

유전 알고리즘을 이용한 지하철 역사 동선 분리 시스템의 효과 분석

김진호* · 이주용** · 김태완***

Kim, Jin-ho*, Lee, Joo-yong**, Kim, Tae-wan***

An Analysis of the Effects of Walking Guidance System in Subway Stations using Genetic Algorithm

ABSTRACT

The conflict of opposing pedestrian traffic-flow in a subway station(made up of stair, passageway, and escalator) diminishes the convenience and mobility of its users. In addition, the station's efficiency would be negatively affected by the growth of delay and queue length in pedestrian facilities. As these phenomena have been resulted by the overlapping in pedestrian's traffic-line, the separation of it would alleviate these problems. For the criteria and methodology of separation, this paper has investigated the bi-directional queue length and delay on the entrance of each facility (stair, passageway and escalator). Since the pedestrian flow exists bidirectionally, we have used the weighted average by inflow rate for the delay value. For the optimization of the separation, the Genetic Algorithm has been utilized in order to minimize the delay.

Key words : Walking guidance system, Pedestrian flow, Conflict, Delay

초록

지하철 역사 내 계단, 통로, 그리고 에스컬레이터 등의 보행 시설물에서 발생하는 서로 다른 방향의 보행교통류간 상충은 보행자의 편의와 이동성을 감소시킨다. 또한, 각 시설물별 지체 시간과 대기 행렬의 증가를 수반함에 따라 역사의 이용효율을 저하시키게 된다. 이러한 현상은 보행교통류간의 동선이 겹치면서 발생하는 것으로 동선을 방향에 따라 적절히 분리해줄 경우 완화될 수 있다. 하지만 우선 동선 분리의 기준과 그 방법론에 대한 정립이 선행되어야 한다 할 수 있다. 본 연구에서는 계단, 통로 그리고 에스컬레이터로 분류되는 각 시설물의 입구를 기준으로 방향별 대기 행렬과 지체시간을 도출하였다. 이 때, 시설물의 보행교통류는 양방향으로 존재하므로 지체시간은 각 방향별 유입 인원 에 따라 가중 평균 값을 활용하였다. 또한 동선 분리 시스템의 운영을 최적화하기 위해 유전 알고리즘을 활용하여 보행자의 지체시간을 최소화하였다.

검색어 : 동선 분리 시스템, 보행교통류, 상충, 지체시간

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

도심부 지하철 역사 내 보행자의 활동은 열차 승하차, 개찰구 통과 및 출입구로의 경로 설정 등 보행자의 보행 동기와 목적성이 비교적 명확한 편이기 때문에 한정된 동선과 축을 기준으로 이루어지는 경향이 있다. 이와 같은 현상은 특히 첨두 시간대에 보행교통량이 많아지면서 두드러진다.

* 한국철도기술연구원 스마트역사연구팀 (Korea Railroad Research Institute · ziminpa@krii.re.kr)

** 정희원 · 교신저자 · 중앙대학교 일반대학원 도시공학과 석사과정 (Corresponding Author · Chung-Ang University · jylee3302@naver.com)

*** 정희원 · 중앙대학교 사회기반시스템공학부 교수 (Chung-Ang University · twkim@cau.ac.kr)

Received March 20, 2015/ revised April 6, 2015/ accepted April 13, 2015

하지만 지하철 역사와 같이 보행공간이 한정된 장소에서는 보행 교통량이 증가할수록 방향이 서로 다른 보행 동선간의 상충이 보행자의 편의와 이동성을 저하시키는 문제를 야기한다. 증가된 보행자의 수만큼 여유 공간이 줄어들면서 보행군 내 개별 보행자의 이동경로가 직선화되지 못하고 반복적인 방향 전환에 따라 복잡해지며 보행속도 또한 일정하게 유지되지 못하기 때문이다.

따라서 보행교통류의 방향별 동선이 적절히 분리될 수 있도록 관리하는 것은 보행 동선의 중복과 상충을 방지하여 보행자의 편의와 이동성을 증진할 뿐만 아니라 지하철 역사의 이용 효율을 높이는 방안이라 판단된다. 이에 본 연구는 서울 사당역을 대상으로 동선 분리에 따른 대기행렬 길이와 지체시간을 산정하여 동선 분리 시스템의 효과를 분석하고자 한다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구에서는 대기행렬 이론에 기반하여 지하철 역사 내 시설물의 대기행렬 길이와 지체시간을 분석하였다. 역사 내 보행시설물은 분석의 용이성을 위해 계단, 통로, 그리고 에스컬레이터로 한정하였다. 특히 에스컬레이터의 경우, 방향별 동선이 완전히 분리되어 있으며 기계장치를 통해 보행이 이루어지기 때문에 양방향 보행자간 정체 발생 가능성이 적다. 따라서 에스컬레이터는 보행자의 이용 여부만 반영하고 본 연구에서 제안하는 동선 분리 시스템의 설치 대상에서는 제외하였다. 대기행렬 길이와 지체시간은 보행시설물의 너비에 따라 영향을 받으며 폭이 넓을수록 정체가 적게 발생한다. 따라서 방향별 보행폭이 서로 다른 시나리오별로 분석이 수행되었다.

또한, 보행폭에 따라 대기행렬 길이와 지체시간이 다른 점에 착안하여 유전 알고리즘을 활용한 방향별 최적 보행폭을 산정하고 각 시나리오별 결과를 비교하였다.

2. 관련 연구 동향

양방향 보행교통류에 관한 연구는 각 방향별 보행자가 서로 뒤섞인 채 진행되는 교행 상태에 놓인 보행교통류의 통행 특성에 관한 연구와 각 방향별로 보행시설물의 폭을 분할한 상태에서의 통행 특성에 관한 연구로 분류할 수 있다. 교행 상태에 대한 분석은 주로 미시적 관점에서 보행자의 운동 행태와 보행자간 상호작용에 대한 연구가 주를 이루는 반면, 시설물이 분할되어 있는 경우에는 그로 인한 보행자의 편의와 기대 효과에 대한 분석이 중점적으로 다뤄지고 있다.

Muramatsu and Nagatani(2000)는 양방향뿐 아니라, 4개 방향으로 각각 이동하는 보행교통류의 정체 현상을 연구하였다. 편의의 비보행(Biased Random Walker) 모델을 활용하여 시나리오와

모형식의 계수를 변화시켜가며 민감도 분석을 수행하였다. 특히, 보행교통류의 급격한 속도 저하가 발생하는 임계 밀도를 연구하여 보행교통류의 정체 현상을 분석하는데 유용하다 할 수 있다. 하지만 정방격자 모형을 사용하였는데 이는 보행자의 이동 방향이 상하좌우 4개 방향으로 제한되기 때문에 고밀 상태에서 보행자간 정체가 심화될 경우 모든 보행자가 제자리에 멈춰버리면서 시뮬레이션이 정체되는 문제점을 갖고 있다.

Lee(2012)는 회전육각격자 모형을 활용하여 양방향 보행교통류의 교행 상태를 분석하였다. 앞서 언급한 정방격자 모형과는 달리 회전육각격자모형은 보행자간 상충 발생시 자연스러운 방향 전환을 통해 회피 움직임을 표현하는 것이 가능하여 양방향 보행교통류의 교행 상태를 분석하기에 용이한 것으로 나타났다. 따라서 고밀도 상태에서의 각 방향별 보행열의 생성과 근접현상을 시뮬레이션 하였으며, 보행교통류의 와해현상을 관측하였다. 하지만, 시뮬레이션을 통해 관측된 자료에 대한 정성적인 분석이 주를 이루고 있다.

Zhang(2015)은 양방향 보행교통류에서 각 보행자간의 상호작용을 해석하여 보행교통류를 분석하였다. 특히 방향이 서로 다른 보행자가 마주보고 진행하며 상충을 일으킬 경우, 밀어내거나 회피하고자 하는 경향이 있는데 이를 재현하여 보행자의 운동을 설명하였다. 교행 상태에 놓인 보행자간의 상충으로 혼잡이 발생하여 해소되기까지의 과정을 시뮬레이션 하였으며, 특히 병목 지점에서 방향이 서로 다른 보행자간의 통행 행태를 설명하는 병목 교차현상(Bottleneck Oscillation)을 재현한 바 있다. 이는 보행교통류가 교행 상태에 있을 경우 보행자간 미시적 행태에 대한 고려가 필요함을 상기시키는 연구라 할 수 있다.

Takimoto and Nagatani(2002)는 보행시설물의 방향에 따른 분할선(Partition Line)을 도입하여 그에 따른 효과를 시뮬레이션 하였다. 분할선은 차량 교통류에서 각 방향별 차선을 분리하는 중앙차선과 비슷한 개념이지만, 방향별로 완전히 분리된 차량교통류와는 달리 보행자가 일시적으로 분할선의 안팎을 넘나들 수 있게 설계하여 보행자의 자연스러운 교행 상태를 반영하였다. 특히, 분할선의 도입만으로도 시설물의 용량이 증가하는 것으로 나타났는데 이는 보행교통류에서 방향별 동선 분리의 중요성을 상기시키는 결과라 할 수 있다.

Yu and Song(2007)은 Takimoto and Nagatani(2002)의 모델에 기반하여 분할선을 벗어난 보행자에 의해 보행 교통류가 받는 영향과 각 방향별 교통량 비율에 따른 차이를 분석하였다. 분할선을 벗어난 보행자가 분할선 내부로 복귀하기 전까지는 반대 방향 보행자와 상충을 일으키며 교행 상태에 놓이게 되는데, 이로 인해 보행교통류의 속도 및 밀도가 받는 영향을 정량적으로 제시하였다는 점에서 의의가 있다. 특히 교행 상태로 인한 영향이 각 방향별

교통량의 비율에 민감하게 반응하는 것을 확인하여 분할선의 설치 시에는 방향별 교통량 비율에 대한 고려가 필요함을 알 수 있다.

Yang et al.(2011)은 우측통행에 관한 확률을 부여하여 분할선을 벗어난 보행자가 내부로 복귀하기까지의 과정을 시나리오별로 연구하였다. 분할선이 설치되어 있는 상태에서 이를 벗어난 보행자는 분할선의 설치 목적과 달리 의도하지 않은 교행 상태를 일으키며 보행 시설물의 효율을 저하시키게 된다. 따라서 해당 연구는 분할선을 벗어난 보행자가 효율적으로 다시 분할선 내부로 복귀하기까지의 과정을 분석하여 분할선 운영 과정에서의 관리 방안을 제시하였다 할 수 있다.

Lee and Kim(2014)은 보행교통류 모형을 개발하여 동선 분리 시스템이 보행편의와 이동성에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 보행자간 상충 횟수나 평균 통행시간, 평균 통행 속도에 있어서 동선 분리 시스템을 적용하는 것이 그렇지 않은 경우보다 유리한 것으로 나타났다. 특히 우측통행으로의 유도가 동선 분리 시스템과 함께 적용될 경우에 보행 시설물의 효율이 가장 좋은 것으로 분석되었는데, 이는 앞서 언급한 Yang et al.(2011)의 연구 결과와 마찬가지로 동선 분리 시스템의 적용에 있어 필요한 교통 운영 관리의 중요성을 시사한다.

이와 같은 연구들을 살펴볼 때, 보행교통류는 방향별 교통량이 서로 혼재되어 교행 상태에 놓일 수 있는 특성을 고려하여야 한다. 또한 이러한 통행 특성이 부정적으로 작용할 경우 교행 상태를 완화하기 위해 방향별 동선을 분리하는 것이 주요한 방법임을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 보행교통류의 동선 분리에 따른 효과와 그 방법론에 대해 분석하고자 한다.

본 연구는 기존의 동선 분리 및 분할선에 관한 연구가 주로 단일 시설물 내에서 분할선을 설치하는 상황을 다룬 것과 달리, 서로 연결되어 있는 시설물의 방향별 동선을 연속적으로 분리하는 상황을 대상으로 하고 있다. 또한, 기존의 연구가 대부분 동선 분리 시의 효과와 그로 인한 미시적 보행 행태에 대해 다루고 있는 반면, 본 연구는 동선 분리로 인한 효과와 더불어 동선을 어떻게 분리할 것인가에 대한 구체적인 방법을 제시한다는 점에서 차별성을 갖는다.

3. 동선 분리 시스템

3.1 시스템의 개요

수도권의 지하철 역사는 많은 유동인구가 관측되는 시설물로 보행교통류에서 발생할 수 있는 교행 상태, 보행자간 상충, 그리고 혼잡 현상이 복합적으로 관측되는 경향이 있다. 특히, 역사 내 한정된 공간에서 열차 승하차·이동·환승 등의 보행 활동이 동선을 따라 발생하며, 오전, 오후 첨두시의 출·퇴근 통행 상황에서는

방향별 동선의 충돌로 인해 보행자의 이동 저항이 급속히 증가하는 실정이다.

더욱이 이러한 변화는 통행시간의 증가, 안전사고의 발생 가능성 증대와 같이 도시철도 역사의 이용 효율을 저해하는 요인으로 작용하게 되므로, 물리적으로 보행자의 동선이 분리되도록 유도할 수 있는 시스템의 개발이 필요하다 할 수 있다.

하지만 기존 역사의 환경 개선을 통한 방법은 비용이 과대하고 비효율적이라 할 수 있다. 지하 공간의 특성 상 구조물 개선이나 확장 등의 방안은 현실적 제약조건을 다수 갖고 있으므로, 지하 공간의 신설을 통해 보행 공간의 양적 확장을 추구하는 방법만으론 근본적인 이동 성능의 개선을 기대하기 어렵다 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 보행교통류의 동선을 방향별로 분리시켜 주는 동선 분리 시스템의 적용을 통해 이와 같은 문제점에 대한 해결책을 제시하고자 한다. 앞서 언급했듯이 보행교통류에서 방향별 동선의 충돌은 보행자의 이동 저항을 증가시키며, 지하철 역사 공간은 한정된 공간의 특성상 이와 같은 현상이 빈번하게 발생할 수 있다. 따라서 Fig. 1과 같이 지하철 역사 내 보행시설물의 방향별 동선을 분리시키는 동선 분리 시스템의 적용은 보행교통류의 이동 성능을 개선하여 역사의 이용 효율성을 증진시키는데 긍정적으로 작용할 것이다.

또한, 지하철 역사 내 보행 환경 개선을 위해 구조물의 확장이나 형태 변형을 요구하지 않는 것은 큰 장점이라 할 수 있다. 기존의 역사 시설물 내에 동선 분리 시스템의 설치 및 운영을 위한 일정 규모의 공간만을 필요로 하므로, 상대적으로 경제적이며 비용 효율적인 방법이라 판단된다.

결과적으로 본 시스템이 실제 지하철 역사 내에 적용되어 정상적으로 기능하기 위해서는 역사 유형 등에 따른 보행특성 데이터베이스의 구축, 실시간 상황 보완 알고리즘, 정보 네트워크를 활용한 제어기술이 모두 적용되어 실시간으로 보행교통류의 상황을 진단

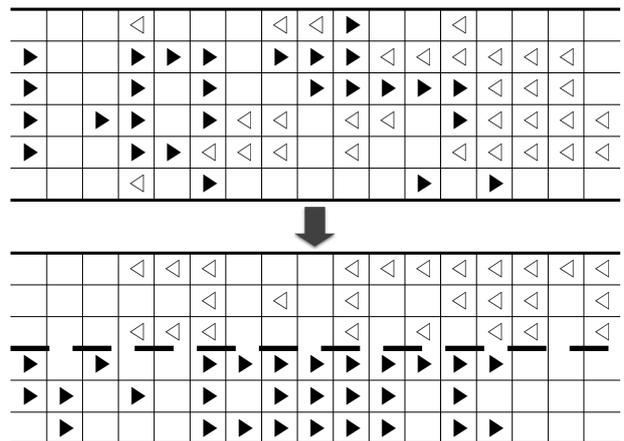


Fig. 1. The Concept of Walking Guidance System

하고 이에 맞추어 가변화된 시스템으로 운영되어야 할 것이다. 하지만 본 연구 단계에서는 실시간으로 가변화된 동선 분리 시스템의 적용에 앞서 시스템이 적용되지 않은 상태에서 관측된 보행교통류의 데이터를 토대로 동선 분리 시스템의 적용 가능성 및 시나리오 별 효과에 대한 분석이 이루어졌다.

3.2 분석 방법론

3.2.1 유전 알고리즘을 통한 최적화

지하철 역사 내에는 계단, 에스컬레이터 그리고 보행통로 등 다양한 보행 시설물이 존재하고 있다. 더욱이 이러한 시설물들의 용량, 보행폭 및 기하구조는 서로 상이하게 구성되어 있으므로 모든 시설물에 맞춰 동선의 분리를 최적화하기 위해선 최적화 알고리즘이 필수적으로 요구된다. 본 연구에서는 유전 알고리즘을 활용하여 최적화를 수행하였다.

유전 알고리즘은 특정 함수를 최소화 또는 최대화하는 최적화 알고리즘이다. 교배와 변이, 자연선택 등 자연계의 생명 진화를 모방하여 최적의 해를 찾아가는 진화 프로그래밍이라 할 수 있다. 주어진 문제의 대수학적 연산이 어려울지라도 적합도 함수만 알 수 있으면 이를 해결할 수 있으므로 다양한 보행 시설물과 보행 동선이 존재할 수 있는 본 연구 과제에 적합한 방법론이라 할 수 있다.

본 연구는 Haupt and Haupt(2004)가 개발한 연속변수 유전 알고리즘을 사용하여 주어진 최적화 문제를 해결하였으며, 적합도 함수로는 방향별 유입량에 따라 가중평균한 지체시간을 활용하여 연산을 수행하였다. 각 시설물의 폭보다 작거나 같은 임의의 양수로 구성된 유전자와 그 유전자의 집합인 염색체를 해로 하였으며 해집단의 수는 400개로 설정하였다. 선택법으로는 적합도에 따라 순위를 할당하고 그에 따른 확률로 결정하는 Ranking 선택법을 사용하였다. 이 때, 적합도 함수의 값이 작은 상위 50%의 해집단은 다음 세대까지 생존하며 교배에 참여하게 된다.

교배법은 Fig. 2와 같은 과정을 통해 이루어지므로 각각 2개의 부모 해에서 2개의 자식 해가 생성된다. 따라서 상위 50%의 해집단인 부모 해와 그와 같은 수의 자식 해를 합쳐 본래 해집단의 수인

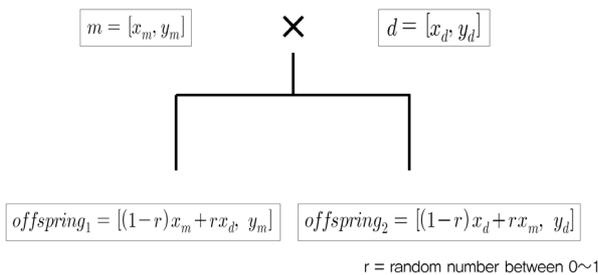


Fig. 2. Crossover Technique of Genetic Algorithm

400개를 유지할 수 있다. 더불어 변이법은 임의로 선택된 자리의 유전자를 해당 시설물의 폭보다 작거나 같은 임의의 양수로 대체하는 방법을 사용하였으며 그 확률은 20%로 설정하였다. 마지막으로 200세대까지 유전 알고리즘을 반복하여 적합도 함수를 최소화시키는 유전자와 유전자의 집합인 염색체를 본 연구의 해로 정의하였다.

3.2.2 대기행렬과 지체시간

보행시설물의 정제 정도와 서비스 수준을 평가하는 지표로는 대기행렬 길이(Queue Length)와 지체시간(Total Delay, TD)을 사용하고자 한다. 대기행렬 길이는 시설물에 용량보다 큰 값의 보행량이 유입되면서 시설물에 진입하지 못하고 정제되어 있는 보행자 행렬을 의미하며 1분당 평균값을 적용하였다. 또한 지체시간은 대기행렬이 생성된 뒤 소멸되기까지의 소요 시간을 뜻하며, 총 지체시간을 기준으로 분석을 수행하였다. 두 지표들은 대기행렬 이론을 통해 도출이 가능하며, 상대적으로 연산이 간편하다는 장점을 갖고 있다.

대기행렬 이론에서는 평균도착률(λ)과 그 함수($A(t)$), 그리고 평균서비스율(μ)과 그 함수($D(t)$)의 관계를 통해 연산이 수행되므로 두 값을 정의할 필요가 있다. 평균도착률은 시설물 폭의 단위 m당 진입 보행교통량(인/분/m)을 사용하며, 평균서비스율은 시설물이 수용할 수 있는 폭의 단위 m당 보행교통량(인/분/m)을 의미한다.

$$\text{Total Delay} = \int_0^t Q(t) dt = \sum_{i=1}^n W_i \quad (1)$$

$$\text{Queue Length} = \frac{\text{Total Delay}}{t}$$

이 때, $Q(t) = A(t) - D(t)$

$W_i =$ 누적인원(i)에서의 지체시간

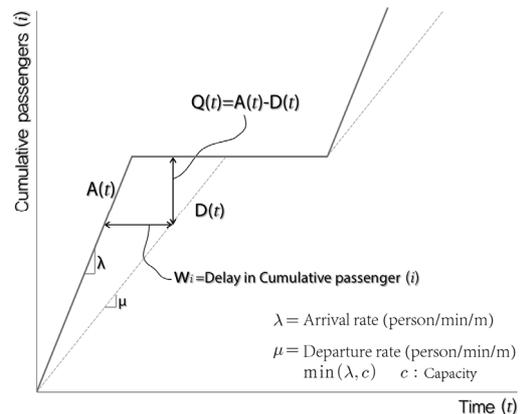


Fig. 3. Queuing Theory

평균도착률이 용량보다 작다면 평균서비스율은 평균도착률과 동일한 값을 가질 것이며, 평균도착률이 용량보다 크다면 평균서비스율은 용량과 동일한 값을 가지게 된다. 따라서 평균도착률과 평균서비스율이 서로 같을 경우 대기행렬과 지체시간이 발생하지 않는 반면, 평균도착률이 평균서비스율보다 클 경우 대기행렬과 지체시간이 발생하게 된다. 이 때, 대기행렬 길이와 지체시간은 Eq. (1)을 통해 도출할 수 있다.

3.2.3 시스템의 적합도 함수 및 최적화 목표

유전 알고리즘은 적합도 함수를 통해 최적화 목표를 달성하게 된다. 반복 연산을 통해 적합도 함수의 값을 최소화 혹은 최대화 시키면서 그 값이 안정화되도록 유도하는 것이다. 본 연구에서는 동선 분리 시스템을 통해 보행시설물의 정체가 최소화되도록 유도하고자 하므로 정체 정도의 지표인 대기행렬 길이와 지체시간을 통해 적합도 함수를 구성할 수 있다.

하지만, 두 가지 지표를 모두 활용하여 연산을 수행하고자 할 경우, 연산 과정이 복잡해질 뿐만 아니라 두 지표를 동시에 최적화시키기 위한 과정에서 어느 한 지표의 최적화도 달성하지 못하게 될 수도 있다. 따라서 적합도 함수는 Eq. (2)와 같이 지체시간만을 사용하였다. 이는 지체시간이 시간가치에 관한 지표로서 보행자의 활동 및 정체현상을 정량화하기 더 용이한 지표라고 판단하였기 때문이다. 또한 대기행렬 길이의 경우 지체시간을 변수로 하여 유도된다는 것을 감안한 결과이다.

$$F = f\left(\frac{\alpha TD_1 + \beta TD_2}{\alpha + \beta}; x_j, B_j - x_j\right) \quad (2)$$

Table 1. Variables in the Fitness Function

Variables Direction	Pedestrian Flow (person)	Total Delay (person · minute)	Facility Width (m)
Direction 1	α	TD_1	x_j
Direction 2	β	TD_2	$B_j - x_j$

이 때, 지체시간은 각 방향별 총 보행자 유입량에 따라 가중 평균한 값을 입력하여 방향별 유입량의 차이를 반영하였다. 지체시간은 인/분/m 단위의 평균도착률, 평균서비스율에 영향을 받으며, 이 중 인/분의 값은 주어진 교통 상황에서의 보행교통량을 뜻하는 변수로 분석시점에 유입 보행량으로 고정되어 있는 값이다. 따라서 지체시간은 시설물 폭(m)의 변화에 따라 달라지므로, Eq. (3)과 같이 지체시간을 최소화하는 시설물 폭을 연산하였다.

$$\frac{\partial F}{\partial x_j} = 0$$

$$\frac{\partial F}{\partial (B_j - x_j)} = 0 \quad (3)$$

3.2.4 분석 전제

실제 지하철 역사 내에는 서로 다른 시설물이 보행자의 동선을 따라 연속적으로 배치되어 있으므로 각 시설물의 입구마다 대기행렬과 지체시간이 생성될 수 있다. 따라서 각 시설물의 입구마다 Node를 설정하여 Fig. 4와 같이 대기행렬과 지체시간의 연산을 수행해야 한다.

이 때, 보행자가 최초로 진입하게 되는 시설물의 평균도착률은 현장 조사를 통해 얻을 수 있는 반면, 연결되어진 시설물들의 평균도착률은 직전 시설물의 평균서비스율을 활용하여 연산을 수행한다. 따라서 Node와 Node를 연결한 Link의 길이는 해당 시설물의 길이와 동일하며, Node에서의 평균서비스율에 따른 통행이 Link에 그대로 유지된다고 가정한다.

본 연구에서는 보행교통류의 주요한 특징으로 양방향 교행 상태에 주목하였으므로 Node-Link 구조도 마찬가지로 양방향으로 구성되었다. 양방향 구조에서는 각 방향별로 보행폭을 동선에 따라 어떻게 분리하는가에 의해 방향별 대기행렬과 지체시간에 차이를 보인다. 어느 한 방향의 보행폭이 지나치게 좁을 경우 극심한 대기행렬과 지체시간이 생성되지만, 맞은편 방향은 상대적으로 통행이 원활하게 이루어지는 것이다. 또한, 시설물이 연속적으로 이어져 있으므로 직전 시설물의 보행폭 변화는 다음 시설물의 대기행렬과 지체시간에 영향을 끼치게 된다.

물론 시설물에 정체가 발생할 경우 시간당 진입하는 보행자의 수를 제한하는 방법으로 대기행렬 길이와 지체시간을 감소시킬 수도 있다. 하지만 본 연구는 주어진 교통량 상황에서 동선을 어떻게 분리할 것인가에 집중하는 관계로 정체가 발생할 경우 보행교통량을 인위적으로 조절하여 보행자의 진입을 제한하는 방안은 고려치 않았다.

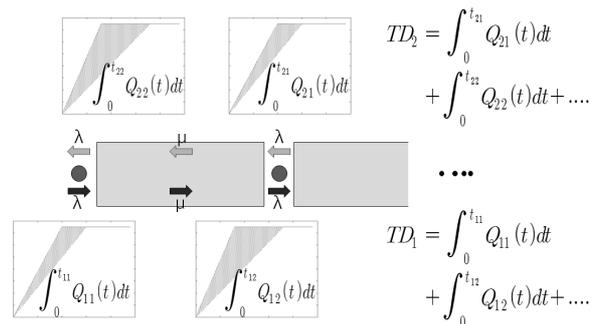


Fig. 4. Calculation on Successive Facilities

이렇듯 본 연구는 각 시설물의 방향별 폭과 연속적으로 구성된 시설물간의 평균도착률-평균서비스를 관계로 인해 상호간에 영향을 주는 연속적인 특성을 갖는다. 또한, 방향별 보행폭에 변화를 주는 동선 분리 시스템에서 지체시간을 최소화하기 위해 유전 알고리즘을 통한 동적 모형 연산을 수행하여야 한다.

4. 동선 분리 시스템의 효과 분석

4.1 시스템 적용 대상지

동선 분리 시스템의 적용 대상지는 서울 사당역 내 2호선-4호선 간 환승통로를 선정하였다. 사당역은 서울메트로 2호선과 4호선이 교차하고 있는 환승역사로 첨두 시간에 보행교통량이 많기 때문에 본 시스템의 적용 대상지로 적합하다 할 수 있다.

대상지는 Fig. 5와 같이 계단, 통로 및 에스컬레이터가 모두 존재하고 있으며, 총 8개의 Node와 양방향 5개, 단일방향 2개로 총 7개의 Link로 구분 지을 수 있다. 에스컬레이터는 단일 방향(UP)으로만 존재하므로 에스컬레이터와 그와 연결된 통로의 일부분은 단일방향 Link로 설정하는 반면, 그 이외의 시설물은 양방향 Link이므로 동선 분리 시스템의 적용범위에 속한다.

교통량 자료는 2014년 5월 16일 오전 첨두시에 수집된 자료를 활용하였으며, 4호선→2호선 방향의 경우 에스컬레이터와 계단의 분류 지점에서는 30%의 보행자만이 계단을 이용하고 나머지는 에스컬레이터를 통해 이동하는 것으로 분석하였다. 또한, 분석시간 이전에 시스템 내에 보행자가 존재하지 않는 상황에서 두 보행교통류가 동시에 진입하는 상황을 가정하여 시뮬레이션을 수행하였다.

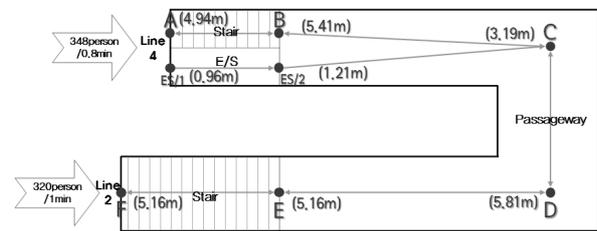


Fig. 5. Transfer-passageway in Sa-dang Station

Table 2. Optimized Passage-width by Genetic Algorithm

Direction \ Node	A	B	C	D	E	F
Line 4→Line 2 (x_j , m)	1.46 (30%)	1.85 (34%)	1.24 (39%)	2.65 (46%)	2.47 (48%)	2.36 (46%)
Line 2→Line 4 ($B_j - x_j$, m)	3.48 (70%)	3.56 (66%)	1.95 (61%)	3.16 (54%)	2.69 (52%)	2.80 (54%)
Total Width (B_j , m)	4.94	5.41	3.19	5.81	5.16	5.16

4.2 유전 알고리즘을 통한 최적화 선정

유전 알고리즘을 통한 최적 보행폭 선정 결과는 Table 2와 같다. 4호선→2호선 방향의 경우 전체 유입 보행량은 더 많지만, Node A에서 합류부인 Node C까지는 해당 방향 폭의 값과 전체 폭에서 차지하는 비율이 매우 낮은 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 대부분의 보행자가 동선 분리 시스템의 설치 대상이 아닌 에스컬레이터를 이용하기 때문에 상대적으로 보행량이 적은 계단 부에서는 넓은 보행폭이 필요치 않은 것으로 해석할 수 있다.

하지만 에스컬레이터를 통과한 보행자들의 합류 이후인 Node D 부터는 4호선→2호선 방향의 보행폭이 증가하며 양방향간 보행 폭의 격차가 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 에스컬레이터의 설치로 인한 효과가 감소하였으며 합류부에서의 보행자간 혼란이 가중되어 발생한 결과라 할 수 있다.

이는 본 연구 결과가 유전 알고리즘을 활용하여 동적 모형의 연산을 수행하였기에 도출되었다고 할 수 있다. Node C를 전후하여 보행 동선의 합류 및 분류 상황이 정상적으로 구현되어 있는 것은 본 분석이 주어진 교통량 정보를 정상적으로 반영하고 있음을 보여준다 할 수 있다.

4.3 시나리오별 효과 분석

동선 분리 시스템에 따른 효과는 총 3가지 시나리오로 분석되었다. 각 방향별로 모든 보행시설물의 폭을 절반씩 균일하게 나눠서 사용하는 경우(시나리오 1)와, 유입 보행량의 비율에 따라 나눠서 사용하는 경우(시나리오 2), 그리고 마지막으로 본 연구가 제안하는 유전 알고리즘에 따라 최적화된 보행폭으로 나눠서 사용하는 경우(시나리오 3)로 구분할 수 있다.

이 때, 시나리오 2의 경우 4호선→2호선 방향은 Node A에서 유입인원의 30%만이 동선 분리 시스템의 적용 대상인 계단을 사용하므로 에스컬레이터를 이용한 나머지 70%의 보행군과 합류하기 전까진 전체 유입 보행량의 30% 값을 사용하였다.

분석 결과를 정리한 Fig. 6은 시나리오별로 보행 활동을 평가하기 위해 각 Node에서 발생하는 지체시간과 대기행렬 길이를 나타내었다. 세 시나리오 모두 Node C에서 가장 큰 지체시간이 관측되는 것을 알 수 있다. 이는 Node C가 4호선→2호선 방향의 동선이 합류하는 지점으로 이로 인한 혼란이 발생하며 보행자의 정체를 유발하기 때문으로 판단된다.

특히 각 시나리오별로 Node C에서 발생하는 지체시간의 차이가 크지 않은 것으로 나타나 Node C는 시나리오에 따른 개선 효과가 불분명한 것으로 판단된다. 이는 동선간의 합류가 발생할 경우는 그렇지 않은 경우에 비해 동선을 분리하는 방법이 다르게 적용되어야 함을 시사한다. 따라서 합·분류 상황에는 이에 맞춰 특화된 동선 분리 시스템의 운영 대책이 필요하다 할 수 있다.

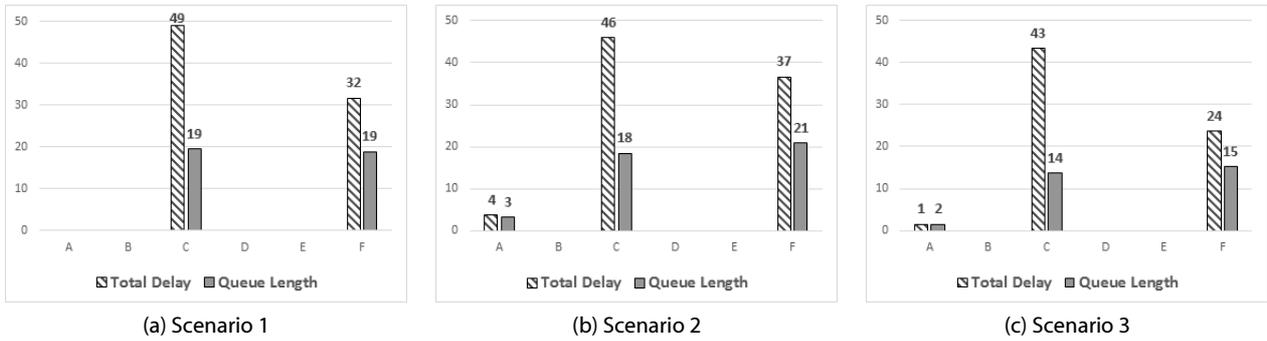


Fig. 6. Delay and Queue Length of Each Scenario

하지만 이를 제외한 대부분의 Node에서는 시나리오 3이 강점을 갖는 것을 알 수 있다. 각 방향별로 최초로 위치하고 있는 시설물인 Node A와 Node F의 경우 보행자가 열차에서 하차하여 최초로 마주하게 되는 시설물이라는 점에서 초기 보행 혼잡을 관리하는데 중요한 역할을 한다.

비록 Node A에서는 시나리오 3이 가장 우수한 결과를 도출하진 않았지만, 다른 시나리오들에 비해 현격한 차이를 보이지 않는다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 시나리오 1에서는 지체시간이 전혀 발생하지 않았지만, 시나리오 2에서는 4인분, 시나리오 3에서는 1인분으로 나타나 시나리오별 효과를 파악하기가 쉽지 않다. 특히 Node A의 경우 에스컬레이터와 계단으로 분류되어 있는 외중에 계단에만 동선 분리 시스템을 설치한 경우이기 때문에 이용하는 보행자의 양이 그다지 많지 않아 시나리오별 효과를 정확히 진단하기엔 한계가 있다.

이와 달리 Node F는 모든 보행자가 동선 분리 시스템이 적용된 시설물을 통행하는 상태이므로 Node A에 비해 시스템의 적용에 따른 효과를 비교하기에 더 적합하다 할 수 있다. 이 경우에는 시나리오 3이 다른 시나리오에 비해 우수한 성능을 보였는데, 가장 지체시간이 큰 시나리오 2에 비해 35%, 그 다음으로 지체시간이 큰 시나리오 1에 비해 25%의 지체시간 감소 효과가 나타났다. 따라서 본 분석에서 제시하는 방법론이 가장 적합한 것을 알 수 있다.

그에 따라 각 시나리오별로 지표의 합산을 비교한 Table 4에 의하면 시나리오 3이 지체시간과 대기행렬 길이의 합에서 각각 약 68인분과 30인분으로 가장 좋은 결과를 보이는 것을 확인할 수 있다. 가장 효율이 좋지 않은 시나리오 2에 비해 지체시간은 20%, 대기행렬 길이는 28%의 감소효과를 보였는데, 이는 교통량의 분류 및 합류로 인해 교통량의 분배가 동적으로 변화하는 상황을 가장 잘 해석한 결과로 판단된다. 또한, 다양한 시설물이 서로 연속적으로 배치되어 상호 영향을 주며 동적으로 연결되어 있는 상황을 반영하고 있기 때문이라 할 수 있다.

Table 3. Scenarios of Walking Guidance System

Scenario	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
Note	Directionally Separating Half [50% : 50%]	Directionally Separating by Inflow-rate [348 : 320 or (348×0.3) : 320]	Dynamic Calculation for Optimizing the Fitness-function

Table 4. The Effect of Waking Guidance System

Scenario	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
Estimates			
Σ Total Delay (person · minute)	80.59	86.36	68.45
Σ Queue Length (person)	38.34	42.64	30.40

반면, 나머지 두 시나리오는 이보다 더 열악한 보행 환경을 갖는 것으로 분석되었다. 특히 시나리오 2는 지체시간의 합이 약 86인분으로 가장 큰 것을 알 수 있다. 이는 대부분 보행자가 열차에서 하차한 뒤 최초로 접하게 되는 시설물, 특히 Node F에서 높은 지체시간이 관측된 것에 따른 영향이라 할 수 있다. 따라서 동선 분리 시스템의 적용 시에는 서로 연결된 시설물의 최초 진입 시에 발생할 수 있는 초기 혼란을 관리하는 것이 중요하다고 할 수 있다.

5. 결론 및 향후 연구 과제

본 연구에서는 지하철 역사 내 보행시설물에서의 방향별 보행 동선간 중복과 상충이 역사 이용 효율에 부정적인 영향을 준다는 판단 하에 동선 분리 시스템의 도입을 제안하였다. 이 때, 보행시설물의 정체 정도와 서비스 수준을 나타내는 지표로 대기행렬 길이와 지체시간을 활용하였다. 그에 따라 보행 환경 개선을 목표로 시나리

오별 동선 분리 시스템에 따른 효과를 비교 분석하였다.

또한, 보행시설물은 서로 연속적으로 연결되어 있으며 상호 영향을 주는 사항이기 때문에 유전 알고리즘을 적용하여 개별 시설물의 입구로 설정된 각 Node에서 동선 분리를 위한 방향별 최적 보행폭을 산정하였다.

시나리오별 분석 결과, 유전 알고리즘을 적용하여 분리하는 경우가 절반씩 균일하게 분리, 유입보행량의 비율로 분리하는 경우보다 지체 감소효과가 좋았다. 유전 알고리즘을 적용한 동선 분리는 보행시설물의 대기행렬 길이와 지체시간을 최소화시킬 수 있을 뿐만 아니라, 동선간의 합류와 분류 상황을 반영하고 있는 것을 확인하였다. 더불어 이를 활용한 동선 분리 시스템의 운용 방안을 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

다만, 보행 동선의 합류 지점인 Node C는 시나리오별 효과에서 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 서로 다른 보행교통류간의 합류가 발생할 경우 그 영향으로 보행자간 혼잡과 정체 현상이 심화되기 때문으로 추정된다. 따라서 합·분류 상황에서 보행자간 정체를 관리하고 동선을 적절히 분리하기 위한 추가적인 방안에 대한 연구가 후속되어야 할 것이다.

또한, 본 연구에서는 동선 분리 시스템을 분할선의 개념으로 인식하고 분석을 수행하였다는 한계를 갖고 있다. 현실에서의 양방향 보행교통류는 각 방향별 동선이 분할되어 완전히 분리되어 있지 않은 대신, 교행 상태에 놓이게 되므로 분리된 동선의 비가상으로 보행자가 벗어날 수 있다. 향후 연구에서는 동선 분리 시스템의 지시를 따르지 않고 분리선의 밖으로 벗어나 교행하는 보행자가 전체 보행교통류에 미치는 영향과 이를 방지하기 위한 대책에 대한 연구가 수행되어야 한다.

이를 위해선 교행 상태에서 시설물의 용량과 보행자의 지체시간, 대기행렬 길이가 어느 정도 영향을 받는지에 대한 연구가 선행되어야 할 것이다. 보행교통류의 교행은 각 보행자 개개인의 행태에 큰 영향을 받아 본 연구에서 분석한 거시적인 관점만으로는 다루기 힘든 만큼 미시적 분석을 함께 활용한 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업의 연구비지원(14RTRP-B067918-02)에 의해 수행되었습니다.

본 논문은 대한교통학회 제72회 학술발표회(2015.2.14)에서 발표된 내용을 수정·보완하여 작성된 것입니다.

References

- Lee, J. (2012). "Development of rotated hexagonal lattice model for pedestrian flows using particle swarm optimization (RHRM-PS)." *Journal of Transportation Research*, The Korea Transport Institute, Vol. 19, No. 3, pp. 35-45 (in Korean).
- Lee, J. Y. and Kim, T. W. (2014). "Improvement of pedestrian convenience and mobility by walking guidance system in subway stations." *The 71st Proceedings of the KOR-KST Conference*, Korean Society of Transportation, pp. 254-257 (in Korean).
- Muramatsu, M. and Nagatani, T. (2000). "Jamming transition in two-dimensional pedestrian traffic." *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, ELSEVIER, Vol. 275, No. 1-2, pp. 281-291.
- Randy, L. H. and Sue, E. H. (2004). *Practical Genetic Algorithms*, John Wiley & Sons Inc, New York.
- Takimoto, K., Tajima, Y. and Nagatani, T. (2002). "Effect of partition line on jamming transition in pedestrian counter flow." *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, ELSEVIER, Vol. 308, No. 1-4, pp. 460-470.
- Yang, L. X., Zhao, X. M. and Zheng, J. F. (2011). "Bi-directional pedestrians with a partition line." *International Journal of Modern Physics C*, World Scientific Company, Vol. 22, No. 8, pp. 871-881.
- Yu, Y. F. and Song, W. G. (2007). "Effect of traffic rule breaking behavior on pedestrian counterflow in a channel with a partition line." *Physical Review E*, American Physical Society, Vol. 76, No. 2, p. 026102.
- Zhang, Q. (2015). "Simulation model of bi-directional pedestrian considering potential effect ahead and behind." *Physica A*, ELSEVIER, Vol. 419, pp. 335-348.