

최적화 모형을 활용한 열차 운행 횟수 및 정차 패턴 생성 : 고속 열차 노선 계획을 중심으로

Finding Train Frequencies and Halting Patterns Using Optimization Models : a Focus on the Line Plan for High-Speed Trains

박범환* · 김장욱

Bum Hwan Park · Jang-Wook Kim

Abstract There has been much interest in optimizing the halting patterns of high-speed trains, for example by introducing more non-stop trains to supply faster train service to the passengers, which could later bring about a discussion about introducing new high speed train service with differentiated price and service. In general, halting patterns can be considered by constructing an efficient line plan, in which all demand should be covered and the total travel time can be reduced as much as possible. In this study, we present a two-step process based on two optimization models. One is to minimize total kilometers of trains to run on each route ; this will be done using a line planning model under the assumption of all-stop patterns. Then, in the next step, the all-stop patterns are optimally decomposed into several halting patterns in order to minimize the total travel time. We applied the two-step process to the latest demand data in order to develop KTX halting patterns as well as to determine the frequency of each line and compare the current line plan with the optimized one.

Keywords : Train frequency, Halting pattern, Line plan, Optimization model

초 록 승객들에게 보다 빠른 고속 열차 서비스를 제공하기 위해 무정차 열차를 비롯한 고속열차의 정차 패턴 최적화에 대한 관심이 증대하고 있다. 이러한 논의는 이후 정차 패턴을 활용한 차별화된 열차 서비스 및 그에 합당한 가격을 통해 신규 고속 열차 서비스 및 수요를 만들 수 있다는 측면에서 보다 더 큰 관심을 불러오고 있다. 일반적으로 정차 패턴은 효율적인 노선계획 작성에 의해 고려되는데, 효율적인 노선계획이란 모든 수요가 만족되고 전체 여정시간이 최대한으로 감소되는 열차 운행 계획을 말한다. 본 논문에서는 이를 위해 두 개의 최적화 모형을 활용한 2단계 프로세스를 제시한다. 첫 번째 단계는 모든 열차의 all-stop 패턴을 가정한 최소 횟수 혹은 최소 킬로미터 노선 계획을 작성하는 단계이고, 두 번째 단계는 첫 번째 단계로부터 도출된 열차들을 다양한 정차 패턴으로 분해하는 과정이다. 본 연구에서는 이와 같은 프로세스를 최근 고속 열차 실적 수요에 적용해 보았고 기존 열차 운행 횟수 및 정차 패턴과 비교분석하였다.

주요어 : 운행횟수, 정차 패턴, 노선 계획, 최적화 모형

1. 서 론

최근 고속열차의 정차 횟수에 관한 논의가 활발하다. 잦은 정차로 인한 저속열차 논란은 이전부터 있어 왔지만, 최근에는 단순히 정차역을 줄이는 차원에서 한발 더 나아가 정차 패턴에 따른 차별화된 요금(differentiated price) 및 서비스에 대한 논의로 까지 이어지고 있다. 정차 패턴을 어떻게 하는지에 따라 투입되어야 하는 열차 운행 횟수가 달라지므로, 정차 패턴에 따른 고속 열차 서비스의 차별화 가능성 여부는 결국 효율적인 열차 운행계획을 작성할 수 있는가에 달려 있다. 열차 운행 계획은 노선계획, 시각표 작성, 차량 운용 등 다양한 계획의 통합적 작성을 통해 만들어 지는데, 본 연구는 열차 운행 비용(operating cost)이나 승객 여정 시간(travel time)의 최소화를 주요 목적함수[1]로 설정하는 노선 계획에 관한 연구이다.

일반적으로 열차운행횟수를 결정하기 위한 모형을 노선계획(line plan) 모형[1]이라 한다. 노선 계획이란 열차종별 시종착별

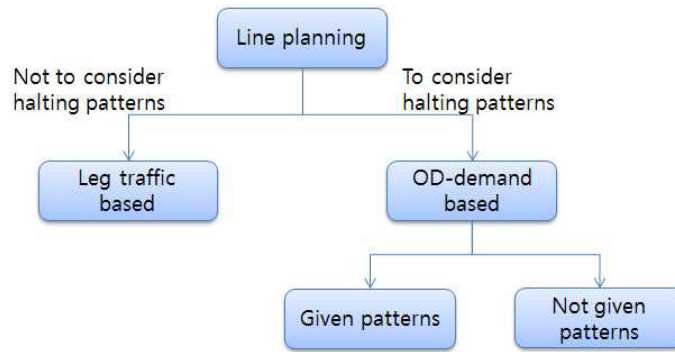


Fig. 1. Classification of line planning models.

열차의 운행 횟수 및 열차별 정차 패턴을 작성하는 계획을 말하는데, 노선 계획은 열차별 시각표의 대략적인 열개로서 열차 운행 계획의 가장 첫 번째 단계라 할 수 있다. 노선 계획은 주로 최적화 모형에 의해 작성되는데, 정차 패턴을 고려하지 않을 경우, 즉 도중 역에서 모두 정차할 경우에는 인접한 두 정차역 구간을 통과하는 구간 통과 수요에 기초하여 노선계획을 작성할 수 있다. 그러나 열차별 정차 패턴이 다를 경우, OD 수요로부터 직접 노선계획을 작성해야한다. 특히 정차패턴이 다르지만 외부적인 작성 과정을 통해 주어지더라도 노선 계획 모형은 여전히 NP-hard이며[2], 정차 패턴이 주어지지 않고 최적화 모형을 통해 직접 작성할 경우, 문제의 난이도는 더 높아진다.

Table 1은 Fig. 1의 분류에 따라 기존 연구를 정리한 것이다. 표에서 보듯이 대부분의 연구들은 정차패턴을 고려하지 않았으며[3,4,5,6,8], 정차 패턴을 고려하더라도 그것이 사전에 주어졌다고 가정하였다[6]. 정차패턴을 노선계획에 직접 반영한 연구로는 [2,7,9,10]의 연구가 있는데, 이들 연구들의 경우 운행 비용(operation cost)과 여정 시간(travelling time)의 일차 결합 형태의 목적함수를 최소화함으로써, 파레토 최적해를 생성하는 것을 목적으로 하였다. 특히 [2]의 연구의 경우, 열생성(column generation)에 기초한 최적화 모형 및 해법을 제시하였으나 경부선 호남선만 있는 예제에 대해 1시간 이상의 수행 시간(running time)을 필요로 하였고, 문제의 복잡성으로 인해 최적해가 아닌 근사해에서 알고리즘을 중단해야 하는 단점이 있었다. [2]의 연구에서 활용한 네트워크 보다 훨씬 복잡해진 현재의 고속열차 네트워크에 [2]의 알고리즘을 적용할 경우, 열생성 시에 풀어야 하는 하부문제를 푸는 데 걸리는 시간이 매우 길어져, 다양한 정차 패턴을 생성하는데 실패하고 매우 낮은 품질의 해를 도출한다.

Table 1. Current studies [2].

Studies	demand type	obj. function	halting pattern
Bussieck et al.(1996)[3]	Leg, OD	Max direct travellers	not considered
Claessens et al.(1998)[4]	Leg	Min operation cost	not considered
Bussieck et al.(2004)[5]	Leg	Min operation cost	not considered
Borndorfer et al.(2007)[6]	OD	operation cost + travelling time	not considered
Goosens et al.(2006)[7]	OD	Min operation cost	considered (but given)
Goosens et al.(2004)[8]	Leg	Min operation cost	not considered
Park et al.(2005)[9]	OD	operation cost + travelling time	considered
Chang et al.(2000)[10]	OD	Multi obj, of operation cost and travelling time	considered
Park et al. (2013)[2]	OD	operation cost + travelling time	considered

본 연구는 [2]에서 활용된 운행 비용과 여정시간의 가중 목적함수 대신에, 운행 비용을 우선적으로 최소화한 후, 여정시간을 최소화하는 이단계로 구성된 최적화 모형을 고려하였다. 첫 번째 단계 최적화 모형은 모든 노선에 운행되는 열차가 all-stop 패턴을 갖는다고 가정하고, 전체 운행 비용을 최소화하는 노선계획을 찾기 위한 모형이고, 두 번째 단계 최적화 모형은 첫 번째 단계로부터 도출된 all-stop 열차들을 다양한 정차패턴으로 분리하는 모형이다. 두 모형의 경우 [2]의 통합 모형보다 훨씬 적은 변수로 구성이 되어, 별도의 알고리즘 설계 필요 없이 분지한계법(Branch-and-Bound) 만으로도 짧은 시간 안에 최적해를 구할 수 있는 장점이 있다.

2. 최적화 모형

정차 패턴을 고려한 노선계획을 위한 2단계 접근법은 Fig. 2와 같다. 그림에서와 같이 모든 열차의 정차 패턴이 all-stop이라 가정하고 노선별 열차 운행횟수를 도출하는 최적화 모형(ASLP)과 이 모형에서 도출한 열차들에 대해 전체 여정시간을 최소화 하기 위한 정차패턴을 구성하는 최적화 모형(HPGM)의 단계적 적용으로 이루어진다.

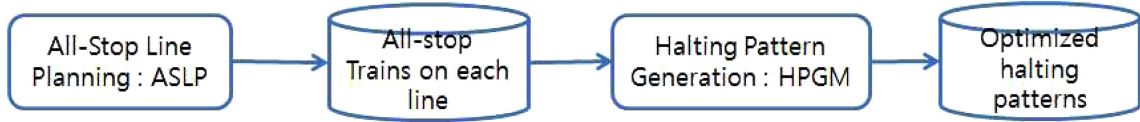


Fig. 2. Two-step approach for halting pattern generation.

2.1 all-stop 패턴 노선계획 모형

첫 번째 단계는 모든 열차가 all-stop 정차 패턴을 갖는다고 가정하고, 각 노선별 최적의 열차 운행 횟수를 선정하는 단계이다. 여기서 노선이란 시발역, 종착역, 경로, 여정시간, 공급 좌석수 등으로 구분할 수 있는 열차들의 집합이다. 예를 들어 서울-부산간 운행하는 고속열차라 하더라도 구포 경유 열차와 그렇지 않은 열차는 서로 다른 노선에 속한다고 간주하며, 특히 동일한 구포 경유 서울-부산간 고속열차라 하더라도 좌석수가 다른 두 열차 또한 서로 다른 노선으로 간주한다. 이러한 노선이 주어질 때, 각 노선에 운행하는 모든 열차가 all-stop한다고 가정하고 노선별 열차 운행 횟수를 계산하는 최적화 모형은 다음과 같다.

용어

- r : 노선 $r \in R$ (경로의 예. 서울-부산(구포경유) 노선, 서울-부산 노선)
- od : origin-destination 쌍. $od \in S$
- D_{od} : od 수요
- i : 역 index, $i \in N$
- c_r : 경로 r 의 운행 비용
- S_{ij}^r : 경로 r 상의 역간 구간 ij 를 통과하는 od 쌍의 집합

결정변수

- x_r : 경로 r 이 사용되면 1 그렇지 않으면 0
- f_r : 경로 r 의 열차 운행 횟수
- y_r^{od} : 경로 r 에 할당된 od 수요

최적화 모형 : ASLP (All-Stop Line Planning model)

$$\min \sum_{r \in R} c_r f_r \quad (1)$$

$$s.t. \sum_{od \in S_{ij}^r} y_r^{od} \leq C_r f_r, \forall ij \in A_r, \forall r \in R \quad (2)$$

$$\sum_{r \in R} y_r^{od} \geq D_{od}, \forall od \in S \quad (3)$$

$$y_r^{od}, f_r \geq 0, \text{ integer}$$

식(1)은 각 노선에서 운행되는 모든 열차들의 운행 비용의 합과 승객의 여정시간의 합을 최소화하는 식이며, 식(2)는 각 노선에 할당되는 전체 공급 좌석수에 대한 제약식이고, 식(3)은 각 노선에 할당된 수요의 주어진 od 수요를 만족함을 의미한다.

추후 실험결과에서도 살펴보겠지만, 위 최적화 모형의 변수 개수는 노선의 개수(R)와 od 의 개수(S)의 곱에 비례하는데, 고속열차 네트워크의 경우 변수가 매우 제한적이라 분지한계법을 적용하는 것만으로도 충분히 빠른 시간 안에 최적해를 구할 수 있었다.

2.2 정차 패턴 생성 최적화 모형

ASLP의 최적화 결과로 도출되는 결정변수 f 값들은 각 노선별 열차 운행 횟수를 의미한다. 예를 들어 Fig. 3의 첫 번째 그림에서 두 개의 후보 노선이 있을 때, ASLP의 결과로 첫 번째 후보 노선(r_1)상의 열차 운행 횟수는 0이고, 두 번째 노선(r_2)상의 열차 운행 횟수는 $2(\sum f_i = 2)$ 가 된다.

두 번째 단계에서는 ASLP를 통해 계산한 총 열차 운행 횟수($\sum f_i$)를 이용하여 $T = \{1, 2, \dots, \sum f_i\}$ 를 정의하고, T 에 있는 각 열차들의 정차 패턴을 결정한다. 최적화 모형 HPGM은 이러한 열차별 정차 패턴을 구하기 위한 최적화 모형이다. 최적화 모형 구성을 위해, Fig. 3의 두 번째 그림과 같이 역간 무정차 운영을 의미하는 아크로 구성된 네트워크를 구축하고, T 에 있는 열차($k \in T$)의 시종착간의 흐름 경로를 표현하는 결정변수(x_{ij}^k)를 도입하면 아래와 같은 다품종 흐름(multi commodity flow) 형태의 네트워크 최적화 모형을 구성할 수 있다.

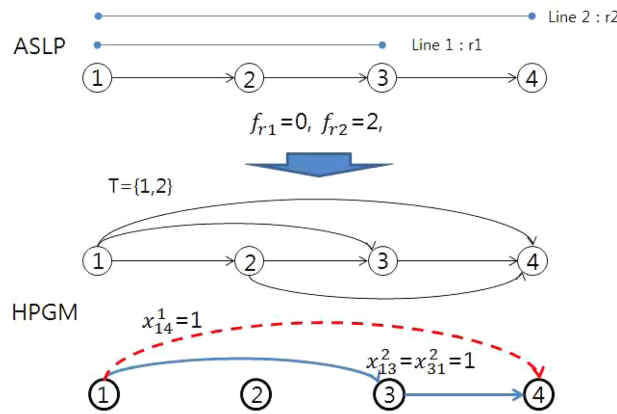


Fig. 3. Decision variables in ASLP and HPGM.

용어

- k : 열차. $k \in T$
- A_k : 열차 k 가 지나가는 무정차구간 ij 의 집합
- t_{ij}^k : 열차 k 가 무정차구간 ij 를 지날 때의 무정차 운전시분 + i 역에서 정차 시간
- S_{kj} : 열차 k 의 무정차구간 ij 를 통과할 수 있는 od 쌍의 집합

결정변수

- x_{ij}^k : 열차 k 가 무정차구간 ij 를 지나면 1 그렇지 않으면 0
- $y_{ij}^{k,od}$: 열차 k 가 지나가는 무정차구간 ij 를 통과하는 od 수요량
- D_{od}^k : 열차 k 에 할당된 od 수요량

최적화 모형 : HPGM (Halting-Pattern Generation Model)

$$\min \sum_{k \in T} \sum_{od \in S} \sum_{ij \in A_k} t_{ij}^k y_{ij}^{k,od} \tag{4}$$

$$s.t. \sum_{j:ij \in A_k} x_{ij}^k - \sum_{j:ji \in A_k} x_{ji}^k = \begin{cases} 1 & i = s(k) \\ -1 & i = t(k) \quad \forall i \in N, \forall k \in T \\ 0 & o/w \end{cases} \tag{5}$$

$$\sum_{j:ij \in A_k} y_{ij}^{k,od} - \sum_{j:ji \in A_k} y_{ji}^{k,od} = \begin{cases} D_{od}^k & i = o \\ -D_{od}^k & i = d \\ 0 & o/w \end{cases} \quad \forall od \in S, \forall k \in T \quad (6)$$

$$\sum_{od \in S_{ij}^k} y_{ij}^{k,od} \leq C_k, \quad \forall ij \in A_k, \forall k \in T. \quad (7)$$

$$\sum_{od \in S_{ij}^k} y_{ij}^{k,od} \leq Mx_{ij}^k, \quad \forall ij \in A_k, \forall k \in T \quad (8)$$

$$\sum_{r \in R} D_{od}^k \geq D_{od}^k, \quad \forall od \in S \quad (9)$$

$$x_{ij}^k \in \{0, 1\}, y_{ij}^{k,od}, D_{od}^k \geq 0$$

식(4)는 모든 수요의 통행시간을 최소화하는 목적함수이며, 식(5)는 정차패턴을 구하기 위한 열차 흐름 변수의 관계식이며, 식(6)은 수요의 흐름 경로를 구하기 위한 제약식이고, 식(7)은 각 열차의 구간별 총 공급좌석수(C_k)제약이다. 식(8)은 식(5)와 식(6)을 연결시키는 제약으로 $x_{ij}^k=0$ 이면 열차 k 의 무정차 운행구간 ij 상으로 어떠한 승객 흐름도 발생하지 않음($\sum y_{ij}^{k,od}=0$)을 의미한다.

위 최적화 모형은 2.1절의 ASLP보다 변수와 제약식이 훨씬 많으며 다품종 흐름이 두 가지가 중첩되어 있는 복잡한 모형이라 할 수 있다. 다음 절의 실험에서 살펴보겠지만, ASLP로부터 도출되는 전체 운행해야 할 열차 횟수가 많아질 경우($|T|$ 가 커짐), 변수의 개수가 기하급수적으로 커져 모형의 복잡도가 올라가지만, 제한된 개수의 열차들의 정차 패턴을 구할 경우 충분히 빠른 시간 안에 최적해를 구할 수 있었다.

3. 전산 실험

3.1 시간대별 수요 및 후보 노선의 선정

본 연구에서는 노선 계획의 시간 단위를 1시간으로 설정하였다. 따라서 시간대별 OD별 수요 도출을 위해 2015년 8월 1일부터 12월 31일까지 5개월간의 고속 열차 수요를 분석하였다. 특히 모든 실적 수요는 해당 열차 정보를 파악할 수 있으므로, 열차의 시발역 출발 시간을 기준으로 한 시간대별 수요로 환원하였다. Table 2는 해당 기간동안의 하루당 평균 수요를 보여주고 있다. 주중의 경우, 하행 76,663명, 상행의 경우 75,863명이며 주말의 경우 10만명이 넘는다.

Table 2. Average daily demand between 1st Aug. 2015 and 31 Dec. 2015.

Average demand (/day)	Average daily demand
(weekday, down)	76,663
(weekday, up)	75,863
(weekend, up)	105,203
(weekend, down)	102,595

노선 계획을 위해서는 후보 노선들(R)을 선정해야 하는데, 앞에서 서술했듯이, 같은 경로를 거치는 열차라 하더라도 열차의 속성(운전 시분, 좌석 용량)이 다르면 서로 다른 노선으로 간주한다. 한국 고속 열차의 경우 20량 고속 차량과 KTX-산천이라 불리는 10량 고속 차량이 동일한 구간에 투입되고 있으므로 원칙적으로는 두 차량이 동일한 구간을 운행하더라도 서로 다른 노선으로 간주해야 한다. 그러나 현재 두 차량의 투입에 있어 주요한 결정 요인은 가용 편성수이며, 노선계획에서 두 차량의 차이에 따라 노선을 따로 설정할 경우, 각 노선에 최적의 열차 횟수를 선정하더라도 편성 제약으로 인해 실행 불가능한 열차 운행 계획이 된다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 가중 좌석 용량을 활용하여, 각 노선에는 현재 열차 운행 계획에서 투입되고 있는 두 차량의 비율만큼씩 투입된다고 가정하였다. 이를 계산하기 위해, 각 노선별 KTX와 KTX-산천 투입 횟수를 분석하

였고, 이를 이용하여 Table 3과 같은 가중좌석수를 계산하였다.

Table 3. Weighted number of seats for each line.

Corridor	KTX (935 seats)	KTX-Sancheon(363 seats)	Weighted # of seats
Gyeonbu	103	16	858
Honam	16	48	506
Jeolla	6	14	535
Gyeongjeon	6	14	535
Donghae	6	14	535

Table 3에서는 경부선-호남선-전라선-경전선-동해선 등 주요 노선별(corridor) 가중좌석수를 설정하였는데, 시간대별 혹은 첨두/비첨두 시간대별 가중좌석수를 설정하는 것도 가능하다. 앞에서 서술했듯이 가중좌석수를 이용하는 이유는 이후 계획단계인 KTX와 KTX-산천의 차량운용(routing) 계획의 용이성을 위한 것인데, 시간대별로 가중좌석수를 세분화할 경우, 두 차량의 운용 대안의 폭을 좁힐 수도 있어, 본 연구에서는 주요 노선별 가중좌석수만 고려하였다.

열차 운행 횟수를 결정하는 노선계획에 있어 열차의 좌석 용량은 운행 횟수에 매우 큰 영향을 미친다. ASLP의 식(2) $\sum y_r^{od} \leq C_r f_r$ 에서 C_r 을 실제 좌석용량으로 설정할 경우, 승객이 집중되는 시간대가 아닌 경우, 시간대에 속한 모든 수요의 집적 효과를 가정함으로써, 상대적으로 적은 숫자의 열차가 투입되는 문제가 있다. 이를 해결하기 위해 현실에서는 좌석용량의 일정 부분만 활용된다고 가정하여 실제 투입되는 좌석용량 대비 특정 비율(load factor) 만큼의 좌석용량을 가정하게 된다. Table 4는

Table 4. Candidate lines and corresponding seating capacity due to load factor.

Corridor	Candidate Lines	Distance (km)	Weighted seating capacity w.r.t load factor			
			80%	85%	90%	100%
Gyeongbu	Seoul-Busan	417	686	729	772	858
	Seoul-(Gupo)-Busan	402				
	Seoul-(Suwon)-Busan	424				
	Hanshin-Seoul-Busan	432				
	Incheon-Seoul-Busan	474				
	Seoul-Daejeon	160				
	Gwangmyeon-Busan	395				
Honam	Yongsan-Mokpo	371	405	430	455	506
	Yongsan-Gwangju	304				
	Yongsan-Seodaejeon-Insan	240				
	Hanshin-Yongsan-Mokpo	386				
	Incheon-Yongsan-Mokpo	428				
Jeolla	Yongsan-Iksan-YeosuExpo	392	428	454	481	535
	Hanshin-Yongsan-Iksan-YeosuExpo	407				
	Incheon-Yongsan-Iksan-YeosuExpo	449				
Gyeongjeon	Seoul-Jinju	444	428	454	481	535
	Seoul-Masan	395				
	Hanshin-Seoul-Jinju	459				
	Incheon-Seoul-Jinju	501				
Donghae	Seoul-Pohang	370	428	454	481	535
	Hanshin-Seoul-Pohang	385				
	Incheon-Seoul-Pohang	427				

각 후보노선(candidate lines)별 load factor를 고려한 가중좌석용량을 나타낸 것이다. 여기서 후보노선은 2015년 11월 기준 고속 열차 운행계획에서 고려한 시종착 패턴으로 구성하였고 괄호로 표현된 역의 경우 노선의 경로를 표현하기 위한 것일 뿐 정차를 의미하는 것은 아니다.

3.2 실험 결과

위에서 설정한 후보 노선 및 시간대별 OD별 수요를 이용하여 모형 ASLP를 적용하면 Table 5과 Table 6과 같은 결과를 얻을 수 있다. 아래 표에서 보듯이 2015년 11월 주중(주말)의 열차 운행 횟수는 하행/상행이 각각 121회/122회(134회/135회)인데, load factor가 커지면 커질수록 투입 열차의 횟수가 증가함을 볼 수 있다. 추후 HPGM 모형의 실험에서 현행 정차 패턴과의 비교 분석을 위해, 실제 운행횟수와 가장 근접한 85%(주중), 100%(주말)를 적용하였다.

Table 5. ASLP results (weekday).

Time	Tuesday, Nov. 2015		Load factor 80%		Load factor 85%		Load factor 90%		Load factor 100%	
	down	up	down	up	down	up	down	up	down	up
05	8	9	8	8	7	8	7	7	7	6
06	8	7	9	8	9	7	8	7	7	6
07	8	9	8	9	8	8	7	8	6	7
08	7	3	8	3	8	3	8	3	7	3
09	8	9	11	9	10	9	9	8	8	7
10	8	8	8	8	8	7	8	7	7	6
11	2	3	2	4	2	4	2	4	1	3
12	10	8	10	8	10	8	9	8	8	7
13	6	8	7	9	6	8	6	8	5	8
14	8	7	8	8	8	7	7	7	5	5
15	7	6	8	9	8	8	7	7	7	7
16	6	6	6	7	6	7	6	7	6	6
17	6	9	7	10	7	9	7	9	7	8
18	7	8	8	8	8	8	7	8	6	6
19	7	5	7	5	6	5	6	5	6	5
20	6	7	6	6	6	6	6	6	5	6
21	2	7	3	6	2	6	2	6	2	6
22	5	3	5	2	4	2	4	2	4	2
23	2	0	2	0	1	0	1	0	1	0
sum	121	122	131	127	124	120	117	117	105	104

ASLP에 의해 구성된 all-stop 패턴을 갖는 열차의 운행 횟수는 위 표와 같다. 각 시간대별 열차 운행 횟수는 HPGM의 입력 요소가 되고, HPGM 최적화 모형을 풀면 각 시간대에 투입되는 열차들의 정차 패턴을 알 수 있다. Table 7과 Table 8은 2015년 11월 화요일, 토요일 기준 열차 스케줄의 루트별 평균 중간 정차 횟수와 HPGM 모형을 통해 도출된 노선 계획에서의 중간 정차 횟수를 비교한 것이다. 전체적으로 하행(상행) 기준 10.9%(6.0%)정도의 정차횟수 감소를 보였으며, 특히 경부선 상하행, 전라선의 상행의 정차 횟수 감소폭이 컸으며, 경전선의 경우 하행 기준으로 기존 정차 횟수 보다 9.6% 소폭 증가하는 현상을 보였다. 주말 노선별 평균 정차 횟수 또한 주중 시간대와 비슷한 양상을 보임. 주말의 경우 [표 3-10]과 같이, 전체 기준으로 상하행 모두 12.7%의 정차횟수 감소효과를 볼 수 있었음. 모든 노선에서 정차 횟수 증감 효과가 더 커짐을 확인할 수 있었음.

열차 운행횟수를 살펴보면 주중 주말 모두 경부선 상행의 열차 수가 기존 운행 횟수보다 감소했으며, 동해선과 경전선의 운행 횟수가 소폭 상승하다. 이는 최적화 모형에서 열차 운행 거리에 따른 우선 순위에 따라, 동대구나 부산으로(부터)의 수요를 처리하는 열차가 동해선 열차, 경전선 열차 순으로 더 유리하기 때문이다. 이는 최적화 모형 ASLP에서의 운행 비용 설정과 관

Table 6. ASLP results (weekend).

Time	Saturday, Nov. 2015		Load factor 80%		Load factor 85%		Load factor 90%		Load factor 100%	
	down	up	down	up	down	up	down	up	down	up
05	8	8	7	6	6	6	6	6	6	5
06	7	7	8	7	8	6	8	6	7	6
07	8	9	9	11	7	9	7	9	7	9
08	8	4	10	5	9	4	8	4	8	4
09	8	9	11	11	10	9	10	9	9	9
10	9	9	11	10	9	9	9	9	8	8
11	1	4	2	6	2	6	2	6	2	6
12	13	8	13	12	13	10	12	10	11	9
13	7	9	9	12	8	11	8	11	7	10
14	8	8	11	12	10	11	10	10	8	9
15	9	9	13	13	12	11	12	11	11	10
16	8	7	10	11	10	9	9	9	9	9
17	7	9	9	14	9	12	9	11	8	10
18	8	8	12	12	11	11	10	11	9	10
19	8	7	9	10	9	9	8	9	8	8
20	7	8	9	9	9	8	9	8	7	7
21	2	8	3	8	3	8	3	8	3	8
22	6	4	7	3	7	3	6	3	6	3
23	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0
Sum	134	135	165	172	154	152	148	150	136	140

Table 7. HPGM results (weekday) : reduced number of intermediate stops.

Corridor	Tuesday, Nov. 2015				Optimized results				Increase (%)	
	down		up		down		up		down	up
	freq.	avr. # of intermediate stops	freq.	avr. # of intermediate stops	freq.	avr. # of intermediate stops	freq.	avr. # of intermediate stops		
Gyeongbu	59	5.2	60	5.3	59	4.2	54	4.7	-20.1	-10.7
Honam	32	5.4	32	5.5	32	5.2	31	5.3	-4.6	-4.4
Jeolla	10	8.7	10	8.8	11	8.1	11	8.7	-7.0	-0.8
Gyeongjeon	10	7.3	10	7.0	9	8.0	12	6.5	9.6	-7.1
Donghae	10	4.6	10	4.2	13	4.4	12	4.3	-4.7	1.2
Sum	121	5.7	122	5.7	124	5.1	120	5.4	-10.9	-6.0

계되는데, 서울-부산(고속신선)의 경우는 417km, 서울-포항의 경우 370km, 서울-부산(구포)의 경우, 402km이므로 서울-부산(고속신선)이 가장 불리함을 볼 수 있다.

위 결과를 좀 더 세밀히 분석하기 위해 중간 정차 횟수별 열차 운행 횟수를 계산해보았다. Table 9에서 보듯이, 현재는 무정차 통과 열차가 하나도 없는 반면, HPGM 모형을 통해 도출된 노선계획의 경우, 주중의 경우 12대, 주말의 경우 31대에 이른다. 반면 중간 정차 횟수가 9회 이상인 열차 횟수는 기존의 열차 운행계획에 비해 상당히 증가함을 볼 수 있는데, 이는 수요가 많은 OD간에는 될 수 있는 한 정차 횟수를 줄인 열차로 승객을 수송하여 전체 여정시간을 감소시키고, 수요가 많지 않은 OD 수요의 경우, 몇 개의 열차를 빈번하게 정차시켜 그 수요를 처리한다고 볼 수 있다.

Table 8. HPGM results (weekend) : reduced number of intermediate stops.

Corridor	Saturday, Nov. 2015				Optimized results				Increase (%)	
	down		up		down		up		down	up
	freq.	avr. # of intermediate stops	freq.	avr. # of intermediate stops	freq.	avr. # of intermediate stops	freq.	avr. # of intermediate stops		
Gyeongbu	69	5.1	70	5.2	64	3.9	62	4.2	-23.5	-19.2
Honam	33	5.1	33	5.2	35	4.7	36	4.9	-7.8	-5.8
Jeolla	10	8.7	10	8.8	13	7.3	14	7.4	-16.1	-15.9
Gyeongjeon	12	7.3	12	6.7	12	7.5	15	5.9	2.7	-11.9
Donghae	10	4.6	10	4.2	12	4.3	13	3.6	-6.5	-14.3
Sum	134	5.5	135	5.5	136	4.8	140	4.8	-12.7	-12.7

Table 9. HPGM results : number of trains corresponding to intermediate stops.

# of intermediate stops	# of trains			
	Nov. 2015 (weekday)	Nov. 2015 (weekend)	optimized line plan (weekday)	optimized line plan (weekend)
0	0	0	12	31
1	1	1	32	24
2	4	6	9	20
3	20	27	15	20
4	43	51	23	21
5	61	68	33	41
6	39	41	35	31
7	32	32	26	31
8	23	23	24	23
9	13	13	20	18
10	2	2	9	10
11	4	4	5	5
12	1	1	1	1
Sum	243	269	244	276

4. 결 론

본 연구에서는 기존의 정차패턴을 고려한 노선 계획 모형이 가지고 있던 알고리즘의 한계를 극복하여, 보다 빠른 시간 안에 해를 구할 수 있는 2단계 해법을 제시하였고, 이를 활용하여 고속 열차 노선 계획에 적용해보았다. 실험 결과 모든 시간대에 대해 약 2분 안에 최적해를 도출할 수 있었으며, 기존의 열차 운행 계획에 비해 정차 횟수가 획기적으로 감소할 수 있음을 확인하였다.

그러나 본 연구에서 제시한 최적화 모형은 정차 횟수나 열차 운행 횟수에 따른 수요의 변동성을 고려하지 않은 한계를 가지고 있다. 즉 수요는 열차 운행 계획에 관계없이 고정적이라 가정하였고 그 수요를 수송하기 위한 최소 비용의 열차 운행횟수 및 최적의 정차 패턴을 도출하는 모형이므로 새로운 정차 패턴 및 이에 따른 정차역 감소로 인한 수요 감소 효과를 완전히 배제하기 어렵다. 특히 실적 수요로부터 도출된 최적의 노선 계획에서는 더 이상 그러한 수요가 유지되지 않고 변화하는데, 이러한 수요예측과 노선 계획 간의 불일치 문제를 해소하기 위해서는, 노선계획과 그 계획에 따른 수요의 변동성을 동시에 고려할 수 있는 통합 최적화 모형이나 반복적인 프로세스에 대한 추후 연구가 필요하다.

뿐만 아니라 노선계획에서 작성한 정차 패턴이 시간표 작성 과정에서 그대로 현실화되는 것은 불가능하다. 특히 무정차 고속

열차의 경우 각 역 정차 열차와의 표정 속도가 매우 상이하여 대피를 통한 스케줄 조정이 상당히 필요할 것으로 예측되기 때문이다. 결국 노선계획을 중심으로 노선 계획에 따른 수요의 변동성, 노선 계획의 시간표 작성 가능성(feasibility)간의 효율적인 반복적 프로세스가 필요하다.

References

- [1] M.R. Bussieck (1997) Optimal lines in public rail transport, Ph.D thesis, TU Branunschweig.
- [2] B.H. Park, Y. Seo, S.-P. Hong, H.-R. Rho (2013) Column generation approach to line planning with various halting patterns - application to the Korean high-speed railway, *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, 30(4), pp.1-19
- [3] M.R. Bussieck, P. Kreuzer, U. Zimmermann (1996) Optimal lines for railway systems. *European Journal of Operations Research*, 96, pp. 54-63.
- [4] M. Claessens, van Dijk, P. Zwaneveld (1998) Cost optimal allocation of rail passenger lines. *European Journal of Operations Research*, 110, pp. 474-489.
- [5] M.R. Bussieck, T. Lindner, M. Lubbecke (2004) A fast algorithm for near optimal line plans. *Mathematical Methods of Operations Research*, 59, pp. 205-220.
- [6] R. Borndorfer, M. Grottschel, M. Pfetsch (2007) A column generation approach to line planning in public transport. *Transportation Science*, 41(1), pp. 123-132.
- [7] J. Goossens, S. Hoesel, L. Kroon (2002) On solving multi-type line planning problems. METEOR Research Memorandum RM/02/009. University of Maastricht.
- [8] J. Goossens, S. Hoesel, L. Kroon (2004) A branch-and-cut approach for solving railway line-planning problems. *Transportation Science*, 38(3), pp. 379-393.
- [9] Y-H. Chang, C-H. Yeh and C-C. Shen (2000) A multiobjective model for passenger train services planning: Application to Taiwan's high-speed rail line. *Transportation Research Part B*, 34, pp. 91-106.

(Received 22 May 2017; Revised 22 June 2017; Accepted 3 July 2017)

Bum Hwan Park: beomi72@hanmail.net

Department of Railroad Management and Logistics, Korea National University of Transportation, 157 Cheoldo bangmulgwan-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do, 16106, Korea

Jang-Wook Kim: kjw@korail.com

Management Research Department, KORAIL Research Institute 240 Jungangro, Dong-gu, Daejeon City, 34168, Korea