

지역간 철도의 노선계획 최적화 모형

오동규¹ · 고승영² · 강승모^{1*}

¹ 고려대학교 건축사회환경공학부, ² 서울대학교 건설환경공학부

Line Planning Optimization Model for Intercity Railway

OH, Dongkyu¹ · KHO, Seung-Young² · KANG, Seungmo^{1*}

¹ School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

² Dept. of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University, Seoul 151-744, Korea

Abstract

The purpose of this research is to optimize the line planning of the intercity passenger railway. In this study, the line planning problem has been formulated into a mixed integer programming by minimizing both user costs (passenger's total travel time) and operator costs (operation, maintenance and vehicle costs) with multiple train types. As a solution algorithm, the branch-and-bound method is used to solve this problem. The change of travel demand, train speed and the number of schedules have been tested through sensitivity analysis. The optimal stop-schedules and frequency as well as system split with respect to each train type have been found in the case study of Kyoung-bu railway line in Korea. The model and results of this research are useful to make a decision for railway operation strategy, to analyze the efficiency of new railway systems and to evaluate the social costs of users and operators.

본 연구는 지역간 여객 철도의 노선계획을 최적화하는 방법에 관한 연구이다. 본 연구의 노선계획 모형은 다양한 차종이 운용되는 철도노선에서 이용자비용(이용자의 총 통행시간)과 운영자비용(열차 운행비용, 유지·보수비용, 차량 구입비용)의 합을 최소화하고자 하는 혼합정수계획 수리모형으로 구축되었고, 모형의 해법으로 분기 한정법이 사용되었다. 수요의 변화, 열차 속도의 변화, 정차스케줄 수의 변화 등에 대한 민감도 분석 결과도 제시하였고, 국내 경부선의 사례연구를 통하여 각 열차차종의 차종별 수요 분할 뿐만 아니라 최적 정차스케줄과 운행빈도를 동시에 산출할 수 있음을 보여주었다. 본 연구의 모형과 결과는 열차 운영 전략을 수립하거나 새로운 철도 시스템의 효율성을 분석하거나 이용자·운영자의 사회적 비용을 산정하는 경우 등에 적용될 수 있다.

Key Words

Line Planning, Mixed Integer Programming, Passenger Railway, Railway Operation, Stop-schedule
노선계획, 혼합정수모형, 여객철도, 철도운영, 정차스케줄

* : Corresponding Author
s_kang@korea.ac.kr, Phone:+81-2-3290-4862, Fax:+82-2-928-7656

Received 30 November 2012, Accepted 17 February 2013

I. 서론

그 동안 정부 주도로 제공되었던 대중교통서비스가 계획단계와 시설공급 단계를 지나 점차 운영·유지단계로 접어들면서 대중교통 시스템 운영의 효율성 제고를 위한 연구의 중요성이 증대되고 있는데, 특히 대중교통 시스템의 효율성을 증진시키기 위한 노력은 도시부 대중교통보다는 지역간 대중교통에, 버스 보다는 철도에서 보다 큰 효과를 나타낼 수 있을 것으로 기대되어 지역간 여객 철도의 운영 효율성을 증진시키기 위한 연구가 필요한 시점이다.

지역간 철도 시스템에 관한 연구는 수요예측, 노선 설계, 운영계획, 배차계획 그리고 철도시스템 등의 분야에서 각각 활발히 진행되어왔는데, 주로 철도시스템의 발전에 따라 그에 적합한 노선 결정과 운영계획 수립 등이 위주로 진행되었다. 최근에는 지역간 철도가 점차 고속화되고 전철화되면서 지역간 철도를 이용한 통근수요 등 유발수요가 발생하고, 이에 상응하는 역 위치 선정, 노선계획 수립 등에 대한 변화의 요구가 커지고 있는 추세이다.

이에 본 연구에서는 지역간 철도의 운영 효율성을 제고하기 위한 방법으로 총 사회적비용을 최소화할 수 있는 최적 노선계획 수립에 대한 연구를 수행하고 현실에서 적용 가능한 실용적 모형을 제시하고자 한다. 노선계획(line planning)이란 주로 철도 운영계획에서 사용되는 용어로 노선의 시·종점 결정, 중간 정차역 결정, 노선의 운행빈도 결정 등을 포함하는 계획 모형을 의미한다.

본 연구에서는 주어진 수요를 충족하는 범위 내에서 총 사회적비용(이용자비용+운영자비용)이 최소화되는 노선의 운영계획을 작성하는 모형을 제시하고 이에 대한 해법을 제시하며 현실 자료에 적용하여 적용성을 평가한 후 개선방향을 도출하고 모형의 의미에 대해 해석하도록 한다.

II. 이론적 배경

철도 운영계획(Railway operation planning)이란 주어진 철도 시스템 자원(선로, 신호, 열차 등)을 효율적으로 활용하여 운영 효율을 극대화시키기 위한 종합적인 계획으로 수요예측, 열차규모 산정, 열차 운행패턴 결정, 운행회수 산정, 배차계획 등 실질적으로 열차를 운행시키기 위한 계획을 의미한다.

Anthony(1965)는 여객철도 서비스의 계획 단계별

결정사항에 대한 구조 모형을 제시하였는데, 철도운영계획은 크게 전술적 결정단계(strategic decisions)와 전략적 결정단계(tactical decisions)로 나눌 수 있고, 전략단계에서는 가용한 자원의 획득, 개발계획을 수립하는 단계로, 전술단계에서는 최적화된 철도 서비스 계획을 수립하는 단계로 각각 구분하였다.

순수한 열차의 운영계획 측면에서 볼 때 철도 노선의 건설여부를 판단한 후에 수행되는 과정으로 크게 다섯 단계로 정의할 수 있는데, 수송수요산정(passenger demand estimation)-노선계획 수립(line planning)-열차시각표 작성(time scheduling)-열차 할당 및 배차(rolling stock plan)-승무원투입계획 작성(crew scheduling)의 단계로 각각 진행된다(Chang et al.(2000), Kim and Suh(2002), Goossens et al.(2004), Park et al.(2005), Huisman et al.(2005), Guihaire and Hao(2008) 등).

이 중 본 연구와 직접적인 관련이 있는 노선계획에 대해 살펴보면, 노선계획에 관한 연구의 모형은 노선을 정해진 계획에 의해 운행할 때 발생하는 이용자비용과 운영자비용을 최소화할 수 있는 정차패턴과 운행빈도를 결정하는 형태로 구축된다.

노선계획이 별도의 계획 모형으로 발전된 것은 Bussieck et al.(1996)의 연구가 출발이라 할 수 있는데, 이 연구의 모형은 직결승객수를 최대화하는 노선별 운행빈도를 결정하는 모형이다.

운영자비용과 이용자비용을 목적함수에 반영한 연구가 본격적으로 시작되었는데 운영자비용만을 고려한 연구(Claessens et al.(1998), Goossens et al.(2004), Goossens et al.(2006)), 이용자비용만을 고려한 연구(Schöbel et al.(2005)), 운영자비용과 이용자비용을 동시에 고려한 연구(Chang et al.(2000), Kim et al.(2002), Park et al.(2005), Borndörfer et al.(2007), Park et al.(2009)) 등으로 점차 목적함수의 구성이 복잡해지고 다양해지게 된다.

이상에서 논한 관련연구 고찰 결과 및 시사점을 바탕으로 본 연구의 진행 방향을 다음과 같이 설정하였다.

첫째, 본 연구는 지역간 여객철도의 노선계획의 효율성을 제고하기 위해 이용자비용·운영자비용 등 총 사회적비용이 최소화될 수 있는 최적화수리모형을 개발하고 그 효율성을 검토하며 결과 해석을 통해 대중교통계획 측면에서 유의미한 결과를 도출한다.

둘째, 모형의 해를 구하는 과정에서 시스템분할(차중

Table 1. Literature review and contribution of this study

Authors	Year	Objective function	Decision variable	Problem type*	Train class	Solution methods
Bussieck et al.	1996	Number of direct rides	Freq.	MIP	Multi	Branch and Bound
Claessens et al.	1998	Operating costs	Freq., Route choice	INLP, ILP	Multi	Branch and Bound
Chang et al.	2000	Operating costs+Halting loss time	Freq., Stop-schedule	MOLP	Single	Fuzzy mathematical programming
Kim et al.	2002	Operating costs+User costs Operational revenue	Freq.	MINLP	Multi	Heuristic
Goossens et al.	2004	Operating costs	Freq., Route choice	MIP	Single	Branch and Cut
Park et al.	2005	User costs+Operational revenue	Freq., Stop-schedule	MIP	Single	Branch and Bound
Schöbel et al.	2005	User costs(including transfer cost)	Freq.,Route choice	INLP	Single	LP-relaxation, Cutting plane
Goossens et al.	2006	Operating costs	Freq.	IP	Single	Self-developed program
Borndörfer et al.	2007	Operating costs+User costs	Freq., Route choice	Linear Problem	Single	LP-relaxation, Column-generation
Park et al.	2009	Operating costs+User costs	Freq.	IP	Single	Heuristic
This study		Operating costs+User costs	Freq. Stop-schedule	MIP	Multi	Branch and Bound

note*: MIP: Mixed Integer Problem, INLP: Integer Non-Linear Problem, ILP: Integer Linear Problem, MOLP: Multi-Objective Linear Problem, MINLP: Mixed Integer Non-Linear Problem, IP: Integer Problem

별 수요 구분), 시·종점 결정, 정차패턴(정차스케줄) 결정, 정차스케줄별 운행빈도 결정, 차종별 소요 대수를 동시에 산출하여 철도 노선의 운영을 위한 실질적인 변수들의 최적값을 도출한다.

셋째, 모형의 구조는 혼합정수계획법을 사용하고 풀이 해법으로는 분기한정법을 적용하여 가장 효율적으로 최적해를 찾을 수 있도록 도모한다.

마지막으로 연구에서 구축된 모형을 실제사례에 적용할 수 있는 방법론을 제시한다.

III. 노선계획 최적화모형

노선계획은 철도운영계획 단계 중 하나로 노선의 시·종점, 정차패턴(중간 정차역), 운행빈도 등의 결정이 주목적인 단계이다. 본 연구에서는 ①모형에서 사용되는 통행수요는 역간수요를 기본으로 하고 전체 역간수요는 불변입(노선계획은 수요예측에 의해 통행수요가 정해진 후에 이루어지는 단계이기 때문), ②수요 및 노선계획은 양방향을 기준으로 동일하다고 가정함, ③이용자의 접근 및 대기시간은 이용자비용에서 제외함(접근시간은 노선계획과 관계없는 외부변수이고, 지역간철도는 열차시각표에 맞추어 역에 도착하므로 대기시간이 큰 의미 없음), ④이용자비용과 운영자비용은 일반화비용계수를 이용

하여 금액으로 환산하고 총비용에 포함시킴, ⑤같은 차종의 열차는 같은 통행시간과 용량을 가진다고 가정하고 서로 다른 차종간 환승은 불가능함이라는 기본 가정을 전제로 수리모형을 구축하였다.

수리모형의 목적함수는 이용자비용과 운영자비용의 합으로 구성되고, 모형은 목적함수를 최소화하는 것으로 구성된다. 이용자비용과 운영자비용의 합을 총 사회적비용으로 정의하는데, 이용자비용은 이용자의 통행시간과 정차손실시간의 합으로 구성되고, 운영자비용은 고정운영비용과 가변운영비용으로 구성된다.

$$\begin{aligned} \text{목적함수} &= \text{총 사회적비용} = \text{이용자비용} + \text{운영자비용} \\ \text{이용자비용} &= (\text{비용계수}) \times (\text{주행시간} + \text{정차손실시간}) \\ \text{운영자비용} &= \text{고정운영비용} + \text{가변운영비용} \end{aligned}$$

모형에서의 제약조건은 총 수요 보존, 서비스용량 제약, 정차역 제약으로 이루어져 있는데, 총 수요 보존은 각 차종별·정차스케줄별 수요의 합은 전체 OD와 일치한다는 제약이고, 서비스용량제약은 노선 내 구간의 서비스용량(운행빈도와 열차용량의 곱)은 재차인원보다 크거나 같아야한다는 제약이며 정차역 제약은 열차가 정차하지 않는 역에서는 승·하차가 발생할 수 없다는 제약이다. 이 외에도 통과수요, 열차대수, 총 운행거리, 총 운행시

간, 총 정착손실시간 등 모형에서의 계산을 위한 매개변수에 대한 제약식이 존재하는데, 이 변수들은 결정변수에 의해 값이 정해지는 변수들이지만 모형에서는 모형을 선형으로 만들기 위해 부등호의 제약조건으로 반영되어 제약조건으로 포함되어 있다.

본 연구에서 제시하는 노선계획 모형은 식(1)-(11)과 같다.

$$\begin{aligned} & \min \text{ 목적함수} \\ & = \gamma_t \left[\sum_s \sum_r \sum_j \sum_i q_{ij}^{rs} T_{ij}^r + \sum_s \sum_r \sum_i p_i^{rs} W_i^r \right] \quad (1) \\ & + \left[\sum_r \gamma_c^r n^r + \sum_s \sum_r \gamma_o^r l^{rs} \right] \end{aligned}$$

제약조건

$$\sum_r \sum_s q_{ij}^{rs} = Q_{ij} \quad (\forall i, j) \quad (2)$$

$$\sum_{k=i}^N \sum_{j=1}^{i-1} q_{jk}^{rs} \leq f^{rs} C^r \quad (\forall i, r, s) \quad (3)$$

$$p_i^{rs} \geq \sum_{k=i+1}^N \sum_{j=1}^{i-1} q_{jk}^{rs} - M(1 - x_i^{rs}) \quad (\forall i, r, s) \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^N q_{ij}^{rs} + \sum_{j=1}^N q_{ji}^{rs} \leq M x_i^{rs} \quad (\forall i, r, s) \quad (5)$$

$$n^r \geq \frac{2}{H} \sum_s \left[\sum_i \{ t_{(i,i+1)}^{rs} + w_i^{rs} \} + D^r f^{rs} \right] \quad (\forall r) \quad (6)$$

$$l_{(i,i+1)}^{rs} \geq T_{(i,i+1)}^r \cdot f^{rs} - M(2 - m_i^{rs} - n_{i+1}^{rs}) \quad (\forall i, r, s) \quad (7)$$

$$w_i^{rs} \geq W_i^r \cdot f^{rs} - M(1 - x_i^{rs}) \quad (\forall i, r, s) \quad (8)$$

$$l_{(i,i+1)}^{rs} \geq L_{(i,i+1)} \cdot f^{rs} - M(2 - m_i^{rs} - n_{i+1}^{rs}) \quad (\forall i, r, s) \quad (9)$$

$$l^{rs} = \sum_i l_{(i,i+1)}^{rs} \quad (\forall r, s) \quad (10)$$

$$m_i^{rs} \leq \sum_{j=1}^i x_j \leq M \cdot m_i^{rs}, \quad (\forall i, r, s) \quad (11)$$

$$n_i^{rs} \leq \sum_{j=i}^N x_j \leq M \cdot n_i^{rs}$$

여기서, 첨자

- r : 열차 차종
- s : 열차 정착스케줄
- i, j, k : 역 노드, $\forall i, j, k \in \Omega$

결정변수

- f^{rs} : 차종 r 의 정착스케줄 s 의 운행빈도 (회/일, 0 또는 자연수)

- x_i^{rs} : 차종 r 의 정착스케줄 s 인 열차가 역 i 에 정착시 1, 그렇지 않으면 0

변수

- q_{ij}^{rs} : 역 $i-j$ 간 차종 r , 정착스케줄 s 이용 수요 (인/일, 0 또는 자연수)

- p_i^{rs} : 역 i 에서 시간 손실을 경험하는 인원수 (인, 0 또는 자연수)

- n^r : 차종 r 의 총 소요 열차 대수 (대, 0 또는 자연수)

- t^{rs} : 차종 r 의 정착스케줄 s 의 주행시간(분)

- l^{rs} : 차종 r 의 정착스케줄 s 의 총 운행거리(km)

- w^{rs} : 차종 r 의 정착스케줄 s 의 총 정착시간(시)

- m_i^{rs} : 차종 r , 정착스케줄 s 에서 역 i 가 출발역이면 역 i 부터 N 까지 모든 m_i^{rs} 는 1, 아니면 0,

- n_i^{rs} : 차종 r , 정착스케줄 s 에서 역 i 가 종착역이면 역 1부터 i 까지 모든 n_i^{rs} 는 1, 아니면 0,

파라미터

- γ_t : 이용자 1인당 시간가치계수(원/인·시)
- γ_c^r : 열차종 r 1편성당 열차보유비용계수(원/편성·일)
- γ_o^r : 열차종 r 1편성당 1km당 운행비용계수 (원/편성·km)

- $\underline{f}^{rs}, \overline{f}^{rs}$: 변수 f^{rs} 의 최소값 및 최대값(회/일)

- $\underline{n}^r, \overline{n}^r$: 변수 n^r 의 최소값 및 최대값(대)

- Q_{ij} : 역 $i-j$ 간 총 수요(인/일)

- W_i^r : 차종 r 의 역 i 에서 정착시간(분)

- L_{ij} : 역 $i-j$ 간 거리(km)

- T_{ij}^r : 차종 r 의 역 $i-j$ 간 주행시간(분)

- C^r : 차종 r 의 1편성당 용량(인/편성)

- D^r : 차종 r 의 회차시간(분)

- H : 철도 운영 시간(분/일)

- N : 총 가용 역 개수

- M : 충분히 큰 양수

- R : 열차 차종의 집합($r \in R$)

- S : 정착스케줄의 집합($s \in S$)

- Ω : 정착 가능한 역의 집합($\Omega = \{1, \dots, N\}$)

식(1)은 목적함수로 이용자비용과 운영자비용의 합을

나타낸다. 이용자비용은 이용자의 기·종점간 주행시간(첫째항)과 역에서의 정차로 인한 정차손실시간(둘째항)의 합이고, 운영자비용은 소요열차 보유비용(셋째항)과 총 운행연장에 따른 운행비용(넷째항)의 합으로 구성된다. 식(2)는 총통행량보존을 나타내며 기·종점간 총통행량은 기·종점간 이용되는 모든 열차와 모든 스케줄을 각각 이용하는 이용자 수의 합과 같음을 나타낸다. 식(3)은 열차용량제약을 나타내며 열차의 1편성당 용량과 운행빈도를 곱한 실질용량(우항)은 재차인원(좌항)보다 항상 크거나 같음을 나타낸다. 식(4)는 열차의 정차로 인한 손실을 경험하는 승객수를 계산하는 식이다. 식(5)는 열차가 역에 정차하지 않는 경우 해당 역에서 승차하거나 하차하는 통행량이 발생할 수 없음을 제한하는 제약식이다. 식(6)은 1일간 총 소요되는 열차 대수를 산출하는 식으로 열차대수는 주행시간과 정차시간, 회차시간의 총 합을 1일 운영 시간으로 나누어 산출할 수 있다. 식(7)은 소요열차대수를 산출하기 위한 통행시간을 산출하는 식이고, 식(8)은 총 정차시간을 산출하는 식이다. 식(9)와 식(10)은 총 운행거리를 산출하는 식인데 총 운행거리는 시·종점의 거리와 운행빈도의 곱으로 표현할 수 있다. 식(11)은 역 정차여부에 따른 시·종착역을 결정하는 결정변수를 정의하는 식이다.

IV. 모형의 해법

본 연구의 모형은 혼합정수모형(MIP, Mixed Integer Programming)으로 최적해를 도출하는 일반적인 해법이 개발되어 있다. MIP 문제는 문제를 선형문제로 풀기 위해 정수조건을 해제하는 선형완화(linear relaxation) 과정을 거친 후 실수해를 도출한 후 열거(enumeration)를 통해 최적 정수해를 도출하는 일반적인 과정을 거친다. 이 과정 중 선형문제를 풀이하는 과정은 연립방정식

의 원리를 이용한 심플렉스법(simplex method)을 주로 사용하고, 정수해 탐색 과정에서는 목적함수를 증가시킬 수 있는 분기 노드를 탐색하여 트리구조에서 가지의 수를 줄이는 방법인 분기 한정법(branch and bound)을 주로 사용한다. 부분 열거법이라 할 수 있는 분기 한정법은 정수해를 찾는 기본적인 열거방법을 적용하면서 계산량을 크게 줄일 수 있어 효율적인 방법으로 컴퓨터 프로그램에 많이 응용되는 방법이다. 본 연구에서는 효율성 측면에서 뛰어난 분기 한정법을 정수해 탐색 방법으로 적용하기로 한다.

V. 모형의 적용

1. 예제 분석

본 연구 모형의 실제 적용성을 검증하기 위해 Figure 1과 같이 역 노드 4개, 차종 2개인 예제네트워크를 구축하였고, 모형의 계산은 최적화 프로그램 패키지인 CPLEX¹⁾를 이용하여 구현하였다.

예제에 적용된 기·종점간 통행시간과 통행량 및 파라미터는 Table 2, Table 3과 같다.



Figure 1. Example network

Table 3. Parameters for example

Section	Train type A	Train type B
γ_o^r	44,000won/unit·km	23,000won/unit·km
γ_c^r	3,000,000won/unit·day	2,000,000won/unit·day
C^r	900persons/unit	1100persons/unit

Table 2. Travel time and demand for example

Travel time of train type A(min.)					Travel time of train type B(min.)					Travel demand(trip/day)				
O \ D	1	2	3	4	O \ D	1	2	3	4	O \ D	1	2	3	4
1	-	45	90	130	1	-	90	190	300	1	-	10,000	9,000	11,000
2	-	-	45	85	2	-	-	100	210	2	-	-	4,000	5,000
3	-	-	-	40	3	-	-	-	110	3	-	-	-	3,000

1) CPLEX MIP solver, ver.12, IBM ILOG社

Table 4. Results of example

Section	Case ①				Case ②			
	Type A		Type B		Type A		Type B	
	stop-schedule	Freq.	stop-schedule	Freq.	stop-schedule	Freq.	stop-schedule	Freq.
schedule 1	1-4	12	1-2	5	1-3	9	1-2	5
schedule 2	2-4	5	1-3	7	1-4	12	1-3-4	1
schedule 3	1-3-4	1	3-4	1	2-4	5		
schedule 4	1-2-3-4	2	1-2-3	3	1-2-3	2		
schedule 5	-	-	-	-	1-2-3-4	3		
num.of train	6		6		9		2	
persons·km	7,425,000		4,275,000		10,395,000		1,305,000	
trips	21,200trips/day		20,800trips/day		34,600trips/day		7,400trips/day	
Obj. Func. Value	88,595,000(won)				88,730,000(won)			

- 이용자 1인당 시간가치계수(γ_t) = 5,000원/시
- 역 정차시간(W_t^r) = 5분(모든 역, 모든 차종)
- 회차시간(D^r) = 50분(모든 차종)
- 철도운영시간(H) = 1200분/일
- 최대 정차스케줄 수 : 5개

예제 네트워크는 ①주어진 조건에 대한 최적노선계획, ②두 차종의 수송실적(인·km)가 8:1인 경우②)에 해당하는 노선계획을 각각 산출하였다. ②의 경우는 운영자의 요구에 의해 운임수입 등을 고려하여 차종간 수송실적의 비가 일정하게 유지하고자 함을 모사하는 것이다. ②의 시나리오를 모사하기 위해서는 수송실적비가 일정해야 함을 제약하는 제약식이 추가되어야 하는데, 추가되는 제약식은 식(12)와 같이 작성할 수 있다.

$$7.95 \left(\sum_s \sum_i \sum_j L_{ij} \cdot q_{ij}^{Bs} \right) \leq \left(\sum_s \sum_i \sum_j L_{ij} \cdot q_{ij}^{As} \right) \quad (12)^3$$

$$\leq 8.05 \left(\sum_s \sum_i \sum_j L_{ij} \cdot q_{ij}^{Bs} \right)$$

결과 ①을 보면, 소요열차대수는 두 차종이 동일하게 6대로 산출되었고, 정차스케줄은 차종별로 각각 4개가 산출되었다. 예제에서 초기값으로 정차스케줄을 5개로 설정하였는데 실제 산출된 결과 정차스케줄이 4개임은 더 이상 정차스케줄을 새로이 생성하지 않더라도 최적값이 도출됨을 보여준다. 일반적으로 모형에서 설정하는 정차스케줄의 수가 많을수록 목적함수값이 더 낮아짐을 기대할 수 있는데, 이는 목적함수값을 줄일 수 있는 선택의 폭이 넓어지기 때문이다. 극단적인 경우 정차스케줄의 개수를 1개로 설정한다면 주어진 수요를 충족시키기

위해서는 1-2-3-4라는 정차스케줄이 작성될 수밖에 없다. 반면 정차스케줄의 수를 늘일수록 다양한 정차패턴이 도출되기 때문에 더 최적인 해가 도출된다.

결과 ②는 인·km를 원하는 비율로 정하고 이 기준에 맞는 결과값을 산출하는 것으로 된 모형식에 제약식(12)를 추가하여 산출된 결과이다. 정차패턴을 보면 결과 ①에 비해 차종 A의 열차대수, 인·km, 이용객수가 모두 증가함을 알 수 있는데, 이는 제약조건에 의해 차종 A를 이용하는 통행량을 크게 하도록 노선계획이 결정되기 때문이다. 1인당 평균통행거리를 산출해보면 차종 A는 300km, 차종 B는 176km로 ①에 비해 효율성이 증가했음을 알 수 있다. 차종

B의 정차스케줄수와 정차패턴은 ①의 경우와 동일하지만 운행빈도는 감소하였다. 차종 A는 정차스케줄 수가 5개로 증가하였고 전체역을 서비스하는 정차스케줄의 운행빈도가 증가하였다.

전체적으로 볼 때, ①의 결과에 비해 차종 A의 수송실적을 증가시키기 위해 이용자비용의 감소에 더 큰 초점을 둔 ②의 결과는 운영자가 수송실적을 일정수준 이상 유지하고자 할 때 노선계획이 어떻게 변화하는지를 보여준다.

2. 민감도 분석

민감도분석에서 변화시킬 입력자료는 수요, 통행시간, 최대정차스케줄수로 각각 정한다. 수요의 변화는 장래 수요 증감 또는 수단분담률 증감을 반영하는 의미로 볼 수 있고, 통행시간의 변화는 속도가 다른 새로운 차종

2) 2010년 기준 국내 경부선 철도의 KTX와 새마을호의 실제 수송실적비가 약 8.6대1임을 감안하였다.

3) (수송실적비)=8 로 둘 경우 강건한 제약조건이 되어 최적해를 도출하지 못할 가능성이 있으므로 7.95와 8.05사이의 값을 가지는 것으로 제약조건을 작성하였다.

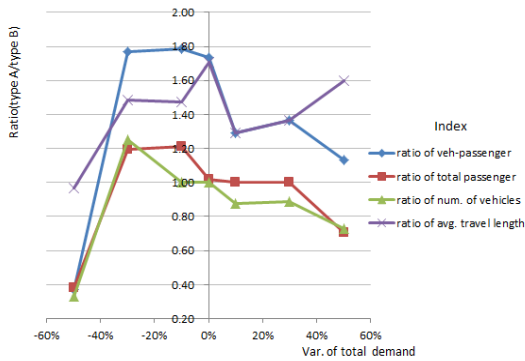


Figure 2. Operating index according to demand variation

이 투입되는 경우로 볼 수 있다. 최대정차스케줄의 수는 정차스케줄을 다양화하는 것이 목적함수에 어떤 영향을 미치는지를 알아보기 위한 것이다.

1) 수요변화에 따른 민감도 분석

분석 결과, 수요의 변화에 따라 차종간 수송실적, 이용객수, 열차대수, 이용자 1인당 평균통행거리 등 모든 지표가 -30 에서 0% 사이에서 차종 A가 우수한 것으로 도출되었고, 이 범위 외에 수요가 감소하거나 증가할 경우 차종 A의 의존도가 떨어지는 것으로 나타났다. 이 결과는 수요가 크고 작음에 따라 차종선택에 일정한 패턴을 보이는 것이 아니라 일정 규모의 수요에서 가장 효율적인 차종이 결정됨을 보여준다. 수요의 변화에 대한 차종별 수송실적, 이용객수, 열차대수, 이용자 1인당 평균 통행거리의 변화를 비교하기 위해 각 차종별 지표를 정리하고, 차종 B 대비 차종 A의 지표를 산출하여 그래프로 나타낸 결과, 수요의 변화에 대한 지표값의 변화는 위로볼록(convex)한 형태의 그래프로 나타나며 이는 특정한 수요 규모에서 차종 A에 대한 의존도가 가장 높아지는 점이 존재함을 알 수 있다(Figure 2).

2) 통행시간의 변화에 따른 민감도 분석

철도 차량 기술의 발전 또는 선로의 개선 등으로 열차의 속도가 증가하는 경우에 대해 모형에서는 통행시간의 변화로 반영할 수 있다. 통행시간의 변화는 차종 A의 통행시간이 10%, 20%, 30% 감소하는 경우, 10%, 20%, 30% 증가하는 경우에 대해 각각 분석한다.

통행시간이 감소(속도가 증가)할수록 이용자비용이 감소하고 소요열차대수가 감소하여 운영자비용도 감소한

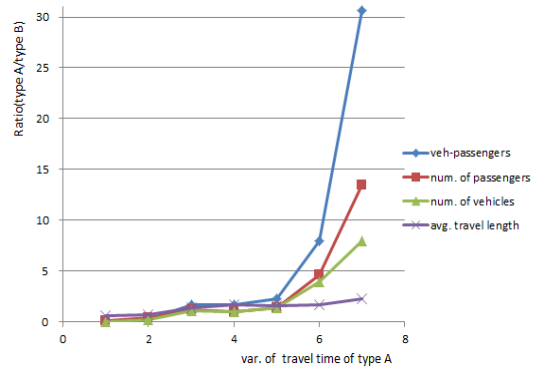


Figure 3. Operating index according to travel time variation

다. 따라서, 통행시간이 감소하는 차종 또는 통행시간을 감소시킬 수 있는 새로운 차종의 빈도가 높아진다. 통행시간의 변화에 대한 차종별 수송실적, 이용객수, 열차대수, 이용자 1인당 평균통행거리의 변화를 비교하기 위해 각 차종별 지표를 정리하고, 차종 B 대비 차종 A의 지표를 산출하여 그래프로 나타낸 결과, 통행시간의 변화에 대한 지표값의 변화는 어떤 차종의 속도가 증가할수록 그 차종에 대한 의존도도 동시에 증가하여 차종 A의 속도증가에 따라 차종A/차종B의 비율이 단조증가(monotone increasing)하는 형태로 나타남을 알 수 있다.

통행시간의 변화에 대한 민감도분석 결과, 차종별 지표의 산출 결과와 차종A/차종B의 지표별 비율은 Figure 3과 같다.

3) 최대정차스케줄 수의 변화에 따른 민감도 분석

최대정차스케줄은 정차스케줄 집합의 원소의 개수를 정하는 것으로 최대정차스케줄의 수가 클수록 정차스케줄이 다양하게 생성되어 목적함수값을 감소시키는 데 도움을 준다. 정차스케줄의 수가 많을수록 운영자비용을 감소시킬 수 있는데, 예제네트워크에 대한 민감도분석은 최대정차스케줄의 수를 1-7까지 변화시키면서 목적함수값의 변화와 실제 생성·운영되는 정차스케줄 수의 변화를 살펴보았다. 분석 결과, 정차스케줄의 수가 증가할수록 목적함수값(총 비용)이 낮아짐을 알 수 있고, 최대정차스케줄 수가 4이상인 경우는 목적함수값이 더 이상 감소하지 않으며 생성되는 정차스케줄 수는 최대정차스케줄의 수에 관계없이 4개가 생성됨을 확인하였다. 이는 주어진 네트워크에서는 총 비용의 최소값이 스케줄 4개로 작성될 때 도출되며 더 이상 목적함수값을 감소시킬

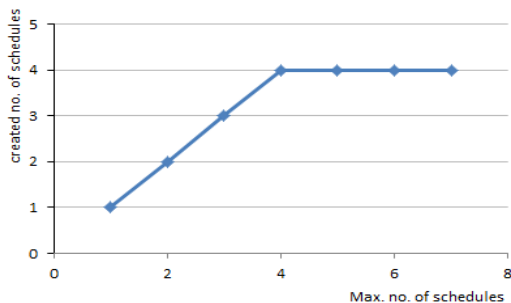


Figure 4. Number of calculated schedule according to maximum number of schedule

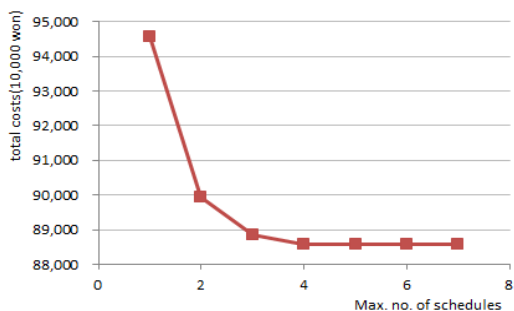


Figure 5. Total cost according to maximum number of schedule

수 있는 운행패턴은 존재하지 않음을 의미한다. 물론, 이는 역 개수 등 네트워크 형상(network topology)에만 관련된 결과는 아니며 수요, 통행시간, 비용 파라미터 등 모든 변수·상수에 관련된 것으로 앞의 민감도분석에서 스케줄이 5개 작성된 경우도 있다.

최대정차스케줄수의 변화에 따른 민감도분석 결과와 생성스케줄수, 총비용과의 관계에 대한 그래프는 Figure 4-5와 같다.

3. 사례 분석

본 연구 모형의 현실 적용성을 알아보기 위해 실제 사례에 적용하였다. 사례 분석은 우리나라의 경부선 철도를 대상으로 하고 차종은 KTX, 새마을, 무궁화호 3개 차종을 대상으로 하여 모형을 적용하였다. 여기서, KTX의 경우 별도 선로를 이용하는 정차스케줄이 존재하지만, 존간 수요 및 역세권 범위를 고려할 때, 다른 종류의 차종이 정차하는 인접한 역을 동일한 권역으로 가정하여 분석을 수행하였다.

OD자료는 한국철도공사에서 제공한 2010년 실적수

Table 5. Model parameters for case study

Section	Unit	KTX	Saemaul-ho	Mugung-hwa-ho
unit operating cost	won/person·km	48.7	51.5	37.3
C^r	persons/unit	935	1,120	720
γ_o^r	won/km·unit	48,556	26,044	22,345
train unit price	100mil. won/25yrs	330	256	102.4
γ_c^r	won/unit·day	4,198,685	3,257,161	1,302,865
γ_t	won/hour·person	6,206		
W_i^r	min.	5		
D^r	min.	50		
H	min./day	1200		
num. of stop schedule	-	10		

Data: Oh, D. K.(2012), pp.86-87

요자료를 이용하여 경부선 역간 수요를 추출하여 생성하였고, 차종별 통행시간은 2011년 10월 기준 열차시각표를 참고하여 생성하였는데 정차역이 없는 차종의 역간 거리는 보간법을 적용하여 생성하였다. 역간거리는 한국철도공사 내부자료를 이용하였다. 그 밖에 모형에 사용된 주요 파라미터는 Table 5와 같다.

먼저 현재 운행되고 있는 각 차종들의 스케줄을 이용하여, 현황분석을 한 후, 실제 철도 운영에서 고려되어야 하는 추가적인 제약조건을 설정, 최적화 결과를 구하고 이를 현황 분석과 비교하였다.

추가적인 제약조건은 차종별 정차회수 제한과 정차가능역 제한의 두 가지를 생각할 수 있다. 이는 실제 열차 운영상 역 시설규모, 수요, 정책적 요구 등으로 인해 모든 차종의 열차가 모든 역에 정차하는 것이 불가능하고, 모든 차종의 정차회수를 자유롭게 설정할 수 없음을 반영한 것이다. 여기서는 현재 운영현황을 고려하여 KTX는 총 14개 역에 정차할 수 있고, 하나의 스케줄 당 최대 8개 역에 정차할 수 있다고 가정하였고, 새마을호의 경우 총 23개 역에 정차, 스케줄당 16개 역까지 정차가능으로 제한하였다.

이러한 방법으로 분석된 현황 모형과 최적화 결과는 Table 6에 제시되어 있다. 본 연구에서 제시된 방법으로 최적화 모형을 적용한 결과, 최적 운영 스케줄은 현재 운영현황 보다 총이용자비용, 총운영자비용, 총사회적비용이 각각 3.75%, 34.89%, 23.48% 씩 감소하는 것으로 나타났다. 최적화 결과에서는 현황보다 KTX, 새마

Table 6. Current operation and optimization result

Section	Current operation			Optimization result		
	KTX	Saemaul-ho	Mugunghwa-ho	KTX	Saemaul-ho	Mugunghwa-ho
num of veh.(units)	19	6	19	13	8	7
passengers(persons)	14,600,820	993,752	4,191,280	13,385,930	5,049,097	1,349,174
average travel length(km/person)	50,201	6,699	41,908	45,645	37,820	15,335
transport record (passengers·km)	291	148	100	293	134	88
total user cost	₩912,320,000			₩878,110,000		
total operating cost	₩1,578,760,000			₩1,027,910,000		
total cost	₩2,491,080,000			₩1,906,020,000		

을호의 수송실적이 증가하고 무궁화호의 이용률은 크게 감소하였는데, 이는 KTX의 장점(이용자비용 절감이 큼)과 새마을호의 장점(열차 용량이 커 열차대수가 적게 소요)이 뚜렷한 반면 무궁화호의 장점은 상대적으로 낮기 때문인 것으로 판단된다. 또한 이같은 결과는 현재 운영되고 있는 정차스케줄을 조정하여 노선계획을 새로 수립할 경우 이용자비용, 운영자비용을 포함한 총사회적비용을 감소시킬 수 있는 여지가 있다는 의미로 해석할 수 있고, 운영계획 수정단계에서 기준으로 삼을 수 있는 근거를 제공했다는데 의의를 둘 수 있다.

VI. 결론 및 향후연구

본 연구에서는 지역간 여객철도를 대상으로 철도운영 계획 중 핵심부분인 노선계획을 설계할 수 있는 최적화 모형을 개발하였다. 특히, 기존 연구에서 반영하지 못했던 차종구분으로 포함시켜 복수 차종을 고려하였고, 이용자비용과 운영자비용을 동시에 반영하여 사회적비용 최적화모형을 수립하였으며 모형 내부에서 시·종점 선정, 정차패턴 결정, 운행빈도 결정, 차종별 수요 배분 등이 동시에 도출될 수 있는 모형으로 현실에서 지역간 여객철도의 운영전략이나 노선계획전략 수립시 적용 가능한 결과를 도출할 수 있는 모형을 개발하였다.

모형을 예제와 실제사례에 적용한 결과, 이용자비용을 감소시키기 위해서는 통행시간이 짧은 고속열차 위주로 정차스케줄이 형성되고 운행빈도가 높아지며 운영자비용을 감소시키기 위해서는 낮은 등급의 열차 위주로 정차스케줄이 형성되는 사실을 확인할 수 있었다. 또한, 고속·고비용의 열차는 장거리통행에, 저속·저비용의 열차는 단거리통행에 투입되는 것이 사회적비용 측면에서 최적화된 정차스케줄이라는 사실을 확인할 수 있었다.

그리고, 특정한 수요 규모에서 주로 운용되는 열차차종의 선택, 최적 정차스케줄 수 등을 산출할 수 있음을 보여 주었다.

본 연구의 모형을 응용하면 현실에서 더 많은 적용분야에 적용할 수 있는데, 격역정차(skip-stop)시스템, 새로운 철도시스템 도입에 대한 정차역 및 정차스케줄 작성, 이용자비용 최소화화 and 운영자비용 최소화 등 극단적인 경우에 대한 분석 등 다양한 분석이 가능하다. 뿐만 아니라 실제 열차 운영 단계에서 1일 운행스케줄 작성에 직접 활용할 수 있고, OD를 시간 단위로 구분할 경우 1일 최소 운행회수를 만족하는 최적 운행스케줄을 작성할 수도 있다(예, 2시간단위 OD를 구축하여 모형에 적용하면 2시간마다 동일한 운행 패턴이 생성됨).

단, 본 연구에서 제시한 MIP모형은 이론상 최적해의 산출이 가능하지만 실제 네트워크의 적용시 역 노드의 수나 차종수, 생성 정차스케줄 수가 증가할 경우 현재의 계산 성능으로는 계산시간이 과다하게 소요될 가능성이 있고 본 연구의 결과에 따라 1일 기준 배차회수를 감소시킬 경우 승객의 불편함 등을 계량화하기 어려워 이를 보완할 수 있는 방법 등에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by the National Research Foundation of Korea grant funded by the Korea government(MEST) (NRF-2010-0029446).

REFERENCES

Anthony R. N. (1965), Planning and Control Systems:

- A Framework for Analysis, Harvard University, Boston, U.S.A.
- Borndörfer R., Grötschel M., Pfetsch M. (2007), A Column-Generation Approach to Line Planning in Public Transport, *Transportation Science*, Vol.41, No.1, pp.123-132.
- Bussieck M., Kreuzer P., Zimmermann U. (1996), Optimal Lines for Railway Systems, *European Journal of Operational Research*, Vol.96, pp.54-63.
- Chang Y., Yeh C., Shen C. (2000), A Multi-Objective Model for Passenger Train Services Planning: Application to Taiwan's High-Speed Rail Line, *Transportation Research Part B*, Vol.34, pp.91-106.
- Claessens M., Van Dijk N., Zwaneveld P. (1998), Cost Optimal Allocation of Rail Passenger Lines, *European Journal of Operational Research*, Vol.110, pp.474-489.
- Goossens J., Hoesel S., Kroon L. (2004), A Branch-and-Cut Approach for Solving Railway Line-Planning Problems, *Transportation Science*, Vol.38, No.3, pp.379-393.
- Goossens J., Hoesel S., Kroon L. (2006), On Solving Multi-Type Railway Line Planning Problems, *European Journal of Operational Research*, Vol.168, pp.403-424.
- Guihaire V., Hao J. (2008), Transit Network Design and Scheduling: A Global Review, *Transportation Research Part A*, Vol.42, pp.1251-1273.
- Huisman T., Boucherie R. J., Van Dijk N. M. (1998), A Solvable Queueing Network Model for Railway Networks and Its Validation and Applications for the Netherlands, *European Journal of Operational Research*, Vol.142, pp.30-51.
- Kim K. H., Seo S. D. (2002), Planning of Train Operation with Different Objectives Utilizing Mixed-Integer Nonlinear Programming Models, *J. Korean Soc. Transp.*, Vol.20, No.7, Korean Society of Transportation, pp.117-133.
- Oh D. K. (2012), Optimal Line Planning for Intercity Multi-class Railway, Ph.D. Thesis, Seoul National University.
- Park B. H., Kim C. S., Seo Y. I., Rho H. L. (2009), An Optimization Model for Line Planning Given Halting Patterns, *Proceeding for 2009 Autumn Conference of the Korean Society for Railway*, pp.2381-2390.
- Park B. H., Oh S. M., Hong S. H., Mun D. S. (2005), Railway Line Planning Considering the Configuration of Lines with Various Halting Patterns, *J. Korean Soc. Transp.*, Korean Society of Transportation, Vol.23, No.6, pp.115-125.
- Schöbel A., Scholl S. (2005), Line planning with minimal traveling time, 5th Workshop on Algorithmic methods and Models for Optimization of railways (ATMOS)-Proceeding.
- ☞ 주 작성자 : 오동규
 ☞ 교신저자 : 강승모
 ☞ 논문투고일 : 2012. 11. 30
 ☞ 논문심사일 : 2013. 2. 5 (1차)
 2013. 2. 17 (2차)
 ☞ 심사판정일 : 2013. 2. 17
 ☞ 반론접수기한 : 2013. 8. 31
 ☞ 3인 익명 심사필
 ☞ 1인 abstract 교정필