

거시적 관점의 철도 선로용량 해석에 관한 연구

오석문, 홍순흠
한국철도기술연구원

A Study on the Aggregate Model of the Railway Line Capacity

Seog-Moon, Oh, Soon-Heum, Hong
Korea Railroad Research Institute

Abstract - 철도에서 선로용량은 선로의 신설이나 개량 또는 열차운용을 위한 스케줄 작성에서 필수적인 용량한계의 척도이다. 특히 선로를 신설하거나 개량할 때 선로용량은 주어진 사업비에 대해 각각의 안을 비교해 볼 수 있는 중요한 척도이다. 이 논문은 기존의 선로를 개량하고자 할 때, 사용할 수 있는 선로용량의 거시모형을 제시하고자 한다.

Jan C. Fransoo(2000)는 이 분야에 대한 선행연구를 수행한바 있다. 여기서는 네덜란드의 선로를 대상으로 2가지 속도종별의 선로용량에 대한 해석적 모형을 제시하였다. 이 논문에서는 선로용량의 모형을 3가지 이상의 속도종별에 대해 고려하는 연구결과를 제시한다.

1. 서 론

선로용량의 개념 및 정의를 UIC(International Union of Railways) 코드에 따라 살펴보면 다음과 같다[2]. 이론적인 선로용량은 단위시간동안 해당구간을 운행할 수 있는 열차의 총수로 정의되고, 이때 각 열차들은 최소 운행시격(minimum headway)으로 운행한다고 가정한다. 반면 실제적인 선로용량은 각각의 열차들이 통계적인 방법으로 구한 서비스 수준(degree of operation quality)을 만족시키는 상태에서 운행하는 것을 가정한다. 여기서 서비스 수준이란 운영의 품질로서 해당구간에서 열차의 정시성(punctuality)을 의미한다. 여기서는 무작위 또는 이례적으로 발생하는 주요한 혼란(disruption)은 고려하지 않는다.

이와 같은 정의에도 불구하고, 선로용량은 다양한 목적으로 사용된다. 가장 대표적인 목적은 열차의 스케줄을 작성할 때, 해당 구간에서 일정한 서비스 수준을 만족시키면서, 수요에 적합한 열차를 스케줄링할 때의 척도로써 사용되는 것이다. 이러한 목적의 선로용량은 주로 시뮬레이션 방법에 의해 구해진다. 또 전체 선로를 관리하는 입장에서 선로 개량의 우선순위를 결정하는 근거로서도 사용된다. 이 논문에서의 선로용량은 주어진 선로에 측선(passing construction)을 설치하여 선로용량을 개선하고자 할 때, 각 사업안들을 비교하는 지표로 사용되는 경우를 제시한다. 이것은 짧은 시간에 다양한 대안을 검토해야 하므로, 시뮬레이션의 방법을 취하는 것은 적합한 방법이 아니다.

Jan C. Fransoo(2000)는 기존의 선로를 주어진 예산으로 개량하여 선로용량을 증대하고자 할 때는 다양한 개량안들의 효과를 신속히 비교·검토하여 의사결정할 수 있는 방법을 제시하였다. 여기에서는 다양한 개량안들의 선로용량 개선 효과를 비교할 수 있는 거시적 관점의 선로용량 해석모형으로 제시하였고, 5가지의 대안을 제시한 모형으로 비교하였고, 각각의 결과를 시뮬레이션 모형과 비교하여 제안한 모형의 유효성을 입증하였다.

그러나 이 모형에서는 열차의 속도종별을 2가지로만 제한하는 상당히 엄격한 가정을 하고있다. 그것은 저자가 네덜란드의 상황을 고려하여 이에 적합한 방법을 도출한 것이나 이러한 가정은 한국철도의 상황에 비추어보

아, 모형의 지나친 단순화라고 판단된다.

이 논문에서는 열차의 속도종별을 3가지 이상으로 확장하였을 때, 발생하는 모형의 변화들을 제시하고 있다. 2.1에서는 이 논문에서 적용하고 있는 기본적인 가정을 언급하였다. 2.2에서는 모형에서 사용되는 기호를 정의(notation)하였으며, 2.3에서는 모형을 제시하였다. 마지막으로 3에서는 결론 및 토의사항을 제시하였다.

2. 본 론

2.1 가정

측선의 설치에 대한 가정은 다음과 같다.

- (1) 대피 구간에서 저속열차가 고속열차를 한번에 2대 이상 대피하지 않는다. 이와 같은 가정은 자세한 열차 스케줄이 작성되지 않은 선로용량 분석의 초기단계에서 타당한 가정이 된다. 실제로 저속열차가 고속열차를 대피하는 측선에서는 양단의 선로전환장치 통과를 위한 최소시격의 제한 및 열차간 운행시격에 의해 2대 이상을 대피한다는 가정은 정상적인 운행상태에서는 비현실적이다.
- (2) 대피·추월구간에서 저속열차가 고속열차를 대피할 때는 정지상태로 대피한다고 가정한다. 또 저속열차가 대피를 위해 정지할 때와 대피 후 정상운행 속도로 되돌아오는데 소요되는 시간은 0으로 가정한다.
- (3) 고속열차가 대피·추월구간의 선로전환기를 통과할 때, 속도를 줄이지 않는다.
- (4) 대피·추월구간의 선로전환기를 통과하여 대피·추월할 때 최소 운행시격(h)이 지켜져야 한다.
- (5) 대피·추월구간에서 모든 상위열차는 모든 하위열차를 추월할 수 있다.
- (6) 모든 열차들의 대피·추월은 대피·추월구간에서만 발생하고, 다른 구간에서는 발생하지 않는다.
- (7) 또 각 열차별 정차패턴의 상이로 인한 개별 열차의 평균속도 차이는 고려하지 않는다. 이것은 이 모형의 적용분야가 사업초기의 추정치 산정을 목적으로 하기 때문이다.

서비스 정책(service policy)에 대한 가정은 다음과 같다.

- (1) 스케줄은 clock face timing의 개념을 반영한 cyclic time table의 정책으로 한다. 이 스케줄링 개념은 열차횟수가 많고, 철도수요가 높은 지역에서 적합한 방법으로 주로 대도시 및 전철화 구간에서 많이 적용된다. 이 개념은 유럽지역에서 일반적으로 채택되고 있는 개념이고, 한국철도에서도 정시 다이어트의 이름으로 이 개념에 접근하고 있다.
- (2) 일정한 주기(예, 매 시간단위)로 사이클이 반복되고, 각 사이클에는 속도종별의 열차들로 구성된다. 각 사이클 내에서는 선로이용률을 극대화하기 위해, 각 열차들이 속도종별 순으로 배치된다.
- (3) 이 논문에서는 4가지의 속도종별을 고려한다. 이것

은 현실적으로 적합한 가정이다.

2.2 Notation

이 논문의 모형에서 사용하는 부호의 정의는 다음과 같다.

- i - 열차의 종별 (1, 2, 3, 4)
- h - 최소 운행시격(minimum headway)
- f_i - 단위시간당 열차횟수
- v_i - 열차 i 의 운행속도 (km/h, $v_{i-1} > v_i$)
- t_{req} - 단위시간당 최소 소요시간 (hour)
- t'_{req} - 측선이 설치되었을 때, 단위시간당 최소 소요시간 (hour)
- $\delta_{i,j}$ - 열차 i 와 열차 j 의 속도차 때문에 발생하는 지연시간 (hour)
- $\delta'_{i,j}$ - 측선이 설치되었을 때, 열차 i 와 열차 j 의 속도차 때문에 발생하는 지연시간 (hour)
- L - 선로의 길이 (km)
- L' - 측선이 설치된 위치 (km)
- C - 선로용량 (열차횟수/시간)
- C' - 측선이 설치되었을 때, 선로용량
- t - 고려하는 시간 (hour)

2.3 모형

앞에서 언급한 바와 같이 cyclic time table은 일정한 cycle이 반복되는 time table을 말한다. 각 cycle을 구성하는 열차는 고속에서 저속 순으로 배열하는 방법이 선로이용률을 극대화한다. cycle의 구성 예는 (1) → (1) → ... → (2) → (2) → ... → (3) → (3) → ... → (4) → (4) → ... 와 같다.

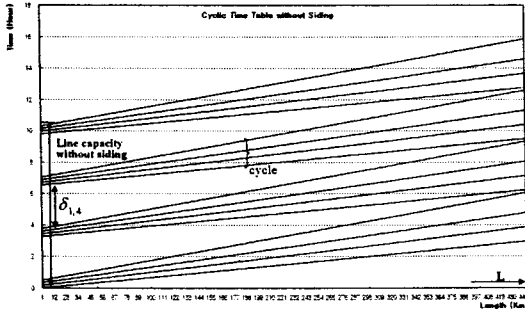


그림 1 Cyclic Time Table without Siding

이때, 최소 소요시간은 다음 식 (1), (2)와 같다.

$$t_{req} = \sum_i f_i \cdot h + (f_1 - 1) \cdot \delta_{1,4} \quad (1)$$

$$\delta_{1,4} = \frac{1}{L} \cdot \left(\frac{1}{v_4} - \frac{1}{v_1} \right) \quad (2)$$

선로용량은 식 (3)과 같다.

$$C = t \cdot \sum_i f_i / t_{req} \quad (3)$$

이 논문의 모형에서 cyclic time table의 개념을 가정하였으나, cyclic time table을 가정하지 않고, 단순히 주어진 선로에 최대의 열차 수가 들어갈 수 있는 서

비스 정책을 고려하면 All of (i-1) → All of (i-2) → All of (i-3) → All of (i-4)와 같이 되고, 이때 최소 소요시간은 식 (4)와 같이 되어 최대의 선로용량이 되는 정책임을 알 수 있다.

$$t_{req} = \sum_i f_i \cdot h \quad (4)$$

반면 최소로 들어갈 수 있는 서비스 정책(여기서는 n 가지의 속도종별을 고려한다.)을 고려하면 (n) → (1) → (n-1) → (2) → (n-2) → (3) → ... 의 순서와 같고, 이때 최소 소요시간은 식 (5)와 같이 되어 최소의 선로용량이 되는 정책이다.

$$t_{req} = \sum_i f_i \cdot h + \sum_i \delta_{i,n-i-1} \cdot f_{n-i-1} \quad (5)$$

최대의 지연을 발생시키는 열차의 운영패턴을 찾는 문제는 각 열차타입의 순서를 결정하여 값을 비교하는 전형적인 조합최적화(combinatorial optimization)의 문제로 NP-Hard 문제이다. NP-Hard 문제는 Polynomial Time 알고리즘이 존재하지 않으므로 문제에 적절한 Heuristic 알고리즘을 개발해야 한다. 이 경우의 서비스 정책은 Greedy Heuristic 알고리즘을 응용한 개념이다.

앞에서 언급한 바와 같이 측선을 설치하면 t_{req} 가 감소하여 선로 전체의 용량증대 효과를 얻을 수 있다. 일반적으로 장거리 선로의 경우 측선은 여러 개소가 설치된다고 봐야 한다. 그러나 이러한 상황에서의 선로용량에 대한 거시모형은 아직 검토되어야 할 부분이 남아 있다. 만약 선로에서 측선이 한 곳에만 설치된다면 상황은 다소 단순해진다.

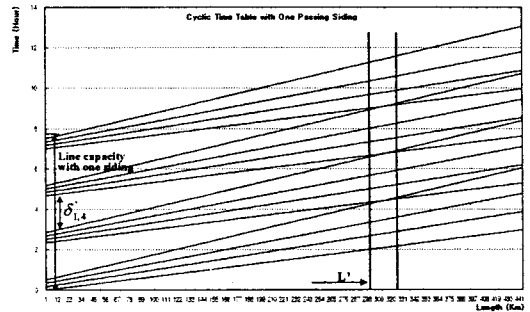


그림 2 Cyclic Time Table with a Siding

그림 1, 2에서 보는 바와 같다. 사이클간 출발지연에 해당하는 값이 ($\delta_{1,4} \rightarrow \delta'_{1,4}$)로 감소했음을 알 수 있다. 이것은 선행 사이클의 마지막 열차를 후행 사이클의 처음 열차가 대피·추월 구간에서 추월하여 선로이용률이 높아졌기 때문이다.

측선이 설치될 때 최소 소요시간 및 선로용량에 관한 식은 다음과 같이 조정된다.

$$t'_{req} = \sum_i f_i \cdot h + (f_1 - 1) \cdot \delta'_{1,4} \quad (1)'$$

$$\delta'_{1,4} = \frac{1}{L'} \cdot \left(\frac{1}{v_4} - \frac{1}{v_1} \right) \quad (2)'$$

$$C' = t \cdot \sum_i f_i / t'_{req} \quad (3)'$$

3. 결 론

이 논문에서는 Jan C. Fransoo(2000)의 논문을 3 가지 이상의 속도종별에 대해 일반화를 시도하였다. 개량될 선로에 운영되는 열차가 cyclic time table 개념에 따라 작성될 것이라는 가정 하에서, 선로용량에 대한 거시적 관점에서 해석모델을 제시하였다. 그러나 장거리 선로에서 축선이 여러 개소가 설치되는 경우의 해석모델은 매우 복잡하게 나타날 것으로 예상되어, 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

이 논문에 대한 토론사항을 몇 가지 언급하면 다음과 같다. Jan C. Fransoo(2000)와 이 논문에서는 다음과 같은 데이터가 주어진다고 가정하였다.

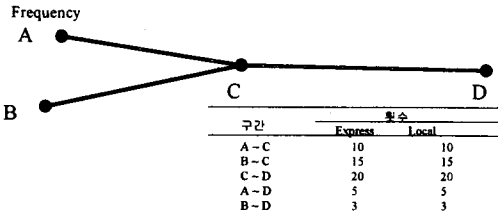


그림 3 Frequency Data

이 가정은 주어진 예산에서 최적의 선로 개량안을 선택하기 위한 척도로써의 선로용량에는 적합하지만, UIC 코드에서 정의한 이론적 또는 실제적 선로용량을 구하는 문제와는 성격이 약간 다르다고 말할 수 있다. UIC 코드에서 정의하는 이론적 선로용량을 구하는 절차는 의사결정이 필요없는 단순한 계산 절차이다.

반면, 위와 같은 데이터를 작성하는 작업은 선로 건설 계획의 핵심적인 의사결정 사항이다. 이 데이터는 선로 건설을 위해 각 구역(zone)간의 예상 수요데이터로부터(수송할당 모형) 얻는다. 위와 같은 계획으로 건설된 선로를 선로가 건설된 후 운영시점에서 실현된 수요를 기반으로 평가해 볼 수 있다. 운영시점에서 실현되는 수요가 건설당시의 예상과 다를 때에는 그 당시의 입장으로 선로의 최적 활용방안을 다시 구성할 수 있다. 이것의 핵심데이터는 운영시점에서 실현된 수요데이터와 선로를 운영하는 데 소요되는 비용데이터이다.

이 논문에서의 주 관점은 이미 건설된 선로를 주어진 예산에서 개량하고자 할 최적의 개량안을 선택하기 위한 척도로써 거시적 관점의 선로용량지표를 개발하는 것이다.

(참 고 문 헌)

- [1] Jan C. Fransoo, J. Will M. Bertrand, "An aggregate capacity estimation model for the evaluation of railroad passing constructions", Transportation Research Part A. 34. 2000, p. 35 ~ 49
- [2] UIC Code - 405, Link between railway infrastructure capacity and the quality of operation
- [3] Hai Yang, Michael G. H. Bell, Qiang Meng, "Modeling the capacity and level of service of urban transportation networks", Transportation Research Part B 34, 2000, p. 255 ~ 275
- [4] Tijs Heisman, Richard J. Boucherie, "Running times on railway sections with heterogeneous train traffic", Transportation Research Part B 35, 2001, p. 271 ~ 292