

대기시간변동 및 용량을 고려한 대중교통 통행배정모형

김진환* · 김동선** · 김지현***

Kim, Jin Howan* · Kim, Dong Sun** · Kim, Ji Hyun***

Developing a Transit Assignment Model Considering Waiting Time Variation and Line Capacity

ABSTRACT

In recent years, the passengers are likely to decide their route on impulse due to the development of the integrated public transport system, and real-time information system. Especially, public transport fare integration in Seoul Metropolitan area, 2004 makes them not to have resistance about changing the modes or routes and their route choice is most effected by the degree of congestion. Assignment model have limitations to describe route changes by congestion. In this study, the concept of a link cost function used in road assignment and Effective frequency is introduced to describe the passengers' behavior when the capacity of public transport is over and the waiting time variation. Two situations, new transit line operation and accident, are set up to validate the model, as a result of the transit assignment by this model, the traffic on networks is not over the capacity. It is expected that this study will be of help to reflect the various behaviors in transit assignments.

Key words : Effective frequency, Assignment, Route choice, Waiting time variation

초 록

최근, 환승시스템 구축 및 통합 교통체계, 스마트폰 보급 등으로 인한 실시간 대중교통 정보제공이 가능해 지면서 이용자들의 대중교통 경로선택이 유연해지고 있어 미리 수단을 정하고 통행하는 것이 아니라 상황에 맞춰 경로를 선택하는 특성으로 변해가고 있다. 우리나라의 경우 2004년부터 시행된 대중교통 요금통합에 따라 이용자가 경로를 선택함에 있어 저항을 느끼지 않는 특징을 보이고 있으며, 이용자들의 경로선택은 대중교통 용량에 따른 혼잡으로 인해 대기시간이 증가 될 경우 달라진다. 이러한 이용자의 노선경로 선택이 대중교통 시스템에서의 혼잡에 따른 대기시간에 영향을 받지만 기존 전통적인 모형으로 묘사하기에는 한계점이 존재하며 이와 관련된 기초연구 역시 부족한 상황이다. 용량과 상관없이 주어진 모형에 의해서 수요를 추정하는 기존 모형의 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 승용차 통행배정에서 사용되는 링크 통행비용함수의 개념을 도입하였으며, 실질운행횟수의 이원화된 변수를 설정하여 용량을 초과하지 않도록 수리모형상의 제약식을 완성하였다. 모형의 검증으로 신규직결노선 도입과 돌발상황에 따른 각각의 시나리오 예제 네트워크를 구축하여 적용하고 그에 대한 유의성을 검증한 결과 용량초과에 대한 통행량은 배정되지 않았으며, 대중교통시스템 용량이 초과할 경우에도 초과된 수요의 경로전환으로 통행량이 안정적으로 배정되는 결과가 나타났다. 따라서 본 논문이 대중교통 시스템에서 혼잡 등으로 인해 변동되는 대기시간에 따라 이용자의 경로선택이 유연해지는 현실을 반영할 수 있는 선행연구가 될 것으로 기대한다.

검색어 : 실질운행횟수, 통행배정, 경로선택, 대기시간 변동

* (주)동해종합기술공사 상무 (Donghea Engineering & Consultants co., Ltd · kjh@dh2002.co.kr)

** 정희원 · 교신저자 · 대전대학교 교수 (Corresponding Author · Daejin University Corresponding author · kimdns@daejin.ac.kr)

*** 정희원 · (주)동해종합기술공사 상무 (Donghea Engineering & Consultants co., Ltd · kjh3450@dh2002.co.kr)

Received April 24, 2014/ revised May 11, 2014/ accepted August 21, 2014

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

최근 대중교통이용활성화에 따른 신규노선의 신설과 환승시스템 구축 및 통합 교통체계 등 대중교통 이용자를 위한 편의시설이 공급되어지고 있고, 이용자의 경우 스마트폰 보급 등으로 신규노선 정보 및 출발상황, 대중교통 혼잡상황 등의 다양한 정보를 통해 대중교통의 경로선택이 유연해지고 있는 실정이다.

이렇듯 유동적인 대중교통시설 및 정보가 이용자들의 선택에 중요한 영향을 미치고 있는 만큼 대중교통시설 및 정보에 따른 이용자의 통행행태를 반영한 수요예측이 전제 되어야 하나 기존 전통적인 모형은 용량과 상관없이 수요가 추정됨으로서 대중교통의 혼잡 및 출발상황 등에 따라 경로를 선택하는 이용자들의 행태를 묘사하기에 한계점이 존재한다.

특히 용량과 상관없이 주어진 모형에 의해서 수요를 추정함으로써 수요가 과다 추정되어 대중교통 노선의 중복투자 등 잘못된 정책결정 등의 큰 문제로 나타나기도 한다. 따라서 본 논문은 기존의 통행배정 단계에서만 용량을 고려하는 모형이 아닌, 용량을 초과하는 구간이 발생하였을 경우 통행자의 경로선택을 반영하고 중복투자 방지 및 혼잡에 따른 합리적 경로선택 정보 등을 제공 할 수 있도록 대중교통의 용량을 고려한 통행배정 모형을 구축하고자 하였다.

1.2 연구의 내용 및 수행절차

본 논문의 내용으로 용량제약에 따른 대중교통 통행배정 모형을 제시하고, 수학적 증명 및 알고리즘을 개발한다. 개발된 모형을

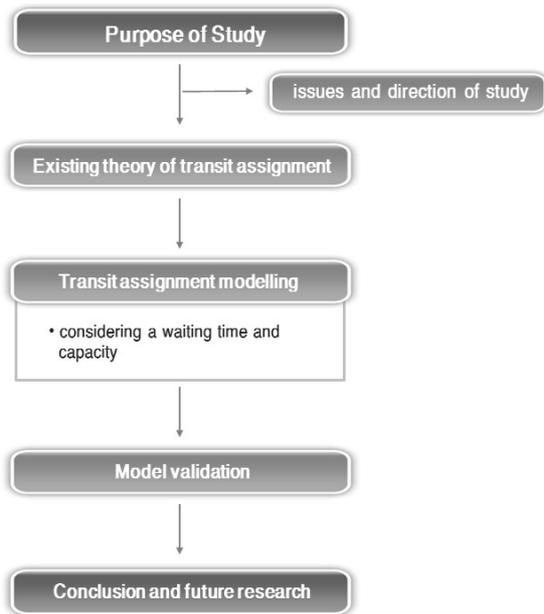


Fig. 1. Steps of Study

신규직결노선 도입에 따른 효과분석을 위한 시나리오 1, 출발상황에 대비한 시나리오 2 등 다양한 환경에서의 예제 네트워크를 통해 본 모형을 분석하고 검증하고, 결론으로 본 논문의 활용성 제고를 위한 정책제언 등 결론을 도출하고자 한다.

2. 선행연구 및 이론적 고찰

Spieß (1993)는 대중교통 통행배정모형에서 용량제약 상태를 고려하기 위하여, 기존의 최적전략을 기본 개념으로 하고, 혼잡을 공포 평형배정에서 사용되는 교통량지체함수와 유사한 비용함수를 이용한 대중교통 통행배정 모형인 최적 전략기반 대중교통 통행배정 모형을 제시하였다. 차내 혼잡을 반영하였다는 점에서 대기시간 증가를 고려하였다고 할 수 있지만, 실제 통행자의 대기시간 증가는 차내 혼잡 뿐만이 아닌 정류장 대기시간을 포함하여 전체적으로 일어나는데 이러한 현상을 단지 차내 시간의 증가로 표현하여 현실성이 다소 결여되고, 용량이상의 통행배정이 일어나 실제 통행행태를 정확히 묘사하지 못하였다.

De Cea and Fernandez (1993)는 대중교통 통행 배정시 차량 균형상태와 차내용량을 고려한 대중교통 균형통행 배정모형을 구축하였다. 이 모형은 차량용량제약으로 인한 정류장에서의 지체를 고려하기 위해 개별 노선을 환승이 발생하는 정류장과 이들을 연결하는 경로구간(루트섹션)으로 결합하여 재구성하였으며, 일반적인운행횟수(Nominal Frequencies)와 유효운행횟수(Effective Frequencies)의 개념을 도입하여 정류장에서의 지체를 모형화 하였다. 이모형의 경우 정류장에서 혼잡에 의한 지체반영으로 용량을 고려할 수 있다는 장점이 있으나, 네트워크를 루트섹션으로 재구성하는 과정이 반드시 필요하며 이 루트섹션이 문제에서 주어진 링크단위의 네트워크보다 더욱 복잡하게 구성된다는 단점이 있다. 또한 링크 통행량간의 상호작용으로 인하여 비대칭이 되고 이 비용함수가 강단조함수가 아닌 경우 해의 유일성이 보장되지 않는 문제점을 내포하고 있다.

Lam et al. (1999)은 혼잡한 상태의 대중교통 노선망의 정류장에서 일부 승객만이 첫 번째 차량에 탑승가능하고 나머지 승객의 경우 다음차량 이용 및 노선을 가정한 대중교통 확률적 사용자 균형통행 배정모형을 제시하였다. 이모형은 대중교통 통행자의 행태에 대하여 불확실성을 고려하여 확률적 통행배정의 개념을 사용하였고, 용량이상 통행량이 배정되는 것을 방지하기 위한 제약 조건을 도입하였다. 또한 통행비용 계산 시 지체를 정류장에서 일어나는 것으로 가정하였으므로 대중교통에서의 지체를 올바른 방법으로 표현하였다는 장점을 가지고 있으나, 사용자가 자신이 통행하고자 하는 노선들의 집합을 선택하는 과정이 실제 통행량을 배정하는 과정과 분리되어 있어 모형의 형태에서 일치성이 결여되는 단점을 갖는다.

Yun (2000)은 즉 용량에 도달할 때까지는 차량 내부가 혼잡하더라도 그 노선이나 차량을 이용하게 되나 용량에 도달하면 그 대안을

자신이 판단하는 네트워크에서 제외하는 용량제약모형을 구축하였다. Yun (2000)의 모형은 기존의 전량통행배정모형과, 최적전략모형, De Cea-Fernandez (1993)모형, Lam et al. (1999)모형과 예제네트워크를 이용하여 용량제약 모형 구축의 당위성을 설명하였으며, 모형 구축결과 수요가 작을 경우 최적전략 모형과 수요 배정 결과가 동일하지만 용량이상의 수요가 배정될 경우 용량제약을 만족하면서 통행자가 용량제약 구간을 제외한 타 구간으로 이전되어 배정되는 결론을 도출하였다.

Park et al. (2007)의 경우 실제 서울시 교통카드자료를 이용하여 지하철의 차내시간, 환승시간, 환승패널티로 구성된 기종점간의 경로 효용함수를 구축하고 로짓모형을 이용하여 확실적인 대중교통 통행배정 모형을 구축하였다. 이는 실제 RP 자료를 활용함으로써 보다 현실적인 모형구축이 가능했으나, 환승패널티 자체를 상수항으로 고려하고, 대중교통 이용객의 경로선택 과정에서 중요한 변수인 혼잡에 대한 반영이 이루어 지지 못한 한계점이 있다.

Lee et al. (2003)의 경우 노선구간의 비용함수는 링크의 통행시간과 차내혼잡을 고려한 혼잡비용의 함수로 정의하고 유전자 알고리즘을 이용하여 k개의 경로를 탐색한 후 로짓모형을 이용하여 통행량을 배정하였다. 이는 차량용량을 고려하였다는 특징이 있지만, 환승 및 대기시간의 차외혼잡으로 인한 지체가 아닌 차내혼잡만을 반영하였다.

Younes Hamdouch et al. (2004)는 상수의 링크통행시간과 대중교통 노선의 용량이 주어진 상태에서 경로의 비용은 종점에서부터의 링크비용과 링크선택확률의 곱의 누적합계로 정의하고 MSA, Projection 알고리즘을 이용하여 대중교통의 통행배정을 수행하였다. 이 연구에서는 노선용량에 대한 고려가 수행되었지만 노선으로의 접근 대기시간에 대한 고려가 미흡한 단점이 있다.

Fumitaka. K. et al. (2003)의 경우 대중교통망 통행배정을 위해 Hyperpath를 구성하는 노선통행시간, 대기시간, 탑승실패의 위험비용을 계상하고 Markov Chain을 이용하여 반복마다 최적의

hyperpath를 계산하였다. 이는 경로비용함수를 구축하고 균형상태의 해를 도출하고 노선의 용량을 고려하였지만 hyperpath 구축과정과 Markov Chain을 이용함에 있어 사전분포의 구축과정이 어렵다는 단점이 존재한다.

기존 연구를 통한 각각의 모형의 시사점을 바탕으로 대중교통의 특성을 고려하기 위해 대기시간의 변동을 고려하여 대중교통 용량을 제약하는 통행배정 모형을 구축하고자 한다.

3. 통행배정모형 개발

3.1 모형의 기본 개념

통행의 수단과 경로를 동시에 선택할 수 있는 통행의 동시성이란 대중교통의 특성을 반영할 수 있는 모형을 구축하고, 특히 대중교통 대기시간 변화 및 용량에 따른 지체를 경험하고 그에 따른 지체시간을 모형에 반영하고자 한다. 본 논문에서의 기본개념은 Spiess-Florian (1989)이 제안한 최적전략 모형과 같이 일정 용량에 도달하기 전까지는 최적전략에 속한 노선들에 대해 운행횟수 비율로 통행배정을 하다가 어떤 링크의 통행량이 주어진 용량에 도달하게 되면, 그 링크를 네트워크에서 제거하고 새로운 최적전략을 찾아 동일한 방법으로 통행배정을 수행한다. 단 최적전략에 속한 노선들에 대한 운행횟수 비율의 경우 승객의 증가에 따라 대기시간이 변동되는 것을 표현하여 수요에 따라 운행횟수를 변화하도록 설정하였다. 이때 대기시간 변동의 경우 대기승객 증가에 따른 지체와 차량 내부 혼잡함에 따른 불편함의 일반화 비용의 변화로 구성된다.

여기에서 Yun (2000)의 논문과 같이 용량에 도달한 링크를 제거하여 용량제약을 수행하게 되는데, 이때는, 그 링크의 통행량 뿐 아니라 그 링크와 연결된 전·후의 통행량 역시 수정된다. 이는 통행량 보존을 만족시키기 위함이며 통행량 보존 제약식에 의해 문제의 내부에서 해결된다.

즉 대중교통 노선에서 일부구간이 수요가 증가할 경우 대기시간

Table 1. Main Features of Existing Models and Acceptable Points in this Study

Category		Main Feature	Acceptable Point
Without capacity constraint	Optimal Strategy Model	- Assignment in proportion to service frequency - No capacity constraint - Superiority of route investigation - Clear expression of user behavior - Applicability for large-scale network	- Superiority in route investigation - Clear expression of user behavior - Applicability for large-scale network
With capacity constraint	Spiess (1993) Model	- Reflect in-vehicle congestion in travel time - Disregard waiting time increment under station congestion - Assign a trip over a capacity	- Reflect in-vehicle congestion as route choice option
	De Cea and Fernandez (1993) Model	- Reflect capacity constraint using effective frequency concept - Modelling a delay at station - Assign a trip over a capacity	- Effective frequency concept
	Yun (2000) Model	- Reflect capacity constraint using effective frequency concept - Reflect capacity constraint using dual variables - Disregard in-vehicle congestion	- Capacity constraint using dual variables

이 증가하여 통행자는 증가된 대기시간에 따라 다른 경로를 선택하게 되는 것을 묘사하고, 용량에 도달한 경우 용량에 도달한 링크가 제거되었기 때문에 통행자는 그 링크가 포함된 대중교통 경로에 대하여 용량도달 이전과 다른 판단을 하게 된다. 이러한 방법으로 한 링크의 통행량이 주어진 용량에 도달하면 전후 링크들에 영향을 미쳐 후속 링크들의 통행량도 감소한다는 것을 묘사할 수 있다.

3.2 모형구축의 전제사항

본 논문에서는 모형 구축시 최적전략의 기본적인 모형구축 전제사항과 같은 승객의 행동패턴에 대한 가정을 하였다.

- 대중교통 이용자는 자신의 대중교통 통행정보에 대한 완벽한 정보를 가지고 있음.
- 대중교통의 경우 노선변경이 용이하지 않고 실시간 정보에 따른 동적통행태를 보이기보다는 자신의 출발지에서 경로를 결정하고 통행을 하는 경우가 많으므로, 정적 통행배정을 근간으로 함.
- 통행자의 경우 자신이 최적전략이라고 판단한 노선에 포함된 차량 중 가장 먼저 도착한 차량에 승차함.
- 단일 노선의 차량운행간격은 일정하고 다른 노선의 차량운행간격에 독립적임.
- 정류장에 도착하는 승객의 분포는 완전히 임의적이며 균일함.
- 통행자는 선택 가능한 경로는 다수가 있으며, 일반화된 통행비용을 최소화하려는 방식으로 행동함.
- 승객은 모형에서 설정된 용량 이상 차량에 탑승할 수 없음.
- 모형에서 사용되어 지는 통행시간은 일반화된 개념임. 즉 현재 노드에서 차량에 승차한 후 목적지까지의 재차시간, 도보시간, 환승시간 등을 시간으로 표현한 값임.
- 같은 노선에 포함되는 모든 차량은 그 크기, 용량, 운행특징 등이 동일하며 항상 가로상의 동일한 일련의 노드 및 링크에서 운행됨.

3.3 대기시간 변동 및 용량제약 통행배정모형 구축

본 논문에서 정류장에서의 승객증가로 인한 대기시간 증가를 고려하기 위하여 유효운행횟수의 기본 수식을 변환하여 새로운 실질운행횟수의 개념을 수립하고, 수요에 따른 정류장에서 혼잡함에 따른 대기시간 증가 및 차내 혼잡함에 따른 대기시간 증가를 고려하였다. 또한 용량 제약 하에서의 운행횟수를 표현하기 위하여 이원변수의 형태를 갖는 실질운행횟수를 도입하였다.

$$f_a^p = \begin{cases} f_a(v) = \frac{1}{2(\mu + \lambda)} & , v_a \leq \mu c \\ 0 & \text{그외} \end{cases}$$

- 여기서, μ : 운행횟수
 c : 차량용량
 λ : 통행량에 따른 운행횟수 감소함수

$$\lambda = \frac{h}{2} \left(\frac{v_a}{\mu c} \right)^\beta + C_i(v)$$

- β : 파라미터(wait curve : 0.4)
 h : headway
 v_a : 통행량
 $C_i(v)$: 차내 혼잡 비용

위 식과 같이 이원화 된 실질운행횟수를 이용하면, 용량에 도달한 링크에 대해 더 이상의 통행배정을 제약할 수 있으며, 용량보존 제약에 의해 전후 링크들에 수정 없이도 전후 링크들에 대한 통행량을 조절할 수 있게 된다. 또한 정류장에서 수요에 따른 운행횟수 감소를 공로에서 BPR식과 마찬가지로 형태의 단조증가함수 형태로 제시하여 수요증가에 따른 운행횟수 감소를 가능하게 해준다. 이는 경로구간을 이용하려는 수요가 그 링크의 용량에 미치지 못하면 크게 중요한 역할을 하는 것은 아니나, 수요가 용량에 도달하거나 넘어서게 되면 급격한 운행횟수 감소되는 특징을 가지고 있다.

위 모형은 운행간격의 1/2을 사용하여 계수에 의존적인 모형이 아닌 대중교통 노선 자체의 특성을 고려할 수 있는 모형식을 제시하였다. 또한 용량제약에 대한 제약조건을 명시하여 용량 이상의 수요가 배정되지 않도록 하였으며, 한 용량에 도달하지 않더라도 정류장에서의 수요가 많을 경우 혼잡에 따른 대기시간 증가에 대한 지체를 고려하는 모형을 구축하였다.

대중교통 요금 통합에 따라 환승요금이 무료이고, 수단간 환승에 저항이 없는 우리나라의 현실상 차내 혼잡함에 의해 경로 및 수단이 변경되는 현실을 반영하기 위해 승객 증가로 겪는 대기시간 증가 외에 차내혼잡의 증가에 따라 승객이 느끼는 불편함을 고려하기 위한 식은 다음과 같다.

$$C_i(v) = \alpha_1 \left(\frac{v_c}{c} \right)^n$$

여기서, $C_i(v)$: 혼잡비용

- v_c : 차량 내 승객 수
 c : 차량 용량
 α_1, n : 파라미터

이와 같은 차내 혼잡을 고려하는 함수는 용량이하에서는 혼잡비용이 '0'에 가까운 값을 갖게 되지만 용량에 거의 도달하면서부터 비용이 급격하게 증가하는 형태를 갖는 값이 적용된다. 즉 차내 혼잡에 따라 대중교통 이용자들이 경로를 변경할 것이라는 가정을 충족하기 위한 수식이다.

위에서 정의한 모형구축의 전제사항과 용량제약의 기본 개념 및 실질운행횟수에 대한 개념과 Spiess-Florian이 제시한 최적전략 모형을 기본으로 수리모형화하여, 대기시간 변동 및 용량을 고려한 통행배정 모형을 구축하였다.

4. 사례연구

4.1 시나리오 설정

본 논문에서는 개발한 모형의 적용가능성 및 우수성을 판단하기 위해 현실상황에서의 교통상황을 간단한 예제로 표현하여 모형을 적용하였다. 분석대상 모형의 경우 최적전략모형(Optimal Strateg Assignment), 용량제약모형(Yun, 2000)을 대상으로 비교 및 분석을 수행하였으며, 분석대상 예제는 공통된 네트워크에 2가지 경우의 운행대안을 바탕으로 설정하였다.

시나리오의 네트워크는 기본적으로 총 5개의 노드로 구성되어있고 6개의 대중교통 노선을 가지고 있는 네트워크로 설정하였다. 출발지의 경우 Node A로 설정하고 도착지의 경우 Node E로 설정하였다. 그리고 환승이 가능한 노드를 Node B, Node C, Node

D로 설정하였고, 이때 노선의 다양성을 표현하기 위하여 노선별로 운행간격과 운행횟수, 차량 및 노선용량을 상이하게 설정하였다.

노선1의 경우 순환노선의 개념으로 모든 지역을 운행하며 운행거리가 긴 노선으로 설정하였고, 노선2, 3, 4의 경우 운행지역이 짧은 지선노선으로 설정하였으며, 노선5의 경우 중간선노선으로 운행거리와 운행지역이 간선과 지선의 중간정도 형태인 노선으로 설정하였고, 노선6의 경우 최종목적지와 연계된 지역만을 운행하는 마을버스와 같은 지선노선으로 설정하였다.

시나리오 1의 경우는 교통시설 운영 및 신설의 적정성 검토와 관련하여 예제를 설정하였다. 대중교통의 경우 정해진 노선을 정해진 계획에 의해 운영되므로, 대중교통 인프라는 수요의 증가에 대비하여 대중교통 시설물을 신설하거나 운영계획 및 노선을 변경해야 한다. 따라서 대중교통 시설물의 신설에 앞서 현재 운영 중인

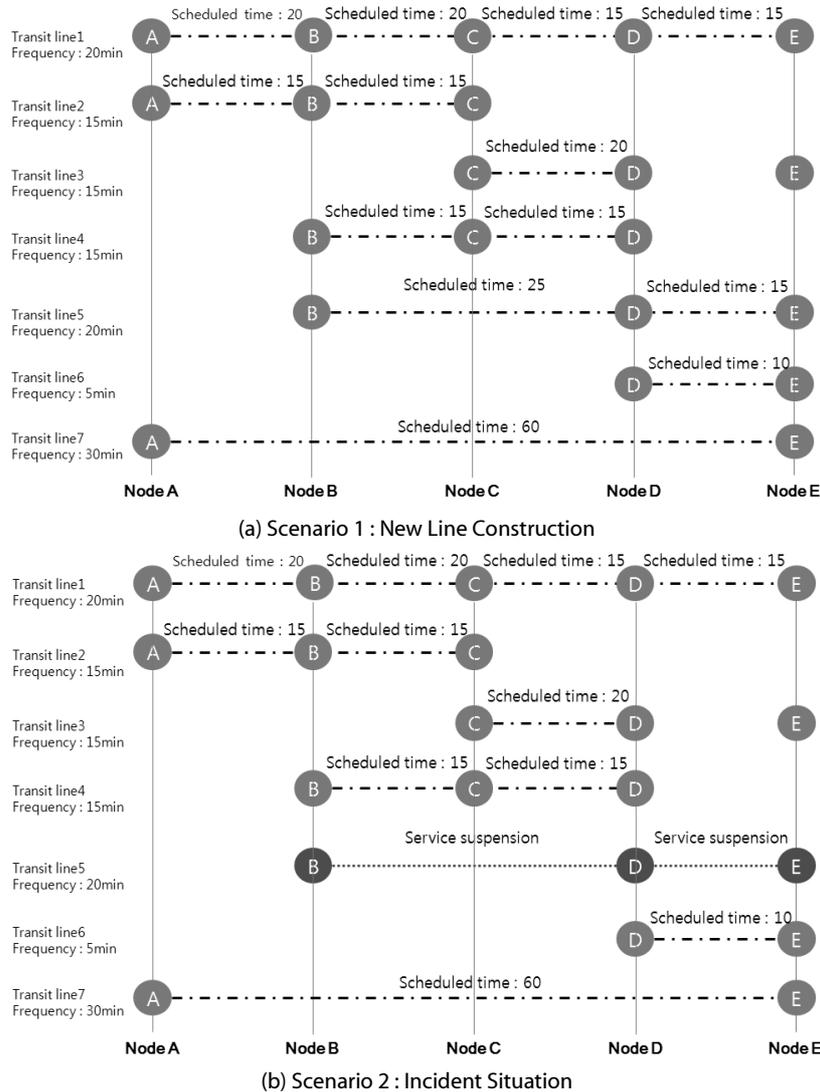


Fig. 2. Network Attributes by Scenario

Table 2. Network Attributes by Scenario

Network Attributes		Route1	Route2	Route3	Route4	Route5	Route6	Route7
Scenario 1	Allocation interval(min.)	20	15	15	15	20	5	30
	Hourly frequency	12	12	10	20	10	5	30
	Capacity (person/hour)	120	150	150	150	180	50	200
Scenario 2	Allocation interval(min.)	20	15	15	15	Service suspension	5	30
	Hourly frequency	12	12	10	20	Service suspension	5	30
	Capacity (person/hour)	120	150	150	150	Service suspension	50	200

대중교통 시설물의 최적화된 운영방안이 필요하다. 특히 노선6의 경우 연계버스의 개념으로 노선용량이 작아 배차간격을 조절한다 하더라도 공급량보다 수요가 많을 가능성이 높다. 그렇기 때문에 출발지인 NodeA에서 도착지 NodeE까지의 직결노선을 신규로 공급하는 경우를 시나리오 1로 설정하였다. 이는 수도권지역에서 서울지역으로 직결노선으로 운행되는 M버스 운행과 같은 시나리오를 염두에 둔 것이다.

시나리오 2의 경우는 돌발상황 발생 시에 대중교통 이용자들이 겪는 문제와 관련하여 통행자들의 행태를 파악하기 위한 시나리오를 설정하였다. 대중교통의 경우 급작스러운 사고 등에 의해 일정기간 운행을 재개할 수 없는 경우가 종종 존재한다. 이러한 경우 대중교통 이용자들에게 미리 경로전환에 대한 정보를 제공하여 돌발상황을 대피할 수 있도록 해야 하지만 현재의 모형으로는 표현하기 어려운 측면이 존재한다. 본 논문에서는 이러한 경우의 대중교통 경로 및 노선전환 행태가 어떻게 모형에서 반영되는지 알아보기 위하여 시나리오 2에서 노선 7이 새롭게 건설된 상태에서 노선5가 돌발상황(사고 및 운행중단)으로 인하여 운행하지 않을 경우를 적용예제2로 설정하였다.

각 시나리오별 적용대상 네트워크 및 네트워크 속성은 다음과 같다.

4.2 시나리오 분석결과

4.2.1 시나리오 분석결과

시나리오 1의 경우 기존의 분석방법론에 의한 용량부족 현상에 의하여 출발지부터 도착지까지 신규노선을 도입하였을 때의 효과를 분석하기 위해 기존모형을 이용하여 분석을 수행하였다.

최적전략모형의 경우 신규 직결노선의 도입에 따라 새로운 최적 전략을 수립하고 그에 따라 수요가 배정되는 결과를 보이고 있다. 그러나 새로운 신규노선의 경우 출발지와 도착지를 연결하는 통행 시간이 빠른 노선이지만 상대적으로 운행간격이 타 노선에 비해 길기 때문에 직결노선에 수요가 크지 않게 배정됨을 알 수 있다.

또한 신규 직결노선인 노선 7을 새롭게 건설하였지만 여전히

노선 6의 경우 용량 이상의 수요가 배정되고 있음을 알 수 있다. 이는 최적전략모형의 경우, 노선의 용량과 상관없이 통행량이 배정된다는 것을 의미하며, 용량부족으로 인한 신규노선의 정확한 수요 예측을 수행할 수 없다는 것을 의미한다.

특히 신규노선의 경우 용량에 대한 여유가 존재함에도 불구하고 노선6의 용량이 초과되었다는 것은 노선용량에 상관없이 통행배정됨으로써 현실을 묘사하지 못하는 것으로 나타나 신규노선 발굴사업(특히 배차간격이 큰 직결노선 혹은 장거리노선) 대중교통 수요가 현실과 왜곡되어 나타나 신규 대중교통 인프라 사업의 효과를 제대로 판단 할 수 없는 가능성을 보여주는 한 예라고 하겠다.

이러한 방법으로 신규노선의 수요를 추정할 경우 여전히 노선6의 용량 이상의 수요가 배정됨으로써 무분별한 대중교통 노선의 투자가 필요하다는 잘못된 판단을 할 우려가 있다.

용량제약모형은 앞선 모형들과 달리 노선6에서의 수요는 용량 이상 배정되지 않는 것으로 분석되었다. 그러나 신규노선의 도입과는 무관하게 노선6의 용량 초과부분의 수요는 노드 D에서 노선1과 노선5로만 전환되는 것으로 나타났다. 이는 용량 이상의 수요가 배정되는 것은 방지하였지만 용량 이상의 수요가 새로운 신규노선으로 전환되는 것이 아니라 동일한 단계에서의 타 노선으로만 배정되는 것으로 노선7의 도입으로 인한 노선6의 개선효과가 나타나지 않는다는 것을 의미한다. 이러한 단점으로 인하여 신규노선의 효과를 정확히 측정할 수 없다고 판단된다.

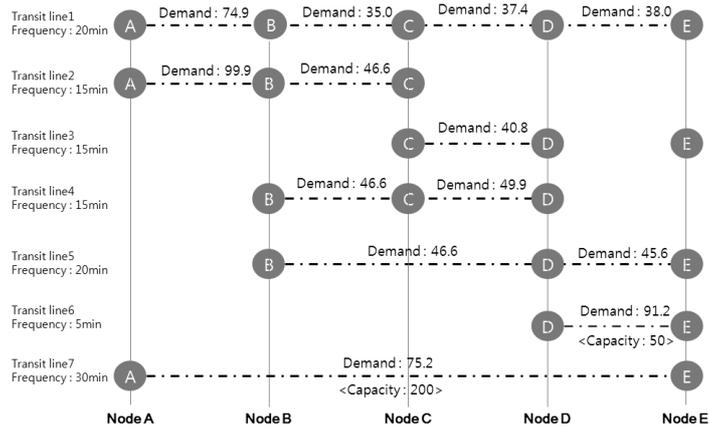
본 논문의 모형은 용량제약모형과 마찬가지로 노선6에서 용량 초과하지 않는 것으로 분석되었다. 또한 신규노선인 노선7의 수요가 기존 연구들에 비하여 월등히 많이 배정된 것을 알 수 있다.

이는 기존의 연구들과는 다르게 수요증가에 따라 운행회수가 변화하는 것을 모형화하였기 때문에 노드D에서 노선 6의 용량 이상의 수요가 배정되면서 용량초과수요가 신규노선으로 전환되었다는 것을 의미한다.

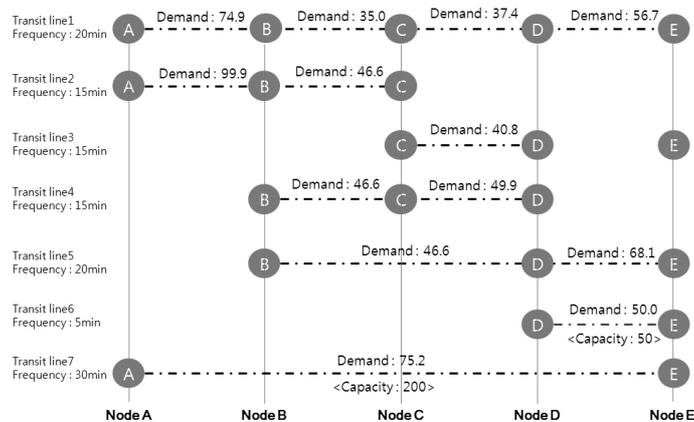
용량초과수요가 출발지에서부터 미리 노선을 바꾸어 통행배정되기 때문에 수요 증가에 따른 정류장에서의 혼잡함과 차량내부의

혼잡함을 고려한 실질운행횟수와 대기시간 증가가 모형화되어 신규 직결노선인 노선7로 수요 전환이 가장 많은 것으로 판단된다. 이는 승객입장에서 용량초과의 경우 상대적으로 시간적인 이득과 환승이 발생하지 않는 노선7을 이용하는 것이 당연하기에 합리적인 모형 추정결과라 판단된다.

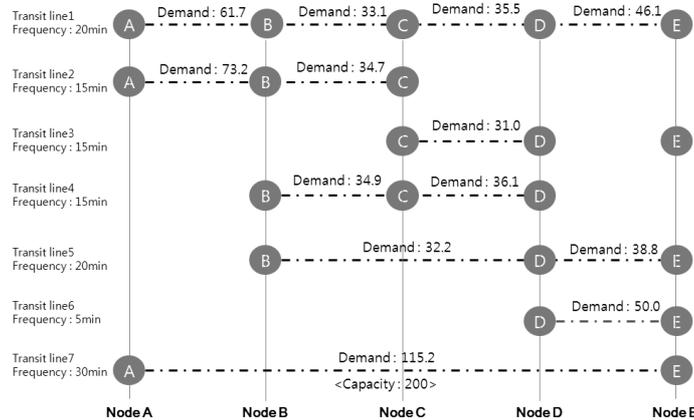
즉 본 논문에서 구축한 실용운행회수가 단순화된 이원화변수가 아니라 수요증가에 따른 지체증가를 모형화하면서 신규노선의 건설로 인하여 용량초과수요의 노선 전환여부에 대한 설명력이 타 모형에 비해 높다는 것으로 판단할 수 있다.



(a) Optimal Strategy Model



(b) Capacity Constrained Model



(c) Waiting Time-Capacity Constrained Model

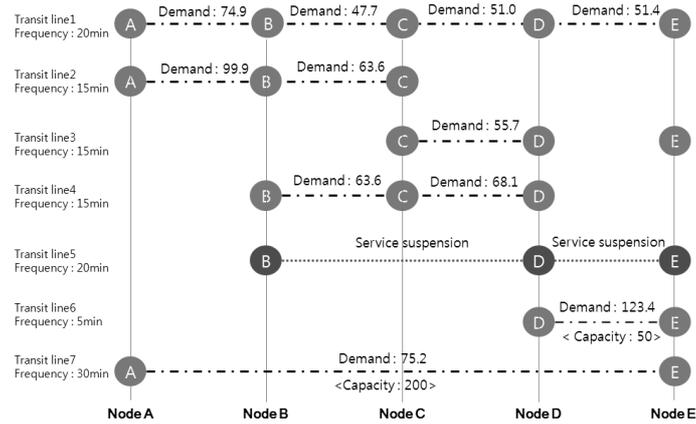
Fig. 3. Comparison of Simulation Result (Scenario1)

4.2.2 시나리오 분석결과

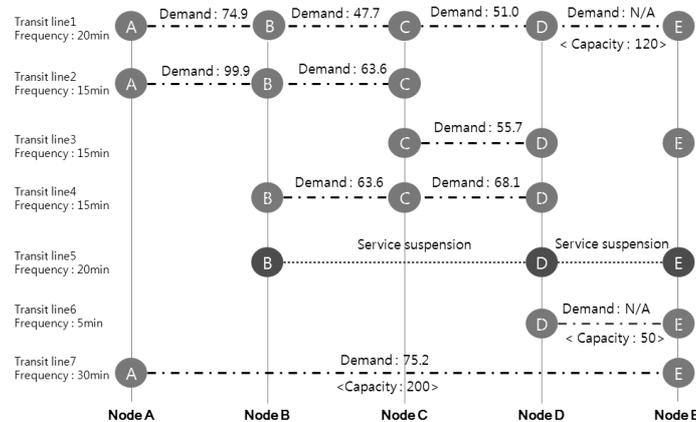
시나리오 2의 경우 급작스러운 사고 등 돌발상황의 발생 시 대중교통 이용자들에게 경로전환에 대한 정보를 제공하여 사전에 돌발상황을 대비할 수 있는가에 대한 가능성을 판단하기 위한 예제로써 용량제약에 의해 통행배정이 수행되면서 통행자들이 돌

발상황을 피해 통행배정 될 수 있는지 여부를 모형에 적용시켜 보았다.

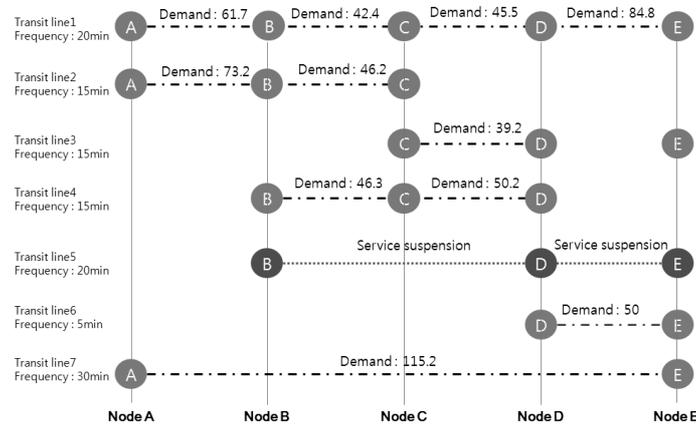
최적전략모형의 경우 최적전략에 따라 노선이 배정되는 결과를 보이고 있다. 그러나 노선 5가 돌발상황 발생으로 이용할 수 없게 되자 노선 6으로의 수요 집중현상이 더욱 심화되는 것으로 나타났



(a) Optimal Strategy Model



(b) Capacity Constrained Model



(c) Waiting Time-Capacity Constrained Model

Fig. 4. Comparison of Simulation Result (Scenario2)

Table 3. Simulation Results by Scenario

Category	Scenario 1			Scenario 2		
	Existing model		Waiting time-capacity constrained model	Existing model		Waiting time-capacity constrained model
	Optimal Strategy Model	Capacity constrained model		Optimal Strategy Model	Capacity constrained model	
Total trip (person/hour)	250.00					
Transfer trip (person/hour)	408.4	449.6	408.4	365.8	-	406.7
Total passenger	953.4	1099.7	1,161.4	994.6	-	1,200.7
Average used line (line/person)	3.8	4.3	4.7	4.0	-	4.8
Total passenger time (person-min)	15,441.6	16,504.7	16,407.1	15,786.6	-	16,923.5
Average travel time (min/person)	61.8	66.1	65.6	63.1	-	67.6
Average V/C	0.45	0.42	0.38	0.51	-	0.43
Maximum V/C	1.82	1.00	1.00	2.47	-	1.00

며 V/C가 2.0이상의 용량이상의 수요가 배정되는 것으로 나타났다. 이는 돌발상황 등의 발생 시에 최적전략모형의 적용으로는 합리적인 경로선택 정보를 제공하거나 분석을 수행할 수 없다는 측면을 보여주는 것으로 판단할 수 있다.

용량제약모형은 돌발상황 발생 시 모형의 해가 구해지지 않는 결과를 보였다. 이는 시나리오2의 특수한 상황에 의한 결과이다. 용량제약모형은 용량 도달 시에 실용운행횟수를 0으로 변환하는 이원변수를 사용하기 때문에 개별노선이 용량에 도달하였을 때 동일단계에서 타 노선으로 수요가 전량 전환되어 버린다.

그렇기 때문에 노드 B에서는 수요가 노선 1, 노선 2, 노선 4로 분산되었지만, 노드 D에서는 노선 1로만 수요가 전환되며 노선1에서도 용량제약으로 인하여 수요가 전환되지 못하면서 전체적인 해를 구하지 못하는 것으로 나타났다.

이는 운행횟수의 변수를 이원화하는 과정에서 상수항에 대한 의존성이 크기 때문에 실제적인 대중교통 통행자의 행태를 반영하지 못하기 때문에 나타나는 결과로 노선 7에서의 여유용량이 존재하지만 모형상의 한계로 인하여 해를 구하지 못하는 것으로 분석되었다.

본 논문의 모형은 타 모형과 다르게 돌발상황 발생시 용량초과 노선이 존재하지 않으며 통행배정이 수행되는 것으로 분석되었다.

용량제약모형의 경우 돌발상황 발생에 따라 모형이 와해되는 결과를 보였지만, 본 분석에서는 돌발상황에 따라 출발지부터 노선 및 경로전환이 수행되면서 용량제약을 만족시키면서 통행배정이 되는 것으로 판단할 수 있다.

특히 노선5의 운행중단과 노선6에서의 용량초과수요가 출발지인 노드 A에서부터 경로를 재선택하여 통행배정되기 때문에 노선5와 중복되는 노선1과 노선7등의 수요가 증가하였으며, 노선1의 경우도 용량이하의 수요가 배정되면서 모형의 해를 구할 수 있었다.

돌발상황에 따라 노선 5가 운행이 중단되더라도 승객의 입장에서는 미리 노선1과 노선7로의 노선선택이 변경된다면 출발지에서 목적지까지 승객의 경로는 합리적으로 설정될 수 있음을 의미하는

것이다.

이는 돌발상황 발생시에 본 연구의 사용을 통해 대중교통 이용자들에게 미리 경로전환에 대한 정보를 제공하여 돌발상황을 대피할 수 있는 모형으로써 의미가 있다는 것과 이러한 돌발상황에 대비한 분석을 본 모형을 통해 수행할 수 있다는 것을 의미한다.

4.3 모형적용결과 종합분석

신규직결노선 도입에 따라 용량제약을 만족하며 효과를 분석하기 위한 시나리오 1과 급작스러운 돌발상황에 대비해 분석을 수행한 시나리오 2의 경우를 분석한 결과 모든 시나리오에서 본 논문에서 적용한 모형이 환승과 노선이용총량 및 평균이용노선수가 가장 많은 것으로 나타났다. 이는 노선 용량제약을 통해 용량제약모형과 같이 환승수요가 많아지기 때문인 것으로 판단된다.

5. 결론

본 논문에서는 기존의 연구와는 달리 대중교통 차량내부 혼잡함과 정류장에서 승객증가에 따라 대기시간이 변화하는 것을 모형화하고 이용자의 경로선택 행태를 현실적으로 묘사할 수 있는 대중교통 용량제약을 위한 통행배정 모형을 개발하였다. 즉 차량내부 혼잡함과 정류장에서의 통행량에 따라 대기시간이 증가하는 모형을 구축하였으며, 이를 시나리오별 예제 네트워크를 적용하여 그에 대한 유의성을 검증하였다. 그 결과 용량초과에 대한 통행량은 배정되지 않았으며, 대중교통시스템 전체 용량이 초과할 경우에도 초과된 수요의 경로전환으로 통행량이 안정적으로 배정되는 결과가 나타났다.

특히 기존 대중교통 시스템에서 묘사에 한계가 있는 광역직결노선의 경우, 본 모형을 적용할 시 대중교통 전체의 V/C가 감소하고 환승통행이 감소하여 불필요한 통행이 발생하지 않는 것으로 나타났다. 이는 수도권지역과 서울지역간의 M버스 등 광역직결노선의

필요성을 간접적으로 보여주는 결과이며 광역직결노선버스 도입으로 인하여 사회전체적인 통행비용을 감소시킬 수 있다는 결과를 보여준다. 광역직결노선의 용량을 확충할 경우 불필요한 환승의 제거 및 대중교통 V/C를 더욱 낮출 수 있는 것으로 분석되었다.

또한, 버스파업 및 교통사고 등의 돌발상황에 대비하여 시나리오를 분석함으로써 이용자에게 미리 경로전환에 대한 정보를 제공하는 방법에 대한 분석방안도 예측되었다.

논문 결과를 통해 기존 교통수요 예측 프로그램의 경우 용량을 제약할 수 있는 알고리즘이 탑재되지 않거나 사용하기에 난해한 면이 있는 상황에서 본 모형을 적용하고, 신규노선 등의 대중교통 인프라 사업 효과 및 돌발상황에 대한 정보 등을 분석함으로써 보다 합리적인 대중교통 정책결정에 도움이 될 수 있을 것으로 기대한다.

향후 과제로서 본 모형이 실제 상황을 정확히 묘사할 수 있는지에 대해 실제 대규모 네트워크 적용이 필요하며, 이를 통해 기존 알고리즘에서 얼마나 개선되었는지 모형의 전이성이 있는지를 분석해야 할 것이다. 또한 버스, 지하철(철도) 등의 용량을 어떻게 산정할 것인지에 대한 대중교통 용량산정의 명확한 정립이 이루어져야 할 것이다.

References

- Cepeda, M., Cominetti, R. and Florian, M. (2006). "A frequency based assignment model for congested transit networks with strict capacity constraints : Characterization and Computation of Equilibria." *Trans. Res.*, Vol. 40B, pp. 437-459.
- De Cea, J. and Fernandez, J. E. (1993). "Transit assignment for congested public transport system : An Equilibrium Model." *Trans. Science*, No. 2, pp. 133-147.
- De Cea, J. and Fernandez, J. E. (1996). "An empirical comparison of equilibrium and non-equilibrium transit assignment model." *Traffic Engineering and Control*, Vol. 37, No. 7.
- Kim, M. W. (2010). *A stochastic transit assignment model based on optimal strategy*, Master's Thesis, Hanyang University (in Korea).
- Lam, W. H. K., Gao, Z. Y., Chan, K. S. and Yang, H. (1999). "A stochastic user equilibrium assignment model for congested transit networks." *Trans. Res.*, Vol. 33B, pp. 351-368.
- Lee, S. H., Choi, I. J., Lee, S. J. and Lim, K. W. (2003). "A transit assignment model using genetic algorithm." *Journal of Korean Society of Transportation*, Korean Society of Transportation, Vol. 21, No. 1, pp. 65-75 (in Korean).
- McFadden, D. (1976). "The theory and practice of disaggregate demand forecasting for various modes of urban transportation." *UC Berkeley*, p. 7623.
- McFadden, D. (1974). "Conditional logit analysis of qualitative choice behavior. In frontiers in econometrics." *P.Zarembka.ed.Academic Press*, New York, pp. 105-142.
- Mun, J. J. (2007). *A stochastic transit assignment model based on mixed transit modes*, Master's Thesis, Seoul National University (in Korean).
- Norojono, O. and Young, W. (2003). "A stated preference freight mode choice model." *Transportation Planning and Technology*, Vol. 26, No. 2, pp. 195-212.
- Park, J. H., Sin, S. I., Lim, Y. T. and Lim, K. W. (2007). "Development of transit assignment model considering an integrated distance-based fare system and in-vehicle congestion." *Journal of Korean Society of Transportation*, Korean Society of Transportation, Vol. 25, No. 2, pp. 133-143 (in Korean).
- Park, J. C., Mun, J. J., Lee, S. M. and Park, C. H. (2007). "A stochastic transit assignment model based on mixed transit modes." *Journal of Korean Society of Transportation*, Korean Society of Transportation, Vol. 25, No. 3, pp. 111-121 (in Korean).
- Spiess, H. (1993). "Transit equilibrium assignment based on optimal strategies : An Implementation in EMME2." EMME/2 Support Center.
- Spiess, H. and Florian, M. (1989). "Optimal strategies : A New Assignment Model for Transit Networks." *Trans. Res.*, Vol. 23B, No. 2, pp. 83-102.
- Younes Hamdouch, Patrice Marcotte, Sang, N. Y. (2004). "Capacitated transit assignment with loading priorities." *Math. Program*, Vol. 101, No. 1, pp. 205-230.
- Yun, H. R. (2000). "A transit trip assignment model under capacity restraint." *Proceedings of the Korean Society of Transportation Conference*, Korean Society of Transportation, 39th, pp. 3-29 (in Korea).