

# 미시적 보행자 시뮬레이터(P-Sim : Pedestrian-Simulator)의 기본구조 및 개발개요

Overview of the Development of Micro Pedestrian Simulator(P-Sim)



한명주



최동훈



정기찬



이영인

## I. 서론

### 1. 연구의 배경 및 목적

대도시의 광역교통문제 및 교통혼잡을 해소하기 위해서는 자가용승용차 이용수요를 대중교통으로 흡수할 수 있는 대중교통 환승체계 구축이 필요하다. 현재의 환승시스템은 교통수단간 연계체계가 미흡하고, 환승 소요시간이 길거나 보행자의 동선이 복잡하며 환승시설간 안내체계 및 편의시설 등이 부족한 상태이다.

이에 환승시간 및 환승거리 최소화, 이용자 편

의성을 고려한 환승센터 건설이 계획되고 있으나 환승센터에 대한 설계 및 배치기준이 미비하며 설계 대안에 대한 평가가 어려운 실정이다. 또한 보행자의 개별행태를 반영하여 이를 미시적으로 평가하기 위한 도구가 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 환승센터, 크게는 보행공간에 대하여 설계적정성 분석, 서비스수준 분석, 배치적정성 평가를 수행하는 설계분석 프로그램(Design-PED)과 개별 보행행태를 반영한 보행자 공간의 효율성 분석, 다양한 상황에서의 미시적 보행행태 분석을 수행하는 운영분석 프로그램(3D-PED)을 개발하고자 한다. 이 두 가지 분석

한명주 : 서울대학교 환경대학원 박사과정, gksaudwn82@hanmail.net, 직장전화:02-880-5667, 직장팩스:02-871-8847

최동훈 : (주)평화메이타시스템 과장, honorhunny@iphds.com, 직장전화:02-566-6243, 직장팩스:02-6280-7601

정기찬 : (주)심테크시스템 차장, kcjung@simtech.co.kr, 직장전화:02-587-4956, 직장팩스:02-587-4957

이영인 : 서울대학교 환경대학원 교수, yilee@snu.ac.kr, 직장전화:02-880-1430, 직장팩스:02-871-8847

본 연구는 국토해양부 국가교통핵심기술개발사업인 「교통연계 및 환승시스템 기술개발」과제의 T1-2 세세부과제로 현재 4차년도 연구가 진행 중에 있음.

본 논문은 제12회교통연구세미나(서울대학교 환경대학원, 2010.04.17)에서 발표된 내용을 수정·보완하여 작성된 것임.

모듈을 통합하여 환승센터 설계 및 운영분석 프로그램(P-Sim)이라 정의하였다.

본 연구에서 개발하고 있는 환승센터 설계 및 운영분석 프로그램(P-Sim)은 현재 개발 중에 있다. 따라서 본 논문은 P-Sim의 기능 및 세부모듈에 대하여 현재까지의 연구내용을 간략하게 제시하는 성격으로 진행한다.

## 2. 연구의 범위 및 내용

환승센터 설계 및 운영분석 프로그램(P-Sim) 개발과제는 교통연계 및 환승시스템 연구과제의 세세 부과제로, 크게 설계분석 프로그램(Design-PED)과 운영분석 프로그램(3D-PED)으로 구분되어 있으며 현재 4차년도 연구(09.8-10.6)가 진행 중에 있다.

Design-PED의 경우 타세세부과제<sup>1)</sup>에서 개발되는 환승센터 설계편람의 설계기준 및 서비스수준을 기준으로, 이를 분석하는 절차를 포함하고 있는 자동 설계분석 프로그램으로 볼 수 있다.

3D-PED의 경우, 개별 보행자의 보행행태모형 개발을 통하여 환승센터와 같은 보행자 공간에서의 미시적인 보행자 행태분석을 수행하는 보행자 시뮬레이터이다.

환승센터 설계 및 운영분석 프로그램(P-Sim) 개발의 주요 연구내용은 환승시설에 대한 설계분석 방법론과 미시적 운영분석을 위한 보행자 행태 알고리즘의 개발이다.

본 연구의 범위는 다음과 같다.

- 설계분석 방법론 정립(설계적정성 평가, 서비스수준 평가, 배치적정성 평가)
- Design-PED(설계분석 프로그램) 개발
- 보행 행태 및 환승시설 이용행태 알고리즘 개발
- 3D-PED(운영분석 프로그램) 개발
- 연구의 활용성 제시

## II. 선행연구의 고찰

### 1. 이론적 고찰

#### 1) 보행자<sup>2)</sup>

보행은 인간의 기본적인 이동수단이다. 또한 보행은 모든 활동의 기반이 되며 타교통수단과 연계되는 가장 중요한 수단으로 볼 수 있다. 차량과 차별적인 보행의 특징은 다음과 같이 정리될 수 있다.

- 차량은 구분된 차로를 따라 주행하지만 보행자는 정해진 경로가 없다.
- 차량은 중앙선에 의하여 두 방향의 대향교통류가 분리되나 보행자는 대향 보행자와 상충이 존재한다.
- 차량은 동 차종의 경우 동일한 가속을 가지지만 보행자의 가속능력은 각기 다르다.
- 차량의 방향은 전방이지만 보행자의 방향은 여러 방향으로 이루어진다.
- 차량과 달리 보행자는 속도의 가·감속량이 상대적으로 크다.
- 차량과 달리 보행자는 진로변경능력이 뛰어나다.

보행자의 물리적 공간(인체타원) : 보행자의 몸의 두께와 어깨폭의 치수, 즉 보행자의 인체타원은 보도 등에서의 보행용량을 결정하는데 중요한 요소가 된다.

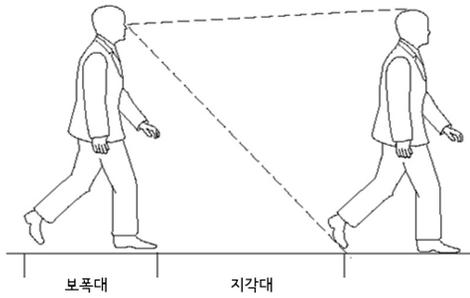
보행자의 완충공간 : 보행자의 개인적인 공간으로 충돌을 피하기 위한 여유 공간의 개념이다. 이는 공중거리, 사회거리, 개체거리, 밀집거리 4가지로 구분될 수 있다.

보행동작에 필요한 공간 : 이는 보폭대(Pacing Zone)와 지각대(Sensory Zone)로 구성된다. (<그림 1>)

보폭대의 거리는 보행속도에 비례하며 직접 측정이 가능하다.

1) 「교통연계 및 환승시스템 기술개발」T1-1 세부과제인 「환승센터 시설배치 기준 및 설계 편람 개발」의 내용을 적용함.

2) J.Fruin, 「보행자공간」, 1972.



〈그림 1〉 보폭대와 지각대

반면 지각대의 거리는 여러 가지 지각이나 심리적 영향을 받는다. 인간의 눈은 3°에서 5°의 원추형의 시계안에서 작고 상세한 것까지 볼 수 있으며 사물을 상세하게 보지 못하나 쾌적하게 볼 수 있는 한도는 60°-70°이다. 계단이나 에스컬레이터를 이용하는 경우 시야가 좁아진다. 또한 타인의 머리부터 발끝까지의 쾌적한 시야의 한계가 되려면 상대방으로부터 2m 정도 떨어질 필요가 있다. 지각대의 공간을 결정하는 요소로 반응시간(인지 반응)시간이 있는데 이는 보행자의 계층에 따라서 다양할 수 있다.

## 2) 보행자의 서비스수준 분석

교통(차량)분야에서의 관계와 동일한 식을 기본으로 하여 보행자 공간에 대해 서비스수준을 제시한 값은 〈표 1〉, 〈표 2〉와 같다. 현재 HCM 및 여러 연구의 기준 값으로 이용되고 있다.

〈표 1〉 서비스수준의 정의

서비스 수준	상태
A	느린 사람 추월 가능하며 보행 속도를 자유롭게 선택 가능
B	정상적인 보행 속도 유지 가능하며 대부분 같은 방향을 걷고 있는 흐름이면 추월 가능
C	보행 속도 선택 및 추월에 약간의 어려움 발생
D	보행 속도 선택 및 추월이 상당히 어려우며 때때로 극심한 밀도에 의해 정지되기도 함
E	보행로의 가능 최대 용량이며 주변 보행자로 인해 천천히 걷는 수준임
F	떠밀리는 수준으로 전진함

자료 : J.Fruin, 『보행자공간』, 1972.

〈표 2〉 보행공간 및 계단의 서비스수준

서비스 수준	보행공간		계단	
	공간모듈	흐름계수	공간모듈	흐름계수
A	3.5m <sup>2</sup> /인 이상	20인/m <sup>2</sup> 분 이하	2m <sup>2</sup> /인 이상	15인/m <sup>2</sup> 분 이하
B	2.5~3.5m <sup>2</sup> /인	20~30인/m <sup>2</sup> 분	1.5~2m <sup>2</sup> /인	15~20인/m <sup>2</sup> 분
C	1.5~2.5m <sup>2</sup> /인	30~45인/m <sup>2</sup> 분	1.0~1.5m <sup>2</sup> /인	20~3인/m <sup>2</sup> 분
D	1.0~1.5m <sup>2</sup> /인	45~60인/m <sup>2</sup> 분	0.7~1.0m <sup>2</sup> /인	30~40인/m <sup>2</sup> 분
E	0.5~1.0m <sup>2</sup> /인	60~80인/m <sup>2</sup> 분	0.4~0.7m <sup>2</sup> /인	40~55인/m <sup>2</sup> 분
F	0.5m <sup>2</sup> /인 이하	80인/m <sup>2</sup> 분 이상	0.4m <sup>2</sup> /인 이하	55인/m <sup>2</sup> 분 이상

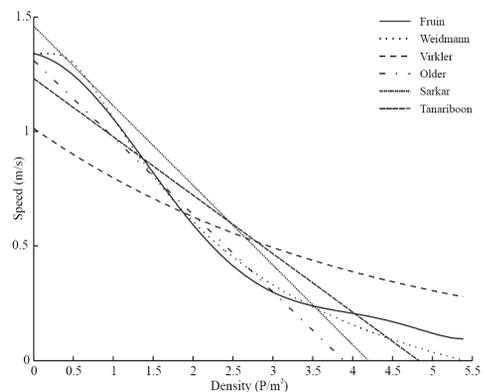
자료 : J.Fruin, 『보행자공간』, 1972.

## 3) 보행자의 행태분석

거시적 측면 : 보행속도, 보행밀도, 보행교통류율, 보행점유공간의 기본적인 관계는 차량의 교통류와 유사하다. 보행교통류율과 보행밀도가 증가할수록 보행속도는 감소한다. 보행밀도의 증가는 보행점유공간의 감소를 의미하며 보행밀도가 증가할수록 개인의 이동 여유 정도가 떨어지게 됨으로써 보행자의 평균 속도도 감소하게 된다. 기존연구 검토를 통한 속도-밀도관계식은 〈그림 2〉와 같다. (Daamen, 2004)

기존연구 검토결과, 속도와 밀도의 현장조사값은 다음과 같다.

속도 : 국외 연구 검토결과, 현장조사를 통한 보



〈그림 2〉 속도-밀도 관계식(기존문헌)

행자의 자유속도는 1.34m/s로 나타났으며, 표준편차는 0.37m/s이다.(Daamen, 2004)

밀도 : 보행자의 최소공간은 0.085m<sup>2</sup>이며 대기공간에서의 평균 밀도는 2.0-2.5인/m<sup>2</sup>이다.(Daamen, 2004)

미시적 측면 : 개별 보행자의 행태를 반영한 미시적인 보행행태모형으로는 크게 CA모형을 적용한 보행행태모형과 Microscopic Simulation model으로 구분될 수 있다.

CA(Cellular Automata)모형의 경우 생물학 분야에서 개발되어 여러 분야에 적용되고 있다. 이는 일반적으로 인접한 격자형 Cell간의 상호작용을 규칙화한 모형을 뜻한다. 이는 Discrete Simulation이며 Cell들간의 상호작용을 규칙화하여 간단하게 보행행태를 모형화할 수 있다는 장점이 있으나 보행자의 행태를 현실적으로 모사하기에는 어려움이 있다.

Microscopic Simulation model : 컴퓨터 연산속도가 빨라짐에 따라 복잡한 미시적 시뮬레이터에 대한 관심이 높아졌다. 이러한 모형은 개별행태를 단위시간을 기준으로 반영한다(Continuous Simulation). 보행자는 보행상황(걷기, 대기 등)에 따라 규정된 보행행태를 가지고 있다. 보행자특성, 위치, 속도, 방향등은 단위시간을 기준으로 개별보행자가 다른 보행자와의 상호작용을 통하여 연속적으로 업데이트 된다. agent이론과 유사하게 볼 수 있으며 보행자의 회피행태 등과 관련하여 Magnetic Force Model, Social Force Model 등이 있다.

## 2. 선행연구의 고찰

### 1) 설계분석

환승시설의 설계분석과 직접적으로 관련된 선행연구는 없다. 다만 고속도로 및 도로안전도 향상을 위한 설계분석 프로그램만 일부 존재한다.

또한 KHCS(Korea Highway Capacity Software)와 같이 도로용량편람(KHCM)의 설계분석을 수

행할 수 있는 설계분석 소프트웨어 개발사레가 있으나 환승센터 설계분석과는 내용적으로 차이가 있다.

### 2) 보행행태모형

국내에서 진행되어온 보행행태모형은 대부분 CA모형을 기반으로 하였다. 박우신(2002)은 차량위주의 교통류를 묘사한 CA기반 모형을 보행교통류와 보행특성을 고려하여 기초적인 보행자 이동 알고리즘을 구축하였다. 구석모(2007) 또한 CA모형을 근거로 하여 연구를 진행하였으며 연구대상 범위를 계단으로 한정하여 모형을 구축하였다.

Blue & Adler(1998) 역시 CA모형을 기반으로 보행자의 전방이동 및 진로변경과정을 모형화하였다.

Microscopic Simulation model의 예로 Okazaki(1979)는 자기장 법칙을 이용한 Magnetic Force Model을 개발하였다. 이는 보행자 및 주변 시설을 자기장 내의 자성체로 적용한 이론으로 보행자, 장애물 및 타 보행자를 양극으로 보고 도착지를 음극으로 보아서 이에 따라 발생하는 유인력과 반발력으로 보행자의 이동을 묘사하였다.

또한 Helbing & Molnar(1995)의 Social Force Model은 자기장력과 유사한 원칙으로 보행자는 자신을 자극하는 Social Force의 총합으로 이동과 감속 및 가속을 수행한다는 이론이다. 여기서 Social Force는 전방으로 이동하려는 추진력과 인접보행자간의 상호작용력, 보행자와 주변시설간의 상호작용력을 의미한다.

### 3) 보행자 시뮬레이터

보행자 행태 및 교통연계 및 환승시스템을 모의 실험할 수 있는 기술은 국내에서 현재까지 개발된 사례가 없으나 다만 몇몇의 국외연구 및 상용 패키지가 개발되어 있다.

SIMPED는 네덜란드에서 개발된 보행자 시뮬레이터로 보행자 이동 및 보행자간의 상호작용에 의해 발생하는 다양한 행태를 분석하는 모형이다. 이와

유사한 SIMWALK는 Savannah Simulations사가 개발한 보행자 시뮬레이션 프로그램으로써 교통 계획가, 도시전문가, 안전책임자들이 보행류를 시뮬레이션하고 시설물의 안전성을 평가하기 위한 프로그램이다. 또한 NOMAD, PEDROUTE, UAF의 Pedestrian Simulation, VISSIM Pedestrian Simulation 등의 보행자 시뮬레이터가 다양한 목적으로 개발되었으나 이에 관한 국내연구는 미진하다.

### III. P-Sim의 개요

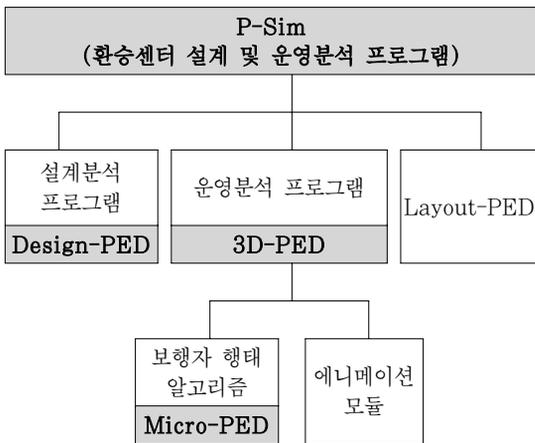
#### 1. 기능 및 구성

P-Sim은 Pedestrian-Simulator의 약자로 설계분석 및 운영분석 모듈을 포함하며, 보행자에 대한 분석 및 모의실험에 대한 포괄적 의미를 가지고 있다. 앞서 설명한바와 같이 이는 크게 Design-PED, 3D-PED로 구성되며 <그림 3>과 같다.

#### 2. 분석흐름도

P-Sim을 이용한 환승센터 및 보행공간의 설계분석 및 미시적 보행행태분석은 <그림 4>와 같은 순서로 진행된다.

우선 설계 및 운영분석을 위한 기본 입력자료로



<그림 3> P-Sim의 구성



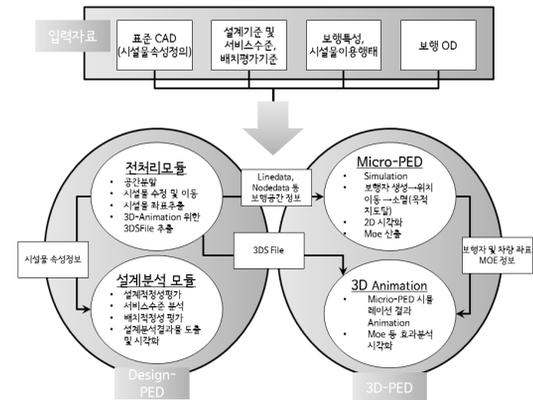
<그림 4> P-Sim 분석흐름도

는 분석공간에 대한 표준 CAD파일(시설물 속성정의)과 분석기준이 되는 설계기준, 서비스수준 등의 DB, 현장조사 및 문헌을 통한 보행행태모형의 기본 Parameter등으로 구분된다.

전처리과정을 통하여 실제 분석에 필요한 공간 정보, 시설물속성이 추출되며 이를 통해 설계분석과 운영분석의 수행이 가능해진다.

또한 현장조사를 통하여 모형의 검증 및 기본입력자료의 정산이 가능하다.

세부모듈의 입력자료와 모듈의 상관관계는 <그림 5>과 같다.



<그림 5> P-Sim의 세부모듈

## IV. Design-PED (설계분석 프로그램)

### 1. 개요

Design-PED는 신규 환승센터를 설계하거나 기존의 운영중인 환승센터의 개선안을 제시할 경우 설계안에 대한 설계분석을 수행하는 프로그램으로 크게 3가지 기능을 포함하고 있다.

첫째, 환승센터 개별시설요소에 대한 설계 기준의 설계 적정성 평가로 『복합환승센터 연계환승시설 설계편람(안)』(국토해양부, 2009)에서 제시하고 있는 시설의 최소기준 만족여부를 평가한다. 예를 들어 “계단부는 승강장 연단으로부터 충분한 공간(최소 2.5m 이상)을 확보한다.” 등의 설계기준을 적용하여 설계대안 시설의 설계적정성을 설계도면으로 자동 평가한다. 이를 통해 환승센터 및 보행공간의 설계측면의 문제점을 분석한다.

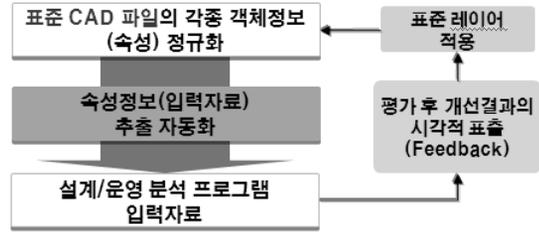
둘째, 환승센터 시설에 대한 서비스수준을 분석한다. 환승센터 이용수요를 고려하여 『복합환승센터 연계환승시설 설계편람(안)』(국토해양부, 2009)에 제시되어있는 서비스수준을 적용하여 개별시설의 서비스수준을 평가하고, 이용자의 주요 동선을 고려하여 연계시설에 대한 서비스수준 평가를 수행하는 기능을 가지고 있다. 또한 용량측면의 문제구간에 대한 개선책을 제시하는 기능을 가지고 있다.

셋째, 시설 배치에 대한 배치적정성을 평가한다. 환승 승객의 주요 동선을 고려하여 여러 설계대안의 시설 배치 적정성을 평가한다. 환승센터의 외부시설(접근수단)에 대한 배치적정성 평가와 내부시설(출입구-개찰구)간의 배치적정성 평가를 수행한다.

### 2. 입력자료

#### 1) 표준CAD

설계/운영분석 모듈을 위한 객체(Object)구성 원칙을 수립하는 과정이 표준 CAD 파일 작성이다. 이는 CAD 도면 작성에 필요한 시설물의 설계



〈그림 6〉 CAD 표준화 과정

속성을 사전에 규격에 따라 정의함으로써 신규 설계 또는 기존 도면의 각종 시설물 정보 추출 과정을 자동화 하는 것이 목적이다. (〈그림 6〉)

### 2) 설계기준 및 서비스수준, 배치평가기준

#### (1) 설계기준

환승시설 별 설계기준은 『복합환승센터 연계환승시설 설계편람(안)』(국토해양부, 2009)의 내용을 적용하였다. 〈표 3〉과 같은 시설물에 대한 설계기준이 제시되어 있다.

〈표 3〉 환승센터 요소시설 구분

시설구분		시설구분	
보행 이동 시설	외부계단	환승 편의 시설	대표소 (자동발매기)
	내부계단		개찰구
	출입구		대합실
	보행통로		화장실
	에스컬레이터	기타 시설	긴급대피시설
	엘리베이터		보안검색대
	무빙워커		
경사로			

자료 : 국토해양부, 『복합환승센터 연계환승시설 설계편람(안)』, 2009.

〈표 4〉 계단 서비스수준

LOS	보행교통류율 (인/분/m)	점유면적 (m <sup>2</sup> /인)
A	0~18.66	≥ 1.65
B	18.66~25.57	1.18~1.65
C	25.57~33.63	0.87~1.18
D	33.63~41.47	0.61~0.87
E	41.47~48.64	0.47~0.61
F	> 48.64	< 0.47

자료 : 국토해양부, 『복합환승센터 연계환승시설 설계편람(안)』, 2009.

(2) 서비스수준 분석

『복합환승센터 연계환승시설 설계편람(안)』(국토해양부, 2009)에서는 <표 3>와 같은 시설에 대하여 서비스수준을 제시하고 있으며 이는 환승센터 유형별로 보행자 구성에 따른 PME(Pedestrian Moving Equivalent), PWE(Pedestrian Waiting Equivalent)를 적용하여 분석한다. <표 4>는 계단에서의 서비스수준이다.

(3) 배치적정성 평가

『복합환승센터 연계환승시설 설계편람(안)』(국토해양부, 2009)에서 외부시설과 내부시설에 대한 배치적정성 평가 기준을 제시하고 있으며 본 Design-PED는 이를 반영하여 설계도에 대한 배치평가를 수행한다. 외부평가에 대한 배치기준 산정공식과 서비스수준은 <표 5>, <표 6>과 같다.

3. 설계분석의 내용 및 사례연구

1) Design-PED UI

Design-PED의 UI는 <그림 7>과 같다. 입력

<표 5> 외부배치 기준

$$\text{가중평균거리} = \frac{\sum P_i \times Ph_i}{P}, P = \sum P_i$$

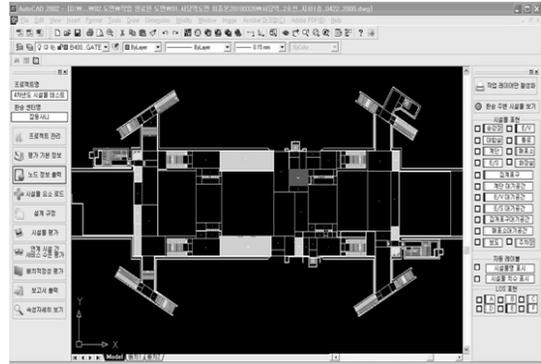
$P_i$  = 환승센터의 주 교통수단을 이용하기 위한 접근 교통수단별 수요  
 $Ph_i$  = 접근교통수단별 환승거리(Path)로서 접근교통수단 하차지점에서 주교통수단 승차지점까지의 거리

자료 : 국토해양부, 『복합환승센터 연계환승시설 설계편람(안)』, 2009.

<표 6> 외부시설 배치의 서비스수준

LOS	환승시간	환승거리
A	1분 이내	60m 이내
B	1분~2분	60m~120m
C	2분~3분	120m~180m
D	3분~4분	180m~240m
E	4분~5분	240m~300m
F	5분 이상	300m 이상

자료 : 국토해양부, 『복합환승센터 연계환승시설 설계편람(안)』, 2009.



<그림 7> Design-PED UI

변수 외부파일을 지원하고 있으며, 프로젝트 관리, 평가기본정보, 시설물요소로드, 설계규정, 시설물 평가, 연계시설간 서비스수준 평가, 보고서 출력 등의 메뉴바로 구성되어 있다.

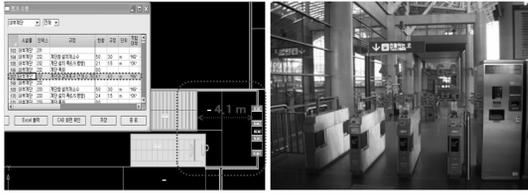
2) 사례연구

본 연구에서는 2개의 지하철이 환승하는 가상의 환승역사를 대상으로 표준 CAD File을 구축한 후 설계도에 대한 설계분석을 수행하였다.

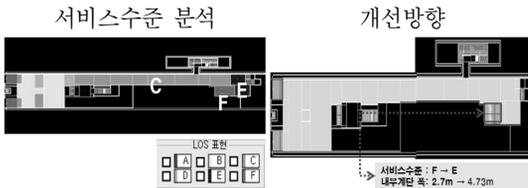
먼저 설계적정성 평가 결과, 총 635개 시설물에 대하여 약 12.9%인 82개 시설물이 최소설계기준에 부적합한 것으로 나타났다. 부적합한 설계항목은 계단과 짐개표구간 이격거리로, 이와 관련된 설계기준이 6.0m이나 설치현황은 4.1m로 약 2m가 부족한 것으로 나타났고, 화장실 면적, 계단참의 길이 등의 부적합한 설계항목이 있는 것으로 분석되었다. 환승역사의 설계적정성평가 결과는 <표 7>과 같고 부적절 설계항목 예시는 <그림 8>과 같다.

<표 7> 환승역사의 설계적정성평가 결과

구분	개요	설계적정성평가 항목	
		총 시설물	부적합 시설물
지상1층	보도, 버스정류장 등	77	1
지하1층	Line A 대합실	206	34
지하2층	환승통로	150	10
지하3층	Line A 승강장	98	11
지하4층	환승통로	80	17
지하5층	Line B 승강장	24	9
총계		635	82(약12.9%)



〈그림 8〉 부적합 설계항목 예시



〈그림 9〉 환승통로의 서비스수준 분석

또한 Line A-Line B 환승통로(지하 4층)에 대한 서비스수준 분석결과, 계단 등의 병목구간에서 오전 첨두시 수요적용결과, 서비스수준 F로 분석되었으며, Design-PED에서는 이를 서비스수준 상향 개선하기 위한 설계치수를 제안하는 기능을 가지고 있다.(〈그림 9〉)

마지막으로 환승역사의 내부시설, 외부시설에 대한 배치적정성수준을 평가할 수 있다.

### 3) 결과물 출력

Design-PED에서는 각 설계분석 항목에 대하여 〈그림 10〉과 같이 시각적인 그래프, 표로 결과를 제시하며 최종보고서를 출력한다.



〈그림 10〉 Design-PED의 결과물

## V. 3D-PED (운영분석 프로그램)

### 1. 개요

3D-PED(운영분석 프로그램)는 환승센터의 주요 시설, 수단(보행자, 철도 등)의 행태를 3D로 모사하여 환승센터의 운영효율성 평가와 설계안의 적정성 및 평가를 미시적, 행태적 측면에서 현실적으로 평가 검증할 수 있는 분석도구이다. 환승센터 보행자의 행태 분석, 서비스시설의 미시적 분석, 다양한 상황(첨두시, 재난 등)에서의 환승센터 운영평가 등에 이용될 수 있다.

3D-PED는 보행자의 개별행태모형을 적용하여 실제 시뮬레이션을 하는 보행자 시뮬레이터(Micro-PED)와 이를 기반으로 보행자 및 수단행태를 3D로 애니메이션, 시각화하고 결과항목(MOE)을 표출하는 모듈로 구성되어 있다.

본 논문에서는 실제적인 보행자 시뮬레이터인 Micro-PED를 중심으로 연구내용을 전개한다.

### 2. 입력자료

본 연구에서 개발하는 Micro-PED의 입력자료는 크게 3가지로 구분될 수 있다.

첫째, 보행공간에 대한 정보이다. 미리 정의된 시설물 Layer를 통하여 보행공간에 대한 보행자 시뮬레이터의 입력자료를 CAD로부터 자동 추출할 수 있다(표준 CAD 파일). 보행 공간의 Linedata(이동불가/이동가능 등의 속성정보 포함), Nodedata, Blockdata, Facilitydata 등의 Micro-PED의 입력자료가 Design-PED의 전처리모듈을 통해 자동 추출된다.

둘째, 보행행태의 효율성분석을 위한 서비스수준 등의 기준이 입력자료로 포함된다. 본 연구에서는 『복합환승센터 연계환승시설 설계편람(안)』(국토해양부, 2009)에서 개발하고 있는 대기공간, 계단, 보행통로의 서비스수준과 J.Fruin(1972), HCM(2000) 등 다양한 기준을 입력하여 결과를

비교분석할 수 있다.

셋째, 보행행태모형의 Parameter와 보행OD이다. 현장조사를 수행하여 이와 관련된 기본값을 설정하였으며, 이는 분석대상공간에 따라 변경이 가능하다. 우선 본 연구에서는 환승시설에 대한 보행공간이용특성조사를 통하여 개별 시설물의 이용 분포를 도출하였으며 이를 Micro-PED에 입력하였다. 보행OD의 경우 설문조사를 통한 환승승객의 활동패턴을 도출하여 반영하였다.

인간중심점	보행자의 중심점. 하나의 점으로 보행자의 이동거리를 계산하는 기준점
인체타원	<p>인간의 물리적공간으로 최소 점유공간을 의미함. 인간중심점을 기준으로 한 원으로 보행자 계층에 따라 다양함.</p> $\frac{(x-\alpha)^2}{S^2} + \frac{(y-\beta)^2}{B^2} = 1$ (보행자 물리영역) <p>여기서, <math>\alpha, \beta</math> : 보행자 중심좌표  <math>S</math> : 보행자 어깨폭  <math>B</math> : 보행자 가슴폭</p>
완충공간	개인의 사적인 자유내의 행동반경을 의미함. 이는 인체타원보다 크며 가변적임
시야	인간의 시야범위를 고려하여 75°로 정의함
인지공간	<p>장애물 판단 및 회피, 속도조절을 위한 판단범위로 보행자계층에 따라 다르며 속도에 대한 함수임.</p> $y = -\delta(x-\alpha)^2 + fg = \beta$ (보행자 인지영역) <p>여기서, <math>\delta = \frac{fg}{(S+cs)^2}</math>  <math>\alpha, \beta</math> : 보행자 중심좌표  <math>S</math> : 보행자 어깨폭  <math>B</math> : 보행자 가슴폭  <math>fg</math> : 보행자 전방 여유폭  <math>cs</math> : 보행자 측방 여유폭</p>

〈그림 11〉 보행자 특성

### 3. 보행자 행태 알고리즘의 개발

#### 1) 보행자의 정의

**보행자 특성** : 개별보행자의 보행행태모형 정립을 위한 보행자의 특성을 인간중심점, 인체타원, 완충공간, 시야, 인지공간으로 정의하였다. 인체타원과 완충공간은 보행자계층(성별, 나이, 자유속도 등)에 따라 가변적이다. 인지공간은 장애물 및 상대방 보행자와의 상관관계를 고려하여 보행자의 회피, 속도조절 여부를 판단하는 공간으로 이는 보행자의 속도와 관계되어 있다. (〈그림 11〉)

인체타원의 경우, 한국인 인체치수조사(사이즈코리아) (2008)에서 제시된 한국인 성인남녀 20-30대 표준체형 중 95분위값(426.5×231.5mm)을 선정하였다. 표준체형에 옷 두께 30mm를 더한 값(486.5×291.5mm)을 최종 한국인의 표준체형으로 정의하고 이를 반영하였다. (〈그림 12〉)

**보행자 계층** : 보행자의 연령, 성별, 신체조건, 보행목적 등에 따라 보행자의 개별특성은 달라질 수 있다. 본 연구에서는 보행자의 계층을 성별(남/여), 나이(6-11세/12-17세/18-24세/25-39세/40-59세/60세이상), 짐(일반/캐리어/백팩/손가방), 성격(급함/느긋) 등으로 구분(총 96개 계층)하였으며, 교통약자(휠체어/시각장애인/임산부/노인/동반자)(5개 계층)를 추가하였다. (〈표 8〉)

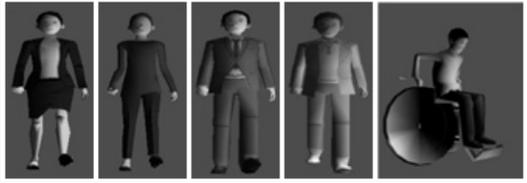
보행자 계층에 따라 보행자 특성 중 인체타원, 완충공간을 달리하였으며 기존연구를 토대로 계층별 자유속도를 부여하였다.



〈그림 12〉 한국인의 표준체형(인체타원)

〈표 8〉 보행자 계층

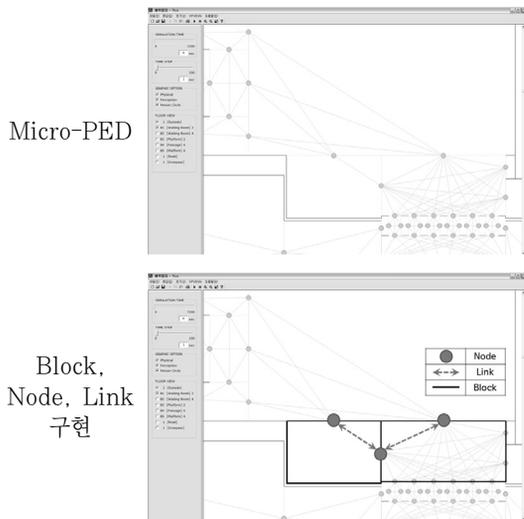
성별코드		나이		집	
남성	0	6~11세	0	집X	0
		12~17세	1	캐리어	1
		18~24세	2		
여성	1	25~39세	3	백팩	2
		40~59세	4	손가방	3
		60세이상	5		
성격		의상		교통약자	
일반	0	정장	0	일반	0
급합	1			휠체어	1
느긋	2	캐주얼	1	시각장애	2
				임산부	3



2) 보행자의 활동 및 경로선택

(1) 보행공간의 정의

보행공간은 크게 보행자 이동공간(보도 및 환승동로 등), 보행활동시설(매표소, 화장실 등), 보행자 생성소멸시설(출입구, 플랫폼 등)등으로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 보행공간을 보행행태분석을 위하여 Block과 Node-Link 체계로 구현하였다.((그림 13))



〈그림 13〉 보행공간의 정의

(2) 보행자의 활동선택

보행공간내에는 다양한 목적을 가진 보행자들이 혼재하므로 개별 활동선택행태를 일률적으로 단순화하기에는 어려움이 따른다. 따라서 본 연구에서는 출근, 통학, 업무의 보행목적을 가진 보행자들이 환승센터 내부에서 활동을 선택하는 과정을 중심으로 활동선택모형을 정립하였다.

환승센터에서의 보행자의 통행은 일반적인 기종점외에 경유지가 추가된다. 활동통행(Activity Trip)은 이러한 통행목적 달성을 과정에서 경유하는 활동시설로 구성되는 경로를 나타낸다.

활동시설로는 환승편의시설(화장실, 상점 등)과 매표소, 자동판매기 등의 환승시설로 구분하였다.

본 연구에서는 유출입조사외의 활동주적조사(설문)를 수행하여 활동선택모형을 구축하였다. 보행자의 특성(이용시간대, 나이, 성별, 이용수단 등)을 기반으로 Activity Trip을 Category화하여 확률배분에 의해 활동을 선택할 수 있도록 하였다.

(3) 보행자의 경로선택

환승센터에서 보행자가 경로를 선택하는 데에는 보행자의 주관적인 판단이 작용하기 때문에 보행자의 통행목적, 통행특성 등 다양한 측면에서의 연구가 필요하다. 본 연구에서는 보행자의 이동경로 선택을 수리모형화 하기 위하여 환승센터내의 보행자 특성을 고려하여 최단거리탐색알고리즘과 Space Syntax이론을 적용한 최대인지도 경로탐색알고리즘을 적용하였다. 최단거리 탐색 알고리즘은 보행자가 환승센터 내 시설 구조 및 통행경로에 익숙하다는 전제하에 최단경로를 찾는 방안, 그리고 Space Syntax이론을 적용한 최대인지도 경로탐색알고리즘은 보행자가 시설 구조 및 경로에 익숙하지 않을 경우에 대한 적용방안으로 고려되었다.

최단거리 및 최대인지도 선택알고리즘은 앞서 정의된 Node-Link를 이용하여 설정될 수 있다.

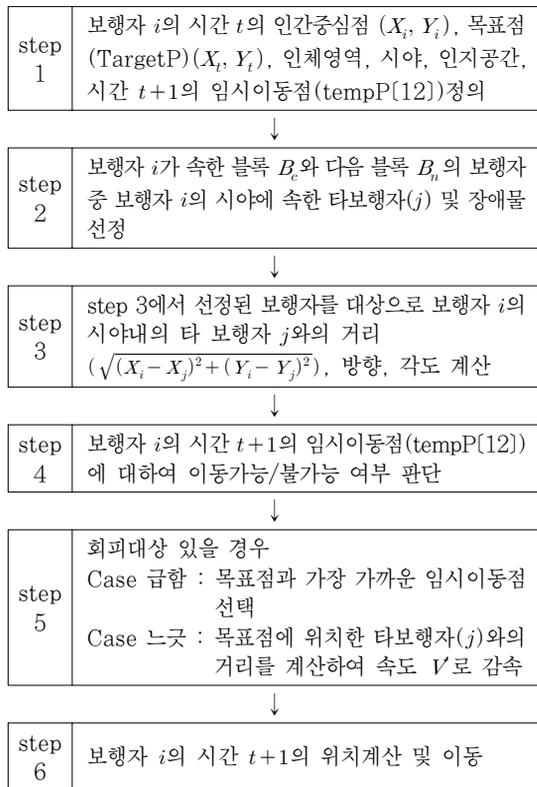
또한 신체조건에 따라 다양한 경로가 선택될 수 있다. 예를 들어 휠체어이용자는 계단을 이용할 수 없다. 이를 위하여 다계층 보행자 통행배정 기법이 연구 중에 있다.

### 3) 보행자의 행태모형

#### (1) 회피행태

보행자는 차량과 달리 의사결정과정, 보행방향 결정, 가속 및 감속과 같은 반응에 대하여 순간적인 행태를 보이기 때문에 이러한 미시적 특성을 표현할 수 있는 알고리즘이 필요하다. 본 연구에서는 인체타원을 나타내는 물리적 영역과 타 보행자 및 장애물 인식에 따른 회피 또는 방향전환을 하게 되는 인지영역에 대한 기준을 정하고 그에 따른 보행자 회피 원칙을 정립하였다.

기준 보행자는 자신의 물리적 영역 즉, 신체영역과 인지영역 그리고 현재 진행방향에 따라 150° 회피 범위(시야범위)를 가지는 것으로 정의하였다. 인지영역안에 타보행자나 장애물이 검색된 경우 진행방향을 크게 벗어나지 않는 범위내에서 목표지점과의 거리를 최소화 하는 방향으로 진행방향 및 속도를 수정하게 된다.



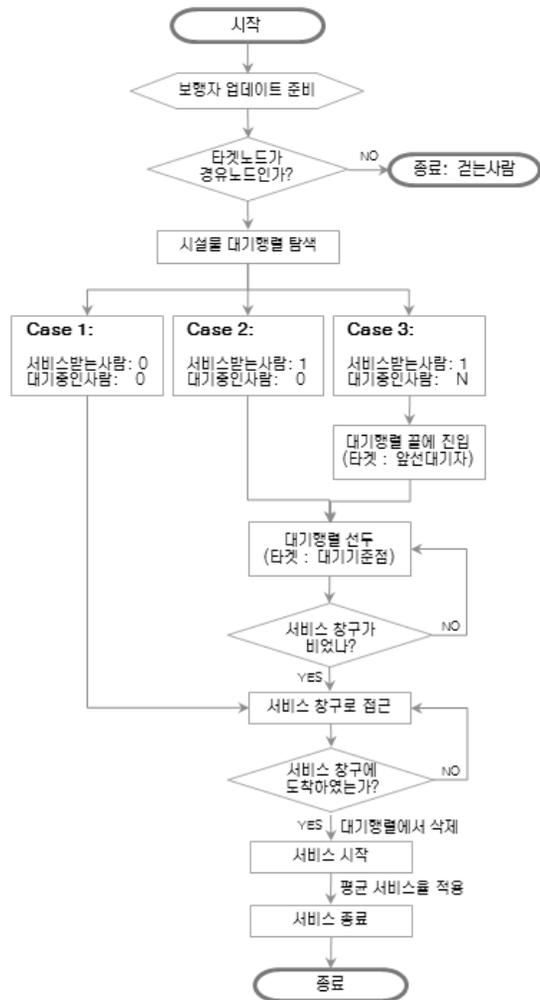
〈그림 14〉 보행자의 회피행태

#### (2) 시설물 이용행태

본 연구에서는 시설물 이용행태모형을 추가하였다. 보행자들이 시설물을 이용하는 일련의 과정을 모형화하였다. 이를 위하여 보행공간내의 시설물들을 대기행태, 서비스행태에 따라 분류하였다.

보행자의 생성, 소멸이 되는 공간인 분석공간내의 진입보도 이외에도 다양한 수단에서의 승하차가 보행자의 생성, 소멸이 될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 우선 다양한 수단의 승하차행태를 정의하였다.

또한 보행시설 중 편의시설인 화장실 및 상점과 매표소(KIOSK), 개찰구 등의 시설이용행태를 정



〈그림 15〉 시설물 이용행태 알고리즘

〈표 9〉 시설물 속성에 따른 구분

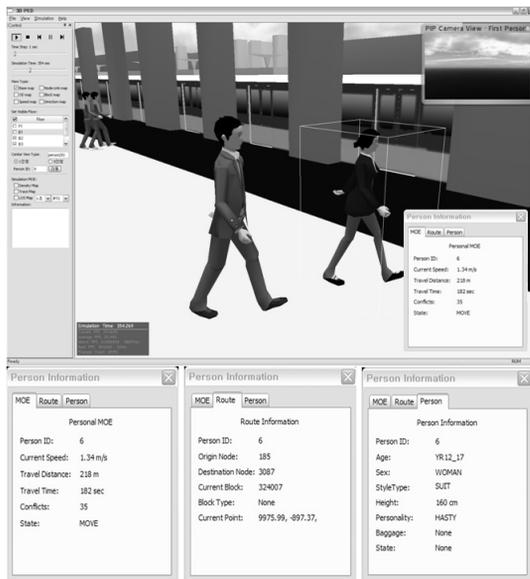
구분	서비스 제공위치	서비스 형태	대기행태
매표소(KIOSK)	시설물 외부	FIFO	단일
화장실, 상점 등 편의시설	시설물 내부	FIFO	단일
지하철승강장, 버스정류장, 택시승강장 등	시설물 통과	FIFO	다중
개찰구	시설물 통과	FIFO	다중

의하여 보행자시뮬레이터에 반영하였다.

서비스를 제공하는 시설물의 주요 요소는 대기와 서비스이다. 시설물 이용자에 비해 서비스 창구가 적으면 대기행렬이 발생하게 되고, 대기행렬 내의 사람들은 진입 순서대로 서비스를 받게 된다.

#### 4) MOE출력

3D-PED에서는 시뮬레이션 Timestep단위의 보행자 및 시설물 정보를 통하여 보행공간의 효율성 분석(보행자의 이동성, 안전성, 쾌적성 등 평가 및 분석)을 위한 다양한 MOE를 산출할 수 있다. 본 연구에서는 보행자와 시설물 그리고 시뮬레이션 수행으로 구분하여 MOE를 설정하였다.



〈그림 16〉 MOE 표출예시

- 보행자 관련 MOE : 보행자 기본정보(보행자 ID, 나이, 성별, 성향, 짐유무, 자유속도), 현재 속도, 이동거리, 이동시간, 시설물 이용횟수, 지체시간, 상충수 등
- 시설물 관련 MOE : 시설물 기본정보(시설물 ID, 시설물 형태, 서버수), 총 이용자수, 평균 서비스시간, 평균 대기시간, 대기행렬 길이, 시설물 이용상태 등
- 시뮬레이션 MOE : 총 시뮬레이션 시간, 총 발생 보행자수, 보행자 총 이동거리, 보행자 총 이동시간, 보행자 평균 속도, 보행자 이동패턴 등 정의된 MOE의 표출예시는 〈그림 16〉과 같다.

### 4. 운영분석의 내용 및 사례연구

#### 1) 3D-PED UI

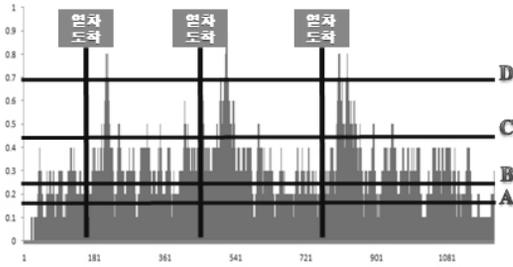
3D\_PED의 UI는 〈그림 17〉과 같다. UI는 크게 3가지 기능으로 구분될 수 있다. 보행태모형을 적용한 Micro-PED의 시뮬레이션 결과를 시각화하고 애니메이션하는 기능과 환승센터 보행 공간에 대한 다양한 공간보기 기능(Base Map, Node-Link Map, Block Map, OD Map 등)과 시뮬레이션 결과(MOE)를 다양한 각도에서 표출한다.

#### 2) 사례연구

본 연구에서는 Micro-PED, 3D-PED를 통해 다양한 상황에서의 보행자 시뮬레이션을 수행하였다.



〈그림 17〉 3D-PED UI



〈그림 18〉 지하철 환승통로의 서비스수준 변화

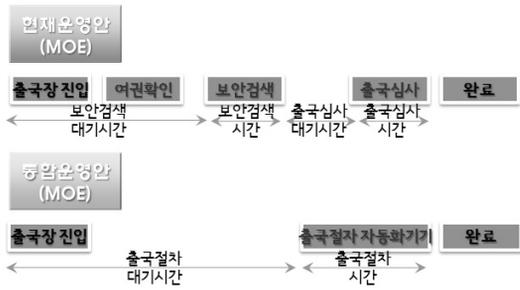
(1) 지하철 환승통로

지하철 승강장의 경우, 열차 도착시 보행자의 승하차가 동시에 발생하는 공간으로 정적인 분석방법론으로 보행공간을 평가하기에는 한계가 있다.

Micro-PED를 이용하여 환승통로의 실시간 서비스수준을 분석한 결과, 열차도착으로 인한 일시적인 수요 집중현상과 혼잡이 해소되는 행태를 확인할 수 있다.〈그림 18〉

(2) 인천공항 출입국절차 통합의 효과분석

개별 보행행태모형을 반영한 본 시뮬레이터를 통하여 다양한 상황에 대한 모의실험이 가능하다. 현재 인천공항은 여권확인, 보안검색, 출국심사의 3



〈그림 19〉 공항의 출입국절차

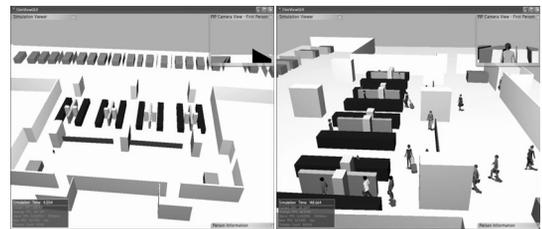
단계로 출입국절차가 운영되고 있다. 이를 1단계로 통합하여 운영할 경우에 대하여 본 시뮬레이터를 통한 승객의 대기시간, 보안검색시간 등의 비교를 통하여 운영효과를 분석하였다.〈그림 19〉, 〈표 10〉

현장조사 결과를 통해 얻은 시설물 이용 분포를 이용하여 시뮬레이션을 수행한 결과, 보안검색과 출국심사 소요시간은 매우 유사한 값을 나타내고 있으며, 보안검색 대기시간의 경우 현장조사와 시뮬레이션 간에 유사한 결과를 나타내어 시뮬레이션이 현장상황을 적절하게 모사하고 있다고 판단할 수 있다.〈그림 20〉

분석결과, 3단계로 운영하는 현재 운영안의 경우 평균소요시간 침두시 350초/인인데 비하여 1단계로 통합운영할 경우(개선안 1) 약 49%감소한 179초/인의 소요시간이 걸릴 것으로 분석되었다.〈표 11〉

〈표 11〉 통합운영에 따른 효과분석

구분		평균소요시간(초/인)	
		침두시	비침두시
미시행	현재 운영안	350	248
시행	통합 운영안	179	147
개선효과(소요시간절감율)		49%	41%



〈그림 20〉 출입국절차 효과분석 시뮬레이션

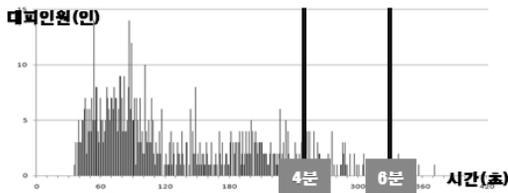
〈표 10〉 시나리오 설정

구분		내용	운영장구		수요
현재운영안		여권확인, 보안검색, 출국심사 3단계로 구분하여 수행	보안검색 : 8개, 출국심사 : 14개 (전용 창구 포함)		침두 비침두
통합 운영안	개선안 1	1단계로 통합운영	자동화 기기 15대	상업시설 무	침두 비침두
	개선안 2		자동화 기기 11대	상업시설 유	침두 비침두

(3) 돌발상황발생시 피난행태 분석

본 Micro-PED를 이용하여 환승센터내의 화재와 같은 돌발상황이 발생할 경우에 대한 행태 분석이 가능하다. 화재발생과 동시에 보행자는 가장 가까운 출입구를 통해 환승센터를 벗어나게 되는데 시설물 위치에 따른 대피시간의 변화, 환승센터의 위험도 등을 분석할 수 있다.

가상의 환승역사를 대상으로 화재발생시의 환승 승객의 대피시간을 산출하였다. 총 767명중 674명이 4분 이내에 환승센터를 대피한 것으로 분석되었으며 나머지 93명이 화재에 위험한 것으로 나타났다.



<그림 21> 화재에 따른 대피시간



<그림 22> 화재에 따른 대피 시뮬레이션

3) 결과물 출력

3D-PED에서는 보행자, 시설물, 시뮬레이션 총 MOE 등에 대하여 시각적인 그래프, 표로 결과물을 제시하며 최종보고서를 출력한다.(<그림 23>)

VI. 연구의 활용성

환승센터 설계 및 운영분석 프로그램(P-Sim)은 환승센터내의 개별 보행자 행태를 반영하여 환승센터의 운영효율성을 평가하고, 설계안의 적정성 분석 및 서비스수준 평가를 수행한다. 본 프로



<그림 23> 3D-PED의 결과물

그램은 다음과 같은 기능을 수행할 수 있도록 개발이 진행되고 있다.

- 다양한 시나리오(돌발상황, 침두시, 장래수요 변화 등)에 대한 모의실험 및 MOE분석
- 보행자 수요에 따른 환승행태 분석 : 환승시간, 환승거리
- 교통약자 등 다양한 보행군에 대한 환승행태 분석
- 환승센터 설계안 평가(규모, 시설배치 등의 적정성을 미시적으로 평가)를 위한 동적 이고 미시적인 개별 보행자 모의실험 분석
- 국내 보행자 특성을 고려한 한국형 환승센터 분석

또한 P-Sim은 환승센터의 기본설계단계, 실시 설계단계, 기운영시 문제점 분석 등의 여러 단계에서 여러 대안에 대한 평가가 가능하며 환승센터 운영방향결정 및 개선에 활용될 수 있을 것이다.

현재 수도권에서는 지하철 1-9호선, 분당선, 경의선 등의 도시 및 광역철도가 운영되고 있으며 역사는 총 508개이다.

기운영되는 상당수의 역사가 현재 설계지침 적용전에 건설되었고 또한 일부역사는 혼잡으로 인

〈표 12〉 수도권 도시 및 광역철도 역사현황

구분	서울메트로				도시철도공사			
	1호선	2호선	3호선	4호선	5호선	6호선	7호선	8호선
역사(개소)	97	51	43	48	51	33	42	17
구분	서울 9호선	인천메트로	한국철도공사			인천공항철도		계
	9호선	인천1호선	분당선	중앙선	경의선	인천공항철도		
역사(개소)	25	29	20	26	20	6	208	

해 많은 문제가 발생하고 있다.

P-Sim을 이용하여 해당역사에 대한 최소설계 기준 만족 여부, 서비스수준 분석, 배치적정성 분석 등의 설계 및 운영분석이 시급히 시행되어야 할 것으로 판단된다.

### Ⅶ. 향후 연구방향

환승센터 설계 및 운영분석 프로그램(P-Sim)은 현재 개발 중에 있으며 보완되어야 할 사항이 있다.

첫째, 환승센터 설계편람 분석결과에 대한 검증이 필요하다. 프로그램 기능에 대한 검증이 요구된다.

둘째, 보행자 행태알고리즘의 보완이 필요하며, 현장조사를 통한 검증이 필요하다.

셋째, 설계분석 프로그램과 운영분석 프로그램 간의 연계가 필요하다.

넷째, 이용자가 사용하기 편리한 프로그램으로 개발되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 정규화된 CAD작성지침을 제시하여 프로그램의 입력자료를 자동추출하는 기능을 가지고 있으며 보완중에 있다.

마지막으로, 본 프로그램을 통한 산출되는 MOE에 대한 적정성 분석이 필요하다.

### 참고문헌

1. 건설교통부, 『도시철도 정거장 및 환승, 편의 시설 보완 설계 지침』, 2002.
2. 건설교통부, 『도로용량편람』, 2004.
3. 국토해양부, 『복합환승센터 연계환승시설 설계편람(안)』, 2009.
4. 한국건설교통기술평가원, 『환승센터 설계 및 운영분석 프로그램 개발(2차년도)』, 2008.

5. 한국건설교통기술평가원, 『환승센터 설계 및 운영분석 프로그램 개발(3차년도)』, 2009.
6. 구석모, 『CA 모형을 이용한 환승계단의 보행자 행태 모형 구축 및 평가』, 서울시립대학교 석사학위 논문, 2007.
7. 박동주, 『보행목적에 따른 보행교통류 특성에 관한 연구』, 서울대학교 석사학위 논문, 1993.
8. 이진욱, 『보행자교통류특성과 그 적용에 관한 연구』, 영남대학교 석사학위 논문
9. John J. Fruin, 『보행자 공간 : 이론과 디자인』, 1991
10. 박우신(2002), 『보행자 시설 서비스 수준 산정에 관한 연구』, 대한교통학회지, 제20권 제1호, 대한교통학회, pp.149-156. 5,
11. Transportation Research Board, 『Transit Capacity and Quality of Service Manual』, 2nd Edition, 2003.
12. Blue, V.J. & J.L. Adler, 『Emergent fundamental pedestrian flows from cellular automata microsimulation』, Transportation Research Record 1644(1998), pp 29 - 36.
13. Daamen, W., 『Modelling Passenger Flows in Public Transport Facilities』, PhD thesis, Delft University of Technology, 2004.
14. Fruin, J.J., 『Pedestrian Planning and Design, Metropolitan association of urban designers and environmental planners』, New York, 1971.
15. Helbing, D. & P. Molnar, 『Social force model for pedestrian dynamics』, Physical Review E 51(5), 4282 - 4286, 1995.
16. Okazaki, S., 『A Study of Pedestrian Movement in Architectural Space, Part 1: Pedestrian Movement by the Application on of Magnetic Models』, 1979.