

지역간 철도의 확률적 통행배정모형 구축 연구

A Stochastic Transit Assignment Model for Intercity Rail Network

권용석[†] · 김경태* · 임종훈**

Yong-Seok Kwon · Kyoung-Tae Kim · Chong-Hoon Lim

Abstract The characteristics of intercity rail network are different from those of public transit network in urban area. In this paper, we proposed a new transit assignment model which is generalized form of deterministic assignment model by introducing line selection probability on route section. This model consider various characteristics of intercity rail and simplify network expansion for applying search algorithms developed in road assignment model. We showed the model availability by comparing with existing models using virtual networks. The tests on a small scale network show that this model is superior to existing models for predicting intercity rail demand.

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

요 지 지역간 철도는 일반적인 대중교통의 특징 이외에도 노선의 수가 매우 많다는 등의 차별화되는 특징이 있다. 본 연구는 경로구간에 노선선택확률의 개념을 도입하여, 지역간 철도의 특징을 잘 반영할 수 있는 확률적 대중교통 통행배정모형을 제시하였다. 확률적 통행배정모형은 결정적 통행배정모형의 특성을 포함한 보다 일반화된 모형이다. 본 모형은 다양한 지역간 철도의 특징을 반영할 수 있으며, 기존의 도로 통행배정모형에서 많이 활용되고 있는 탐색 알고리즘을 직접 활용하기 위해 대중교통 통행배정모형에서 적용되는 네트워크 확장을 단순화시킬 수 있다. 모형의 검증을 위해서 기존에 대표적으로 이용되는 선형 및 격자형 네트워크에서의 적용성을 검증하기 위해서 본 연구에서 제안한 해법을 사용하여 기존 모형과 비교하였다. 또한, 지역간 철도의 현실을 반영한 소규모 네트워크에서 기존 모형과의 예측 능력을 비교하였으며, 그 결과 본 연구에서 제시한 모형의 예측 능력이 가장 우수한 것으로 분석되었다.

주 요 어 : 지역간 철도, 통행배정모형, 확률모형, 경로구간, 노선선택확률

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

지역간 철도를 이용하는 고객의 통행패턴은 개인교통 수단과는 차별화된다. 김경태·이진선[1]의 연구에 의하면 지역간 철도는 일반적인 대중교통의 특징 이외에도 차별화되는 특징으로서 동일한 노선에 속하는 차량수는 매우 적으면서 노선의 수는 많아진다는 것, 복합열차라는 개념이 존재한다는 것, 환승수요가 매우 적다는 것, 요금산정 방식이 복잡하다는 것 등이 거론되고 있다. 김경태 등[2]의 연구에

서는 이 중에서 노선의 수가 매우 많다는 측면에서 지역간 철도에서는 경로구간의 개념을 도입하고, 경로구간을 운행하는 노선에 대해서 노선선택확률을 도입하는 것이 유리하다고 하였다. 이로부터 경로구간 기반의 결정적 통행배정모형을 제시하였으며, 기존의 대표적인 모형에 비해서 모형의 예측 결과를 개선할 수 있고, 역간수요 등 다양한 분석결과를 도출할 수 있다고 하였다.

그러나, 이 연구는 결정적 모형만을 제시한 것으로서 최단경로에만 통행량을 배정한 방식이다. 본 연구에서는 경로구간에 노선선택확률의 개념을 활용하여 구축한 결정적 통행배정모형의 해법을 확률선택모형을 이용하여 보다 일반화된 모형으로 확장하고 해법을 제시하였다. 통행배정모형에서 사용되는 대표적인 확률선택모형은 로짓모형과 프로빗모형이 있다. 로짓모형의 경우 비관련대안간의 독립성의 문제가 있는 것으로 알려져 있으나 모형의 적용이 편리

[†] 책임저자 : 정회원, 전주대학교, 토목환경공학과, 교수
E-mail : jisankys@jj.ac.kr

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

* 정회원, 한국철도기술연구원, 선임연구원

** 전주대학교 공과대학원 건설공학과

하고 계산이 간편하기 때문에 널리 사용되고 있다. 프로빗 모형은 비관련대안간의 독립성 문제에서 자유롭지만 시뮬레이션 기법을 활용하는 모형의 계산 과정이 복잡하여 적용성 측면에서 불리하다. 본 연구에서는 로짓모형 기반으로 확률적 통행배정모형을 구축하였다.

본 연구의 범위는 경로구간의 노선선택확률의 개념을 도입한 확률적 대중교통 통행배정모형을 구축하고, 가상의 네트워크에서의 검증과 소규모 네트워크에서의 적용성을 분석하는 것이다. 비교 모형으로는 기존의 대표적인 대중교통 통행배정모형을 활용하였다.

1.2 기존연구 고찰

Fig. 1에서 보는 바와 같이 대중교통 통행배정모형의 기본이 되는 연구는 Le Clercq[3]와 Chriqui-Robillard[4]의 연구에서 출발한다. Le Clercq[3]는 노선구간의 개념을 처음 도입하였고, Chriqui-Robillard[4]는 제한적 최적전략의 개념을 도입하였다. 제한적 최적전략은 “통행자는 동일한 노드 사이를 운행하는 다양한 노선에 대해서 평균통행시간을 최소화시키는 노선에 속한 차량 중 가장 먼저 도착한 차량에 승차한다”는 개념이다. 또한, 공통노선(common line)의 개념이 도입되었으며, 동일한 물리적 링크를 공통으로 이

용하는 노선으로서 링크의 평균통행시간을 최소화시키는 노선의 집합을 의미한다.

Spiess-Florian[5]은 Chriqui-Robillard[4]의 제한적 최적전략과 공통노선의 개념에 기초하여 최적전략의 개념을 확립하였으며, 이는 다시 혼잡을 반영한 Spiess[6], Wu et al.[7]의 연구와 통행량을 배정하는 방식을 개선한 Jayakrishnan et al.[8]의 연구로 발전하였다. 그러나 현재까지도 Spiess-Florian[5]의 최적전략을 확립한 모형이 널리 활용되고 있다.

De Cea-Fernández[9]는 Le Clercq[3]의 노선구간 개념과 Chriqui-Robillard[4]의 공통노선, 제한적 최적전략의 개념을 활용하여 경로구간과 제한적 최적전략을 반영한 모형을 제시하였으며, De Cea-Fernández[10]에서 혼잡의 개념을 도입하였다. 또한, 이 모형들에 근거하여 확률적 개념이 도입된 연구와 혼잡을 반영하는 방법에 따라서 다양한 연구들이 있었지만 최적전략의 기본개념은 변하지 않았다.

김경태 등[2]은 지역간 철도의 특징을 고려하여 지역간 철도에 적합한 결정적 모형을 제시하였는데, 이 연구에서는 경로구간 기반으로 대중교통 네트워크를 확장하였으며, 우리나라 전체 지역간 철도 네트워크에서는 2004년 10월 20일을 기준으로 총 22,101개의 경로구간이 생성되어 네트

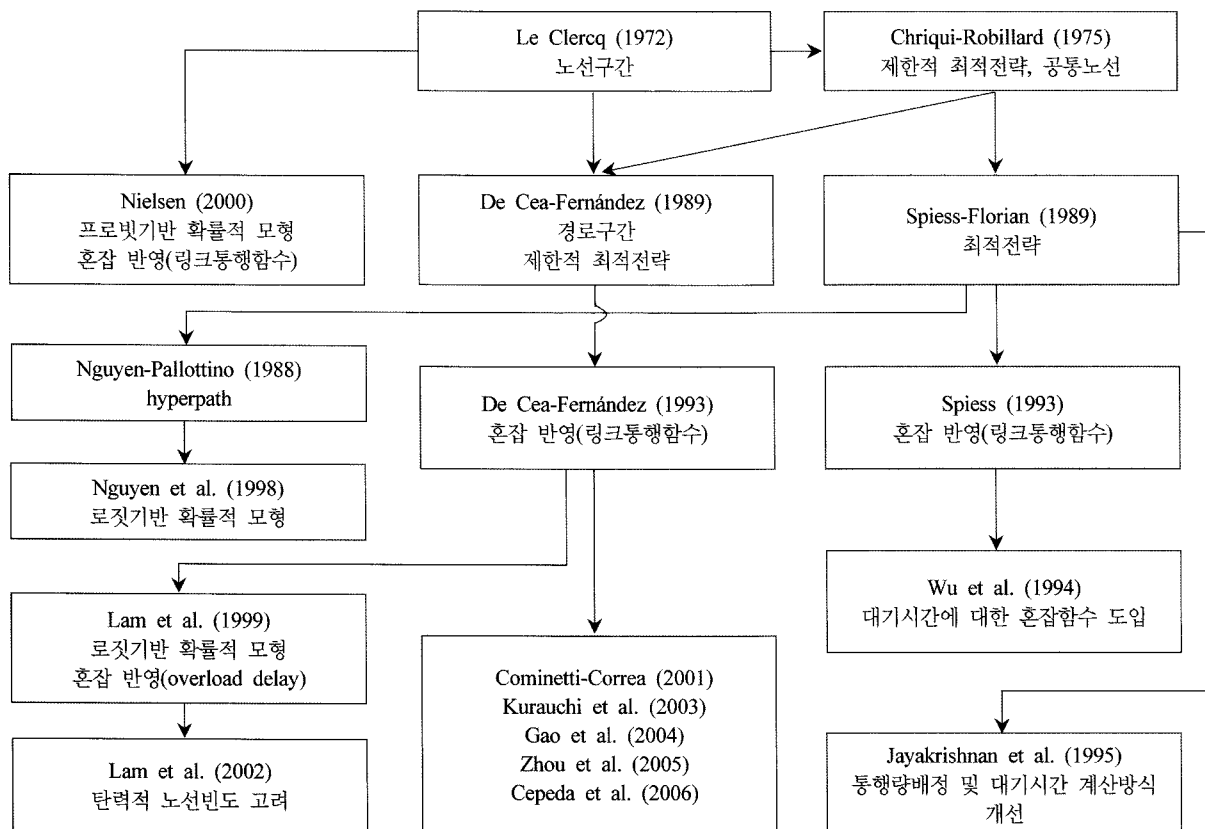


Fig. 1. 대중교통 통행배정모형 연구의 흐름

워크 확장이 합리적인 수준인 것으로 제시하였다. 또한, 노선선택확률의 개념을 도입하여 다양한 차종간의 분담률 추정이 보다 합리적으로 예측되는 것으로 제시하였다. 앞서서도 언급한 바와 같이 본 연구에서는 김경태 등[2]의 모형에서 제시한 결정적 통행배정모형을 보다 일반화된 확률적 모형으로 확장하고, 가상의 네트워크에서의 검증과 소규모 네트워크에서의 적용성을 분석하였다.

2. 모형의 구축

2.1 기호 정리

경로구간의 노선선택확률을 이용한 확률적 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
- I_{xy}^l = 노선 l 의 노드 xy 간의 여정에 포함된 일련의 노드집합
- J_{xy}^l = 노선 l 의 노드 xy 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 중에서 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
- d_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_{xy} = 노드 x 와 노드 y 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
- c_{xy}^{min} = 노드 x 와 노드 y 간 최단경로의 일반화 비용
- c_{od}^k = 기종점 쌍 od 간의 경로 k 의 일반화 비용
- R_{od} = 기종점 쌍 od 간의 통행배정 대상경로의 집합
- R_{od}^k = 기종점 쌍 od 간의 통행배정 대상경로 k 의 일련의 링크집합

- v_{od}^k = 기종점 쌍 od 간의 경로 k 의 통행량
- p_{od}^k = 기종점 쌍 od 간의 경로 k 의 선택확률
- C_{od}^k = 기종점 쌍 od 간의 경로 k 의 인지통행비용
- C_a = 링크 a 의 인지통행비용

2.2 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 불완전한 정보를 가지고 있다.
- 가정 7: 통행자는 자신의 인지통행비용을 최소화하는 경로를 선택하며, 통행자가 인지하는 통행비용의 관측 불가능한 비용은 비관련 대안간의 독립성(I.I.A.)의 속성을 가지고 검בל 분포를 따른다.

2.3 수리 모형

경로구간으로 확장한 네트워크에 대해서 고려하였다. 일반적으로 확률적 통행배정모형의 균형조건(어떤 통행자도 일반적으로 자신의 경로를 변경하여 그의 인지통행시간을 감소시킬 수 없는 상태를 확률적 사용자 균형(SUE) 상태라고 함. 이 때, 특정 경로의 선택확률은 주어진 기종점 쌍에 대해서 고려되는 경로들 중에 해당경로의 인지통행비용이 가장 적을 확률과 동일함)은 다음의 식과 같다.

$$v_{od}^k = v_{od} \cdot p_{od}^k \quad (1)$$

$$\forall o \in O, \forall d \in D, \forall k \in R_{od}$$

$$s.t. \quad c_a = c_a(v_a), \forall a \in A$$

$$v_{od} = \sum_{k \in R_{od}} v_{od}^k, \forall o \in O, \forall d \in D$$

여기서, $p_{od}^k = \Pr(C_{od}^k \leq C_{od}^l, \forall l \neq k \in R_{od})$

$$C_{od}^k = \sum_{a \in R_{od}^k} C_a \cdot \delta_a^{r,k}, \forall o \in O, \forall d \in D, \forall k \in R_{od}$$

$$c_a = E[C_a], \forall a \in A$$

$$v_a = \sum_{o \in O} \sum_{d \in D} \sum_{k \in R_{od}} v_{od}^k \cdot \delta_{od}^{a,k}, \forall a \in A$$

$$\delta_{od}^{a,k} = \begin{cases} 1, & \text{if } a \in R_{od}^k \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

링크통행비용이 링크통행량에 대해서 독립적이라면, 즉, 링크통행비용이 링크통행량에 관계없이 일정한 값을 가지면 위의 식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$v_{od}^k = v_{od} \cdot p_{od}^k \quad (2)$$

$$\forall o \in O, \forall d \in D, \forall k \in R_{od}$$

$$s.t. v_{od} = \sum_{k \in R_{od}} v_{od}^k, \forall o \in O, \forall d \in D$$

여기서, $p_{od}^k = \Pr(C_{od}^k \leq C_{od}^l, \forall l \neq k \in R_{od})$

$$C_{od}^k = \sum_{a \in R_{od}^k} C_a \cdot \delta_{od}^{a,k}, \forall o \in O, \forall d \in D, \forall k \in R_{od}$$

위의 식에서 김정태-이진선[1]의 연구에서 제시한 방법에 의해서 다음의 식이 성립한다.

$$v_{od}^k = v_{od} \cdot \frac{\exp[-\theta \cdot c_{od}^k]}{\sum_{l \in R_{od}} \exp[-\theta \cdot c_{od}^l]} \quad (3)$$

$$\forall o \in O, \forall d \in D, \forall k \in R_{od}$$

따라서 링크통행비용이 링크통행량에 관계없이 일정한 값을 가지게 되면 확률선택모형으로서 로짓모형을 사용하여 한 번에 균형 상태의 경로통행량을 구할 수 있게 된다.

2.4 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_{xy}^l ($x, y \in N_s$), 링크집합 J_{xy}^l ($x, y \in N_s$)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 ($\in S$) 선택

$$S = S - \{l\}$$

[단계 1.3] 노선구간 생성 및 경로구간 운행노선 정보 수정

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

$a \in A_r$ 인 경우

$$L_a = L_a + \{l\}$$

$a \notin A_r$ 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

$$c_a^l = a_1 \cdot tt_a + a_2 \cdot \frac{\alpha}{f_a^l} + a_3 \cdot tc_a \quad (4)$$

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

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

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

$$c_a^m = \frac{\sum_{l \in L_a^m} (c_a^l - \frac{\alpha}{f_a^l}) \cdot f_a^l}{\sum_{l \in L_a^m} f_a^l} + \frac{\alpha}{\sum_{l \in L_a^m} f_a^l} \quad (5)$$

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

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

$$p_a^m = \sum_{l \in L_a^m} p_a^l \quad (6)$$

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

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

$$c_a = \sum_{l \in U_a} p_a^l \cdot c_a^l \quad (7)$$

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

[단계 3] 통행배정 대상경로 선정

◦ K -최단경로 탐색 알고리즘을 이용하여 모든 기종점 od 에 대해서 K 개의 경로로 구성되는 통행배정 대상 경로의 집합 R_{od} 를 결정하고, 통행배정 대상경로의 경로정보 R_{od}^k 저장

[단계 4] 통행량 배정

[단계 4.0] 통행배정 대상경로 집합에 대해 다음의 로짓 모형을 이용하여 경로별 통행량 배정

$$v_{od}^k = v_{od} \cdot \frac{\exp[-\theta \cdot c_{od}^k]}{\sum_{l \in R_{od}} \exp[-\theta \cdot c_{od}^l]} \quad (8)$$

$$\forall o \in O, \forall d \in D, \forall k \in R_{od}$$

여기서, $\theta =$ 분산계수

[단계 4.1] 경로 통행량을 링크 통행량으로 배정

$$v_a = \sum_{o \in O} \sum_{d \in D} \sum_{k \in R_{od}} v_{od}^k \cdot \delta_{od}^{k,a} \quad (9)$$

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

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

[단계 4.2] 링크(경로구간) 통행량을 노선구간 통행량으로 배정

◦ 경로구간 통행량을 통합노선의 노선구간 통행량으로 배정

$$v_a^l = p_a^l \cdot v_a \quad (10)$$

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

◦ 통합노선의 노선구간 통행량을 개별노선의 노선구간 통행량으로 배정

$$v_a^l = \frac{p_a^l}{p_a^m} \cdot v_a^m = p_a^l \cdot v_a \quad (11)$$

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

[단계 4.3] 노선구간 통행량을 단위노선구간(line segment) 통행량으로 배정

$$v_m^l = \sum_{a \in A_r} v_a^l \cdot \delta_{a,m}^l \quad (12)$$

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

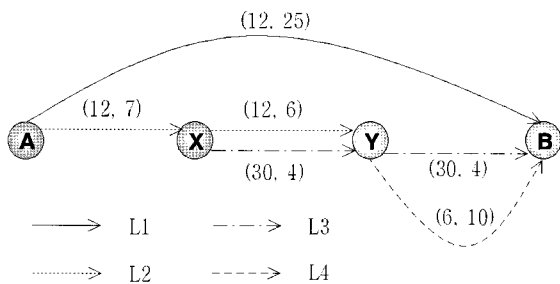
$$\text{여기서, } \delta_{a,m}^l = \begin{cases} 1, & \text{if } m \in a \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

3. 모형의 검증 및 사례 분석

3.1 선형 네트워크에서의 검증

3.1.1 가상 네트워크의 설명

선형의 가상 네트워크는 최적전략 개념을 도입한 연구에서 많이 사용된 네트워크를 활용하였으며(Spiess-Florian [5], De Cea-Fernández[9]), 운행노선의 운행간격과 링크통행시간 정보는 Fig. 2와 같다. 수요는 A에서 B로 100이 주어지는 것으로 설정하였다.



주: (배차간격, 링크통행시간)

Fig. 2. 선형 네트워크

3.1.2 네트워크 확장 및 노선의 분류

네트워크를 확장하기 위해서는 순차적으로 노선 정보를 읽고, 링크(경로구간)와 노드를 생성하게 된다. 먼저 노선 1의 정보를 읽으면 링크(A→B)가 생성된다. 다음으로 노선 2를 읽는 과정에서 노드 A와 X, 노드 A와 Y, 노드 X와 Y를 연결하는 링크를 생성하게 된다. 노선 3을 읽는 과정에서 노드 X와 Y, 노드 Y와 B, 노드 X와 B를 연결하는 링크가 생성되는데, 노드 X와 Y를 연결하는 링크는 이미 생성된 링크이므로 링크 정보만 수정한다. 마지막으로 노선 4를 읽어 노드 Y와 B를 연결하는 링크 정보를 변경한다. 환승이 가능한 역에서는 노드간의 환승벌점을 줄 수 있도록 도착노드는 X₁, Y₁, 출발노드는 X₂, Y₂로 변경하고, 링크(X₁→X₂), (Y₁→Y₂)를 생성하면 네트워크 확장은 완료된다.

네트워크의 확장이 완료되면 Fig. 3과 같이 노드 및 링크가 확장되고 각 링크(경로구간)를 운행하는 노선의 정보가 저장된다. 각각의 노선의 특성이 상이하기 때문에 동일한 노선그룹으로 묶어줄 노선은 없는 것으로 설정한다.

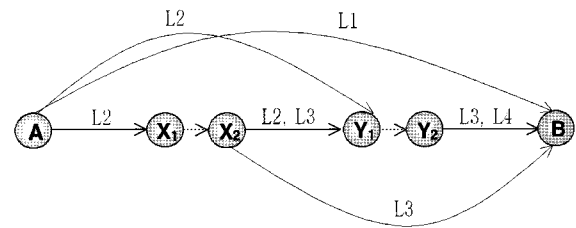


Fig. 3. 경로구간으로 확장된 선형 네트워크

3.1.3 경로구간의 일반화 비용 산정

일반화 비용을 산정할 때 실질적으로는 운임이 반영되어야 하지만 주어진 정보가 없으므로 고려하지 않는다. 먼저 모든 경로구간을 운행하는 노선별로 일반화 비용을 산정하면 다음과 같다.

Table 1. 선형 네트워크의 경로구간별, 노선별 일반화 비용

경로구간	노선 1	노선 2	노선 3	노선 4
(A→B)	31	-	-	-
(A→X ₁)	-	13	-	-
(A→Y ₁)	-	19	-	-
(X ₂ →Y ₁)	-	12	19	-
(X ₂ →B)	-	-	23	-
(Y ₂ →B)	-	-	19	13

통합노선은 고려할 필요가 없으므로 각 노선의 선택확률을 먼저 계산하여야 한다. 주어진 정보가 제한적이기 때문에

에 각 경로구간을 운행하는 노선의 선택확률은 각 노선의 일반화 비용에 반비례한다고 가정하여 구하였다(다항로짓 모형의 빈도와 통행시간에 대한 계수를 적용하여 구할 수도 있는데, 김경태·이진선[1]의 연구에서 제안한 모형을 활용하면 노선선택확률은 경로구간 ($X_2 \rightarrow Y_1$)는 0.543(노선 2), 0.457(노선 3), 경로구간 ($Y_1 \rightarrow B$)는 0.391(노선 3), 0.609(노선 4)가 됨). 따라서 2개 노선 이상이 운행하는 경로구간 ($X_2 \rightarrow Y_1$)과 ($Y_2 \rightarrow B$)를 운행하는 노선의 선택확률은 다음과 같이 구할 수 있다.

□ 경로구간 ($X_2 \rightarrow Y_1$)에 대해서

$$p^{L2} = \frac{1}{12} / \left[\frac{1}{12} + \frac{1}{19} \right] = 0.613$$

$$p^{L3} = 1 - p^{L2} = 0.387$$

□ 경로구간 ($Y_1 \rightarrow B$)에 대해서

$$p^{L3} = \frac{1}{19} / \left[\frac{1}{19} + \frac{1}{13} \right] = 0.406$$

$$p^{L4} = 1 - p^{L3} = 0.594$$

따라서 모든 경로구간의 일반화 비용은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$c_{(A \rightarrow B)} = \frac{12}{2} + 25 = 31, \quad c_{(A \rightarrow X_1)} = \frac{12}{2} + 7 = 13$$

$$c_{(A \rightarrow Y_1)} = \frac{12}{2} + 13 = 19, \quad c_{(X_2 \rightarrow B)} = \frac{30}{2} + 8 = 23$$

$$c_{(X_2 \rightarrow Y_1)} = \left(\frac{12}{2} + 6 \right) \cdot 0.613 + \left(\frac{30}{2} + 6 \right) \cdot 0.387 = 14.71$$

$$c_{(Y_2 \rightarrow B)} = \left(\frac{30}{2} + 4 \right) \cdot 0.406 + \left(\frac{6}{2} + 10 \right) \cdot 0.594 = 15.44$$

3.1.4 통행배정 대상경로 선정

네트워크가 단순하기 때문에 모든 경로에 대해서 일반화 비용을 계산하였으며, 환승 벌점은 따로 설정하지 않았다 ($c_{(X_1 \rightarrow X_2)} = c_{(Y_1 \rightarrow Y_2)} = 0$). 최단경로는 $A \rightarrow B$ 가 되고, 4개 경로에 대해서 로짓모형을 이용하여 통행량을 배정한다.

$$c_{AB}^{A \rightarrow B} = c_{(A \rightarrow B)} = 31$$

$$c_{AB}^{A \rightarrow X_1 \rightarrow X_2 \rightarrow B} = c_{(A \rightarrow X_1)} + c_{(X_1 \rightarrow X_2)} + c_{(X_2 \rightarrow B)} = 36$$

$$c_{AB}^{A \rightarrow X_1 \rightarrow X_2 \rightarrow Y_1 \rightarrow Y_2 \rightarrow B} = c_{(A \rightarrow X_1)} + c_{(X_1 \rightarrow X_2)} + c_{(X_2 \rightarrow Y_1)} + c_{(Y_1 \rightarrow Y_2)} + c_{(Y_2 \rightarrow B)} = 43.15$$

$$c_{AB}^{A \rightarrow Y_1 \rightarrow Y_2 \rightarrow B} = c_{(A \rightarrow Y_1)} + c_{(Y_1 \rightarrow Y_2)} + c_{(Y_2 \rightarrow B)} = 34.44$$

3.1.5 통행량 배정

경로별 통행량의 배정은 다항로짓모형을 이용하여 구할 수 있다. 여기서 분산계수를 어떻게 설정하는가에 따라서

통행량이 결정되는데, 분산계수가 작을수록 모든 경로에 배정되는 통행량은 같아지고, 클수록 최단경로에 배정되는 통행량이 커지게 된다. 분산계수의 값이 0.1, 0.2, 0.5인 경우의 분석 결과는 다음과 같다.

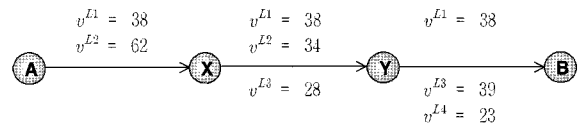


Fig. 4. 선형 네트워크에서의 배정 결과 (분산계수=0.1)

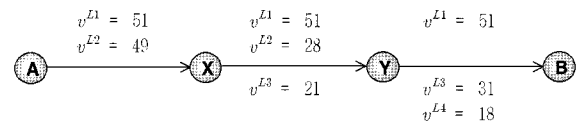


Fig. 5. 선형 네트워크에서의 배정 결과 (분산계수=0.2)

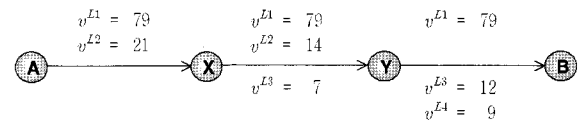


Fig. 6. 선형 네트워크에서의 배정 결과 (분산계수=0.5)

3.1.6 기존 모형과의 비교

가상의 네트워크에서는 기존의 모형과 직접적으로 정량적인 비교는 비교의 기준이 명확하지 않기 때문에 가능하지 않다. 다만 기존 모형의 분석결과를 제시하는 것은 본 연구에서 제시한 모형의 결과가 기존 모형의 결과와 얼마나 유사한 결과를 도출하는 지를 확인하기 위함이다.

De Cea-Fernández[9] 모형의 결과는 Y까지의 노선 2를 이용하고 Y에서는 노선 3과 4 중에서 먼저 도착하는 노선의 차량에 탑승하게 되며 평균통행시간은 30.5분이 걸린다 (Le Clercq[1], Chriqui-Robillard[2]) 모형의 적용 결과도 동일함). 만약 환승벌점을 0.5분보다 크게 적용하면 김경태 등[2]이 제시한 결정적 모형의 결과와 같아진다.

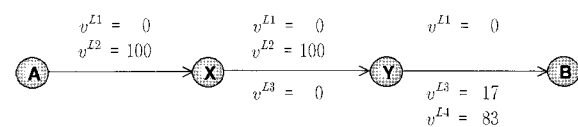


Fig. 7. De Cea-Fernández[9] 모형 결과 (선형 네트워크)

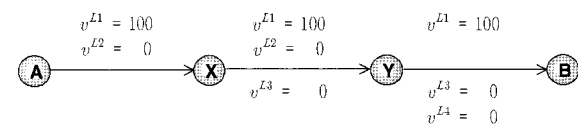


Fig. 8. 김경태 등[2] 모형 결과 (선형 네트워크)

최적전략 통행배정모형은 보다 합리적인 결과를 보여주

고 있는데, 가상 네트워크의 특수성에 기인한다. 단순한 네트워크에서의 전량 통행배정은 합리적이지 못한 결과를 도출할 가능성이 많으며, 보다 복잡한 형태의 네트워크에서는 이러한 현상은 다소 완화될 수 있다.

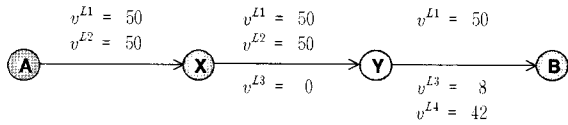


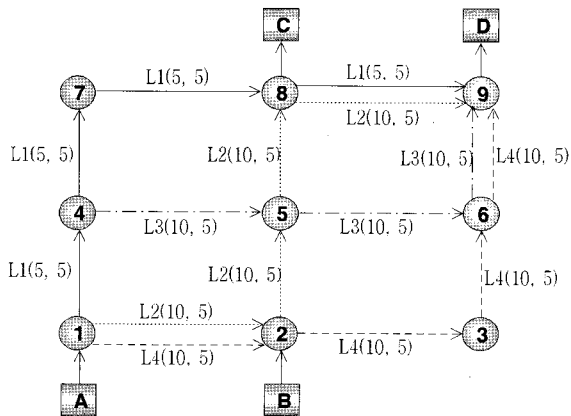
Fig. 9. 최적전략 통행배정모형의 결과 (선형 네트워크)

본 연구에서 제시한 모형은 분산계수의 값이 0.2인 경우가 최적전략 통행배정모형과 비교적 유사한 해를 가지는 것으로 분석되었지만 최적전략 모형에서는 X→Y 구간에서 노선 3에 통행량이 전혀 배정되지 않았지만 본 모형에서는 통행량이 배정되는 결과가 나왔다. 실제로 운행되는 노선의 통행시간이 크게 차이가 나지 않음에도 불구하고 통행량이 전혀 배정되지 않는 것은 현실에서는 일어나기 힘든 일이다. 따라서 적정 통행량이 배정되는 것이 보다 현실적이다.

3.2 격자형 네트워크에서의 검증

3.2.1 가상 네트워크의 설명

이성모 등[11]이 제시한 격자형 가상 네트워크 및 운행노선의 정보는 다음과 같다. 이성모 등[11]의 연구는 용량을 고려한 모형으로서 가상 네트워크의 경우 혼잡이 발생하는 상황이 발생하도록 네트워크를 구축하였으므로 본 연구에서 제시한 모형이 용량을 초과하는 현상이 발생한다. 그러나 혼잡을 고려하지 않는 모형간의 비교는 가능하고 본 모형의 적용과정을 쉽게 이해할 수 있다는 측면에서 사용하였다. 수송수요는 A에서 C, D로 각각 400, B에서 D로 300이고, 각 기종점에 연결되는 링크의 통행비용은 0으로 주어져 있다.



주: (배차간격, 링크통행시간)

Fig. 10. 격자형 네트워크

3.2.2 네트워크 확장 및 노선의 분류

모형의 해법에 제시된 방법을 사용하여 네트워크를 확장하면 Fig. 11와 같다. 선형 네트워크에서 네트워크를 확장하는 방안에 대해서 상세하게 설명하였으므로 여기서는 최종 결과만을 제시하였다. 환승 별점은 부과하지 않으므로 네트워크를 보다 쉽게 이해하기 위해서 노드는 확장하지 않았다. 다만 보행링크가 연결되는 경우에는 노드를 확장할 때 주의사항은 그림에서 보는 바와 같이 환승별점이 포함되지 않도록 연결하여야 한다.

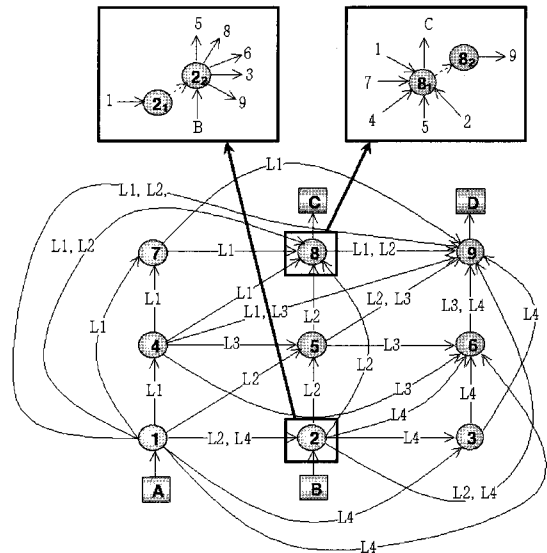


Fig. 11. 경로구간으로 확장된 격자형 네트워크

생성된 링크(경로구간)는 모두 27개이며, 운임에 대한 정보는 없으므로 고려하지 않았다. 모든 노선은 통행시간의 속성이 같기 때문에 동일한 경로구간에 포함되어 있는 노선들은 모두 동일한 그룹으로 통합하였고, 모든 경로구간은 하나의 통합노선이 운행하는 것으로 설정할 수 있다.

3.2.3 경로구간 일반화 비용 및 통행배정 대상경로 선정

경로구간의 일반화 비용과 통행배정 대상경로의 선정은 선형 네트워크에서와 동일한 방법으로 산정하였다. 모든 노선의 링크통행시간이 동일하기 때문에 통합을 할 때 빈도를 합산하는 방식을 적용하며, 격자형 가상 네트워크에서 모든 경로구간을 운행하는 노선은 하나의 통합노선으로 설정된다. 경로구간별 각 노선을 이용할 선택확률의 계산은 모든 경로구간의 통합노선이 1개이기 때문에 통합노선의 선택확률은 1이 되고, 모든 개별노선의 선택확률은 단순히 빈도에 비례하는 것으로 계산할 수 있다. 경로구간별 일반화 비용의 실제 계산값은 생략하였다.

통행배정 대상경로를 보면 A에서 D로의 경로는 모두

26개, A에서 C, B에서 D로의 경로는 각각 8개가 있다. 경로의 수가 많지 않으므로 모든 경로에 대해서 통행량을 배정하는 것으로 하였으며, 계산값은 생략하였다.

3.2.4 통행량 배정

경로별 통행량의 배정은 다항로짓모형을 이용하여 구할 수 있다. 여기서 분산계수를 어떻게 설정하는가에 따라서 통행량이 결정되는데, 분산계수가 작을수록 모든 경로에 배정되는 통행량은 같아지고, 클수록 최단경로에 배정되는 통행량이 커지게 된다. 노선구간별, 노선별 통행량 배정은 경로별 통행량을 이용하여 구할 수 있으며, 계산과정은 생략하였다.

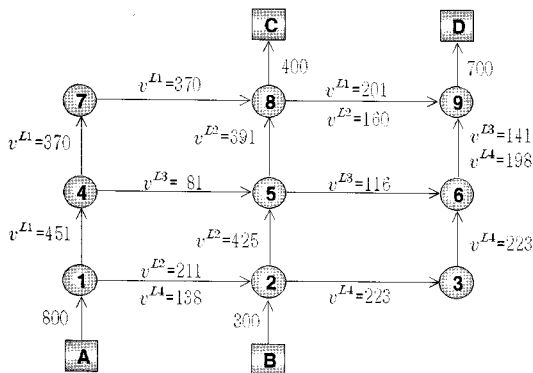


Fig. 12. 격자형 네트워크에서의 배정 결과 (분산계수=0.1)

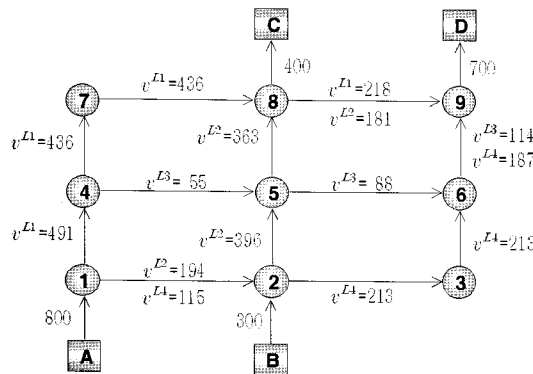


Fig. 13. 격자형 네트워크에서의 배정 결과 (분산계수=0.2)

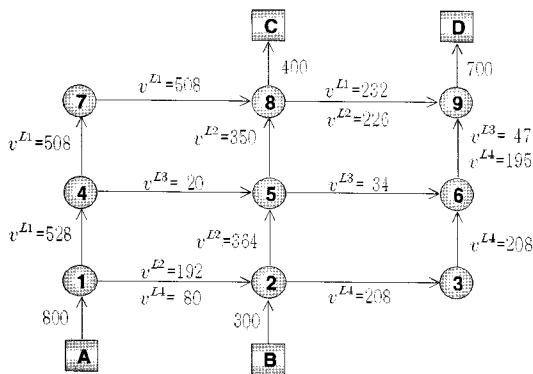


Fig. 14. 격자형 네트워크에서의 배정 결과 (분산계수=0.5)

3.2.5 기존 모형과의 비교

최적전략 통행배정모형, De Cea-Fernández[9] 모형, 김경태 등[2]의 분석결과는 동일하였다. 격자형 네트워크를 운행하는 노선의 특성이 빈도에 의해서만 구별될 뿐 차내 시간이 동일하기 때문에 어떠한 모형을 사용하더라도 결정적 통행배정은 동일한 결과를 도출하는 것으로 분석되었다.

선형 네트워크에서의 결과와 유사하게 본 연구에서 제시한 모형은 분산계수의 값이 0.2인 경우가 비교 모형들과 비교적 유사한 해를 가지는 것으로 분석되었다. 비교 모형에서는 4→5, 5→6 구간에서 노선 3에 통행량이 전혀 배정되지 않았지만 본 모형에서는 통행량이 각각 55, 88이 배정되는 결과가 나왔다. 노선 3을 이용하더라도 통행시간이 크게 차이가 나지 않기 때문에 적정량의 통행량이 배정되는 것이 보다 현실적이다.

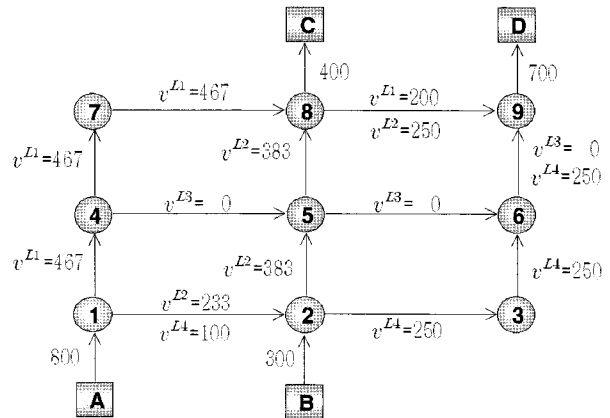


Fig. 15. 격자형 네트워크에서의 기존모형 배정 결과

3.3 사례 분석

3.3.1 분석의 전제

지역간 철도의 특징을 반영할 수 있는 실제 네트워크의 일부분을 이용하여 소규모 네트워크를 구성하여 기존 대중교통 통행배정모형과 본 모형과의 결과를 비교하였다. 네트워크는 김경태 등[2]이 제시한 네트워크를 이용하였고, 비교 모형으로는 혼잡을 반영하지 않는 모형으로서 김경태 등[2] 결정적 통행배정모형, 최적전략 통행배정모형, De Cea-Fernández[9] 모형, Dial[12] 알고리즘을 이용한 확률적 다중경로 통행배정모형을 선정하였다.

기존 모형의 분석 결과는 김경태 등[2]이 제시한 연구를 인용하였고, 본 분석에서는 김경태 등[2]이 제시한 내용에서 언급하지 않은 부분에 대해서만 기술하였다.

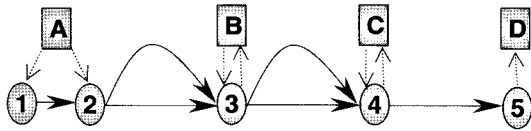


Fig. 17. 사례 네트워크

3.3.2 본 모형 적용 결과

[단계 3]에서 통행배정 대상경로를 탐색하게 되는데, 분석 결과는 Table 3과 같다.

Table 2. 사례 네트워크의 통행배정 대상경로

기종점	통행배정 대상 경로 및 일반화 비용(c_{od}^k)	
	경로	일반화 비용
A, B	A→②→③→B	323
A, C	A→②→④→C	508
	A→①→③→④→C	551
	A→②→③→④→C	629
A, D	A→②→⑤→D	667
	A→①→③→⑤→D	718
	A→②→③→⑤→D	796
	A→①→④→⑤→D	720
	A→②→④→⑤→D	795
	A→①→③→④→⑤→D	839
	A→②→③→④→⑤→D	917
B, C	-	-
B, D	B→③→④→⑤→D	495
C, D	-	-

마지막으로 [단계 4]의 노선별 통행량을 배정하는 식을 적용하여 통행량을 배정하는데, 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 3. 사례 네트워크의 본 모형 통행배정 결과

노드	KTX(통행/일)			새마을(통행/일)			무궁화(통행/일)		
	승차	하차	재차	승차	하차	재차	승차	하차	재차
①	16,177	-	16,177	544	-	544	1,229	-	1,229
②	652	-	16,830	-	-	544	-	-	1,229
③	2,127	3,148	15,808	123	239	428	291	762	757
④	1,003	7,724	9,087	219	210	437	950	427	1,280
⑤	-	9,087	-	-	437	-	-	1,280	-

주: RMSE = 118.8, Theil's U = 0.0092

3.3.3 비교 모형 적용 결과

비교모형의 분석 과정은 김경태 등[2]의 연구에서 제시

한 방법을 적용하였으며, 배정 결과는 다음과 같다.

Table 4. 김경태 등[2] 모형 통행배정 결과

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

주: RMSE = 245.7, Theil's U = 0.0189

Table 5. 최적전략 통행배정모형 배정 결과

노드	KTX(통행/일)			새마을(통행/일)			무궁화(통행/일)		
	승차	하차	재차	승차	하차	재차	승차	하차	재차
①	5,326	-	5,326	1,256	-	1,256	12,021	-	12,021
②	0	-	5,326	-	-	1,256	-	-	12,021
③	1,637	523	6,440	0	1,256	0	835	2,302	10,553
④	267	4,608	2,099	0	0	0	1,872	3,720	8,705
⑤	-	2,099	-	-	0	-	-	-	8,705

주: RMSE = 6,018.0, Theil's U = 0.5107

Table 6. De Cea-Fernández[9] 모형 배정 결과

노드	KTX(통행/일)			새마을(통행/일)			무궁화(통행/일)		
	승차	하차	재차	승차	하차	재차	승차	하차	재차
①	9,033	-	9,033	1,020	-	1,020	8,549	-	8,549
②	0	-	9,033	-	-	1,020	-	-	8,549
③	1,660	567	10,126	0	1,020	0	812	2,494	6,867
④	0	4,919	5,207	642	0	642	1,497	3,409	4,955
⑤	-	5,207	-	-	642	-	-	-	4,955

주: RMSE = 3,886.3, Theil's U = 0.3402

Table 7. 확률적 다중경로 통행배정모형 배정 결과

노드	KTX(통행/일)			새마을(통행/일)			무궁화(통행/일)		
	승차	하차	재차	승차	하차	재차	승차	하차	재차
①	14,783	-	14,783	796	-	796	1,193	-	1,193
②	1,829	-	16,613	-	-	796	-	-	1,193
③	2,240	3,587	15,266	91	240	647	141	254	1,081
④	1,865	7,459	9,672	77	413	310	197	456	822
⑤	-	9,672	-	-	310	-	-	-	822

주: RMSE = 538.9, Theil's U = 0.0424

3.3.4 모형의 비교

모형 D를 제외한 결정적 통행배정모형의 예측 결과가 매우 비합리적으로 예측되었다. 모형 A와 모형 D의 비교

는 두 모형이 모두 예측력이 크게 떨어진다는 점에서 특정 모형의 결과가 우수하다고 판단하기에는 무리가 있다. 확률적 다중경로 통행배정모형이 모형 A와 D보다는 나은 결과를 보이는 것으로 분석되었지만, 경로구간의 노선선택확률의 개념을 도입한 결정적 모형 D에 비해서는 예측 능력이 떨어지는 것으로 분석되었고, 모형 D를 보다 일반화시킨 모형 E의 예측 능력이 가장 우수한 것으로 분석되었다.

모형 A, B, C의 경우 차종별 통행시간가치를 조정하거나, 특성이 다른 KTX를 제외한 일반철도만을 대상으로 한정하여 분석하여도 모형의 예측력은 그다지 향상되지 않는 것으로 분석되었다.

Table 8. 모형의 비교

구분	모형 A ¹⁾	모형 B ²⁾	모형 C ³⁾	모형 D ⁴⁾	모형 E ⁵⁾
RMSE	6,108.0	3,886.3	538.9	245.7	118.8
Theil's U	0.5107	0.3402	0.0424	0.0189	0.0092

- 주1: 최적전략 통행배정모형
 주2: De Cea-Fernández[9] 모형
 주3: 확률적 다중경로 통행배정모형
 주4: 김경태 등[2]이 제시한 모형
 주5: 본 연구에서 제시한 모형

지역간 철도에서 경로구간의 노선선택확률의 개념을 도입한 통행배정모형이 우수한 결과를 보이는 것은 노선별 분담률을 어떤 방식으로 산정하는가에 대한 차이에서 비롯된다. 기존의 모형은 빈도와 운임을 모두 차내시간의 가치로 환산한 일반화 비용을 이용하여 노선별 분담률을 산정하고 있지만, 경로구간의 노선선택확률을 도입할 경우 빈도를 대기시간으로 환산하지 않고 빈도 자체가 가지는 영향력을 활용할 수 있으며, 차내시간과 차종에 대한 선호도를 반영할 수 있기 때문이다.

비록 사례 네트워크가 지역간 철도에 대해서 구성한 것이므로 지역간 철도에 한정된 분석이기는 하지만, 본 연구에서 제시한 통행배정모형이 보다 현실을 정확하게 모사할 수 있는 것으로 결론지을 수 있다. 또한 본 통행배정모형에 의해서 분석한 결과는 복잡한 운임체계를 가지고 있는 지역간 철도의 운임을 기존의 모형보다 현실에 맞게 반영할 수 있으며, 통행시간과 통행비용이 합리적으로 산정될 수 있다. 또한 지역간 철도의 역간수요도 모형의 적용 과정에서 도출될 수 있다는 장점이 있다.

5. 결론 및 향후 연구 과제

본 연구에서는 경로구간의 노선선택확률을 도입하여 지역간 철도의 특징을 합리적으로 반영할 수 있었으며, 기존

의 결정적 모형보다 일반화된 확률적 대중교통 통행배정모형을 제시하였다. 경로구간 기반의 통행배정모형은 지역간 철도의 실제 자료를 근거로 한 사례 네트워크에서 최적전략의 개념이 포함된 모형이나 일반적인 확률적 다중경로 통행배정모형과 비교하였을 때, 지역간 철도의 수요예측에 보다 효율적인 것으로 분석되었다. 본 연구의 핵심적인 개념인 제한적 최적전략이론도 대규모 네트워크나 환승역과 노선이 복잡하게 얽혀있는 도시 교통체계에는 적용성에 어려움이 존재할 수 있다. 따라서 본 연구의 결과가 실제로 활용되기 위해서는 대규모 네트워크에 대해서도 동일한 결과를 도출할 수 있는 지에 대한 추가적인 검증이 필요하다.

참고 문헌

1. 김경태, 이진선(2007), "다항로짓모형을 이용한 지역간 철도통행 연구," 대한교통학회지, 제25권 제1호, pp. 109-119.
2. 김경태, 이성모, 권용석(2008), "지역간 철도의 결정적 통행배정모형 구축 연구," 한국철도학회 논문집, 제11권 제6호, pp. 550-561.
3. Le Clercq, F.(1972), "A public transport assignment method," Traffic Engineering and Control, Vol. 13, No. 6, pp. 91-96.
4. Chriqui, C. and Robillard, P.(1975), "Common bus lines," Transportation Science, pp. 115-121.
5. Spiess, H. and Florian, M.(1989), "Optimal strategies: a new assignment model for transit networks," Transportation Research B(23), pp. 83-102.
6. Spiess, H.(1993), "Transit equilibrium assignment based on optimal strategies: an implementation in EMME/2," EMME/2 Support Center.
7. Wu, J. H., Florian, M., and Marcotte, P.(1994), "Transit equilibrium assignment: a model and solution algorithms," Transportation Science, Vol. 28, No. 3, pp. 193-203.
8. Jayakrishnan, R., McNally, M.G., and Marar, A.G.(1995), "Recursive structure for exact line probabilities and expected waiting times in multipath transit assignment," Transportation Research Record 1493, pp. 178-187.
9. De Cea, J. and Fernández, E.(1989), "Transit assignment to minimal routes: an efficient new algorithm," Traffic Engineering and Control, pp. 491-494.
10. De Cea, J. and Fernández, E.(1993), "Transit assignment for congested public transport systems: an equilibrium model," Transportation Science, Vol. 27, No. 2, pp. 133-147.
11. 이성모, 유경상, 전경수(1996), "차량용량을 고려한 대중교통 통행배정모형구축에 관한 연구," 대한교통학회지, 제14권 제3호, pp. 27-44.
12. Dial, R.B.(1967), "Transit pathfinder algorithm," Highway Research Record 205, pp. 67-85.
13. 김경태(2007), "지역간 철도 통행배정모형 구축 연구," 서울대학교 박사학위논문.
14. Nielsen, O.A.(2000), "A stochastic transit assignment model considering differences in passengers utility functions," Trans-

- portation Research B(34), pp. 377-402.
15. Nguyen, S. and Pallottino, S.(1988), "Equilibrium traffic assignment for large scale transit network," European Journal of Operational Research, Vol. 37, No. 2, pp. 176-186.
 16. Nguyen, S., Pallottino, S., and Gendreau M.(1998), "Implicit enumeration of hyperpaths in a logit model for transit networks," Transportation Science, Vol. 32, pp. 54-64.
 17. Lam, W.H.K., Gao, Z.Y., Chan, K.S., and Yang, H.(1999), "A stochastic user equilibrium assignment model for congested transit networks," Transportation Research B(33), pp. 351-368.
 18. Cominetti, R. and Correa, J.(2001), "Common-lines and passenger assignment in congested transit networks," Transportation Science, Vol. 35, No. 3, pp. 250-267, 2001
 19. Kurauchi, F., Bell, M.G.H., and Schmöcker, J.D.(2003), "Capacity constrained transit assignment with common lines," Journal of Mathematical Modeling and Algorithms, Vol. 2, No. 4, pp. 309-327.
 20. Gao, Z., Sun, H., and Shan, L.L.(2004), "A continuous equilibrium network design model and algorithm for transit systems," Transportation Research B(38), pp. 235-250.
 21. Zhou, J., Lam, W.H.K., Heydecker, B.G.(2005), "The generalized nash equilibrium model for oligopolistic transit market with elastic demand," Transportation Research B(39), pp. 519-544.
 22. Cepeda, M., Cominetti, R., and Florian, M.(2006), "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.
- 접수일(2009년 2월 3일), 수정일(2009년 4월 21일),
게재확정일(2009년 8월 4일)