2	176.6	1.6	3.1	95.2	195.1	-	-	-	-
Exit 12	1.5	2.7	94.7	176.1	1.6	3.1	94.7	194.6	-	-	-	-
Exit 13	1.6	1.6	111.7	111.7	-	-	-	-	1.7	3.8	111.7	254.0
Exit 14	1.7	1.7	111.2	111.2	-	-	-	-	1.7	3.8	111.2	253.5
Summary	1.5	3.4	94.7	215.6	1.6	3.4	94.7	215.6	1.5	3.8	106.8	254.0

단경로 기준, 4호선 승강장에서 출구로 연결되는 모든 계단은 3번-4번, 11번-12번 만을 사용하여 대피하는 것으로 나타났다. 출입구 11번-12번을 제외하고는 출입구별 최소 통행시간과 최대 통행시간이 거의 동일하게 나타났다.

시나리오 2의 경우, 사용가능한 출입구는 3번-4번, 11번-12번으로 현저히 줄어들며, 다양한 기점에서 출발하는 대피 이용자를 수용해야 하기 때문에 출입구별 최소/최대 소요시간이 2배 가량 차이가 났다. 승강장을 제외한 모든 역사내 구간을 100% 활용할 수 있었던 시나리오 1과 비교할 때, 11번-12번 출구를 기준으로 하는 경로 기준 이동거리는 20m 가량 증가하는 것으로 나타났다.

시나리오 3의 경우, 4호선 승강장을 이용하는 대피 이용객을 주로 처리하는 11번-12번 출구 및 근접 통행공간을 사용하지 못하게 된다. 시나리오 2가 4개의 출입구만을 사용하여 대피함에도 불구하고, 시나리오 3 보다 이동거리 및 통행시간 자체가 짧게 나타나는 현상이 나타난다. 시나리오 3의 경우, 사당역 최종 대피시간은 유사상황 발생시 3.8분

가량이 소요되는 것으로 나타났다.

시나리오 1-3 분석 결과, 대피경로 정보를 제공할 경우, 이렇지 않는 경우의 36%-40% 수준의 대피시간이 소요되며, 상황에 따라 사용되는 대피 경로 수와 활용되는 경로가 상이하게 나타나고 있다. 이러한 분석 결과는 유사시 빠른 대피경로분석 및 정보제공의 중요성에 대해서 시사하는 바가 크다.

V. 결 론

대규모 수송을 담당하고 있는 교통수단의 안전 사고는 교통수단의 발달과 함께 전 세계적으로 증가하고 있으며, 인간의 활동영역이 점점 넓어지면서 이용자 수 역시 기하급수적으로 증가하고 있다. 이로 인해 최근 대중교통관련 안전사고는 대규모 참사로 이어지고 있다. 특히, 도시철도는 대규모 이용자를 가장 빈번하게 수송하고 있는 대중교통수단이며, 도시철도역사는 도시철도 이용자의 출입 및 환승을 책임지는 중요한 역할을 하고 있다. 또한, 이용수요 변화와 주변 토지이용 계획 등 다양한 사

회적 변화를 고려하여 구조적으로 보행자의 편의성 및 안전성을 보장할 수 있어야 한다. 이를 위해 수행되는 도시철도역사 개선사업은 현재 지방자치단체가 업무를 담당하고 있기 때문에 사업의 우선순위 선정 및 평가 기준이 일원화되어 있지 않으며, 예산투자에 의한 제약이 많은 실정이다. 이에 본 연구는 과학적이고 객관적인 도시철도역사 개선사업을 평가할 수 있는 분석 시스템을 구축하였으며, 분석 시스템의 최종 분석결과물로 통합평가지표를 제시하여 관련 전문지식 보유 여부와 상관없이 사업의 우선순위 선정 및 결과 해석이 용이하도록 하였다. 이를 바탕으로 제한된 예산의 효율적 활용처를 제시할 수 있을 것으로 사료된다.

실제로 교통과학기술의 비약적인 발전으로 이동·환승편리성을 극대화할 수 있는 다양한 시스템이 개발되고 있으나, 보행류 및 보행네트워크 분석을 기반으로 시스템 투입 최적 입지가 성공적으로 설정되었는지 여부에 따라 사업 추진 여부가 결정되기도 한다. 도시철도역사와 같이 입체적인 보행 공간상의 이동 연속성을 고려한 시스템 투입 위치의 분석은 반복적인 프로젝트 수행이 불가피하며, 분석 시뮬레이터는 과학적인 방법론에 근거하여 불필요한 실행오류를 제거하는 동시에, 분석 시간을 획기적으로 절감하는데 기여할 것으로 기대하고 있다. 또한, 본 연구에서 제시한 바와 같이, 도시철도역사와 같이 입체공간 상에서 발상할 수 있는 예기치 않은 비상상황에 대비할 수 있는 매뉴얼 작성시 다양한 상황 시나리오 분석 및 최적 대피경로 제시할 수 있는 운영 지원 툴로 활용이 가능하며, 상당역 분석 결과, 직관적인 대비경로 설계 및 시기적절한 정보 제공은 약 60% 통행시간을 절감할 수 있음을 시사하고 있다.

본 연구는 대피시나리오에 대한 간단한 시나리오 분석을 통한 평가지표를 제시하였으나, 실제로 혼잡 원인과 보행 행태 등 상이한 조건에 적합한 평가지표의 다양화 및 가중치를 고려한 지표 선정 방식을 채택할 수 있도록 시뮬레이터 기능 고도화에 대한 지속적인 연구가 요구된다.

REFERENCES

- [1] Lee J., Kim T. and You S.(2015), "Improvement of Pedestrian Convenience and Mobility by Applying the Walking Guidance System in Subway Stations," *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 33, no. 2, pp.204-214.
- [2] Jung R. and Chung J.(2015), "Analysis of Route Choice Behavior in Subway Stations," *Seoul Studies*, vol. 16, no. 2, pp.203-214.
- [3] Helbing D. and Molnar P.(1995), "Social Force Model for Pedestrian Dynamics," *Physical Review*, vol. 51, pp.4282-4286.
- [4] Still K.(2000), *Crowd Dynamics*, University of Warwick, Coventry United Kingdom.
- [5] SudK A., Andersen E., Curtis S., Lin M. and Manocha D.(2007), *Real-Time Path Planning for Virtual Agents in Dynamic Environments*, *IEEE Virtual Reality*, Charlotte, N.C.
- [6] Han M., Choi D., Jeong G. and Lee Y.(2010), "Overview of the Development of Microscopic Pedestrian Simulation (P-Sim)," *Journal of Transportation Technology and Policy*, vol. 7, no. 2, pp.15-29.
- [7] Han M.(2015), "Analytic Program of Pedestrian Space Considering Pedestrian Behavior," *Railway Journal*, vol. 18, no. 4, pp.104-108.
- [8] Abdelghany A., Abdelghany A., Mahmassi H.S. and Al-Zahrani A.(2012), "Dynamic Simulation Assignment Model for Pedestrian Movements in Crowded Networks," *Transportation Research Record*, vol. 2416, pp.95-105.
- [9] Fruin J.J. (1971), *Pedestrian Planning and Design*, Metropolitan Association of Urban Designers and Environmental Planner, Inc. N.Y.
- [10] Ministry of Land, Infrastructure, and Transport (2014), *Design Guideline for Metro-Station and Transferring Facilities (New Edition)*.
- [11] Transportation Research Board(2014), *Transit*

- Capacity and Quality of Service Manual (4th Edition), TCRP Report 165.
- [12] Kim J., Oh Y., Son Y. and Park W.(2002), "A Study on Estimating LOS for Pedestrian Facilities," *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 20, no. 1, pp.149-156.
- [13] Lim J., Shin H. and Kim H.(2004), "New Pedestrian LOS by Trip Purpose and Walkway Function," *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, vol. 24, no. 5, pp.724-728.
- [14] Bruce W.(2001), Modeling the Roadside Walking Environment: A Pedestrian Level of Service, Transportation Research Board, 01-0511.
- [15] Transportation Research Board(2010), Highway Capacity Manual 2010 (5th Edition).
- [16] Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs(2014), Korea Highway Capacity Manual.
- [17] Yoon T. and Lee Y.(2010), "A Study on the Evaluation Method of Level of Service in Transfer Walking Facilities," *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 28, no. 1, pp.15-29.
- [18] Shin S., Lee K. and Hong W.(2015), "Strategies for Vitalizing Mega Complex and Transportation Facilities," *Railway Journal*, vol. 18, no. 4, pp.72-79.
- [19] Shin S. and Lee K.(2014), Walkability Improvement Strategies for Large Scaled Transportation Complex, The Seoul Institute, 2014-PR-47, pp.1-96.
- [20] Industry-Academic Cooperation Foundation at Ajou Univeristy(2014), Behavior Survey of Transferring Facilities for Public Transit and LOS Analysis, TS Korea Transportation Safety Authority.
- [21] Ministry of Land, Infrastructure, and Transport (2015), Development of Trip and Transfer Technology for Passengers in the Metro Station.
- [22] Jung R., Chung J. and You S.(2016), "Analysis of Route Choice Behavior in Subway Station Focus on Walking Distance," *The Korea Spatial Planning Review*, Vol. 88, pp.81-100.
- [23] Lee J., Kim T. Chung J. and Kim J.(2016), "Modeling Lane Formation in Pedestrian Counter Flow and Its Effect on Capacity," *Journal of Civil Engineering*, vol. 20, no. 3, pp.1099-1108.
- [24] Lee J.(2016), "Analysis on LOS Criteria of Pedestrian Flow by Simulating a Pedestrian Flow Model," *Korean Society of Transportation*, Vol. 34, no. 2, In press.

저자소개



유 소 영 (You, So-young)

2013년 8월 ~ 현 재 : 한국철도기술연구원 교통체계분석연구팀 선임연구원
2012년 6월 ~ 2013년 7월 : University of California, Irvine Assistant Project Scientist
2012년 University of California, Irvine 박사학위 취득 (토목공학과, 교통공학 전공)
e-mail : syyou@krii.re.kr



정 래 혁 (Jung, Rae-hyuck)

2016년 3월 ~ 현 재 : 정도 UIT 사원
2016년 연세대학교 도시공학과 석사학위 취득 (도시공학)
e-mail : jrh1110@nate.com



정 진 혁 (Chung, Jin-hyuck)

2007년 2월 ~ 현 재 : 연세대학교 도시공학과 교수
1997년 9월 ~ 2007년 2월: 중앙대학교 건설대학 도시공학과 교수
1997년 Pennsylvania State University (토목공학과, 교통계획 전공)
e-mail : jinchung@yonsei.ac.kr