

철도 차량의 반복시간과 소요량 사이의 관계 고찰

Study on Relationship between Turn-back Time and Assignment of Trainsets

기형서 · 오석문 · 박동주*

Hyung-seo Ki · Suk-mun Oh · Dongjoo Park

Abstract This study examines the relationship between the operational turnaround time and the rolling stock requirements. In this study, the operational turnaround time of rolling stock is divided into physical turnback time and waiting time. This paper presents a variety of models and estimation results of the existing studies on operational turnaround time. The proposed estimation model of the operational turnaround time in this study is designed to minimize the operational turnaround time in terminus stations, while the rolling stock requirement is reduced. The developed estimation model was applied in a real-world example, and it was found that the operational turnaround time and the required rolling stocks were lessened compared with the current condition. The method presented in this paper is expected to be utilized in train operational planning and rolling stock routing plans, thereby minimizing the rolling stock requirements of existing railway operating authorities.

Keywords : Turnback time, Turnaround time, Train operational planning, Rolling stock routing plan

초 록 본 논문은 철도차량의 운영상 반복시간과 차량소요량 사이의 관계를 고찰한다. 철도차량의 운영상 반복시간은 물리적 회차시간과 대기시간으로 구별되며, 본 논문은 이 가운데 운영상 반복시간의 산정모형과 산정 결과에 대한 다양한 고찰을 제시한다. 제시된 운영상 반복시간의 산정모형을 활용하면 터미널 정거장에서의 운영상 반복시간을 최소화 할 수 있도록 설정할 수 있다. 또한 차량소요량이 감소되는 운영상 반복시간 설정조건을 제시한다. 현실적인 데이터를 활용하여 운영상 반복시간 설정조건에 따라 차량소요량이 감소하는 사례와 분석결과를 제시한다. 본 논문에서 제시하는 방법은 기존 철도운영기관의 차량소요량을 최소화 하는 열차운영계획 및 차량운용계획 수립에 활용이 가능할 것으로 기대된다.

주요어 : 물리적 회차시간, 운영상 반복시간, 열차운영계획, 차량운용계획

1. 서 론

철도투자사업 계획 및 철도운영단계 모두에서 철도용량과 시설규모 및 차량소요량에 대한 합리적 판단이 중요한 요건이다. 본 논문은 열차운영계획과 차량운용계획에 관련된 철도차량의 운영상 반복시간과 소요량 사이의 관계를 고찰한다. 운영상 반복시간(Operational turnaround Time)은 물리적 회차시간(Physical turnback time)과 대기시간(Waiting time)으로 구분할 수 있다. 여기서 물리적 회차시간은 열차를 구성하는 차량편성량과 열차길이, 시설규모와 입환작업, 객·화차 정리작업 등에 의해 결정되는 값이며 고정요소이다. 반면에 대기시간은 다이어그램상의 열차배치, 상·하행열차 운전시격, 상·하행열차 표정시간의 조합에 따라 추가적으로 발생하는 시간이며 가변요소이다.

Fig. 1은 열차가 상행 - 하행 노선을 일주하는 차량 1 순환주기(1 Cycle trip around) 및 운영상 반복시간에 대한 개념도이다. 여기서 표정시간 TRV_{dn} , TRV_{up} 은 정해진 차량성능과 노선선형 및 정차시간, 영업속도에 따라 거의 고정되며, 운전시격 또한 하루 시간대별 수요에 따라 결정되어 있다.

열차운영계획자가 차량 1 순환주기(1 Cycle trip around)를 단축시켜 차량소요량을 최소화 하는 문제는 고정요소는 처리가 곤란하며 가변적 요소인 시종점 정거장의 체류시간 $t_1(r)$, $t_m(r)$ 의 축소가 대상이다. 철도운영계획을 수립할 때는 물리적 회차시간보다 운영상 반복시간에 따라야 한다. 이는 대기시간이 운영상 추가로 발생하기 때문이다. 현재 국내외 여러 연구에서는 물리

*Corresponding author. E-mail: djpark@uos.ac.kr.

© 2016 The Korean Society for Railway. All rights reserved.

<https://doi.org/10.7782/JKSR.2016.19.6.802>

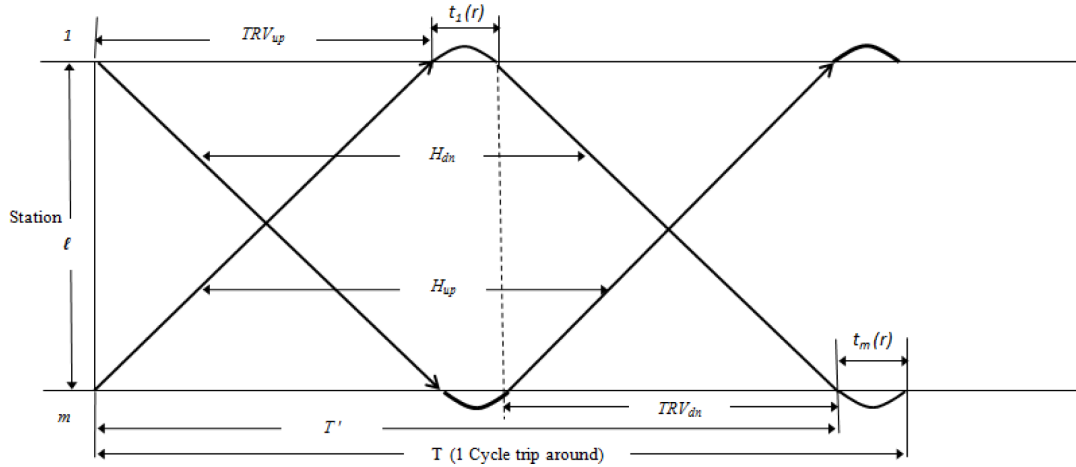


Fig. 1. Concept of 1 cycle trip around time and operational turnaround time.

적 회차시간과 운영상 반복시간의 차이점을 구체적으로 다루지 않았다.

먼저 기존의 연구 중 운영계획과 열차스케줄링 제약에 관하여 고찰한다. Ji-Won Chung, 등 [1]은 한국철도의 열차시퀀싱 문제를 다루면서, 심야 주차와 차량유지보수 제약을 포함하여, 주행거리가 각 열차행로에서 균형을 유지하는 혼합정수프로그래밍 모델을 제시하였다. 그 문제해법으로서 하이브리드 유전자알고리즘을 제안했다. 제안된 알고리즘은 MIP 기반의 두 가지 휴리스틱 처리과정과 함께 수정엘리트그룹 기법을 활용하였다. 그들은 모든 반복시간은 최소 터미널 반복시간을 유지해야 한다고 전제하고 있다.

S.M. Oh & J.H. Min [2]은 최근 수요응답형 지하철 열차운영계획 프로그램인 ‘Dr. METRO’를 도입했다. 이 프로그램은 여객 통행량, 수요예측, 열차스케줄링 및 차량편성의 순서할당 등 주요 기능을 포함하고 있다. 여기서 열차스케줄링 문제해법으로 수학적 최적화기법 그리고 열차스케줄 순서를 벗어난 차량편성의 순서할당에 휴리스틱 알고리즘을 사용하고 있다. 또한 최적화 기법에 기반을 둔 알고리즘은 독자 개발한 몇 가지 GUI 기능을 충족하는 소프트웨어 프로그램이다. 이 연구에서도 전형적인 철도운영계획의 프로세스인 열차 다이어그램 생성 후 차량배정을 적용하고 있다.

K. Ziarati, H. Chizari & A. Mohammadi Nezhad [3]은 Genetic algorithm과 Neural network algorithm을 활용하여 수학적 네트워크 모델을 구축하였다. 고정된 스케줄에 견인 가능한 다른 유형의 동력차 배정은 고정 및 운영비를 최소화하는 컴퓨터 프로그램으로 구현하고, 1주일 차량 운용 다이어그램을 적용하고 있다. 그러나 매개변수들의 변화에 따른 운영상 반복시간의 최소화를 동시에 추정하지 못한다는 한계를 갖고 있다.

김성호 등 [5]은 열차스케줄 설계는 철도운영기관이 해결해야 될 가장 복잡한 문제라고 제시하였다. 차량운용수는 열차시각표를 감당하는 소요열차편성량과 같다고 기술하면서, 이 차량소요계획에 유용한 열거알고리즘을 제시하였다. 이 열거알고리즘은 집합분할문제로서 공식화 했으며 열거기법 혹은 컬럼생성기법을 이용하여 해결했다. 여기서 추가제약을 가진 최단경로문제와 영구꼬리표 알고리즘이나 제약프로그래밍으로 반영하기 어려운 제약조건이 존재하거나 혹은 제약이 많은 경우에 기존 열생성기법 보다 상대적으로 유효하다고 주장한다. 이 연구는 C++ Pseudocode(RE. Neapolitan, K. Naimipour [4] 알고리즘 설계와 분석 기법)를 사용하는 동력차 배정에서 도착열차 시간에 최소 반복시간을 더한 값이 후보열차 출발시간 보다 작아야 한다고 전제하고 있다.

Z. B. Jiang1 & X.Y. Xiao [6]는 다양한 운전시각으로 운행하는 도시철도노선에서 반복회차선 제약 열차스케줄링 알고리즘으로 Devide and conquer rule 채택하였다. 그 목적은 다른 시간주기의 여객수요, 선로용량, 차량수, 차량기지의 위치, 열차운용 및 반복회차 형태에 기반을 둔 실행 가능한 열차시각표를 작성하는 것이다. 상하이 도시철도 2호선의 사례연구에서 업그레이드된 TPM 소프트웨어는 개발한 시뮬레이션 모델링 프레임워크 및 알고리즘을 적용하였다. 그들은 다른 운전시각이 혼합된 운영계획 사례를 동일 시각으로 개선하여 반복선수를 감축하였다.

H. NIU, X. ZHOU [7]는 도시철도노선의 시간 종속 수요와 과포화 상태 하에서 열차시각표를 연구하였다. 여객 탑승과 출발 문제에 통합된 이중정수프로그래밍 모델을 적용하였다. 개별 정거장과 다중 정거장 문제로 구분하여 개진자의 최적시각표에는 국소개선알고리즘을 후자에는 유전자알고리즘을 이용하여 해법을 도출하고 있다. 여기서 열차스케줄링의 핵심 의사결정 변수는 시발 터미널에서 각 열차의 출발시간임을 강조하고 있다.

다음으로 기존의 차량소요량 판단에 관련한 기준을 검토한다. 도철용 [8]은 구간 $D(km)$ 이내에 있는 차량 N 과 전체차량의 15%정도를 예비차량으로 제시하면서 반복시간을 고려하지 않고 있다. 한국개발연구원(KDI) [9]은 도로와 철도부문 예비타당성 조사 지침의 차량소요량 산출식에서 반복시간을 물리적 회차시간과 구별하지 않는다. 김의일 [10]은 차량소요량 계산개념도에 상·하행 반복시간이 동일한 것으로 표현하고 있으며, 반복시간을 회차시간으로 일률 적용하고 있다.

이상과 같이 기존 연구를 살펴 본 바, 대부분 반복시간을 분석대상으로 하지 않았다. 그 반복시간의 개념은 구분이 모호할 뿐만 아니라 물리적 회차시간과 운영상 반복시간의 차이점이 명확치 않았다. 따라서 운영상 반복시간의 변수들에 대한 분석과 어떻게 최소화 가능한지를 제시한 자료는 찾을 수 없다. 기존 차량소요 판단기준은 반복시간과 여유시간이라는 애매한 용어를 사용하거나 시종점 정거장에서 동일한 회차시간을 적용하는 한계점을 가지고 있다.

본 논문의 목적은 불명확한 물리적 회차시간을 재산정하고 파라미터에 따라 변화하는 운영상 반복시간의 산정모형을 개발하여, 열차운영계획시 상·하행 열차스케줄 작성의 어려움을 개선하는 데 도움을 주고자 한다. 다시 말하면 상행과 하행열차 배열 과정에서 계획자가 경험을 바탕으로 임의 조절하는 방식이 아닌 산정모형을 활용하여 생성하는 기법이다. 이 기법은 일반적으로 열차운영계획이 먼저 수립된 후에 그 결과물인 열차디어그램을 받아서 차량운용계획을 수립하는 프로세스를 개선하는 동시에, 최소 운영상 반복시간으로 최소 차량운용을 가능하게 한다. 이를 통하여 철도투자사업 및 운영단계에서 차량소요량 판단의 정확성과 양단 정거장 반복선수의 합리적 산정에 기여하게 될 것이다.

이어지는 2장에서는 물리적 회차시간과 운영상 반복시간을 정의하고 그 내용을 설명한다. 3장은 운영상 반복시간 산정모형에 대한 전제조건 및 부호의 정의를 기술하고 모형구축 내용을 제시한다. 4장에서는 시나리오 구성을 통한 실험결과 분석 및 고찰과 운영상 반복시간의 최적화 효과를 구체적으로 제시한다. 마지막으로 5장은 결론으로 시사점과 연구의 한계 및 후속연구를 제시한다.

2. 물리적 회차시간과 운영상 반복시간

2.1 물리적 회차시간

Table 1은 전형적인 반복회차선의 유형을 예시한 것이다. 물리적 회차시간(Physical Turnback Time)은 열차가 종착 후 다음 후보열차에 투입되기 위하여 필요한 물리적인 소요시간이라고 정의한다. 이 시간크기를 좌우하는 요소들은 정거장 반복선로의 기하구조, 승무원 교대, 차량기지 입출고, 유지보수, 화차 및 동력차의 입환작업시간, 동력차 방향 전환용 전차시간, 차량의 급수 및 급유, 객실 여객편의 시설의 정비 및 청소, 비품관리, 열차조성과 관련된 시험, 열차간 접촉, 등이다. 기존 철도운영기관에서 사용하는 물리적 회차시간은 전동차 기준으로 열차편성량에 따라 약간의 차이가 있으나 5~7분, 고속열차는 40분(경부고속철도 기본계획 당시 기준)이다. 반면에 일반철도의 경우는 차종 및 정거장 시설유형에 따라 차이가 많아 일정한 값으로 규정하는 데 한계가 있어서 주어진 여건에 따라 별도로 설정하고 있다.

Table 1. Layouts of various turn-back track.

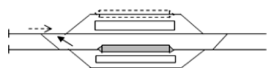
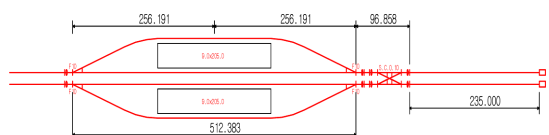
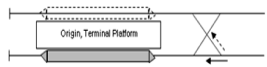
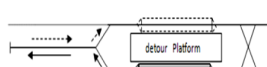
Types	Layout	Shunting (mileage)
Siding		 <p>(10cars) F10 : 256.2 + 96.8 + 110.5 = 464m (F12 : 500m, F8 : 430m, F6 : 401m)</p>
Extension track		
Y - type (Reversing track)		

Table 2는 반복선에서 전동열차의 차량이 이동하는 시간(왕복)을 시뮬레이션 하여 30초 단위로 정리한 결과이다. 도보 속도는 5km/h를 적용하고 여객 승차와 하차는 각 30초, 운전석 기기취급은 15초를 적용한 것이다. 다만 고속열차는 현재 적용하고 있는 기준 40분, 화물열차는 특징이 곤란하여 임의로 추출한 110분을 예시하였다.

Table 2. Calculation results.

Category		Urban and metropolitan			HSR	Freight
Composition		6cars	8cars	10cars	20cars	30cars
Operation condition	Total length (mileage)	350m	390m	464m	384m	560m
	Walking time (applied speed 5km/h)	87sec	116sec	144sec	Current criteria	Random
	Passenger and desk handling	75sec	75sec	75sec		
	Shunting (round trip)	126sec	138sec	160sec		
	Total time (sec)	288	329	379		
Physical turnback time (min.)	5.0	5.5	6.5	40		

Note) The total time is in practical units of 30 seconds

2.2 운영상 반복시간

물리적 회차시간과 달리 운영상 반복시간은 고정적인 물리적 회차시간 이외에 운전시격, 상·하행열차 운행시간 TRV_{up} , TRV_{dn} (=표정시간), 열차배치(Sequencing) 위치에 따라 변화되는 특성을 갖고 있다. 이 운영상 반복시간은 도착열차의 차량을 후보열차에 충당하기까지 요구되는 소요시간(도착시간~후보열차 출발시간)이라고 정의한다. 따라서, 물리적 회차시간의 개념과 비교할 때, 운영상 반복시간은 항상 '운영상 반복시간 \geq 물리적 회차시간'의 관계를 충족해야 된다. Fig. 2는 운영상의 반복시간 개념을 순서도로 작성한 것이다. 이 과정을 구체적으로 설명하면 다음과 같다.

- ① 상행열차는 기준점 [0]에서 출발하여 → 13분 운행 후, 역 [1]에 도착하여(=하행열차 출발 기준점 13분 위치) 운전시격(5분)으로 배치된 다음 후보열차에 반복운용이 가능하다.
- ② 이 때 하행 운영상 반복시간은 최소한 물리적 회차시간(5분 이상)을 충족하는 18분에 출발할 때 5분이다.
- ③ 반복운용 된 하행열차는 역 [1]을 출발하여 13분 운행 후 역 [m]에 도착한다(31분 위치).
- ④ 이렇게 역 [m]에서 시발하여 역 [1]을 경유하고 역 [1]에 복귀한 하행열차는 물리적 회차시간(5분)을 경과해야만 다음 상행 후보열차에 투입이 가능하다.
- ⑤ 그러나 상행열차도 기준점 [0]으로 부터 운전시격 5분마다 계획되기 때문에, 다음 35분 출발열차에 물리적 회차시간 부족으로 반복운용이 안 되고 그 다음 출발열차(40분 위치)에 투입되면서, 상행 운영상 반복시간은 9분(4+5)으로 증가된다.
- ⑥ 결과적으로 역 [m]의 기준점 [0]에서 시발한 열차가 1순환주기를 완성하는 데 소요된 시간은 총 40분이다.

여기서 '상행 표정시간 13분 + 하행 운영상 반복시간 5분 + 하행 표정시간 13분 + 상행 운영상 반복시간 9분 = 40분'이 소요되는 데 결국 상·하행열차 표정시간과 물리적 회차시간은 거의 고정되어 단축이 곤란하다. 본 연구는 예시한 5 + 9 = 14분보다 상·하행 운영상 반복시간을 최소화할 수 있는 상행열차 배치위치를 조정하는 기법으로 새로운 산정모형을 구축하였다.

본 연구의 모형은 상·하행 열차의 운전시격과 표정시간이 동일한 경우뿐만 아니라 상·하행 열차의 운전시격과 표정시간이 서

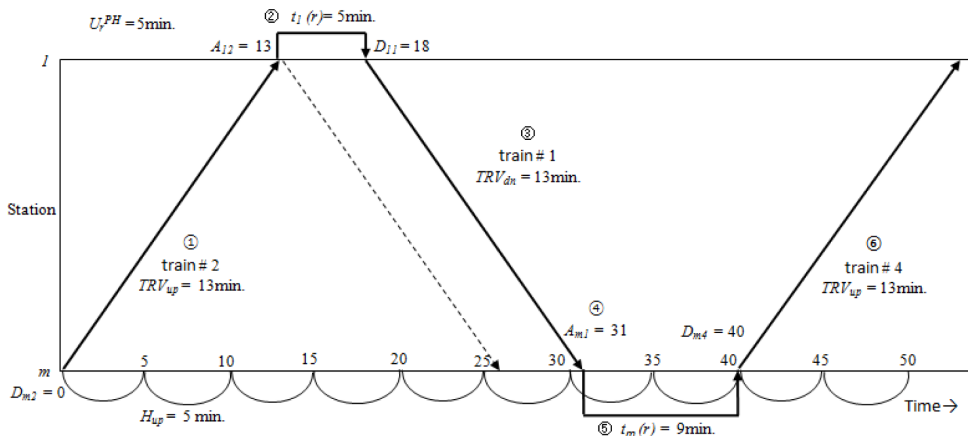


Fig. 2. Concept of the operational turnaround time.

로 다른 경우에도(즉 기존의 도시 및 광역철도의 운행체계보다 일반화 된) 계산을 보장하는 특성을 가지고 있다. 다음 장에서는 개발된 운영상 반복시간 산정모형에 대하여 자세하게 설명한다.

3. 운영상 반복시간 산정모형

3.1 전제조건

운영상 반복시간을 수식모형으로 표현하는데 있어서 고려할 전제조건은 아래와 같다.

- i) 물리적 회차시간은 열차종별로 서로 다르게 설정한다.
- ii) 상행과 하행의 열차운행 표정시간이 각기 다를 수 있다(열차다이아그램에서 기술기차만 발생한다고 가정하여 0.5분씩 상행열차 기준 배치위치[0,H]를 변경하면서 반복시간 변화를 분석한다).
- iii) 노선에서 상행과 하행 열차의 운전시격은 서로 다를 수 있다.
- iv) 노선의 시발역과 종착역에서 운영상 반복시간은 서로 다를 수 있다.

3.2 부호의 정의

- 인덱스

- $S = \{1, 2, 3, \dots, m\}$: 정거장 번호 집합, $s \in S$, $s=1$ 시발역, $s=m$ 종착역
- $I = \{1, 2, 3, \dots, n\}$: 열차 번호 집합, $i, j \in I$
- $R = \{\text{도시 및 광역전동차 6량, 8량, 10량, KTX 20,...}\}$: 열차종별 번호 집합, $r \in R$

- 변수

- $t_1(r)$: 시발 정거장에서 열차종별-r의 하행 운영상 반복시간
- $t_m(r)$: 종착 정거장에서 열차종별-r의 상행 운영상 반복시간

- 파라미터

- U_r^{PH} : 열차종별 r의 물리적 회차시간(예, r=#6 : 5분, #8 : 5.5분, #10 : 6.5분, KTX : 40분)
- TRV_{dn} : 열차 [i]의 시발역 ~ 종착역간 하행열차 표정시간
- TRV_{up} : 열차 [i]의 종착역 ~ 시발역간 상행열차 표정시간
- A_{m1} : 상행열차 ($m \rightarrow 1$) [m]의 역 [1]에 도착(후보)시간
- D_{11} : 하행열차 ($1 \rightarrow m$) [1]의 역 [1]에서 출발(후보)시간(=하행 열차배열 위치)
- D_{m1} : 상행열차 ($m \rightarrow 1$) [1]의 역 [m]에서 출발(후보)시간(=상행 열차배열 위치)
- A_{1m} : 하행열차 ($1 \rightarrow m$) [1]의 역 [m]에 도착(후보)시간
- H_{dn} : 하행열차의 목표 운전시격
- H_{up} : 상행열차의 목표 운전시격
- T' : 임의의 차량이 정해진 운영상 반복시간 $t_1(r)$ 에 의해 이전 출발지로 복귀한 시간
- T : 차량운용의 1 순환주기(1 cycle trip around)

3.3 산정 모형

산정모형의 구축은 Fig. 3의 흐름도를 활용하였다. 먼저 물리적 회차시간 U_r^{PH} 과 운전시격 H_{dn} , 정거장 [m]에서 열차 [1]의 출발시간(열차배열 위치) D_{m1} 의 조건 1에 충족하는 경우(Yes), 하행(Downstream) 운영상 반복시간 $t_1(r)$ 은 '물리적 회차시간 U_r^{PH} - 상행열차 정거장 [1]에 도착시간 A_{11} + 상행 표정시간 TRV_{up} '값을 갖는다. 만약 충족되지 않으면서(No), 상행 표정시간 TRV_{up} 과 운전시격 H_{dn} 의 조건 2에 충족하는 경우(Yes)는 '2×물리적 회차시간 U_r^{PH} - 정거장 [m]에서 열차 [1]의 출발시간(열차배열 위치) D_{m1} '값을 갖는다. 조건식 1, 2를 만족할 수 없는 경우는 (수식 1)을 활용하여 계산하도록 정식화 하였다.

여기서, r 은 Donald Knuth의 표기법으로 정리하면 다음과 같다[11].

$$r \equiv D_{m1} \bmod TRV_{up} \equiv D_{m1} - \left\lfloor \frac{D_{m1}}{TRV_{up}} \right\rfloor \times TRV_{up} \quad (1)$$

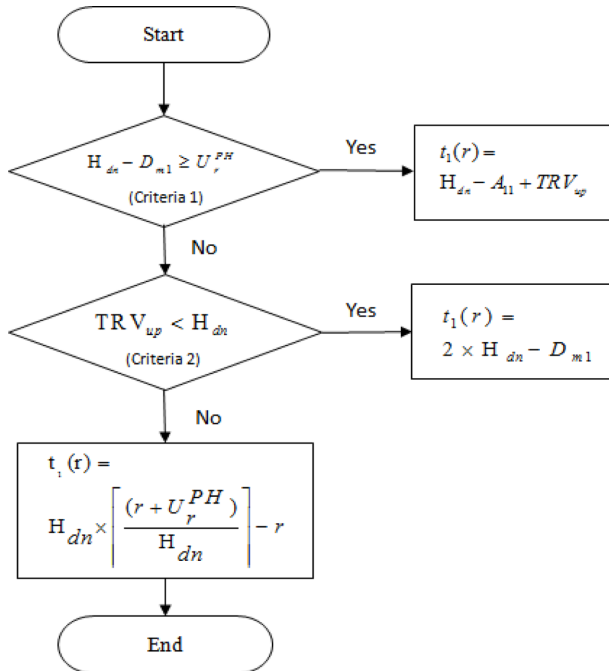


Fig. 3. Operational turnaround time model(downstream).

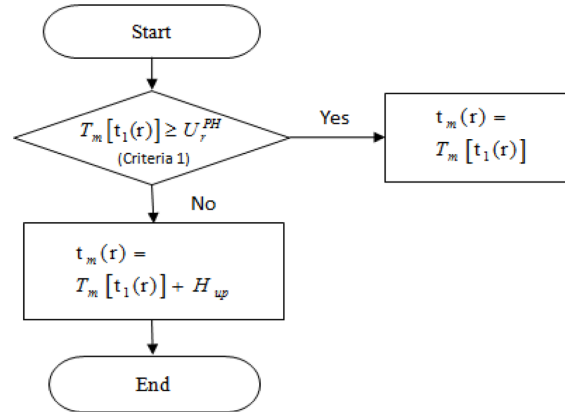


Fig. 4. Operational turnaround time model(upstream).

Fig. 4의 흐름도와 같이 상행(Upstream) 운영상 반복시간 $t_m(r)$ 모형은 하행(Downstream) 운영상 반복시간 $t_1(r)$ 이 먼저 산출된 후, 그 결과를 기반으로 구축하였다. 이때 하행 운영상 반복시간 제약요소가 공통적으로 동원되며, 물리적 회차시간 U_r^{PH} 과 운전시각 H_{up} , 정거장 [1]에서 열차 [2](후보열차) 출발시각 D_{12} 및 하행 표정시각 TRV_{dn} 을 비교하여, 조건 1을 충족하는 경우(Yes)와 충족되지 못하는(No) 경우로 나뉘어 모형을 개발하였다.

여기서, $T \equiv (A_{11} + t_1(r) + TRV_{dn})$, (수식 2)의 T 는 임의의 열차가 종점 정거장 [m]에서 출발하여 시점의 정해진 하행 반복시간을 경과 후 출발지로 복귀하는데 소요된 시간이다. 그 다음 차량 1 순환주기를 완성하기 위해 상행 반복시간을 구하는 모형을 구축하는 과정이다.

$$T_m[t_1(r)] \equiv \left[\left(H_{up} \times \left\lceil \frac{T}{H_{up}} \right\rceil + D_{m1} - T \right) \bmod H_{up} \right] + H_{up} \times \left\lceil \frac{U_r^{PH}}{H_{up}} \right\rceil - H_{up} \quad (2)$$

위에서 구축한 모형으로 하행 및 상행 운영상 반복시간을 산정하며, 평균 운영상 반복시간은 종점 정거장 [m]에서 상행열차 배열시간 D_{m1} 의 위치 $[0, H_m]$ 에 따라 변화한다. (수식 3)의 조건을 충족하는 열차 스케줄링이 차량소요량을 최소화하는 방식이 될 것이다.

$$\text{Min}_{D_{mj} \in [0, H]} \frac{t_1(r) + t_m(r)}{2} \quad (3)$$

Fig. 5는 구축한 산정모형의 예시이며, 상·하행 표정시간 16분, 운전시각 30분, 물리적 회차시간 5분으로 가정하여 작도하였다.

먼저, 실선 # 2열차가 상행 열차배열 위치 D_{m1} (16분)에서 출발하여(역 [m] → 역 [1]) A_{11} (32분)에 도착 후, D_{12} (46분)까지 하행 반복시간 $t_1(r)$ 14분을 경과한 다음 # 1 열차(역 [1] → 역 [m])가 A_{m1} (62분)에 도착하여, 다음 # 6 열차 출발시각 D_{m6} (76분)까지 $t_m(r)$ (=14분)이 산정된다. 한편 점선 # 4 열차가 상행 열차배열 위치 D_{m4} (26분)에서 출발하여(역 [m] → 역 [1]) A_{14} (42분)에 도착 후, 물리적 회차시간 U_r^{PH} (5분)을 충족할 수 없어(46분까지 반복불가) 차기 열차 출발시각 D_{13} (76분)까지 하행 반복시간 $t_1(r)$ (=34분)을 대기하였다가 # 3 열차로(역 [1] → 역 [m]) A_{m3} (92분)에 도착한다. 다음 상행열차 # 8 출발시각 D_{m8} (116분)까지 상행 운영상 반복시간 $t_m(r)$ (=24분)이 산출되며, 차량 1 순환주기를 완성하는 열차의 궤적을 순차적으로 추적할 수 있다. 다음 장에서는 산정모형에 대한 실험결과 분석 및 최적화 효과를 순차적으로 기술하였다.

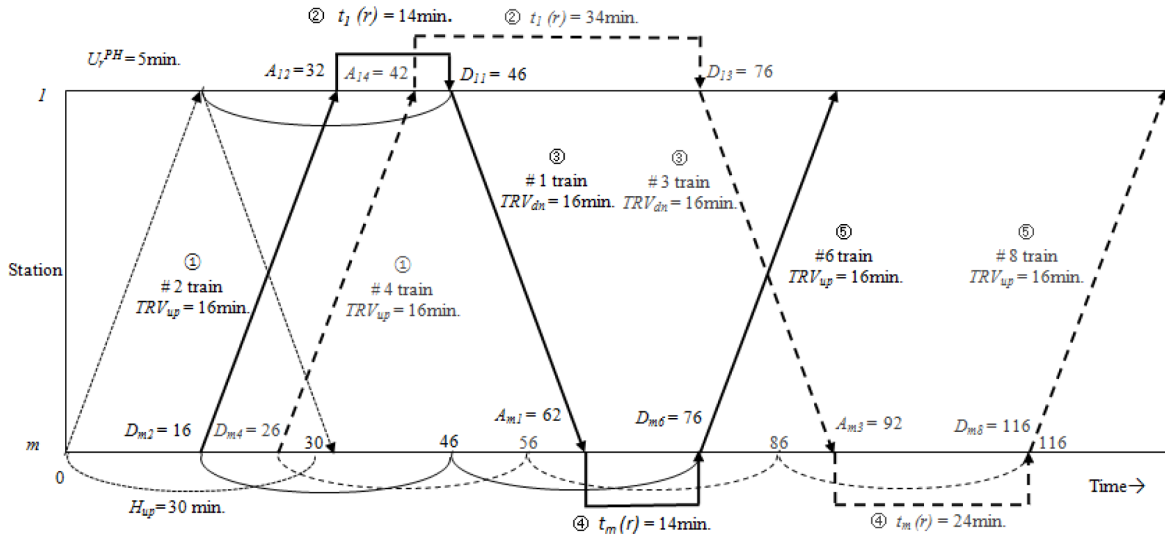


Fig. 5. Sample diagram of operational turnaround time.

4. 실험 결과 분석 및 최소화 효과

4.1 실험 결과

가. 실험계획 및 시나리오 구성

Table 3의 실험계획 시나리오 설정은 철도운영계획 중 열차스케줄링의 프로세스를 기반으로 노선의 열차특성을 대표하는 도시 및 광역철도, 고속철도와 일반철도로 나누고 열차종별을 3가지로 구분하였다. 열차종별 실험계획의 구성과 그 입력요소들은 물리적 회차시간, 각 열차의 표정시간(상·하행), 운전시격(상·하행), 열차배열 위치 등 4 가지이다. 그 출력값은 평균 운영상 반복시간, 물리적 회차시간과 차, 차량소요량과 단일해 여부를 제시하는 것이며 그 세부 시나리오의 구성을 설명하면 다음과 같다.

도시 및 광역철도에서 운행되는 열차편성을 6량, 8량, 10량형으로 나누고, 편성량에 따라 고정된 물리적 회차시간은 5분, 5.5분, 6.5분으로 설정하였다. 여기에 표정시간 조건 $TRV_{up}=TRV_{dn}(35\text{분})$ 으로 고정된 시나리오는 운전시격 조건 $H_{up}=H_{dn}$ 의 각각 30분, 9분, 5분으로 변화시키면서 각 편성량별 운영상 반복시간의 산정결과를 비교하는 구조이다. 반면에 표정시간 조건 $TRV_{up}=TRV_{dn}(35\text{분})$ 으로 고정하면서 운전시격 조건 $H_{up} \neq H_{dn}$ 의 경우이다. 이 시나리오는 상행 운전시격 $H_{up}(29\text{분}, 8\text{분}, 4\text{분})$ 과 하행 운전시격 $H_{dn}(30\text{분}, 9\text{분}, 5\text{분})$ 을 가정하여 6량형을 표본으로 운영상 반복시간의 변화를 관찰하는 것이다.

다음은 운전시격 조건 $H_{up}=H_{dn}$ 을 16분에 고정하고서 표정시간 조건 $TRV_{up}=TRV_{dn}$ 을 각각 19분, 50분, 90분으로 가정하여 각 편성량별(6량, 8량, 10량형) 운영상 반복시간의 산정결과를 비교하는 것이다. 반면에 운전시격 조건 $H_{up}=H_{dn}(16\text{분})$ 으로 고정하면서 표정시간 조건 $TRV_{up} \neq TRV_{dn}$ 의 경우이다. 이 시나리오는 상행 표정시간 $TRV_{up}(18\text{분}, 49\text{분}, 89\text{분})$ 과 하행 표정시간 $TRV_{dn}(19\text{분}, 50\text{분}, 90\text{분})$ 으로 가정하여, 6량형을 표본으로 운영상 반복시간의 변화를 추적하는 구조이다.

그 다음은 고속철도와 일반철도에 대한 표정시간 조건 $TRV_{up}=TRV_{dn}$ 을 각각 130분, 165분, 210분으로, 운전시격 조건 $H_{up}=H_{dn}$ 을 각각 16분, 10분, 30분으로 가정한 구조이다. 여기서 물리적 회차시간 20분과 40분에 대한 운영상 반복시간의 변화를 관찰하는 것이다. 반면에 운전시격 조건 $H_{up}=H_{dn}$ 이 각각 16분, 10분, 30분이지만, 표정시간이 다른 조건 $TRV_{up}(130\text{분}, 165\text{분}, 210\text{분}) \neq TRV_{dn}(128\text{분}, 163\text{분}, 208\text{분})$ 으로 가정하여 운영상 반복시간의 변화를 관찰하는 구조이다.

나. 산정결과 고찰

먼저, 도시 및 광역철도와 일반 및 고속철도의 경우에는 물리적 회차시간 U_r^{PH} 의 큰 차이를 확인할 수 있다. 그 원인은 전동열차 편성량과 열차길이에 의한 입환작업 소요시간의 영향이다(5분~6.5분). 예를 들면 일반열차의 경우는 동력차와 객화차의 전선입환 시간과 반복운용을 위한 준비정리 및 열차조성과 제동시험 등이 고정적으로 부가된다. 고속열차의 경우는 반복운용을 위한 정리시간(청소, 승하차 및 운전준비 등에 20분~40분 설정)이 많이 필요하기 때문인 것으로 분석된다. 또한 고정편성형 이외에 동력차 견인형의 일반철도(화물열차 경우)는 그 시간을 동일하게 설정하기 곤란한 특성을 가지고 있다. 여기서 본 연구의

Table 3. Results of calculation of the operational turnaround time.

Scenario		Input (min.)						Output (min.)			Remark
		U_r^{PH} (a)	TRV		Headway		D_{m1}	$[t_1(r)+t_m(r)]/2$ (b)	Difference (b-a)	Vehicle req. (units)	
			up	dn	up	dn					
Urban and metropolitan railway	6car	5	35	35	30	30	20	10	5	4	
			35	35	9	9	3.5	5.5	0.5	11	
			35	35	5	5	0	5	0	18	Single
	8car	5.5	35	35	30	30	20	10	4.5	4	
			35	35	9	9	3.5	5.5	0	11	Single
			35	35	5	5	2.5	7.5	2	20	
	10car	6.5	35	35	30	30	20	10	3.5	4	
			35	35	9	9	8	10	3.5	12	
			35	35	5	5	2.5	7.5	1	20	
	6car	5	35	35	29	30	21.5	8.5	3.5	4	
			35	35	8	9	4	5	0	11	Single
			35	35	4	5	0	5	0	21	*Single
	6car	5	19	19	16	16	11	5	0	4	Single
			50	50	16	16	10	6	1	8	
			90	90	16	16	10	6	1	14	
	8car	5.5	19	19	16	16	3	13	7.5	5	
			50	50	16	16	10	6	0.5	8	
			90	90	16	16	10	6	0.5	14	
	10car	6.5	19	19	16	16	3	13	6.5	5	
			50	50	16	16	2	14	7.5	9	
			90	90	16	16	2	14	7.5	15	
	6car	5	18	19	16	16	10.5	5.5	0.5	4	
			49	50	16	16	9.5	6.5	1.5	8	
			89	90	16	16	9.5	6.5	1.5	14	
HSR and conventional railroad	Loco. and KTX	20	130	130	16	16	10	22	2	22	
			165	165	10	10	0	20	0	42	Single
			210	210	30	30	0	30	10	18	
		40	130	130	16	16	2	46	6	25	
			165	165	10	10	0	40	0	47	Single
			210	210	30	30	15	45	5	20	
		20	130	128	16	16	9	23	3	22	
			165	163	10	10	9	21	1	42	
			210	208	30	30	29	31	11	18	
	40	130	128	16	16	1	47	7	25		
		165	163	10	10	9	41	1	47		
		210	208	30	30	14	46	6	20		

한계는 일반철도를 대상으로 전국 주요 정거장을 전수조사할 수 없었던 점이다. 그럼에도 불구하고 어느 경우이건 물리적 회차 시간이 특정되면 운영상 반복시간을 계산할 수 있도록 산정모형이 개발되었다.

다음으로, 표정시간 조건 $TRV_{up}=TRV_{dn}$ 에 운전시격 조건 $H_{up}=H_{dn}$ 을 각각 30분, 9분, 5분으로 변화시키는 시나리오에서 도시 및 광역철도는 차량편성량이 증가하면, 물리적 회차시간의 증가보다 운영상 반복시간의 증가 폭이 더 커지는 현상이다. 또한 단

일해를 제외하고 범위해(=복수해)를 갖는 경우에도 차량편성량이 증가할수록 범위가 더 넓어지는 현상이다. 이러한 현상이 발생하는 이유는 물리적 회차시간이 상대적으로 큰 열차편성은 동일조건에서 후보열차에 매칭되는 경우가 줄어들어 차기 후보열차로 옮겨지기 때문이다. 한편 현실적으로 수요의 크기로 인하여 상행과 하행의 운전시격이 1분 정도 서로 다른 운영환경을 가정한 사례이다. 이 운전시격 조건 $H_{up} \neq H_{dn}$ 은 동일 조건에 비해 운영상 반복시간이 약간 감소하고, 평균운전시격도 0.5분 감소되면서 차량소요량에 변화를 보인다. 이때 차량소요량이 일부 증가되는 원인은 평균시격이 단축되기 때문이다. 따라서 계획자는 상·하행이 서로 다른 운전시격으로 계획되는 경우 그 평균값을 적용하여 차량소요량을 검토할 필요가 있다.

한편 도시 및 광역철도 노선의 비첨두 시간대를 가정한 경우로서, 운전시격(16분)을 고정($H_{up}=H_{dn}$)하고, 표정시간 조건 $TRV_{up}=TRV_{dn}$ 의 19분, 50분, 90분에 대한 시나리오는 차량편성량이 증가하면 운영상 반복시간과 물리적 회차시간 차가 커지고 차량소요량도 상대적으로 1편씩 증가되는 현상이 나타났다. 그 이유는 동일조건에서 차량 1순환주기 시간이 증가되면서 운전시격은 동일하므로 차량소요량 계산결과가 늘어나기 때문이다. 여기서 현실적인 노선의 선형조건을 가정한 경우로서, 1분 정도 다른 상·하행 표정시간 조건 $TRV_{up} \neq TRV_{dn}$ 의 결과는 운영상 반복시간이 0.5분씩 증가되지만 차량소요량에는 변화가 없었다. 그 이유는 상대적으로 차량 1순환주기 시간의 미미한 변화(0.5분)로 판단이 된다. 따라서 표정시간 보다 운전시격의 영향이 더 크다는 점을 확인할 수 있었다.

마지막으로 일반철도 및 고속철도의 물리적 회차시간 U_r^{PH} 을 20분, 40분이라고 가정한 시나리오에 대한 결과이다. 이 때 운전시격과 표정시간을 동일하게 적용한 경우와 하행 표정시간을 2분씩 단축시킨 경우는 운영상 반복시간의 미미한 변화로 차량소요량에도 변화는 없다. 다만, 물리적 회차시간 40분과 20분을 비교할 경우는 차량소요량이 3 ~ 5편성까지 감소된다. 그 이유는 회차시간의 축소 폭이 커져서 운전시격이 작아질수록 차량소요량이 크게 늘어나기 때문이다. 따라서 물리적 회차시간의 단축 연구도 지속되어야 할 것이다.

덧붙여 Table 4는 표정시간 35분, 운전시격 5분을 가정한 경우, 도시 및 광역철도 차량편성별(6량, 8량, 10량) 운영상 반복시간의 단일해와 범위해 도출 결과이다.

Table 4. Sample of single value and range.

TRV (min.)	Headway (min.)	D_{m1} (min.)	[$t_1(r)+t_m(r)$]/2 (min.)			Remark
			6cars	8cars	10cars	
35	5	0.0	5.00	10.00	10.00	*6cars : single value *8cars : range *10cars : range
		1.0	7.50	7.50	10.00	
		2.0	7.50	7.50	7.50	
		3.0	7.50	7.50	7.50	
		4.0	7.50	7.50	10.00	

Note) Physical turnback time : 6cars type-5min., 8cars type-5.5min., 10cars type-6.5min.

여기서 단일해는 '물리적 회차시간 U_r^{PH} = 평균 운영상 반복시간($[t_1(r)+t_m(r)]/2$)'조건이 성립하는 단 하나의 해(예, 5분)라고 정의한다. 반면에 범위해(=복수해)는 물리적 회차시간 $U_r^{PH} \neq$ 평균 운영상 반복시간($[t_1(r)+t_m(r)]/2$)'조건이 성립하는 복수의 해라고 정의한다. 계획자가 주목할 사항은 단일해의 스케줄링 조건은 단 하나의 상행열차 배치위치 D_{m1} 를 찾는 것이 핵심이다. 반면에 범위해의 경우는 복수의 상행열차 배치위치 D_{m1} 중에서도 '상행 운영상 반복시간 $t_m(r)$ = 하행 운영상 반복시간 $t_1(r)$ '조건이 성립되는 위치의 선택이 터미널 정거장 반복선수의 균형설계에 유리하다는 점이다.

4.2 운영상 반복시간 최소화 효과

가. 적정 운전시격 및 표정시간 산정

Table 5는 실험결과에 추가하여 표정시간 및 운전시격의 변화에 따라 운영상 반복시간의 계산값이 어떻게 순환하는지에 대한 규칙성을 찾기 위해 정리한 자료이다.

본 연구는 물리적 회차시간 U_r^{PH} 5분, 운전시격 3분 ~ 20분, 30분, 상·하행 표정시간 21분 ~ 40분이라고 가정하였다. 그 계산결과 홀수의 운전시격에서는 시격 수치의 주기로 운영상 반복시간이 순환한다(예, 3분 시격: 3...19분 시격: 19). 반면에 짝수의 운전시격에서는 시격 수치의 1/2 주기로 운영상 반복시간이 순환한다(예, 4분 시격: 2,...20분 시격: 10, 30분 시격: 15). 이러한 규칙적 현상을 활용하여 계획자는 철도시설 투자사업 설계 및 운영단계에서 적정 운전시격과 적정 표정시격을 선택하여 노선설계와 열차운영의 효율화에도 기여할 수 있을 것이다.

Table 5. Operational turnaround time by the travel time.

Headway (min.)	Travel time? 'TRV _{up} =TRV _{dn} ' (min.)																			
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
3	6.0	5.0	5.5	6.0	5.0	5.5	5.5	5.0	5.5	6.0	5.0	5.5	6.0	5.0	5.5	6.0	5.0	5.5	6.0	5.0
4	5.0	6.0	5.0	6.0	5.0	6.0	5.0	6.0	5.0	6.0	5.0	6.0	5.0	6.0	5.0	6.0	5.0	6.0	5.0	6.0
5	6.5	5.5	7.0	6.0	5.0	6.5	5.5	7.0	6.0	5.0	6.5	5.5	7.0	6.0	5.0	6.5	5.5	7.0	6.0	5.0
6	6.0	5.0	7.0	6.0	5.0	7.0	6.0	5.0	7.0	6.0	5.0	7.0	6.0	5.0	7.0	6.0	5.0	7.0	6.0	5.0
7	7.0	6.0	5.0	7.5	6.5	5.5	8.0	7.0	6.0	5.0	7.5	6.5	5.5	8.0	7.0	6.0	5.0	7.5	6.5	5.5
8	7.0	6.0	5.0	8.0	7.0	6.0	5.0	8.0	7.0	6.0	5.0	8.0	7.0	6.0	5.0	8.0	7.0	6.0	5.0	8.0
9	6.0	5.0	8.5	7.5	6.5	5.5	9.0	8.0	7.0	6.0	5.0	8.5	7.5	6.5	5.5	9.0	8.0	7.0	6.0	5.0
10	9.0	8.0	7.0	6.0	5.0	9.0	8.0	7.0	6.0	5.0	9.0	8.0	7.0	6.0	5.0	9.0	8.0	7.0	6.0	5.0
11	6.5	5.5	10.0	9.0	8.0	7.0	6.0	5.0	9.5	8.5	7.5	6.5	5.5	10.0	9.0	8.0	7.0	6.0	5.0	9.5
12	9.0	8.0	7.0	6.0	5.0	10.0	9.0	8.0	7.0	6.0	5.0	10.0	9.0	8.0	7.0	6.0	5.0	10.0	9.0	8.0
13	5.0	10.5	9.5	8.5	7.5	6.5	5.5	11.0	10.0	9.0	8.0	7.0	6.0	5.0	10.5	9.5	8.5	7.5	6.5	5.5
14	7.0	6.0	5.0	11.0	10.0	9.0	8.0	7.0	6.0	5.0	11.0	10.0	9.0	8.0	7.0	6.0	5.0	11.0	10.0	9.0
15	9.0	8.0	7.0	6.0	5.0	11.5	10.5	9.5	8.5	7.5	6.5	5.5	12.0	11.0	10.0	9.0	8.0	7.0	6.0	5.0
16	11.0	10.0	9.0	8.0	7.0	6.0	5.0	12.0	11.0	10.0	9.0	8.0	7.0	6.0	5.0	12.0	11.0	10.0	9.0	8.0
17	13.0	12.0	11.0	10.0	9.0	8.0	7.0	6.0	5.0	12.5	11.5	10.5	9.5	8.5	7.5	6.5	5.5	13.0	12.0	11.0
18	6.0	5.0	13.0	12.0	11.0	10.0	9.0	8.0	7.0	6.0	5.0	13.0	12.0	11.0	10.0	9.0	8.0	7.0	6.0	5.0
19	7.5	6.5	5.5	14.0	13.0	12.0	11.0	10.0	9.0	8.0	7.0	6.0	5.0	13.5	12.5	11.5	10.5	9.5	8.5	7.5
20	9.0	8.0	7.0	6.0	5.0	14.0	13.0	12.0	11.0	10.0	9.0	8.0	7.0	6.0	5.0	14.0	13.0	12.0	11.0	10.0
30	9.0	8.0	7.0	6.0	5.0	19.0	18.0	17.0	16.0	15.0	14.0	13.0	12.0	11.0	10.0	9.0	8.0	7.0	6.0	5.0
"t<=5"	2	4	4	0	9	0	3	3	2	4	7	0	2	3	6	0	6	0	3	8

Note) The change of the operational turnaround time in the case of physical turnaround time 5 minutes

1) 적정 운전시각 선택 가능

전제조건은 물리적 회차시간 U_r^{PH} 5분, 상·하행 표정시간 $TRV_{up}=TRV_{dn}$ 30분, 운전시각 $H_{up}=H_{dn}$ 17이다. 이때 평균운영상 반복시간은 하이라이트 된 부분인 12.5분이다. 만약 같은 조건에 1분 차이의 운전시각 $H_{up}=H_{dn}$ 18분에 속한 평균 운영상 반복시간 6분을 선택한다면, 1편성의 차량 감축효과를 얻을 수 있다.

2) 적정 표정시간 선택 가능

전제조건은 물리적 회차시간 U_r^{PH} 5분, 상·하행 표정시간 $TRV_{up}=TRV_{dn}$ 26분, 운전시각 $H_{up}=H_{dn}$ 30분이다. 이때 평균운영상 반복시간은 하이라이트 된 부분인 19분이다. 만약 같은 조건에서 1분 차이의 상·하행 표정시간 $TRV_{up}=TRV_{dn}$ 25분에 속한 평균 운영상 반복시간 5분을 선택한다면, 1편성의 차량 감축효과를 얻을 수 있다.

나. 상하 배치위치에 따라 차량운용편성 감축

본 연구는 상·하행 표정시간 $TRV_{up}=TRV_{dn}$ 35분, 운전시각 $H_{up}=H_{dn}$ 5을 전제조건으로 도시 및 광역철도 전동차 3개 유형(6량형, 8량형, 10량형)의 운영상 반복시간과 차량소요량을 상행 배치위치 D_{m1} 별로 산출하여 Table 6에 제시하였다. 개략적인 차량소요량은 ‘차량소요량=(상·하행 표정시간+상·하행 운영상 반복시간)/운전시각’ 일반식을 활용하여 추정하였다.

위 표에서 6량형은 [0]분 위치에서 18편성, 8량형은 [3.5 ~ 4.5]분 위치에서 범위해 20편성, 10량형은 [1.5 ~ 3.5]분 위치에서 범위해 20편성의 소요량이 산출되어, 다른 열차배열 위치 D_{m1} 에 스케줄링 한 것 보다 각각 6량형 $\Delta 2$ 편성, 8량형 $\Delta 1$ 편성, 10량형 $\Delta 1$ 편성의 절감효과를 나타낸다.

다. 시종점 정거장 배선 설계상의 균형 유지

Table 7은 상·하행 표정시간 $TRV_{up}=TRV_{dn}$ 35분, 운전시각 $H_{up}=H_{dn}$ 5분이라 가정하고, 전동열차 종별(6량형, 8량형, 10량형) 운영상 반복시간과 반복순수를 상행 열차배열 위치 D_{m1} 별로 산출결과이다. 시종점 반복순수 계산식은 ‘반복순수=하행 운영상

Table 6. Operational turnaround time and vehicle requirements.

D_{m1} (min.)	6cars type		8cars type		10cars type	
	$[t_1(r)+t_m(r)]/2$ (min.)	Vehicle requirement	$[t_1(r)+t_m(r)]/2$ (min.)	Vehicle requirement	$[t_1(r)+t_m(r)]/2$ (min.)	Vehicle requirement
0.0	5.0	18	10.0	21	10.0	21
0.5	7.5	20	7.5	20	10.0	21
1.0	7.5	20	7.5	20	10.0	21
1.5	7.5	20	7.5	20	7.5	20
2.0	7.5	20	7.5	20	7.5	20
2.5	7.5	20	7.5	20	7.5	20
3.0	7.5	20	7.5	20	7.5	20
3.5	7.5	20	7.5	20	7.5	20
4.0	7.5	20	7.5	20	10.0	21
4.5	7.5	20	7.5	20	10.0	21
(mini. - max.)	18 - 20 = $\Delta 2$		20 - 21 = $\Delta 1$		20 - 21 = $\Delta 1$	

Table 7. Operational turnaround time and track requirements.

D_{m1} (min.)	6cars type			8cars type			10cars type		
	$t_1(r)$ (min.)	$t_m(r)$ (min.)	Track requirement	$t_1(r)$ (min.)	$t_m(r)$ (min.)	Track requirement	$t_1(r)$ (min.)	$t_m(r)$ (min.)	Track requirement
0.0	5.0	5.0	1, 1	10.0	10.0	2, 2	10.0	10.0	2, 2
0.5	9.5	5.5	2, 2	9.5	5.5	2, 1	9.5	10.5	2, 2
1.0	9.0	6.0	2, 2	9.0	6.0	2, 2	9.0	11.0	2, 2
1.5	8.5	6.5	2, 2	8.5	6.5	2, 2	8.5	6.5	2, 1
2.0	8.0	7.0	2, 2	8.0	7.0	2, 2	8.0	7.0	2, 2
2.5	7.5	7.5	2, 2	7.5	7.5	2, 2	7.5	7.5	2, 2
3.0	7.0	8.0	2, 2	7.0	8.0	2, 2	7.0	8.0	2, 2
3.5	6.5	8.5	2, 2	6.5	8.5	2, 2	6.5	8.5	1, 2
4.0	6.0	9.0	2, 2	6.0	9.0	2, 2	11.0	9.0	2, 2
4.5	5.5	9.5	2, 2	5.5	9.5	1, 2	10.5	9.5	2, 2
(Mini. - max.)	$\Delta 2$			0			0		

반복시간 $t_1(r)$ /상행 운전시각, 상행 운영상 반복시간 $t_m(r)$ /하행 운전시각'이다.

여기서 시종점 정거장의 반복선수는 6량형 상행 열차배열 위치 D_{m1} [0]에서 1+1선, 8량형과 10량형은 상행 배치위치 D_{m1} [2.5]에서 2+2선이 추정되어 다른 위치보다 6량형에서 $\Delta 2$ 선이 감축된다. 한편 8량형과 10량형은 상·하행이 균형을 유지하는 상행 열차배열 위치 D_{m1} [2.5]분을 선택한 경우가 더 효과적이라고 판단된다.

라. 운영 현실과 산정 사례조사 비교

본 연구는 전국의 도시 및 광역철도에 대한 사례조사를 수행하였다. Table 8은 그 중 일부 노선의 열차운영 실태와 개선 사항 및 효과를 제시한 자료이다.

사례조사는 각 운영사의 열차계획에 대한 최소화 여부를 확인하는데 중점을 두었다. 개선안은 개발한 산정모형을 활용하고 운영상 반복시간이 단일해의 경우는 적정 배치위치를 찾아 스케줄링 하고, 범위해의 경우는 상·하행 운영상 반복시간이 균형을 유지하도록 매칭하는 방식을 적용하였다. 영업시간은 Peak time 및 Non-peak time으로 나눠서 변화된 시간대마다 운전시각을 검토하였고, 각 시간대별 운용차량의 최소화를 시도하였다. 그 결과 노선별 총보유편성의 과부족을 비교하였으며, 부수적으로 열차운영상 운용차량의 최소화 가능성을 확인할 수 있었다.

Table 8. Case study and proposal.

Operator and line	Line		K I + S 3		D 2	S 4	S 5		S 7	
	Link		D~O	G~O	M~Y	D~S	S	M	J~B	D~On
Travel time (min.)	Direction	Down	95.5	64	55	51	86-83.5	90-87.5	107.5	85
		Up	95.5	64	55	51	86-83.5	90-87.5	107.5	85
Current	Headway (min.)	Peak	7	7	5.5	6.66	6.31	6.31	3.33	
		Non-peak	10	20	8	12	15	15	7.5	
	Operational vehicles	Peak	52		23	19	31	32	61	
		Non-peak	22	8	16	10	13	14	29	
	Vehicle requirements		65		30	22	76		70	
Proposal	Operational turn around time (min.)	Average	9.5	9.5	5.5	8.94	8.65	7.8	6.05	
		Down/up	9.5-9.5	9.5-9.5	5.5-5.5	8.8-9.1	8.6-8.7	7.6-8.0		
	Improvement	Peak	51		22	18	30	31	61	
		Non-peak	21	8	15	10	12	13	27	
		Veh. req.	58		25	21	69		69	
		Difference	$\Delta 7$		$\Delta 5$	$\Delta 1$	$\Delta 7$		$\Delta 1$	
	Reduction of veh. req.	Peak	$\Delta 1$		$\Delta 1$	$\Delta 1$	$\Delta 1$	$\Delta 1$	0	
		Non-peak	$\Delta 1$	0	$\Delta 1$	0	$\Delta 1$	$\Delta 1$	$\Delta 2$	

5. 결 론

본 연구는 현재까지 철도운영계획자 및 연구자들의 노하우와 관행에 의존하던 열차스케줄링에 관여하는 운영상 반복시간의 개념을 명확히 정의하였다. 기존의 반복시간 설정문제에 대한 해법으로서 열차다이어그램 생성을 기반으로 새로운 휴리스틱 산정모형을 개발하고, 터미널 정거장의 차량편성별 물리적 회차시간과 비교를 수행하였다.

시사점은 첫째, 물리적 회차시간과 운영상 반복시간의 차이를 구분하여 명확하게 수치화 하였다. 둘째, 기존 열차운영계획의 최종 성과물인 열차다이어그램이 생성된 후, 차량운용 및 인력운용계획을 수행하던 프로세스에 대한 한계를 발견하였다(FIFO rule). 만약 열차 스케줄링 단계에서 최소화가 안 되면 차량운용계획에서도 최소화의 한계가 있다는 점이다. 이를 개선하도록 개발된 운영상 반복시간 수확모형을 응용하여 열차스케줄링과 차량운용계획을 동시에 고려하면서 차량운용량 최소화를 가능하게 하였다. 셋째, Peak time 및 Non-peak time 등 운전시각의 시간대별 변동에 맞춰 운용차량 최소화와 함께 부수적으로 반복선수의 균형 유지와 감축 가능성을 확인하였다.

본 연구의 진행상 한계는 일반철도(예, 화물열차)에 대한 물리적 회차시간의 다양한 현업 상황을 광범위하게 다루지 못한 점이다(전국 철도망을 이루는 각 노선의 시종별 정거장의 구배 배선의 다양한 구조, 열차에 투입하는 여러 종류의 동력차에 대한 물리적 회차시간의 다른 점, 기타 일반 여객열차 및 화물열차의 도착 후 반복회차를 위한 입환작업과 준비정리시간의 차이점 등에 대한 전수조사의 규모로 인한 한계). 이에 대한 후속연구와 함께 열차운영계획 업무의 효율화에 기여할 수 있는 운영상 반복시간 수확모형을 접목한 열차스케줄링 범용 툴의 연구를 지속하고자 한다.

References

- [1] Ji-Won Chung, Seog-Moon Oh, In-Chan Choi (2009) *A hybridgenetic Algorithm for train sequencing in the Korean railway*, Omega37, Elsevier BV, United Kingdom, pp. 555-565.
- [2] S.M. Oh, J.H. Min (2014) *A demand-responsive metro-train operation planning program*, *Railway Engineering Design and Optimization, Computers in Railways X IV*, WITpress, Great Britain UK, pp. 595-602.
- [3] K. Ziarati, H. Chizari and A. Mohammadi Nezhad (2005) Locomotive optimization using artificial intelligence approach, *Iranian journal of Science and Technology*, Transaction B, Engineering, 29(B1), The Islamic Republic of Iran, pp. 95-105.
- [4] RE. Neapolitan, K. Naimipour (2004), *Foundations of ALGORITHMS Using C ++ Pseudocode*, 3rd Edition, Jones and Bartlett Pub-

- lishers Inc., Sudbury, MA 01776, pp. 7-31.
- [5] Seong-Ho Kim, Dong-Hee Kim, Tae-Sung Choi (2004) An Enumeration Algorithm for Generating the Candidate Routings in a Set Partitioning Problem Approach to the Rolling Stock Requirement Plan, *Journal of the Korean Society for Railway*, 7(4), pp. 112-117.
 - [6] Jiang, Z.B., Xiao, X.Y. (2014) A turn-back track constraint train scheduling algorithm on a multi-interval rail transit line, *14th International Conference on Railway Engineering Design and Optimization*, COMPRAIL 2014, Rome, Italy, 135, pp. 151-162.
 - [7] Huimin NIU, Xuesong ZHOU (2013) Optimizing Urban Rail Timetable under Time-dependent Demand and Oversaturated Conditions, *Transportation Research Part C Emerging Technologies*, 36(16), pp. 212-230.
 - [8] C.U. Do (2009) *Traffic Engineering Principles*, Cheongmungak. pp. 354-360.
 - [9] Korea Development Institute (2008) *Modify feasibility study standard guidelines of road and rail sector projects complementary studies (5th Edition)*, Korea Development Institute.
 - [10] U.I. Kim (1999) *Recent Driving Theory*, (Corporation) Korea Railroad Operation Technology Association, Seoul, pp. 370-403.
 - [11] Graham, Ronald L, Knuth, Donald E, Patashnik, Oren (1994) *Concrete Mathematics*, Reading Ma.: Addison-Wesley, ISBN 0-201-55802-5.

(Received 19 October 2016; Revised 29 November 2016; Accepted 5 December 2016)

Hyungseo Ki: grand0303@ yahoo.co.kr

Department of Transportation Engineering, University of Seoul, 163 Siripdaero (90 Jeonnong-dong), Dongdaemun-gu, Seoul, 130-743, Korea

Suk-mun Oh: smoh@ krrri.re.kr

Korea Railroad Research Institute, 176 Cheoldobangmulgwan-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do, 437-757, Korea

Dongjoo Park: djpark@ uos.ac.kr

Department of Transportation Engineering, University of Seoul, 163 Siripdaero (90 Jeonnong-dong), Dongdaemun-gu, Seoul, 130-743, Korea