

지역간 철도의 결정적 통행배정모형 구축 연구

A Deterministic Transit Assignment Model for Intercity Rail Network

김경태* · 이성모** · 권용석†

Kyoung-Tae Kim · Sung-Mo Rhee · Yong-Seok Kwon

Abstract The purpose of this paper is to propose a new transit assignment model for intercity rail networks. The characteristics of intercity rail are different from that of public transit in urban area. Line selection probability on route section is introduced to include the characteristics of intercity rail into transit assignment model. Network expansion is more simplified by a assumption line selection probability is externally given. The generalized cost is used to decide the volume of each transit line in most of existing transit assignment models. But, many variables have influence on the volume of each line such as time schedule of transit lines, inter-station distance, passengers' income, seasonal variation of demand and regional characteristics. The influence of these variables can be considered to decide the volume of each line by introducing line selection probability on route section. The tests on a small scale network show that the model proposed in this paper is superior to existing models for predicting intercity rail demand. Proposed model is suitable to consider the complicated fare structure of intercity rail and to draw inter-station demand directly as a result of assignment procedure.

Keywords : Intercity Rail, Assignment Model, Route Section, Line Selection Probability

요 지 본 연구에서는 도시권역의 대중교통수단과는 여러 가지 측면에서 차별화되는 지역간 철도의 특징을 반영한 대중교통 통행배정모형을 제시하였다. 경로구간 기반으로 대중교통 네트워크를 확장하고, 경로구간을 운행하는 노선의 선택확률을 통행배정모형 내에서 결정하는 것이 아닌 외부적으로 결정하는 방식을 적용하여, 직접 네트워크를 확장하는 방법보다 네트워크 확장 규모를 줄일 수 있었다. 지역간 철도의 특징을 반영할 수 있도록 적절한 가정을 통해서 경로구간 기반의 결정적 대중교통 통행배정모형과 해법을 제시하였다. 현실을 최대한 반영한 소규모 네트워크에서 기존의 대표적인 대중교통 통행배정모형과 비교한 결과 본 연구에서 제시한 모형의 예측력이 우수한 것으로 분석되었다.

주요어 : 지역간 철도, 통행배정모형, 경로구간, 노선선택확률

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

개인교통은 네트워크의 양적인 측면이나 선택할 수 있는 경로가 복잡한 형태를 취하고 있지만, 대중교통은 사전에 정해진 경로를 운행한다는 특징 때문에 네트워크의 구성이나 기종점 간에 선택할 수 있는 물리적인 경로가 매우 단

순하다. 그러나 개인교통이 도로를 이용하는 승용차라는 단순한 차종으로만 대별되는데 비해서 대중교통은 혼잡이 발생하는 도로를 이용하는 노선버스, 혼잡으로부터 비교적 자유로운 궤도 교통수단인 지하철 등의 복잡하고 다양한 교통수단이 존재한다. 통행배정모형의 구축 측면에서 대중교통은 다양한 수단이 존재하고 각각의 수단이 고유한 특징을 가지고 있기 때문에 이들의 특징을 통합하여 모형을 구축하는 것이 매우 어렵고 훨씬 더 복잡한 양상을 띠고 있다.

기존의 대중교통 통행배정모형은 주로 도시권역의 교통수단인 노선버스나 지하철 등의 특징을 반영할 수 있는 모형을 구축하려는 연구가 주류를 이루었다. 장거리 통행이 주를 이루는 지역간 철도에도 이러한 모형을 적용함으로써 도

* 책임저자 · 교신저자 : 정희원, 전주대학교, 토목환경공학과, 교수
E-mail : jjsankys@jj.ac.kr

TEL : (063)220-2292 FAX : (063)220-2056

* 정희원, 한국철도기술연구원, 물류표준화연구단, 선임연구원

** 서울대학교, 지구환경시스템공학부, BK교수

시권역의 대중교통수단과는 여러 가지 측면에서 다른 특징을 보이고 있는 지역간 철도를 이용하는 통행을 예측하는데에 한계점으로 작용하고 있다. 따라서 지역간 철도의 통행 특징을 정확하게 규명할 수 있는 모형의 구축이 필요하며, 각종 철도투자에 따른 영향을 분석하는 데에 있어 가장 핵심이 되는 것이 통행배정모형이기 때문에 지역간 철도의 특징을 효율적으로 반영할 수 있도록 새로운 통행배정모형을 개발하는 것은 의미있는 연구로 판단된다.

본 연구의 목적은 도시권역의 대중교통수단과는 여러 측면에서 다른 지역간 철도의 특징을 기존 모형에서 합리적으로 반영할 수 없는 부분을 개선하여 지역간 철도에 맞는 대중교통 통행배정모형을 개발하는 것이다. 지역간 철도에 적합한 대중교통 통행배정모형을 적용함으로써 모형의 예측 결과를 개선할 수 있고, 결과물로서 링크 통행량뿐만 아니라 지역간 철도에서 중요하게 인식되는 역간수요 등 다양한 분석결과를 도출할 수 있다.

1.2 기존연구 고찰

대중교통에서는 도로에서 이미 개발된 통행배정모형을 대중교통에 적용하기 위하여 확장해야 하는 네트워크의 규모가 매우 크기 때문에 기중점 쌍을 연결하는 경로가 무수히 많아진다. 초기의 연구들은 단위노선구간(line segment) 기반으로 네트워크를 확장하고, 주로 최단경로에 통행량을 배정하거나 경로 나열을 통해 통행배정 대상경로를 결정하는 방식이다(Dial[1], Rapp et al.[2], Andreasson[3] 등). 합리적 경로의 개념을 도입하는 연구는 이러한 제약조건을 일부 완화시킬 수는 있지만, 여전히 기중점 쌍을 연결하는 합리적인 경로의 수는 통제할 수 없는 수준으로 커지게 된다. 대안으로서 K-최단경로 알고리즘과 같은 다중경로 탐색 알고리즘이 개발되었지만, 대중교통 네트워크를 노선 정보에 따라 노드와 링크로 직접 확장하는 대규모의 네트워크에서는 효과적으로 유효한 경로를 탐색하는 방법이 개발되어 있지 않으며, 모든 경로를 일일이 나열하는 것은 모형의 계산시간이 지나치게 커지는 단점이 발생한다.

현재까지 개발된 대중교통 통행배정모형의 기본이 되는 연구는 노선구간(line section) 개념을 도입한 Le Clercq[4], “통행자는 동일한 노드 사이를 운행하는 다양한 노선에 대해서 평균통행시간을 최소화시키는 노선에 속한 차량 중 가장 먼저 도착한 차량에 승차한다”는 제한적 최적전략의 개념을 도입한 Chriqui-Robillard[5]의 연구가 있다. 노선구간과 제한적 최적전략 개념이 도입되면서 공통노선(common line)의 개념이 도입되었는데, 공통노선이란 동일한 물리적 링크를 공통으로 이용하는 노선으로서 링크의 평균통행시간을 최소화시키는 노선의 집합을 뜻한다.

노선을 반영한 네트워크의 확장에 의해서 대중교통 네트워크가 도로 네트워크에 비해서 매우 복잡한 형태를 취하기 때문에 발생하는 경로탐색의 문제를 해결하기 위한 연구는 크게 2방향으로 전개되었다. 먼저, Chriqui-Robillard[5]의 연구에 근거해 최적전략 개념을 확립한 Spiess-Florian[6]의 연구와 Le Clercq[4], Chriqui-Robillard[5]의 연구에서 노선구간과 제한적 최적전략의 개념을 활용하여, 경로구간과 경로구간의 제한적 최적전략 개념을 확립한 De Cea-Fernández[7]의 연구가 있다. 이들 모형은 용량을 고려하지 않는 모형으로서 결정적인 통행배정모형이며, 각 모형을 구축하기 위한 접근방법은 다르지만 모형의 형태는 동일하게 나타난다.

Spiess-Florian[6] 모형은 단위노선구간으로 직접 대중교통 네트워크를 확장하였으며, 네트워크 규모가 커짐에 따라 발생하는 경로탐색 문제를 해결하기 위해서 최적전략의 개념을 확립하였고, 모형의 계산시간을 합리적인 수준으로 개선시켰다. 최적전략 통행배정모형은 Jayakrishnan et al.[8]에 의해 통행량을 배정하는 방법을 개선하는 연구, Spiess[9], Wu et al.[10]에 의해 혼잡을 반영한 연구로 발전하였다.

De Cea-Fernández[7]의 모형은 경로구간의 개념을 도입함으로써 노선구간으로 대중교통 네트워크를 확장하는 것에 비해서 네트워크 규모를 크게 줄일 수 있었다. 이 모형은 De Cea-Fernández[11]에 의해서 혼잡의 개념이 도입되었고, 이 모형에서 사용한 경로구간의 제한적 최적전략의 개념은 다양한 방법으로 혼잡을 고려하는 연구들(Lam et al.[12], Cepeda et al.[13] 등)로 발전하였는데, 주로 혼잡을 고려하는 방법에 대한 연구에서 진전이 있었을 뿐 제한적 최적전략의 개념을 활용하는 기본적인 개념은 변하지 않았다.

1.3 연구의 범위

본 연구의 범위는 기존 대중교통 통행배정모형을 지역간 철도에 적용할 경우의 한계를 파악하여 지역간 철도의 특징을 합리적으로 반영할 수 있는 대중교통 통행배정모형을 개발하는 것이다. 지역간 철도 네트워크의 확장은 직접 확장하는 것보다 경로구간 기반으로 확장하는 것이 보다 유리한 것으로 판단하였다. 경로구간으로 확장된 지역간 철도 네트워크에서 경로구간을 운행하는 다양한 노선에 대해서 노선선택확률의 개념을 도입하여 혼잡을 반영하지 않는 경우의 대중교통 통행배정모형을 제시하였고, 지역간 철도의 실질적인 소규모 네트워크에 적용하여 기존의 대표적인 대중교통 통행배정모형과 비교하였다.

2. 대중교통 네트워크 확장과 경로구간

2.1 대중교통 네트워크의 확장

일반적으로 대중교통은 개인교통과는 달리 동일한 경로를 운행하는 서로 다른 노선들이 존재하게 된다. 따라서 도로 네트워크에서 개발된 경로탐색 알고리즘을 직접 적용할 수는 없으며, 네트워크를 확장하는 것이 필요하다. 따라서 네트워크를 어떤 방식으로 확장할 것인가와 확장된 네트워크에서의 경로를 어떤 방식으로 탐색할 것인가가 대중교통 통행배정모형의 주요 연구 분야가 된다.

Fig. 1과 같이 기중점을 제외하고 모두 N 개의 노드로 구성되는 1방향 네트워크가 있을 때, 모든 역에 정착하는 L 개의 노선이 운행할 때의 네트워크 확장에 필요한 노드수는 $L \cdot (N-2)$, 링크수는 $L \cdot (N-1) + (N-2) \cdot L(L-1)$ 가 된다.

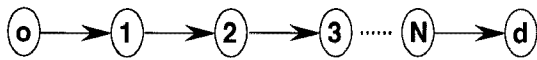


Fig. 1. Network example 1 (NE1)

노선의 수가 많지 않으면 네트워크 확장을 위해서 생성해야 할 가상의 노드수와 링크수는 별 문제가 되지 않을 수 있지만, 운행하는 노선수가 많아지면 기하급수적으로 증가하게 된다. 일반적으로 정착역수(M)가 노선수(L)보다 크기 때문에 대중교통의 노선수에 따라 네트워크 확장을 위해서 생성해야 할 링크의 수는 L^3 에 비례하기 때문이다. 각각의 기중점 쌍에 대해서 최단경로에만 통행량을 배정하는 경우에는 경로탐색 과정에서 별다른 문제점을 발생하지 않지만, 기중점 쌍을 연결하는 경로가 무수히 많은 네트워크에서 최단경로에만 통행량을 배정하는 것은 통행량이 배정되지 않는 경로가 많아져서 효율적이지 못하다.

특히, 최근에는 Dijkstra[14] 알고리즘과 같은 효율적인 최단경로를 찾는 알고리즘 이외에 K 개의 최단경로를 찾는 문제의 경우에는 계산시간이 상당히 많이 소요되는 단점이 있기 때문에 네트워크의 크기를 크게 증가시키는 것은 모형의 계산시간에 문제가 발생할 수 있다. 따라서 여정 단위로 네트워크를 직접 확장하는 것은 효율적이지 못하다.

이러한 문제점을 해결하기 위한 방법은 2가지 측면에서 접근이 가능하다. 우선 다중경로를 탐색하는 방법이 있다. 그러나 합리적 경로나 K -최단경로 알고리즘을 적용하는 것은 통행배정 대상경로가 매우 많아지거나 계산시간이 효율적이지 못하기 때문에 Spiess-Florian[6] 모형과 같이 최적 전략을 도입하는 방법이 제시되었다. 다른 방법은 네트워크를 보다 단순화시키는 방법으로서 이로부터 경로구간이라는 개념이 도입되었다.

2.2 경로구간 개념의 도입

대중교통노선을 이용하여 네트워크를 확장하는 링크 기반의 초기 연구는 Le Clercq[4]에 의한 연구로서, 개별 노선의 모든 정류장 쌍을 링크로 확장하는 모형을 제안하였다. 모형에서는 물리적인 링크와 노선이 배제되고 개별 노선을 구성하는 정류장과 정류장의 모든 쌍들이 링크(노선구간)가 된다. Fig. 2는 1개 노선에 대해서 Fig. 1의 네트워크를 노선구간으로 확장한 개념을 나타낸 것으로, 생성하는 링크의 수는 $0.5 \cdot L \cdot N \cdot (N-1)$ 이 된다.

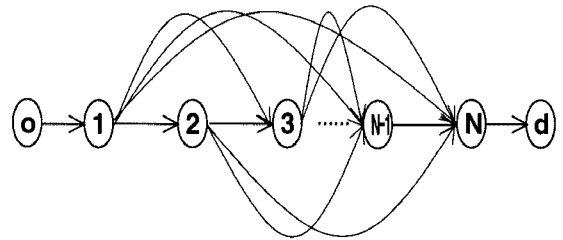


Fig. 2. Network expansion of NE1 based on Line Section

Nielson[15]은 모든 정착역을 고려하여 노선별로 Le Clercq[4]의 방법에 의해서 링크를 생성하였다. Nielson[15]은 코펜하겐의 대중교통 네트워크를 297개 존 체계와 2,200개 노드, 3,497개 링크로 구성하였다. 이 중에서 버스는 1,736개의 링크를 사용하고 철도 네트워크는 320개의 링크로 구성되고 가상의 링크는 864개, 도보에 의한 268개의 환승지점이 있다. 대중교통 노선은 435개이며 정착역간에 노선을 연결하였을 때 191,631개의 링크가 새로 생성되었고, 이를 통합할 경우 168,529개의 링크로 줄어드는 것으로 분석(속성이 같은 링크는 빈도를 합산하는 방식으로 통합하였지만, 링크의 수는 12% 정도만 줄일 수 있어 실효성은 떨어짐)되었는데, 모형이 100번의 반복수행을 할 경우 실행시간은 3시간 이내로 제시하였다. Nielson[15]의 방법은 계산시간 측면에서 현실에 적용하기에는 한계가 있으며 네트워크를 보다 단순화하는 방안이 필요하다.

De Cea-Fernández[7]는 Chriqui-Robillard[5]의 제한적 최적전략 개념을 활용하여 환승노드만을 연결하는 경로구간이라는 개념을 도입함으로써 Le Clercq[4]가 생성하는 링크의 수를 줄일 수 있었으며, 동일한 경로구간을 운행하는 노선들도 제한적 최적전략 개념을 이용하여 통합할 수 있었다. 따라서 하나의 경로구간을 운행하는 노선들에 의해서 경로구간은 빈도와 통행시간의 속성으로 나타낼 수 있으며, 모형이 생성하는 링크는 모든 역이 환승노드일 경우 $N \cdot (N-1)$ 이 된다. 경로의 탐색은 도로 통행배정에 사용되는 알고리즘을 사용하여 최단경로를 구할 수 있다. 네트워크를 직접 확장하는 것은 노선의 수에 더 민감하게 반응하

고 경로구간 단위로 네트워크를 확장하는 것은 각 노선이 운행하는 노드(정차역)수에 민감하게 반응한다. 따라서 지역간 철도의 경우는 노선의 수가 크게 증가하는 경향이 있으므로 경로구간으로 네트워크를 확장하는 것이 보다 합리적이다.

대중교통 네트워크에서 모든 노드 사이에 노선이 서비스 되고 승하차가 가능하다면 N 개의 노드로 구성되는 실제 네트워크에서는 $2N$ 개에 근접하는 링크만을 필요로 하지만, 본 연구에서와 같이 경로구간으로 네트워크를 확장하게 되면 최대 $N(N-1)$ 개의 링크를 생성해야 한다(새로 확장되는 노드간을 연결하는 링크의 수는 제외하고 계산할 경우이며, 새로이 확장되는 노드의 수 및 확장된 노드를 연결하는 링크는 경로구간에 비해서 매우 적기 때문에 고려하지 않음). 대중교통 노드가 1,000개라면 경로구간은 최대 999,000개 까지 생성될 수도 있지만, 실제로 현실 네트워크에서 생성되는 경로구간은 많지 않은 것으로 분석되었다. 우리나라 지역간 철도 네트워크에서는 2004년 10월 20일을 기준으로 분석해 본 결과 총 22,101개의 경로구간이 생성되었다.

2.3 경로구간의 노선선택확률

Le Clercq[4]와 De Cea-Fernández[7]의 장점만을 이용하여 경로구간 기반으로 링크를 생성하고, De Cea-Fernández[7]가 새로 생성된 경로구간을 운행하는 노선을 최적전략에 의해서 통합하는 것을 개선하는 방안을 본 연구에서 제시하고자 하였다. De Cea-Fernández[7]의 방법처럼 경로구간 단위의 분석은 Spiess-Florian[6]의 방법에 비해서는 대중교통의 운임을 합리적으로 반영할 수 있지만, 대중교통에서 환승통행에 따른 환승할인을 현실적으로 반영할 수 없는 한계는 있으며, 이를 개선하기 위해서는 경로 기반으로 최단 경로를 탐색하는 것이 필요하다.

De Cea-Fernández[7]는 경로구간을 운행하는 노선을 제한적 최적전략을 이용하여 경로구간의 평균통행시간을 최소화하는 노선을 공통노선으로 정의하고, 통행자는 공통노선에 포함된 노선 중에서 가장 먼저 도착하는 차량에 승차한다는 가정하에 공통노선의 빈도를 이용하여 경로구간을 대기시간과 차내시간으로 표현하여 수리모형을 구축하였다.

모형을 단순화하는 측면과 수리모형으로 표현하기 위해서 위와 같은 가정을 한 것은 합리적일 수는 있으나, 동일한 경로구간을 운행하는 노선 중에서 제한적 최적전략에 의해서 공통노선에서 제외된 노선이라고 하더라도 현실에서는 통행이 배정되는 현상이 발생하기 때문에 현실적인 가정이 라고 할 수는 없다. 따라서 보다 일반화된 개념이 필요하며, 본 연구에서는 각 노선의 선택확률을 적용하는 방법을 도입하였다.

De Cea-Fernández[7] 모형이 경로구간에 적용한 제한적 최적전략의 개념을 실제 사례로 확인하면 보다 명확하게 이해할 수 있다. 2004년 12월 20일을 기준으로 할 때 서울-부산 경로구간을 운행하는 노선은 KTX 27회에 평균차내시간 170분, 새마을 9회에 279분, 무궁화 14회에 324분이 되고, 당시 운임은 순서대로 45,000원, 36,800원, 24,800원이었다. 분석시간을 1,140분(19시간), 일반화 비용은 차내시간 단위로 계산하고, 대기시간은 운행간격의 1/2로 설정하고 차내시간과 동일한 가치를 부여한다. 그러면 시간가치를 어떻게 적용하느냐에 따라서 일반화 비용이 가장 작은 노선이 결정될 수 있는데, 참고로 모든 차종에 대해서 시간가치를 6,740원/시간($=0.03934+0.00035020 \times 60$, 수단선택모형에서 철도의 모수를 이용하여 계산한 값[16])으로 설정하면 각각의 일반화 비용은 592, 670, 585분이 된다.

제한적 최적전략을 적용하면 공통노선에는 무궁화와 KTX가 포함되고 새마을은 제외된다. 이럴 경우 KTX와 무궁화의 통행량 분담률은 서울-부산 경로구간의 총 통행량에 대해서 각각 66%, 34%가 되지만 현실의 분담률은 KTX, 새마을, 무궁화가 순서대로 90.6%, 3.9%, 5.5%이다. 일반화 비용을 구성하는 요소들에 대한 계수를 어떻게 조정하더라도 제한적 최적전략에 포함된 노선의 통행량 분담률이 빈도에 의해서 결정되기 때문에 현실적이지 못하고, 공통노선에 포함되지 않을 경우에는 통행량이 전혀 배정되지 않게 된다.

따라서 동일한 경로구간에서 제한적 최적전략의 개념을 도입하여 계산한 경로구간의 일반화 비용은 실질적으로 현실을 반영할 수 없는 왜곡된 값이 된다. 따라서 본 연구에서 제한한 각 노선의 선택확률을 이용하는 것이 보다 현실적이라고 할 수 있다. 경로구간에 노선선택확률을 도입하면 경로구간은 하나의 링크로 표현할 수 있고, 생성해야 할 링크는 De Cea-Fernández[7]의 1/2이 된다. 보다 상세한 내용은 김경태[18]에 제시되어 있다.

3. 모형의 구축

3.1 기호 정리

경로구간의 노선선택확률을 이용한 결정적 통행배정모형의 구축을 위해서 사용한 기호는 다음과 같다.

$G(N, A)$ = 노드집합 N , 링크집합 A 로 구성된 대중교통 네트워크

O = 기점노드의 집합

D = 종점노드의 집합

A_i^* : 노드 i 를 출발하는 링크집합

- A_i^- : 노드 i 로 도착하는 링크집합
- L = 노선집합
- l_{ab}^l = 노선 l 의 노드 ab 간의 여정에 포함된 일련의 노드집합
- J_{ab}^l = 노선 l 의 노드 ab 간의 여정에 포함된 일련의 링크집합
- L_a = 링크(경로구간) $a=(i \rightarrow j)$ 를 운행하는 노선집합
- L_a^m = 링크(경로구간) $a=(i \rightarrow j)$ 를 운행하는 노선 m 에서 통합노선 m 에 포함되는 노선집합
- U_a = 링크(경로구간) $a=(i \rightarrow j)$ 를 운행하는 통합노선의 집합
- A_r = 노선이 운행하는 링크(경로구간)의 집합
- N_s = 노선이 정차하는 노드집합
- c_a^l = 링크 $a=(i \rightarrow j)$ 를 운행하는 노선 l 의 일반화 비용
- f_a^l = 링크(경로구간) $a=(i \rightarrow j)$ 를 운행하는 노선 l 의 단위시간에 대한 운행빈도
- α = 차량운행간격의 분포와 통행자 도착분포에 의한 계수
- p_a^l = 링크(경로구간) $a=(i \rightarrow j)$ 를 운행하는 노선 l 을 선택할 확률
- c_a = 링크 $a=(i \rightarrow j)$ 의 일반화 비용
- R_{od}^{\min} = 기종점 쌍 od 간의 최단경로를 구성하는 링크집합
- v_{ab} = 노드 a 와 노드 b 간의 통행량
- v_a = 링크 $a=(i \rightarrow j)$ 의 통행량
- v_a^l = 링크(경로구간) $a=(i \rightarrow j)$ 를 운행하는 노선 l 의 통행량
- t_a^l = 링크(경로구간) $a=(i \rightarrow j)$ 를 운행하는 노선 l 의 차내시간

3.2 기본 가정

대중교통 네트워크가 경로구간 기반으로 확장되었다는 전제 하에 가정을 검토하였으며, 일반화된 형태의 수리모형 구축을 위해서 사용한 가정을 포함하였다.

- 가정 1: 임의의 경로구간을 운행하는 노선집합에 속한 각 노선을 통행자가 선택할 확률은 일정하다.
- 가정 2: 동일한 경로구간을 운행하는 노선 중 통행시간과 운임 등의 특성이 유사한 노선끼리는 통합한다.
- 가정 3: 경로구간의 일반화 비용은 경로구간을 운행하는 각 통합노선의 일반화 비용과 선택확률의 곱의 합에 의해서 결정되고 용량은 무한하다.
- 가정 4: 기종점 통행량은 개인교통수단과 분리되고, 대중교통의 기종점 통행량은 주어지는 것으로 한다.
- 가정 5: 통행의 출발시간을 고려하지 않으며 모든 통행은 동시에 일어나는 것으로 간주한다.
- 가정 6: 통행자는 노선통합과 경로구간으로 확장된 대중교통 네트워크에 대해 거의 완벽한 정보를 가지고 있다.
- 가정 7: 통행자는 자신의 평균통행비용을 최소화하는 경로를 선택하며, 통행비용은 일반화 비용으로 표현된다.

3.3 수리모형의 구축

대중교통을 이용하는 통행자가 평균통행비용을 최소화시키는 경로를 이용한다고 가정한다면 경로구간으로 확장된 네트워크에서 모든 기종점 쌍에 대한 통행량을 배정하는 문제는 수리최소화 문제로 표현할 수 있다. 목적함수인 식 (1)은 링크통행비용을 최소화하는 것이고, 제약식인 식 (2)는 각 노드에서 통행량이 보존되는 것을 의미한다. 식 (3)은 링크의 일반화비용을 산정하는 방식이며, 식 (4)는 노선별 통행량을 배정하는 방식, 식 (5)는 통행량의 비음 조건이다.

$$\text{Min} \sum_{a \in A} c_a \cdot v_a \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \sum_{a \in A_i^+} v_a - \sum_{a \in A_i^-} v_a = \begin{cases} v_{od}, & \text{if } i=o \\ -v_{od}, & \text{if } i=d \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

$$\forall i \in N, \forall o \in O, \forall d \in D$$

$$c_a = \sum_{l \in L_a} p_a^l \cdot c_a^l, \quad \forall a \in A_r \quad (3)$$

$$v_a^l = p_a^l \cdot v_a, \quad \forall a \in A_r, \forall l \in L_a \quad (4)$$

$$v_a \geq 0, \quad \forall a \in A \quad (5)$$

본 모형은 De Cea-Fernández[7] 모형의 보다 일반화된 형태가 되며, 노선의 선택확률 p_a^l 이 어떠한 형태를 갖는가에 따라서 모형의 해법이 달라질 수 있다. 즉, 선택확률이 선형이면 단순한 선형계획법(linear programming) 문제로 쉽게 풀리지만, 선택확률이 비선형이 되면 목적함수와 제약식에 모두 비선형식이 포함되기 때문에 쉽게 풀리지 않게 된다.

링크(경로구간) $a=(i \rightarrow j)$ 를 운행하는 노선이 서로 독립적이라고 한다면 경로구간을 이용하는 통행자의 일반화 비용(c_a)은 c_a^l 과 p_a^l 을 이용하여 산정할 수 있고, 경로구간의 비용은 대기시간이 없는 일반화 비용의 형태로 구성될 수 있다. 그리고 c_a^l 과 p_a^l 이 상수이므로 c_a 는 통행배정이 끝날 때까지 변하지 않는다.

따라서 식 (3), (4)는 제약조건으로서의 의미가 없어지고, 각 링크(경로구간)의 일반화 비용을 계산하는 방식과 노선별로 통행량이 배정되는 방식만을 결정하는 요소로 작용하기 때문에 다음과 같이 쓸 수 있다. 이 식은 단순한 선형식으로 구성되기 때문에 쉽게 풀 수 있게 된다. 즉, 대중교통 네트워크 전체의 기종점 쌍에 대한 통행량 배정은 모형을 기점노드의 수만큼 반복 계산하여 구할 수 있다.

$$\text{Min} \sum_{a \in A} c_a \cdot v_a \quad (6)$$

$$\text{s.t.} \sum_{a \in A_i^-} v_a - \sum_{a \in A_i^+} v_a = v_{oi}, \quad \forall i \in N \quad (7)$$

$$v_a \geq 0, \forall a \in A$$

$$\text{여기서, } c_a = \sum_{l \in L_a} p_a^l \cdot c_a^l, \forall a \in A_r \quad (8)$$

$$v_a^l = p_a^l \cdot v_a, \forall a \in A_r, \forall l \in L_a \quad (9)$$

3.4 모형의 해법

이상의 가정을 근거로 하여 동일한 경로구간을 운행하는 노선의 선택확률을 반영한 대중교통 통행배정모형의 알고리즘 적용 과정은 다음과 같다. 먼저 노선 집합 L , 노선 $l(\in L)$ 의 여정에 포함된 일련의 노드집합 $I_{ab}^l(a, b \in N_s)$, 링크집합 $J_{ab}^l(a, b \in N_s)$ 은 주어진 것으로 한다.

[단계 1] 네트워크 확장 및 노선 분류

[단계 1.1] 초기화

$$A_r = \phi, S = L, L_a = \phi$$

[단계 1.2] 노선선택

만약 $S = \phi$, [단계 1.4]로

그렇지 않으면, S 에서 순차적으로 노선 $l(\in L)$ 선택
 $S = S - \{l\}$

[단계 1.3] 노선구간 생성 및 경로구간 운행노선 정보 수정

• 노선 l 의 정착역 정보(I_{ab}^l)를 이용하여, $i, j(\in I_{ab}^l)$ 에 대해 노선구간 $a=(i \rightarrow j)$ 생성

$$a \in A_r \text{인 경우} \\ L_a = L_a + \{l\}$$

$$a \notin A_r \text{인 경우} \\ A_r = A_r + \{a\} \\ L_a = L_a + \{l\}$$

• [단계 1.2] 반복

[단계 1.4] 모든 노드 $i(\in N_s)$ 에 대하여 환승노드 확장

[단계 1.5] 모든 경로구간 $a=(i \rightarrow j)$ 에 대하여 운행노선을 노선그룹으로 분류하여 L_a^m 에 저장

[단계 2] 경로구간의 일반화 비용 계산

[단계 2.1] 경로구간 $a=(i \rightarrow j)(\in A_r)$ 를 운행하는 노선 $l(\in L_a)$ 에 대하여 일반화 비용 c_a^l 결정

$$c_a^l = a_1 \cdot t_a + a_2 \cdot \frac{\alpha}{f_a^l} + a_3 \cdot t_c a \quad (10)$$

$$\forall a = (i \rightarrow j) \in A_r, \forall l \in L_a$$

여기서, t_a = 링크 $a=(i \rightarrow j)$ 의 차내시간

$t_c a$ = 링크 $a=(i \rightarrow j)$ 의 운임

a_1, a_2, a_3 = 추정계수($a_1 = a_2 = 1$)

[단계 2.2] 경로구간 $a=(i \rightarrow j)(\in A_r)$ 의 모든 노선그룹

에 대하여 새로운 통합노선 $m(\in U_a)$ 을 생성하고 일반화 비용 c_a^m 계산

$$c_a^m = \frac{\sum_{l \in L_a^m} \left(c_a^l - \frac{\alpha}{f_a^l} \right) \cdot f_a^l}{\sum_{l \in L_a^m} f_a^l} + \frac{\alpha}{\sum_{l \in L_a^m} f_a^l} \quad (11)$$

$$\forall a = (i \rightarrow j) \in A_r, \forall m \in U_a$$

[단계 2.3] 경로구간 $a=(i \rightarrow j)(\in A_r)$ 의 노선 및 통합노선의 선택확률 p_a^l, p_a^m 결정

$$p_a^l = \sum_{l \in L_a^m} p_a^l \quad (12)$$

$$\forall a = (i \rightarrow j) \in A_r, \forall m \in U_a$$

[단계 2.4] 경로구간 $a=(i \rightarrow j)(\in A_r)$ 의 일반화 비용 c_a 계산

$$c_a = \sum_{l \in U_a} p_a^l \cdot c_a^l \quad (13)$$

$$\forall a = (i \rightarrow j) \in A_r$$

[단계 3] 효율적인 최단경로 탐색 알고리즘을 이용하여 모든 기종점 쌍에 대해서 최단경로를 탐색하고 경로정보 R_{od}^{\min} 저장

[단계 4] 통행량 배정

[단계 4.1] 경로 통행량을 링크(경로구간) 통행량으로 배정

$$v_a = \sum_{o \in O} \sum_{d \in D} v_{od} \cdot \delta_{od}^a \quad (14)$$

$$\forall a = (i \rightarrow j) \in A$$

$$\text{여기서, } \delta_{od}^a = \begin{cases} 1, & \text{if } a = (i \rightarrow j) \in R_{od}^{\min} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

[단계 4.2] 링크 통행량을 노선구간 통행량으로 배정
 • 경로구간 통행량을 통합노선의 노선구간 통행량으로 배정

$$v_a^l = p_a^l \cdot v_a \quad (15)$$

$$\forall a = (i \rightarrow j) \in A_r, \forall l \in U_a$$

• 통합노선의 노선구간 통행량을 개별노선의 노선구간 통행량으로 배정

$$v_a^l = \frac{p_a^l}{p_a^m} \cdot v_a^m = p_a^l \cdot v_a \quad (16)$$

$$\forall a = (i \rightarrow j) \in A_r, \forall l \in L_a, \forall m \in U_a$$

[단계 4.3] 노선구간 통행량을 단위노선구간(line seg-

ment) 통행량으로 배정

$$v_m^l = \sum_{a \in A_r} v_a^l \cdot \delta_{a,m}^l \quad (17)$$

$$\forall l \in L, \forall m \in J_{ab}^l$$

여기서, $\delta_{a,m}^l = \begin{cases} 1, & \text{if } m \in a \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$

4. 사례 분석

4.1 분석의 전제

지역간 철도의 특징을 반영할 수 있는 실제 네트워크의 일부분을 이용하여 소규모 네트워크를 구성하여 기존 대중교통 통행배정모형과 본 모형과의 결과를 비교하였다. 비교 모형으로는 혼잡을 반영하지 않는 모형으로서 최적전략 통행배정모형과 De Cea-Fernández[7] 모형, Dial[1] 알고리즘을 이용한 확률적 다중경로 통행배정모형을 선정하였다. 모형 비교를 위한 자료는 지역간 철도의 KTX를 포함하기 위해서 2004년 10월 1달간의 자료를 분석하여 10월 1달간의 역간 평균수요와 패턴이 유사한 10월 20일을 기준으로 하였다.

각각의 모형을 비교하기 위해서 RMSE, Theil의 부등계수를 기준으로 사용하였으며, 각각의 통계치는 작을수록 모형의 결과가 우수한 것으로 판단할 수 있다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{a=1}^N (\hat{V}_a - V_a)^2} \quad (18)$$

$$Theil's U = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{a=1}^N (\hat{V}_a - V_a)^2}}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{a=1}^N V_a^2} + \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{a=1}^N \hat{V}_a^2}} \quad (19)$$

여기서, V_a = 관측 통행량

\hat{V}_a = 예측 통행량

N = 비교대상 자료수

각 모형을 적용하기 위해서 공통적으로 전제한 사항은 다음과 같다.

- ① 일반화 비용은 접근시간, 대기시간, 차내시간, 운임으로 구성되고, 모든 비용은 차내시간 단위로 환산하여 반영하며, 환승 별점은 100으로 설정
- ② 접근시간, 대기시간을 일반화 비용으로 변환할 때 페널티는 없음
- ③ 운임의 차내시간 환산을 위한 시간가치 6,740원/시간

- ④ 분석기간은 1일 단위로서 지역간 철도노선의 실제 운행 내역을 참고로 하여 19시간(1140분)으로 설정

4.2 사례 네트워크 및 자료

Fig. 3과 같이 4개의 존과 5개의 철도역을 이용하여 1방향 네트워크를 구성하였다. 이 네트워크는 현재 우리나라의 대표적인 철도간선인 경부선의 주요역(서울, 용산, 대전, 동대구, 부산역)을 대상으로 하였고, 중간에 정차하는 역들은 모두 생략하여 단순화한 것이다.

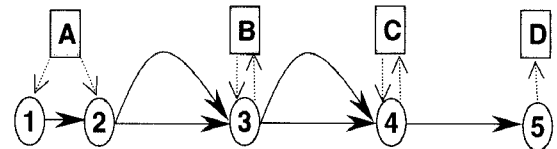


Fig. 3. Network example 2 (NE2)

네트워크를 구성하고 있는 링크 중에서 존과 철도역 사이의 연결을 의미하는 점선으로 표시된 링크는 보행링크로서 용량은 무한하고 거리는 0.01km, 속도는 4km/h로 설정하였으며, 나머지는 철도링크로 구성되고 속성은 Table 1과 같다.

Table 1. Link attributes of NE2

링크	거리(km)	이용 차종
① → ②	3.2	KTX, 새마을, 무궁화
② → ③	156.6	KTX
② ~ ③	163.1	새마을, 무궁화
③ → ④	133.3	KTX
③ ~ ④	160.0	새마을, 무궁화
④ → ⑤	115.4	KTX, 새마을, 무궁화

Table 2는 사례 네트워크의 존간 및 역간 통행량을 표시한 것이다. 각 모형별 통행배정에 사용되는 입력자료는 음영으로 처리된 존간 총 통행량만이 사용된다.

철도노선은 하루에 운행한 모든 지역간 철도차량 중에서 본 사례 네트워크에 포함된 5개 철도역 중에서 최소한 2개역 이상을 정차하는 차량을 대상으로 하였다. 1일 총 632개 차량 중에서 하행 방향으로 2개역 이상을 정차하는 차량은 모두 92개 차량이며, 복합열차를 고려할 경우 최종 89개 차량이 된다. 이것을 노선으로 구분하면 총 63개 노선이 되며, 노선 23, 24, 30이 복합열차이다.

운행패턴이 동일하고 통행시간이 비슷한 노선들을 별도의 노선으로 구분한 이유는 사례 네트워크에서는 생략이 되어 있지만, 5개역 사이에 많은 철도역들이 있고 구분된 노선은 정차 패턴이 모두 다르기 때문이다.

Table 2. Demand by origin-destination pair

출발존 (역)	도착존 (역)	역간 수요(통행/일)			
		KTX	새마을	무궁화	합계
A	B	3,217	200	664	4,081
①	③	3,113	200	664	3,977
②	③	104	0	0	104
A	C	6,897	142	219	7,258
①	④	6,635	142	219	6,996
②	④	262	0	0	262
A	D	6,604	274	385	7,263
①	⑤	6,319	274	385	6,978
②	⑤	285	0	0	285
B	C	940	38	92	1,070
B	D	1,182	83	137	1,402
C	D	1,019	295	825	2,139
합 계		19,859	1,032	2,322	23,213

Table 3. The attributes of KTX lines

노선 번호	운행패턴	빈 도	통행 시간(분)	노선 번호	운행패턴	빈 도	통행 시간(분)
1	①-③	3	65.5	12	①-③-④-⑤	1	170.5
2	①-③-④	5	108.8	13	①-③-④-⑤	1	168.0
3	①-③-④	4	103.9	14	①-③-④-⑤	1	180.5
4	①-③-④-⑤	4	161.9	15	①-⑤	2	154.0
5	①-③-④-⑤	4	172.0	16	①-④-⑤	1	161.5
6	①-③-④-⑤	4	173.1	17	③-④	1	58.0
7	①-③-④-⑤	3	177.7	18	②-③-④-⑤	3	174.0
8	①-③-④-⑤	2	171.8	19	②-③-④-⑤	1	170.0
9	①-③-④-⑤	2	175.8	20	②-③-④-⑤	1	176.0
10	①-③-④-⑤	1	170.5	21	②-③-④-⑤	1	177.5
11	①-③-④-⑤	1	175.0				

Table 4. The attributes of Saemaoul lines

노선 번호	운행패턴	빈 도	통행 시간(분)	노선 번호	운행패턴	빈 도	통행 시간(분)
22	①-③-④	2	198.0	29	①-③-④-⑤	1	277.0
23	①-③-④	1	199.3	30	①-③-④-⑤	1	283.0
24	①-③-④	1	199.0	31	①-③-④-⑤	1	281.0
25	①-③-④	1	198.5	32	①-③-④-⑤	1	277.0
26	①-③-④-⑤	1	274.0	33	①-③-④-⑤	1	283.0
27	①-③-④-⑤	1	272.0	34	①-③-④-⑤	1	283.0
28	①-③-④-⑤	1	277.0				

4.3 분석 결과

4.3.1 본 모형 적용 결과

사례 네트워크와 노선 정보를 이용하여 Fig. 4와 같이 경

Table 5. The attributes of Mugunghwa lines

노선 번호	운행패턴	빈 도	통행시간 (분)	노선 번호	운행패턴	빈 도	통행시간 (분)
35	①-③	1	120.0	50	①-③-④-⑤	1	328.0
36	①-③	1	122.0	51	①-③-④-⑤	1	324.0
37	①-③	1	122.0	52	①-③-④-⑤	1	325.5
38	①-③-④	1	241.0	53	①-③-④-⑤	1	327.0
39	①-③-④	1	231.8	54	①-③-④-⑤	1	331.0
40	①-③-④	1	224.3	55	①-③-④-⑤	1	329.5
41	①-③-④	1	224.0	56	①-③-④-⑤	1	329.0
42	①-③-④	1	232.3	57	③-④-⑤	1	218.0
43	①-③-④-⑤	1	311.0	58	④-⑤	1	98.0
44	①-③-④-⑤	1	315.0	59	④-⑤	1	95.0
45	①-③-④-⑤	1	321.0	60	④-⑤	1	90.5
46	①-③-④-⑤	1	323.0	61	④-⑤	1	93.5
47	①-③-④-⑤	1	322.0	62	④-⑤	1	88.5
48	①-③-④-⑤	1	325.0	63	④-⑤	1	91.5
49	①-③-④-⑤	1	324.0				

로구간으로 확장된 새로운 네트워크를 생성하였다. [단계 1]의 순서에 의해서 우선 철도 네트워크를 확장하면, 그림과 같이 63개 노선을 모두 반영하여 기존의 6개 링크를 대신해서 9개의 경로구간 기반의 링크가 생성된다.

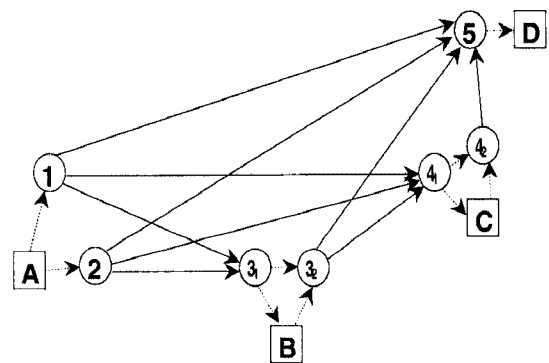


Fig. 4. Network expansion of NE2 based on Route Section

새로 생성된 링크를 운행하는 노선의 초기 정보는 Table 6과 같다. 환승노드는 혼동의 우려가 없으므로 편의상 별도로 구분하여 표기하지 않았다. 사례 네트워크에서의 각 링크는 최대 3개의 통합노선이 운행하는 것으로 설정할 수 있으며, KTX, 새마을, 무궁화의 3개 그룹으로 분류된다.

[단계 2]는 링크(경로구간)별로 운행하는 노선의 일반화 비용을 산정하게 되며 일반화 비용의 산정식은 다음과 같다.

$$c_a^l = tt_a^l + wt_a^l + 0.008902 \cdot tc_a^l \quad (20)$$

Table 6. Line group by route section

링크 $a=(i \rightarrow j)$	노선그룹 1 (L_a^1 , KTX)	노선그룹 2 (L_a^2 , 새마을)	노선그룹 3 (L_a^3 , 무궁화)
(① → ③)	1-14	22-34	35-56
(① → ④)	2-14, 16	22-34	38-56
(① → ⑤)	4-16	26-34	43-56
(② → ③)	18-21	-	-
(② → ④)	18-21	-	-
(② → ⑤)	18-21	-	-
(③ → ④)	2-14, 17-21	22-34	38-57
(③ → ⑤)	4-14, 18-21	26-34	43-57
(④ → ⑤)	4-14, 16, 18-21	26-34	43-63

여기서, u_a^l =링크 $a=(i \rightarrow j)$ 를 운행하는 노선 l 의 차내시간
 wt_a^l =링크 $a=(i \rightarrow j)$ 를 운행하는 노선 l 의 대기시간
 tc_a^l =링크 $a=(i \rightarrow j)$ 를 운행하는 노선 l 의 운임

다음으로 경로구간 기반의 링크를 생성함으로써 통행특성이 유사한 노선을 동일한 그룹으로 묶어주고 통합노선으로

만들어 대기시간을 보다 합리적으로 반영할 수 있다.

또한 이 단계에서 각 노선의 선택확률을 결정하여야 한다. 동일한 통합노선에 속한 노선들의 선택확률은 빈도에 단순 비례하는 것으로 설정할 수 있으며, 선행연구인 김경태·이진선[17]의 연구에서 제시한 다항로짓모형을 이용하여 통합노선별 선택확률을 산정하였다.

$$U_a^m = 0.07448099 \cdot F_a^m - 0.02539502 \cdot T_a^m + D^m \quad (21)$$

여기서, U_a^m =링크 $a=(i \rightarrow j)$ 를 이용하는 차종 m 의 효용함수
 F_a^m =링크 $a=(i \rightarrow j)$ 를 이용하는 차종 m 의 빈도
 T_a^m =링크 $a=(i \rightarrow j)$ 를 이용하는 차종 m 의 통행시간
 $D^{ktx}=-1.5089$, $D^{sae}=-1.2375$, $D^u=-0.2364$,
 $D^{long}=0$

[단계 3]의 최단경로의 탐색은 하나의 기종점 쌍에 대해서 Dijkstra[14] 알고리즘을 활용하여 탐색할 수 있는데, 최단경로에 통행량을 배정하게 된다. 마지막으로 [단계 4]의 노선별 통행량을 배정하는 식을 적용하여 통행량을 배정하

Table 7. The attributes by integrated line

링크 (경로구간)	통합노선1 (KTX)			통합노선2 (새마을)			통합노선3 (무궁화)		
	빈도 (회)	시간 (분)	운임 (원)	빈도 (회)	시간 (분)	운임 (원)	빈도 (회)	시간 (분)	운임 (원)
(① → ③)	36	55.8	19,700	14	101.8	13,900	22	119.0	9,300
(① → ④)	34	104.1	34,900	14	202.1	27,200	19	233.4	18,300
(① → ⑤)	27	170.0	45,000	9	278.6	36,800	14	323.9	24,800
(② → ③)	6	54.9	19,400	0	999.0	13,600	0	999.0	9,100
(② → ④)	6	104.6	34,600	0	999.0	26,900	0	999.0	18,100
(② → ⑤)	6	174.3	44,700	0	999.0	36,500	0	999.0	24,600
(③ → ④)	40	47.8	15,700	14	98.2	13,300	20	113.4	9,000
(③ → ⑤)	30	115.9	26,200	9	174.6	22,900	15	203.9	15,400
(④ → ⑤)	31	66.4	12,200	9	72.6	9,600	21	89.4	6,500

Table 8. Generalized cost of route section

링크 (경로구간)	통합노선별 일반화 비용 (c_a^m)			통합노선별 선택확률 (p_a^m)			일반화 비용 (c_a)
	KTX	새마을	무궁화	KTX	새마을	무궁화	
(① → ③)	247	266	228	0.7510	0.0594	0.1896	244
(① → ④)	432	485	426	0.9360	0.0230	0.0410	433
(① → ⑤)	592	669	585	0.9533	0.0208	0.0259	593
(② → ③)	323	9,999	9,999	1.0000	0.0000	0.0000	323
(② → ④)	508	9,999	9,999	1.0000	0.0000	0.0000	508
(② → ⑤)	667	9,999	9,999	1.0000	0.0000	0.0000	667
(③ → ④)	202	257	222	0.8300	0.0437	0.1264	207
(③ → ⑤)	368	442	379	0.8427	0.0521	0.1053	373
(④ → ⑤)	193	221	174	0.4619	0.1006	0.4375	188

였다. 통행량의 배정은 경로별 통행량을 경로구간 통행량으로 배정하고 다시 통합노선별로 배정한다. 각 개별노선별로는 통합노선의 통행량을 빈도에 비례하여 배정하는 것으로 하였기 때문에 본 분석에서는 제시하지 않았다.

Table 9. Minimum path by origin-destination pair

기종점	최단경로(c_{od}^{min})	
	경로	일반화 비용
A, B	A → ① → ③ → B	244
A, C	A → ① → ④ → C	433
A, D	A → ① → ⑤ → D	593
B, C	B → ③ → ④ → C	207
B, D	B → ③ → ⑤ → D	373
C, D	C → ④ → ⑤ → D	188

Table 10. Assignment results of suggested model

노드	KTX(통행/일)			새마을(통행/일)			무궁화(통행/일)		
	승차	하차	재차	승차	하차	재차	승차	하차	재차
①	16,553	-	16,553	731	-	731	1,318	-	1,318
②	0	-	16,553	-	-	731	-	-	1,318
③	2,194	3,125	15,623	103	281	552	175	675	819
④	1,065	7,683	9,005	223	252	523	851	393	1,276
⑤	-	9,005	-	-	523	-	-	1,276	-

4.3.2 기존 모형의 분석

기존 모형의 분석은 De Cea-Fernández[7] 모형과 최적 전략 통행배정모형, 확률적 다중경로 통행배정모형에 대해서 분석하였으며, 여기서는 접근 방법에 대해서만 간단하게 기술하였다.

최적전략 통행배정모형의 적용은 EMME/2를 이용하였다. EMME/2는 차량의 운행간격을 1,000분 이상은 입력할 수 없으므로 모든 스케일을 1/2로 줄여서 분석하였다. 최적전략의 결정은 통행비용의 차이를 이용하기 때문에 통행량 분석 결과에는 영향을 주지 않는다.

De Cea-Fernández[11] 모형의 분석은 각 노선별 일반화 비용을 산정할 때 노선의 일반화 비용을 대기시간과 대기 시간을 제외한 나머지 일반화 비용으로 구분하고, 경로구간의 평균통행시간을 최소화시키는 노선만을 포함하여 통행량을 배정한다. 통행량의 배정은 제한적 최적전략에 포함된 노선에 대해서 빈도에 비례하여 통행량을 배분한다.

확률적 다중경로 통행배정모형의 적용 결과는 Dial[1] 알고리즘을 대중교통에 적용할 수 있도록 일부 수정하여 합리적 경로를 산정하는 모형을 사용하였다. 분석을 위한 기본가정은 동일하고, 분산계수의 값은 선행연구들에서 많이

사용되는 값인 1.0을 우선 적용하였다. 그 결과 모든 통행이 KTX로만 집중되고, 새마을과 무궁화에는 통행량이 전혀 배정되지 않았다. 따라서 분산계수의 값은 통행량이 최적으로 배분되도록 추정하여 적용하였다.

4.3.3 모형의 비교

기존 모형과 본 연구에서 제시한 통행배정모형을 현실을 최대한 반영한 소규모 네트워크에 적용해 본 결과를 비교하였다. 모형 D를 제외한 결정적 통행배정모형의 예측 결과가 매우 비합리적으로 예측되었다. De Cea-Fernández[11] 모형의 해는 최적전략 통행배정모형보다는 나은 결과를 보이고는 있지만, 두 모형이 모두 예측 능력이 크게 떨어진다는 점에서 특정 모형의 결과가 우수하다고 판단하기에는 무리가 있다. 기존의 모형 중에서는 결정적 통행배정모형에 비해서 확률적 다중경로 통행배정모형이 보다 나은 결과를 보이는 것으로 분석되었다.

본 연구에서 제시한 모형은 다른 모형들에 비해서 매우 우수한 결과를 보여주고 있다. 지역간 철도에 한정된 분석이기는 하지만, 본 연구에서 제시한 통행배정모형이 보다 현실을 정확하게 모사할 수 있는 것으로 판단하였다(상세내용은 김경태[18]의 연구 참조).

Table 11. The comparison of statistical results

구분	모형 A ¹⁾	모형 B ²⁾	모형 C ³⁾	모형 D ⁴⁾
RMSE	6,108.0	3,886.3	538.9	245.7
Theil's U	0.5107	0.3402	0.0424	0.0189

주1: 최적전략 통행배정모형
 주2: De Cea-Fernández[7] 모형
 주3: 확률적 다중경로 통행배정모형
 주4: 본 연구에서 제시한 모형

지역간 철도에서 본 연구에서 제시한 통행배정모형이 기존의 모형보다 우수한 결과를 보이는 것은 노선별 분담률을 어떤 방식으로 산정하는가에 대한 차이에서 비롯된다. 기존의 모형은 빈도와 운임을 모두 차내시간의 가치로 환산하여 일반화 비용이라는 하나의 잣대로만 노선별 분담률을 산정하고 있다. 그러나 본 연구에서 제시한 모형은 빈도를 대기시간으로 환산하지 않고 빈도 자체가 가지는 영향력을 이용하였고, 차내시간과 차중에 대한 선호도를 반영하여 노선선택확률을 산정하였기 때문이다. 운행경로별로 통행량을 결정하기 위해서는 기존 모형과 동일하게 일반화 비용을 이용하고 있지만, 보다 정확한 분석이 요구되는 노선선택확률을 산정하는 방식을 개선한 것이 현실을 보다 합리적으로 모사할 수 있는 주요 요인이다.

5. 결론 및 향후 연구 과제

본 연구는 서두에서 밝힌 목적과 같이 도시권역의 대중교통수단과는 여러 측면에서 다른 지역간 철도의 특징을 기존 모형에서 합리적으로 반영할 수 없는 부분을 개선하여 지역간 철도에 적합한 통행배정모형을 개발하였다. 기존의 대중교통 통행배정모형이 주로 운행패턴이 단순한 도시권역에서 운행하는 노선버스나 지하철 등의 특징을 잘 반영할 수 있도록 구축되어, 지역간 철도를 이용하는 통행을 예측하는 데에 한계로 작용하고 있는 상황에서 지역간 철도의 특성에 맞는 모형을 개발함으로써 지역간 통행을 합리적으로 모사할 수 있는 모형이 구축되었다는 점에서 의의가 있다.

본 연구에서 개발한 통행배정모형을 구축하는 과정에서 도출한 결론을 정리하면 다음과 같다.

첫째, 지역간 철도는 노선이 다양하고 유사한 특징을 가지고, 운임체계가 복잡하고, 복합열차가 운행하고, 환승수요가 낮다는 특징을 가지고 있다. 따라서 노선의 여정을 기반으로 한 네트워크의 확장은 최적전략 통행배정모형과 같이 직접 확장하는 것보다는 경로구간 기반으로 확장하는 것이 네트워크 규모 면에서 유리하다.

둘째, 지역간 철도의 노선 정보를 활용하여 경로구간 기반으로 확장된 지역간 철도 네트워크에서 경로구간을 운행하는 차종의 선택확률을 외부적으로 결정하는 방법을 제시함으로써, 기존의 도로 통행배정모형에서 검증된 경로 탐색 알고리즘을 별도의 수정없이 바로 적용할 수 있게 되었다. 또한 네트워크를 보다 더 단순화시켜 경로 탐색 과정이 보다 간편해지고 차종별 통행량은 보다 정확하게 예측할 수 있게 되었다.

셋째, 경로구간 기반의 통행배정모형을 구축하여 지역간 철도의 실제 자료를 근거로 한 사례 네트워크에서 기존 통행배정모형과 비교한 결과 지역간 철도의 수요예측에는 본 연구에서 제시한 모형을 사용하는 것이 보다 효율적인 것으로 분석되었다.

넷째, 지역간 철도에서 열차운영계획을 수립할 때 매우 중요하게 활용되는 것이 역간수요이다. 최적전략 통행배정모형과 같이 직접 네트워크를 확장하는 경우에는 역간수요를 직접 산정할 수 없다는 한계가 있지만, 본 연구에서 제시한 통행배정모형은 모형의 결과로서 역간수요가 직접 도출될 수 있다는 것이 중요한 장점이 된다.

다섯째, 본 연구에서 도입한 경로구간 기반의 모형은 다양한 시스템의 특성에 맞게 모형을 수정함으로써 보다 복잡한 형태의 운임을 반영할 필요가 있는 경우, 다양한 대중교통수단이 복합적으로 운행하는 경우의 통합 모형이 필요한 경우 등과 같이 다양한 분야로의 적용이 가능할 것으

로 판단된다.

본 연구에서 제시된 통행배정모형을 보다 더 효율적으로 이용하기 위해서는 다음과 같은 연구가 추가로 필요하다.

첫째, 대규모 네트워크에 대해서도 동일한 결과를 도출할 수 있는 지에 대해서 검증이 필요하다.

둘째, 노선의 선택확률에 영향을 주는 요인들에 대한 분석과 선택확률 계산의 정확성을 높이기 위한 적정 요인의 선정과 계산 방법에 대한 연구가 필요하다.

셋째, 본 연구에서 제시한 통행배정모형이 지역간 철도뿐만 아니라 도시권역의 대중교통수단에도 적용이 가능한 지에 대해서 검증이 필요하다. 도시권역에도 적용이 가능하면 노선으로 분류할 수 있는 대중교통수단을 모두 통합하는 것도 가능할 것이다.

참고 문헌

1. Dial, R. B., Transit pathfinder algorithm, Highway Research Record 205, pp. 67-85, 1967.
2. Rapp, M. H., Mattenberger P., Piguet S., Robert Grandpierre A., Interactive graphic system for transit route optimization, Transportation Research Record 619, 1976.
3. Andreasson, I., A method for the analysis of transit networks, Proceedings of the 2nd European Congress on Operations Research, North Holland, Amsterdam, 1976.
4. Le Clercq, F., A public transport assignment method, Traffic Engineering and Control 13(6), pp. 91-96, 1972.
5. Chriqui, C., Robillard, P., Common bus lines, Transportation Science, pp. 115-121, 1975.
6. Spiess, H., Florian, M., Optimal strategies: a new assignment model for transit networks, Transportation Research B(23), pp. 83-102, 1989.
7. De Cea, J., Fernández, E., Transit assignment to minimal routes: an efficient new algorithm, Traffic Engineering and Control, pp. 491-494, 1989.
8. Jayakrishnan, R., McNally, M. G., Marar, A. G., Recursive structure for exact line probabilities and expected waiting times in multipath transit assignment, Transportation Research Record 1493, pp. 178-187, 1995.
9. Spiess, H., Transit equilibrium assignment based on optimal strategies: an implementation in EMME/2, EMME/2 Support Center, 1993.
10. Wu, J. H., Florian M., Marcotte P., Transit equilibrium assignment: a model and solution algorithms, Transportation Science 28(3), pp. 193-203, 1994.
11. De Cea, J., Fernández, E., Transit assignment for congested public transport systems: an equilibrium model, Transportation Science 27(2), pp. 133-147, 1993.
12. Lam, W. H. K., Gao, Z. Y., Chan, K. S., Yang, H., A stochastic user equilibrium assignment model for congested transit networks, Transportation Research B(33), pp. 351-368, 1999.

13. Cepeda, M., Cominetti, R., Florian, M., A frequency-based assignment model for congested transit networks with strict capacity constraint: characterization and computation of equilibria, *Transportation Research B*(40), pp. 437-459, 2006.
 14. Dijkstra, E. W., A note on two problems in connection with graphs, *Numerische Mathematik* 1, pp. 269-271, 1959.
 15. Nielsen, O. A., A stochastic transit assignment model considering differences in passengers utility functions, *Transportation Research B*(34), pp. 377-402, 2000.
 16. 건설교통부, 2004년 국가교통DB구축사업 전국 지역간 여객 기종점 통행량 자료의 현행화, pp. 31-34, 2005.
 17. 김경태, 이진선, 다항로짓모형을 이용한 지역간 철도통행 연구, *대한교통학회지* 제25권 제1호, pp. 109-119, 2007.
 18. 김경태, 지역간 철도 통행배정모형 구축 연구, 서울대학교 박사 학위논문, 2007.
- 접수일(2008년 5월 24일), 수정일(2008년 8월 10일),
게재확정일(2008년 8월 20일)