

철도 운행효율성 향상을 위한 노선용량 산정모형 개발에 관한 연구

김봉준* · 김시곤**

Kim, Bong-Jun*, Kim, Si-gon**

A Study on the Development of a Route Capacity Calculation Model for Improving Railway Operation Efficiency

ABSTRACT

Over-urbanization has contributed to the increase in traffic problems. This makes the need for effective road planning and design more important than ever. I have been able to learn how to build a new road, and how to use it. However, in spite of the importance of good road planning, there are no systematic standards or methods for calculating traffic volume on railroad routes. Therefore, in this study, to strengthen the competitiveness of railroads, the concept of line capacity is introduced to railroads, and a clear standard and method for calculating railroad line capacity are presented. Based on the results, the line capacity of main railway lines for domestic railways was calculated. By applying the method of calculating the line capacity presented in this study, the capacity of existing railway lines and newly expanded routes can be calculated. It is expected that our findings will be able to provide systematic standards that can be applied to yield a more effective investment and design planning stage; the findings will also help improve the efficiency of railroad operation.

Key words : Railroad line capacity calculation model, Line capacity calculation by line segment, Standard train conversion method, Cronbach's alpha coefficient

초 록

지나친 도시화로 인한 차량증가로 도시교통 문제가 사회문제로 인식되고 있고 이로 인해 효과적인 도로계획과 설계는 더욱 중요하게 되었다, 이에 따라 기존 도로를 확장하거나 새로운 도로를 건설할 때 도로의 교통량 산정에 필요한 기준과 방법을 도로용량편람으로 제정하여 운영하고 있다. 하지만 철도 노선에는 이러한 중요성에 불구하고 체계적인 교통량 산정기준이나 방법이 없었다. 따라서 본 연구에서는 철도의 경쟁력 강화를 위해 철도에도 노선용량이란 개념을 도입하여 명확한 철도 노선용량의 산정기준과 방법을 제시 하였다. 그 결과를 바탕으로 국내 철도의 주요 선구별 노선용량을 산정하였다, 이에 따라 본 연구에서 제시한 노선용량 산정방법을 적용하면, 기존의 철도 노선 및 새롭게 확대되는 신규 노선의 용량에 대한 적절한 투자와 설계가 계획단계에서부터 이루어 질 수 있도록 체계적인 기준을 제공할 수 있게 되었으며, 향후 철도 운행효율성 향상에도 도움을 줄 수 있을 것으로 기대한다.

검색어 : 철도 노선용량 산정모형, 선구별 노선용량 산정, 기준열차 환산방법, Cronbach's α 계수

* 정회원 · 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도경영정책학과 박사과정 (Seoul National University of Science and Technology · boyziyo@naver.com)

** 종신회원 · 교신저자 · 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도경영정책학과 교수

(Corresponding Author · Seoul National University of Science and Technology · sigonkim@seoultech.ac.kr)

Received September 26, 2020/ revised October 4, 2020/ accepted October 16, 2020

1. 서론

국내에서는 급격한 도시화와 차량증가로 인하여 도로의 공급이 수요를 충족하지 못하여 발생하는 혼잡을 해결하기 위해 기존 도로 확장 및 신규도로 건설에 필요한 해당 도로의 교통량 산정기준을 제시한 국토교통부 도로용량편람(MOLIT, 2013)이 1992년 제정되어 현재까지 활용되고 있다. 이러한 도로용량 산정기준은 실제 도로의 건설계획 수립, 설계, 통계연보 등에서 활용되고 있다. 하지만 철도 노선에는 그간 체계적인 교통량 산정기준이나 방법의 적용이 현재는 이루어지고 있지 않은 것이 현실이다. 따라서 본 연구에서는 철도의 경쟁력 강화를 위해 철도에도 노선용량이란 개념을 도입하여 명확한 철도 노선용량의 산정기준과 방법을 제시해 보고자 한다.

철도의 노선용량 산정은 객관적인 근거와 공감할 수 있는 이론의 뒷받침이 되어야 한다. 이를 위해 우선적으로 철도차량 및 인프라의 파라미터를 기반으로 한 철도 노선용량 산정식을 개발한다. 이에 따른 철도 노선용량의 산정기준과 방법을 도출함으로써 국내 철도 주요 선구별로 노선용량을 도출 한다. 이를 바탕으로 향후 철도 노선 건설에 있어 효율적인 시설 투자와 합리적인 운영 관리계획에 도움을 주는데 그 목적이 있으며, 본 연구의 추진 방법 및 절차는 Fig. 1과 같다.

2. 기존 문헌고찰

국의 연구사례로 Yamagishi(1951) 산정방법은 열차횟수 및 구성이 변하지 않는 구간을 기준으로 산정하며, 정확성 낮고, 고속, 저속 등 열차군 지정방법 모호하며 승객 수 단위의 분석이 불가능

단점이 있으나 사용이 용이하고 기초 자료 소요항목이 적은 장점이 있다. UIC 405(1983) 산정방법은 유럽 철도운영사에서 주로 활용 해왔으나 UIC 406개정 이후로는 사용하지 않는 방식으로 정확성이 낮고, 정차패턴에 의한 영향을 명시적으로 고려하지 못한 단점이 있으나 평균시격을 열차종간 시격의 평균개념으로 고려한 장점이 있다. TCRP-13(1996) 산정방법은 UIC-406과 야마기시 방법의 중간적인 성격의 산정방법으로 대중교통 분야 분석에 특화되어 있고, 열차단위 분석이 가능하고, 승객수 단위 및 1시간 단위의 편도측정이 가능한 장점이 있다. UIC 406(2004) 산정방법은 주어진 열차시각표를 기준으로 양방향 측정이 가능하며, 승객수 단위 분석이 불가능하고 별도의 S/W가 필요하나 시뮬레이션 기반으로 열차단위의 분석이 가능하며 정확성이 높은 장점이 있다. Taiwan Manual-Continuous route(Taiwan Manual, 2013) 산정방법은 개별선구모형의 경우 열차종별로 선·후행간 시격 계산으로 계산복 잡성이 높고 정거장 전·후의 개별 폐색길이만 고려하여 시격이 작게 산정될 수 있는 단점이 있으나, 단일 또는 연속선구모형의 구분이 가능하며, 연속선구모형의 경우 정차비용, 차종비용 등 현실적인 운영조건을 고려할 수 있는 장점이 있다.

국내 사례연구로 Kim and Kim(2003)의 철도시스템 개선을 위한 용량분석에 관한 연구에서는 선로용량 모집단을 설정하여 열차혼잡패턴에 따른 무작위 추출로 표본집단을 추출하고 열차횟수에 대한 통계분석을 수행하여 선로용량에 영향을 주는 열차등급, 열차속도, 신호폐색 길이, 열차제어시스템(ATP)를 설명하였다. Kim et al.(2006)의 지역간철도 선로용량 관리를 위한 지표개발 연구에서는 선로용량 개념을 이론적 최대용량, 실용용량, 영업용량으로 구분하고, 선로용량 관리를 위한 지표 개발로 침투 4시간을 적용, 야마기시 모형과 UIC405 모형을 비교 및 연계한 선로용량 산정모형을 제시하였다. Jeong et al.(2012)의 수도권고속철도 개통에 따른 고속선 병목구간 최적열차운행 체계 연구에서는 국내 고속철도 네트워크의 병목구간인 평택-오송구간의 선로용량에 대한 산정결과를 제시하였다. 아울러 고속선의 신호체계인 TVM430시스템의 열차설정 이론을 기초로 운행시격 및 열차횟수를 산정하는 방법을 기반으로 열차운행패턴 적용방안을 제시 하였으며, 정차패턴에 따라서 열차 운행시격이 변화한다는 사실을 지적하고 있다. Shon et al.(2013)의 열차운영패턴에 따른 고속철도 병목구간 선로용량 산정 연구에서도 평택-오송구간을 중심으로 격역 정차 및 수요비례 정차 등 2가지 유형의 열차 운행패턴을 적용하여 열차운행 DIA를 분석하였으며, 각 열차의 운행패턴에 따른 최소운전시격 및 선로용량을 산정하였다. Kim et al.(2013)의 철도이용수요에 따른 선로용량 변화 분석 연구에서는 정차시간이 선로용량 변화에 미치는 영향을 분석하여 추가 가능한 용량수준을 검토하였다, 앞서 살펴본 바와 같이 철도 노선용량에 대해 국내외

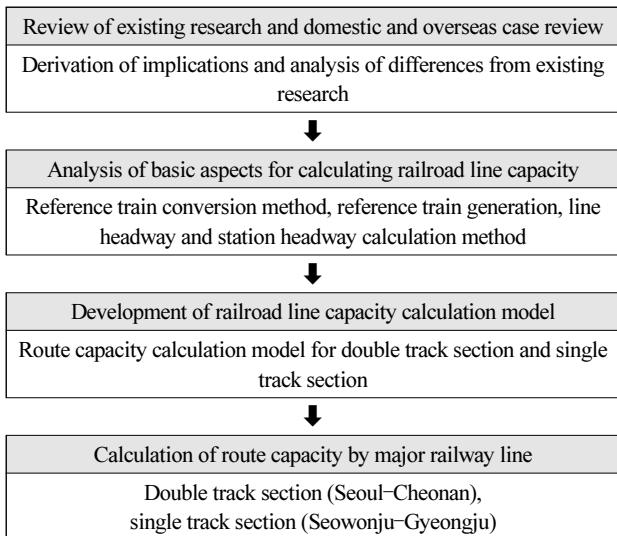


Fig. 1. The Study Procedure

연구사례에 적용된 연구 방법론을 구분하면, 크게 해석적 방법과 시뮬레이션 방법은 Fig. 2와 같이 두 가지 방법으로 구분해 볼 수 있다.

국내에서는 해석적 방법론 산식을 이용한 일본의 야마기시 산식이 가장 대표적으로 활용되고 있다, 하지만 복잡한 현실조건을 지나치게 단순화하여 산정결과의 정확성이 다소 떨어지는 단점이다. 시뮬레이션 방법은 UIC 406 방식 등의 방법으로 독일의 RAILSYS 및 스위스의 OpenTrack 등의 S/W를 활용하여 산정하는 유럽에서는 표준화된 방법으로 산정 결과에 대한 정확성이 높은 장점이 있다. 하지만 시뮬레이션 방법을 수행하기 위한 기초 데이터 등 입력자료가 복잡하여 적용이 어려우며 전문화된 S/W 활용이 불가피하다는 단점이 있다. 특히, 시뮬레이션 방법을 채택하

고 있는 국가철도공단의 기존 선로배분시스템은 다수가 수용할 수 있는 보편적인 방법은 아니며, 기 적용된 방법론은 일반적으로 철도 노선용량을 산정하여 모든 운영기관에 적용하는 것은 한계가 있으므로 곤란하다. 따라서, 현재 국내에서 활용 중인 기존의 해석적 방법은 자체적인 비평적 요소가 많을 뿐만 아니라 적합한 기준과 방법이 아니므로, 대안으로 철도 노선용량 산정을 위한 새로운 해석적 방법의 개발이 필요하다고 판단된다.

본 연구의 분석방법은 산식을 기반으로 한 해석적 방법론을 기본 토대로 하되, 기존 철도 노선 및 새롭게 확대되는 신규 노선의 용량에 대한 적절한 설계와 투자가 이루어 질 수 있도록 철도 노선용량에 대한 명확한 산정방식과 방법을 개발하고자 한다. 아울러 실제 철도 용량 산정에 있어 현장 반영은 필수적이지만, 본 논문에서는 Table 1과

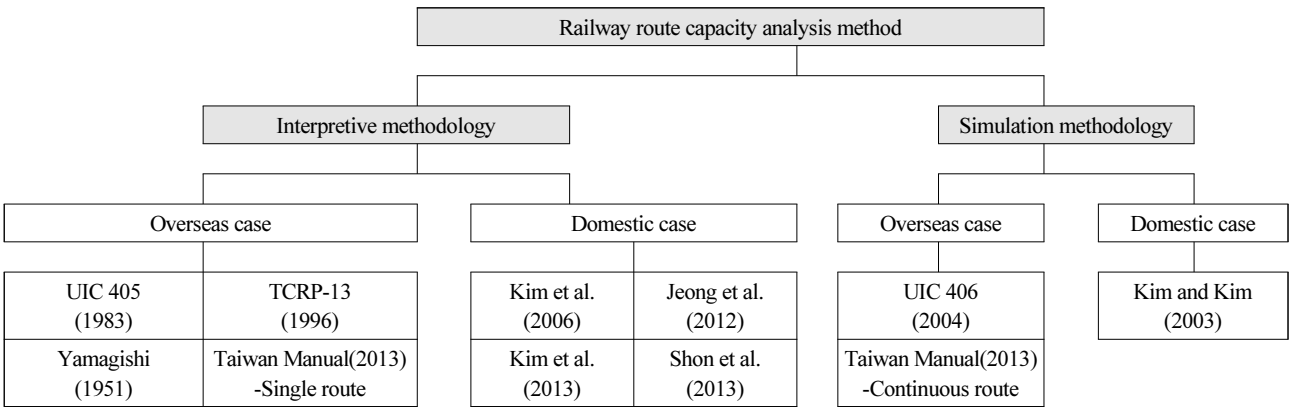


Fig. 2. Classification of Domestic and International Railway Line Capacity Analysis Methods

Table 1. Comparative Analysis of Domestic and International Railway Line Capacity Analysis Method and Method of This Study

| Division | Overseas Case | | | | | Domestic Case | | | | | This study | |
|--|---|----------------|----------------|----------------|----------------------|--------------------|-------------------|---------------------|-------------------|--------------------|------------|-------|
| | Yamgishi (1951) | UIC 405 (1983) | TCRP-13 (1996) | UIC 406 (2004) | Taiwan Manual (2013) | Kim and Kim (2003) | Kim et al. (2006) | Jeong et al. (2012) | Kim et al. (2013) | Shon et al. (2013) | | |
| 1. Establishing the concept of railroad capacity | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | △ | ○ | △ | ○ | |
| 2. Railroad capacity parameter | Characteristics by vehicle type | △ | △ | △ | ○ | ○ | △ | ○ | ○ | × | ○ | ○ |
| | Line utilization rate | △ | ○ | x | x | x | × | × | △ | × | △ | ○ |
| | Closing method, driving time | △ | △ | ○ | ○ | ○ | △ | △ | ○ | × | ○ | ○ |
| | Classification by operation method (H) High-speed (G) General (U) Urban railway | H/G | G | U | H/G | G/U | H/G | G | H | U | H | H/G/U |
| | Design capacity, maximum speed | △ | △ | △ | ○ | ○ | △ | △ | ○ | △ | ○ | ○ |
| | Line equipment | x | △ | △ | ○ | ○ | △ | △ | ○ | △ | ○ | ○ |
| | Train operating conditions | △ | △ | △ | ○ | ○ | × | × | ○ | × | ○ | ○ |
| 3. Establishment of route capacity calculation formula | ○ | ○ | ○ | × | ○ | ○ | ○ | × | ○ | × | ○ | |

※ O: Explicit consideration; △: Partial consideration x: Not considered

같이 기존 연구들과는 차별성을 부각시켜, 철도 노선용량에 필요한 파라미터 값들을 활용하여 단일선구에 운행하는 다양한 열차종별의 열차를 기준열차로 환산하는 기준열차 환산방식을 적용한 본선시격, 정거장시격을 산정하여 철도 노선용량을 산정할 수 있는 새로운 산정 모형식을 개발하여 철도 노선용량에 대한 새로운 개념 정립을 하고자 한다. 이를 토대로 새로운 산정 모형을 적용하여 국내 주요 복선, 단선철도 구간에 노선용량을 산정해보고자 한다.

3. 철도 노선용량 산정모형 개발

3.1 철도 노선용량 산정모형 개발에 필요한 기본사항 분석

먼저 본 연구에서는 철도 노선용량 산정모형 개발을 위하여 기준열차를 환산하는 방법을 기반으로 모형을 검토해 보았다. 기준열차 환산방식의 전제조건은 철도 노선용량 산정 시 선구단위로 계산하며, 독립적이다. 즉, 선구 간에 미치는 영향은 고려하지 않는다. 또한 선구 내 여러 단위링크(Link)가 있는 경우 철도노선용량이 가장 낮은 단위링크의 철도 노선용량을 선구의 철도 노선용량으로 하며, 선로의 유지보수 및 미운영시간은 기준시간에 포함하지 않는다. 이러한 기준열차 환산방식은 철도 노선용량 산정을 위해 선구에 운행하는 열차의 차종이 단일차종인지, 여러 가지 차종이 혼용되는 다 차종인지 파악하는 것이 중요하므로, 여러 차종이 혼용 운행하는 구간이라면 계산상 편의성 및 일관성을 확보하기 위하여 하나의 열차차종으로, 즉 기준열차로 변환한다. 이는 마치 단일차종이 운행하는 것과 같은 개념이다. 기준열차를 생성하는 것은 단위링크를 여러 차종의 열차가 운행하기 때문에 하나의 단일 차종의 열차를 만들어내는 것으로, 단위링크를 운행되는 열차를 대표하는 기준열차를 만들어 내는 방법이다.

기준열차를 생성하기 위해서는 단위링크를 운행하는 열차의 종류(차종), 열차별 특성인 열차길이, 제한속도, 상용 가 감속도 그리고 운행비율 등의 기본 파라미터 값들이 필요하며, 각각의 파라미터 값들을 산정하는 방법은 다음과 같다.

기준열차의 열차길이(L^B)은 각 열차종의 열차길이를 운행비율에 따라 평균하여 산정한다.

$$L^B = R^1 L^1 + R^2 L^2 + \dots + R^n L^n \quad (1)$$

여기서, L^B : 기준열차 열차길이(m)

L^n : 차종 n 의 열차길이(m)

R^n : 차종 n 의 운행비율(%)

기준열차의 제한속도(V^B)는 기준열차의 시격이 운행비율에 따른 평균시격(\bar{h})이 되도록 각 열차종의 운행비율을 해당 열차종의

제한속도로 나누어 더한 값의 역수로 산정한다.

$$\frac{n \times BL}{V^B} \approx \bar{h} \approx \sum_i h^i R^i \approx \sum_i \frac{n \times BL}{V^i} R^i \quad (2)$$

$$V^B = \frac{1}{\frac{R^1}{V^1} + \frac{R^2}{V^2} + \dots + \frac{R^n}{V^n}} \quad (3)$$

여기서, V^B : 기준열차 제한속도(km/h)

V^n : 차종 n 의 제한속도(km/h)

R^n : 차종 n 의 운행비율(%)

기준열차의 상용 가속도(α_a^B)는 기준열차의 제동거리가 각 열차종(기준열차의 제한속도로 운행)의 제동거리 값의 평균이 되도록 각 열차종의 운행비율을 해당 열차종의 상용 감속도로 나누어 더한 값의 역수로 산정한다. 기준열차의 상용 감속도(α_d^B) 역시 상용 감속도와 같은 방법으로 산정한다.

$$\alpha_a^B = \frac{1}{\frac{R^1}{\alpha_a^1} + \frac{R^2}{\alpha_a^2} + \dots + \frac{R^n}{\alpha_a^n}} \quad \alpha_d^B = \frac{1}{\frac{R^1}{\alpha_d^1} + \frac{R^2}{\alpha_d^2} + \dots + \frac{R^n}{\alpha_d^n}} \quad (4)$$

여기서, α_a^B : 기준열차 상용 가속도(m/s²)

α_d^B : 기준열차 상용 감속도(m/s²)

R^n : 차종 n 의 운행비율(%)

α_a^n : 차종 n 의 상용 가속도(m/s²)

α_d^n : 차종 n 의 상용 감속도(m/s²)

기준열차로 환산을 위한 열차길이(L^B), 제한속도(V^B), 상용 가속도(α_a^B), 상용 감속도(α_d^B) 등의 파라미터 값에 대한 환산방법에 대한 예시를 보면 Table 2와 같다.

기준열차의 환산계수(Base Train Equivalent Factor; β)는 기준열차로의 변환 시 동일한 단위시간 동안 이중 열차의 총 운행횟수와 기준열차의 운행횟수를 일치시켜주어야 하므로, 열차종간 시격과 열차운행비율로 평균시격을 산정하며, 기준열차의 환산계수 산정 방법은 다음과 같다.

$$\beta = \frac{\sum_{i,j} \frac{BN \times BL}{V^i / 3.6} + \left(\frac{K}{V^i / 3.6} - \frac{K}{V^j / 3.6} \right) R^i R^j}{\frac{BN \times BL}{V^i / 3.6}} \quad (5)$$

여기서, β : 기준열차 환산계수
 BN : 신호 시스템의 열차제동에 필요한 폐색(Block)의 수
 BL : 선구내 폐색구간의 평균길이(m)
 K : 단위링크거리(m)
 V^n : 열차종 n 의 제한속도(km/h)
 R^n : 열차종 n 의 운행비율(%)

T_{om} : 역간 운전시분에 추가적으로 반영하는 운영상의 여유시간(초)
 * 국내 철도 운영기관에서는 대략 역간 운전시분의 5 % 정도를 감안하고 있음
 V^B : 기준열차 제한속도(km/h)
 β : 기준열차 환산계수

3.2 본선시격(Line Headway)의 산정방법 검토

본선시격은 정거장 외 본선에서 물리적으로 가능한 최소시격으로, 본 연구에서는 철도종별 차이점 발생에 따라 고정폐색의 경우에 한정하여 본선시격을 산정한다. 본선시격은 위에서 검토한 Eqs. (1)~(3)의 파라미터 값을 적용하며, 선·후행 열차 사이에 필요한 폐색 수에 한 폐색 길이를 곱하여 이격거리를 계산하고, 열차길이와 여유거리를 더한 거리를 본선 제한속도로 나누어 산정한다. 본선시격의 산정방법은 다음과 같다.

$$h(l) = \left(\beta \times \frac{BN \times BL + L^B + BZ}{V^B / 3.6} + T_{dr} + T_{il} + T_{om} \right) / 60 \quad (6)$$

여기서, $h(l)$: 본선시격(Line Headway)

BN : 신호 시스템의 열차제동에 필요한 폐색(Block)의 수
 BL : 선구내 폐색구간의 평균길이(m)
 L^B : 기준열차 열차길이(m)
 BZ (Buffer Zone) : 폐색구간별 중복(overlap)에 따른 일종의 여유거리(m)
 * 유럽의 경우 100~300 m 반영하며 본 연구에서는 300 m로 반영
 T_{dr} : 기관사가 속도변화를 인지하여 제어하는데 걸리는 인지시간(초)
 T_{il} : 차량시스템, 이동권한, 분기기 등 시스템 제어를 위한 연동시간(초)

3.3 정거장시격(Station Headway)의 산정방법 검토

정거장시격은 선구내의 정거장에서 정차조건을 고려하여, 정거장 시격은 정거장에서 진출한 열차와 정거장으로서 역과 역 사이에서 열차운행을 고려한 시격이다. 정거장시격 산정을 위하여, 먼저 대피선-정차패턴의 비율(%)을 산정한다,

열차의 정차패턴 유형은 총 7가지로 ① 선행열차 통과, 후행열차 통과($h^1(s) = h(l)$), ② 선행열차 통과, 후행열차 정차($h^2(s) = h(l) + (T_b + T_{dw} + T_a) / 60$), ③-1 선행열차 정차, 후행열차 통과(대피/추월 안함)($h^{3-1}(s) = h(l)$), ③-2 : 선행열차 정차, 후행열차 통과(대피/추월 함)($h^{3-2}(s) = (T_b + T_{dw} + T_a) / 60$), ④-1 선행열차 정차, 후행열차 정차(대피선 1개 이상, 대피/추월 안함)($h^{4-1}(s) = \max(h(l), (T_b + T_{dw} + T_a) / 60)$), ④-2 선행열차 정차, 후행열차 정차(대피선 2개 이상, 대피/추월 안함)($h^{4-2}(s) = h(l)$), ④-3 선행열차 정차, 후행열차 정차(대피선 2개 이상, 대피/추월 함)($h^{4-3}(s) = 2 \times h(l)$) 등의 패턴으로 구분한다.

정거장시격의 산정방법은 시간적 범위를 정거장 시격으로 나눈 값으로 산정식은 다음과 같다.

$$h(s) = r^1 h^1(s) + r^2 h^2(s) + r^{3-1} h^{3-1}(s) + r^{3-2} h^{3-2}(s) + r^{4-1} h^{4-1}(s) + r^{4-2} h^{4-2}(s) + r^{4-3} h^{4-3}(s) \quad (7)$$

여기서, $h(s)$: 정거장시격(분)

r^n : 대피선-정차패턴 n 의 비율(%)

$h^n(s)$: 대피선-정차패턴 n 의 정거장시격(분)

Table 2. Generation of Train Length, Speed Limit, Commercial Acceleration, and Commercial Deceleration of the Reference Train (Example)

| Railway Vehicle Type | Train Length (L^n) | Speed Limit (V^n) | Commercial Acceleration (α_a^B) | Commercial Deceleration (α_d^B) | Operating Rate (R^n) |
|----------------------|------------------------|-----------------------|--|--|--------------------------|
| | (m) | (km/h) | (m/s ²) | (m/s ²) | (%) |
| KTX | 400 | 300 | 0.32 | 0.57 | 5 |
| Saemaoul | 143 | 150 | 0.47 | 0.64 | 25 |
| Mugunghwa | 200 | 120 | 0.25 | 0.55 | 50 |
| Freight train | 500 | 70 | 0.15 | 0.07 | 30 |
| Standard train | 305 | 97 | 0.21 | 0.18 | 100 |

3.4 철도 노선용량 산정모형의 구축

복선 철도노선용량은 기준열차 생성 후 단위링크의 정거장과 정거장 사이에서 물리적으로 가능한 최소시각인 본선시격과 정거장에서의 정차를 고려하는 정거장시격을 계산한다. 단위링크의 철도노선용량(c_{ls})은 기준시간을 정거장시격으로 나누어 산출한다. 기준시간은 선로유지보수 및 열차 미운행 시간을 제외한 시간으로써, 일반적으로 고속철도는 17.5시간(1,050분), 일반철도는 18시간(1,080분), 도시철도는 19시간(1,140분)으로 계산한다. 선구의 철도노선용량은 선구를 형성하는 단위링크의 철도노선용량 중 가장 작은 값을 선택한다.

$$c_{ls} = \frac{T}{h(s)} \quad (8)$$

여기서, c_{ls} : 철도노선용량(회/기준시간)

T : 기준시간(분)

$h(s)$: 정거장시격(분)

단선 철도노선용량은 기준열차 생성 후, 선구의 교행 가능역에서

운행하는 열차의 가속시간, 제동시간, 등속시간을 계산하여 운전시분을 계산한다. 단선 철도노선용량은 주어진 기준시간을 역간운전시분 및 폐색취급시분의 합으로 나누어 산정한다.

$$c_{ls} = \frac{T/2}{t_s + c} \quad (9)$$

여기서, c_{ls} : 철도노선용량(편도횟수/기준시간)

T : 기준시간(분)

t_s : 역간운전시분(분)

c : 폐색취급시분(분)

4. 철도 노선용량 산정모형 적용

4.1 복선철도 운행구간의 노선용량 산정결과

본 연구에서 검토한 Eqs. (1), (3), (5) and (6)와 Table 2를 활용하여, 경부선 서울~천안 간 복선철도 운행구간에 본선시격(Line Headway)을 산정한 결과는 Table 3과 같다.

Table 3. Calculation Results of Line Headway for Calculation of Railroad Line Capacity

| Route | Link | Speed Limit | Number of Occlusions | Occlusion Length | Train Length | Number of Trains | | | | Extra Distance | Recognition Time | Interlocking Time | Spare Time | Base Train Equivalent Factor | Line Headway |
|----------------|---------------------|-------------|----------------------|------------------|--------------|------------------|----------|-------------|---------------|----------------|------------------|-------------------|------------|------------------------------|--------------|
| | | | | | | KTX | Sae-maël | Mu-gung-hwa | Freight Train | | | | | | |
| | Section | km/h | Sum | m | m | Times/Day | | | | m | Sec | Sec | Sec | - | Min |
| Gyeong-bu line | Seoul-Geumcheon-gu | 127 | 5 | 559 | 306 | 91 | 22 | 63 | 9 | 300 | 10 | 20 | 30 | 1.07 | 2.72 |
| | Geumcheon-gu-Uiwang | 123 | 5 | 643 | 220 | 4 | 22 | 63 | 8 | 300 | 10 | 20 | 30 | 1.11 | 3.03 |
| | Uiwang-Cheonan | 101 | 5 | 667 | 293 | 4 | 22 | 63 | 42 | 300 | 10 | 20 | 30 | 1.52 | 4.55 |

Table 4. Example of Station Headway and Route Capacity Calculation Results

| Route | Link | Stop | Number of Side-Tracks | Line Headway | Standard Train | | Braking Loss Time | Stop Time | Acceleration Loss Time | Train Pattern Ratio | | | | | | | Station Headway | Route Capacity |
|---------------|---------------------|--------------|-----------------------|--------------|-------------------------|-------------------------|-------------------|-----------|------------------------|---------------------|-----|------|------|------|------|------|-----------------|----------------|
| | | | | | Commercial Acceleration | Commercial Deceleration | | | | R1 | R2 | R3-1 | R3-2 | R4-1 | R4-2 | R4-3 | | |
| | Section | | Num | Min | ‰ | ‰ | Sec | Sec | Sec | % | % | % | % | % | % | % | Min | Times/Day |
| Gyeongbu line | Seoul-Geumcheon-gu | Seoul | 2 | 3.13 | 0.29 | 0.42 | 42 | 120 | 61 | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 100% | 0% | 3.13 | 228 |
| | | Yeongdeungpo | 2 | 3.42 | 0.29 | 0.42 | 30 | 120 | 43 | 10% | 39% | 29% | 8% | 14% | 0% | 0% | 4.74 | |
| | Geumcheon-gu-Uiwang | Anyang | 1 | 3.50 | 0.27 | 0.36 | 39 | 120 | 52 | 11% | 35% | 29% | 0% | 20% | 0% | 0% | 4.73 | 228 |
| | Uiwang-Cheonan | Suwon | 2 | 4.55 | 0.22 | 0.17 | 81 | 120 | 63 | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 100% | 0% | 4.55 | 189 |
| | | Pyeongtaek | 1 | 4.55 | 0.22 | 0.17 | 81 | 120 | 63 | 2% | 10% | 10% | 0% | 78% | 0% | 0% | 5.73 | |
| | | Cheonan | 2 | 4.55 | 0.22 | 0.17 | 81 | 120 | 63 | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 100% | 0% | 4.55 | |

Table 3에서 산정된 본선시격(Line Headway)을 기준으로 Eqs. (4) and (7)의 산정모형을 적용하여, 정거장시격(Station Headway)을 산정하고, Eq. (8)에 따른 노선용량을 산정한 결과는 Table 4와 같다.

4.2 단선철도 운행구간의 노선용량 산정결과

본 연구에서 검토한 Eqs. (1), (3), (5) and (6)과 Table 2를 활용하여, 중앙선 서원주~경주 간 단선철도 운행구간에 본선시격(Line Headway)을 산정한 결과는 Table 5와 같다.

Table 5에서 산정된 본선시격(Line Headway)을 기준으로 Eqs. (4) and (7)을 적용하여, 정거장시격(Station Headway)을 산정하고, Eq. (9)를 적용한 노선용량을 산정한 결과는 Table 6과 같다.

4.3 본 연구의 철도 노선용량 산정결과와 현재의 선로용량 비교 및 일관성 검증

본 연구에서 산정한 노선용량과 국가철도공단에서 사용 중인 선로용량 간의 비교분석 및 일관성을 검증을 위해 Cronbach's α 계수를 사용하였다. Cronbach's α 계수는 일관성을 나타내는 계수로 신뢰성을 평가하는 척도로, 0.0~1.0의 값을 갖는데 값이 높을수록 신뢰도가 높다. 일반적으로 0.8~0.9의 값이면 신뢰도가 매우 높은 것이며, 비교분석 결과 Cronbach's α 계수 값이 '0.989'로 본 연구에서 산정한 노선용량 산정모형에 대한 신뢰성이 있는 것으로 Table 7 및 Fig. 3과 같이 분석되었다.

Table 5. Calculation Results of Line Headway for Calculation of Railroad Line

| Route | Link | Speed Limit | Number of Occlusions | Occlusion Length | Train Length | Number of Trains | | | | Extra Distance | Recognition Time | Interlocking Time | Spare Time | Base Train Equivalent Factor | Line Headway |
|---------------|---------------------|-------------|----------------------|------------------|--------------|------------------|----------|-----------|---------------|----------------|------------------|-------------------|------------|------------------------------|--------------|
| | | | | | | KTX | Sae-maөл | Mugunghwa | Freight Train | | | | | | |
| | | | | | | Sum | m | m | Times/Day | | | | | | |
| Jung-ang line | Seowonju-Wonju | 91 | 5 | 800 | 347 | - | 2 | 15 | 17 | 300 | 10 | 20 | 30 | 1.00 | 3.88 |
| | Wonju-Bongyang | 91 | 5 | 800 | 347 | - | 2 | 15 | 17 | 300 | 10 | 20 | 30 | 1.00 | 3.88 |
| | Bongyang-Jecheon | 80 | 5 | 800 | 406 | - | 2 | 24 | 58 | 300 | 10 | 20 | 30 | 1.00 | 4.32 |
| | Jecheon-Dodam | 76 | 5 | 800 | 424 | - | 2 | 7 | 28 | 300 | 10 | 20 | 30 | 1.00 | 4.47 |
| | Dodam-Danseong | 85 | 5 | 800 | 372 | - | 2 | 7 | 13 | 300 | 10 | 20 | 30 | 1.00 | 4.08 |
| | Danseong-Yeongju | 85 | 5 | 800 | 372 | - | 2 | 7 | 13 | 300 | 10 | 20 | 30 | 1.00 | 4.08 |
| | Yeongju-Andong | 80 | 5 | 800 | 404 | - | 0 | 8 | 17 | 300 | 10 | 20 | 30 | 1.00 | 4.30 |
| | Andong-Yeongcheon | 72 | 5 | 800 | 455 | - | 0 | 3 | 17 | 300 | 10 | 20 | 30 | 1.00 | 4.70 |
| | Yeongcheon-Gyeongju | 88 | 5 | 800 | 358 | - | 2 | 18 | 23 | 300 | 10 | 20 | 30 | 1.00 | 3.96 |

Table 6. Station Headway and Route Capacity Calculation Results

| Route | Link | Stop | Number of Side-Tracks | Line Headway | Standard Train | | Braking Loss Time | Stop Time | Acceleration Loss Time | Train Pattern Ratio | | | | | | | Station Headway | Route Capacity |
|---------------|---------------------|------------|-----------------------|--------------|-------------------------|-------------------------|-------------------|-----------|------------------------|---------------------|-----|------|------|------|------|------|-----------------|----------------|
| | | | | | Commercial Acceleration | Commercial Deceleration | | | | R1 | R2 | R3-1 | R3-2 | R4-1 | R4-2 | R4-3 | | |
| | | | | | Min | Sec | | | | % | % | % | % | % | % | % | | |
| Jung-ang line | Seowonju-Wonju | Wonju | 2 | 4.07 | 0.19 | 0.12 | 101 | 120 | 66 | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 100% | 0% | 8.55 | 63 |
| | Wonju-Bongyang | Bongyang | 1 | 4.07 | 0.19 | 0.12 | 101 | 120 | 66 | 53% | 24% | 24% | 0% | 0% | 0% | 0% | 7.69 | 70 |
| | Bongyang-Jecheon | Jecheon | 2 | 4.54 | 0.17 | 0.10 | 115 | 120 | 64 | 35% | 29% | 29% | 0% | 0% | 6% | 0% | 5.95 | 182 |
| | Jecheon-Dodam | Dodam | 2 | 4.71 | 0.17 | 0.09 | 119 | 120 | 63 | 35% | 29% | 29% | 0% | 0% | 6% | 0% | 6.12 | 176 |
| | Dodam-Danseong | Danseong | 1 | 4.30 | 0.18 | 0.11 | 108 | 120 | 64 | 0% | 0% | 0% | 0% | 100% | 0% | 0% | 8.67 | 62 |
| | Danseong-Yeongju | Yeongju | 2 | 4.30 | 0.18 | 0.11 | 108 | 120 | 64 | 63% | 13% | 25% | 0% | 0% | 0% | 0% | 9.65 | 56 |
| | Yeongju-Andong | Andong | 2 | 4.52 | 0.17 | 0.10 | 115 | 120 | 65 | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 100% | 0% | 9.08 | 59 |
| | Andong-Yeongcheon | Yeongcheon | 2 | 4.95 | 0.16 | 0.08 | 125 | 120 | 63 | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 100% | 0% | 11.26 | 48 |
| | Yeongcheon-Gyeongju | Gyeongju | 2 | 4.16 | 0.19 | 0.12 | 104 | 120 | 66 | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 100% | 0% | 8.98 | 60 |

Table 7. Comparison and Analysis of Route Capacity Calculation Results and Current Route Capacity

| Link | | A. Route Capacity Calculation Results | B. Route Capacity of Korea National Railway | Sum |
|------------------------------|---------------------|---------------------------------------|---|----------|
| Gyeongbu -line | Seoul-Geumcheon-gu | 228 | 259 | 487 |
| | Geumcheon-gu-Uiwang | 228 | 192 | 420 |
| | Uiwang-Cheonan | 189 | 195 | 384 |
| Jungang -line | Seowonju-Wonju | 63 | 74 | 137 |
| | Wonju-Bongyang | 70 | 74 | 144 |
| | Bongyang-Jecheon | 182 | 176 | 358 |
| | Jecheon-Dodam | 176 | 172 | 348 |
| | Dodam-Danseong | 62 | 62 | 124 |
| | Danseong-Yeongju | 56 | 46 | 102 |
| | Yeongju-Andong | 59 | 46 | 105 |
| | Andong-Yeongcheon | 48 | 50 | 98 |
| | Yeongcheon-Gyeongju | 60 | 64 | 124 |
| | Variance | | 5510.749 | 5679.909 |
| Sum of variance | | 11190.658 | | |
| Cronbach's Alpha Coefficient | | 0.989 | | |

* Cronbach's $\alpha = ((\text{Number of items})/(\text{Number of items}-1))*(1-\text{Sum of variances}/\text{Variance of the sum})$

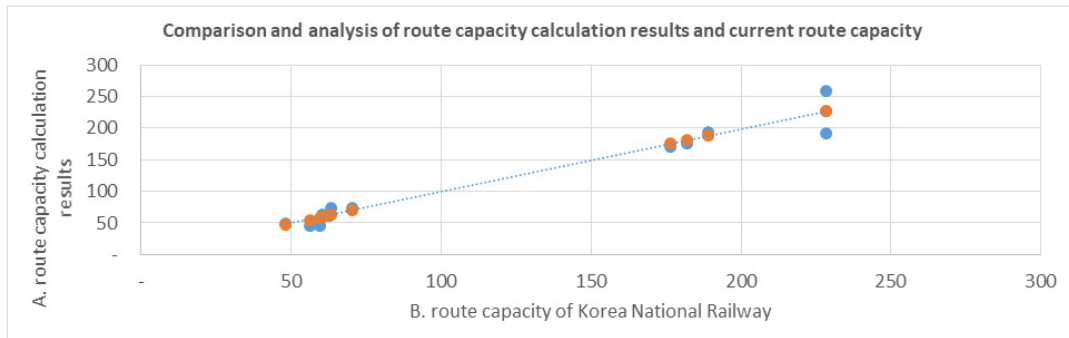


Fig. 3. Comparison and Analysis of Route Capacity Calculation Results and Current Route Capacity

5. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 기존 선행연구 사례로 검토된 산식에 기반 한 해석적 방법론을 기본 토대로, 철도 노선용량 산정을 위한 새로운 방법을 제시하였다. 새로운 방식의 철도 노선용량 산정을 위해 단일선구에 대하여 운행하는 다양한 열차종별의 열차를 기준열차로 환산하는 기준열차 기반 환산방식의 산정모형을 개발하였다. 이러한 기준열차 기반의 환산방식의 산정모형을 적용하여, 경부선 복선 구간(서울~천안) 및 중앙선 단선 구간(서원주~경주)에 본선시격(Line Headway)과, 정거장시격(Station Headway)을 산정하고, 이를 통하여 노선용량을 산정할 수 있었다. 철도 경쟁력 강화를 위해 그간의 불명확한 기준의 철도 노선용량의 개념을 공급자적 관점에서의 기존 용량의 한계 값을 철도 사용량으로서의 개념으로

제정하고, 명확한 철도 노선용량의 산정기준과 방법을 정립하여 그 결과를 제시함으로써, 철도 운행 효율성 향상을 위한 기존 철도 노선 및 새롭게 확대되는 신규 노선의 용량에 대한 적절한 설계와 투자가 이루어 질 수 있도록 기준 및 척도를 제시할 수 있게 되었다.

다만 본 연구에서 최소한의 절차와 방법론으로 기준열차 환산방식을 적용한 고정폐색 구간에 한하여 철도 노선용량을 산정하는 방법을 제시하였으므로, 산정된 노선용량을 각 운행 선구별로 적용 시, 열차의 정시성, 혼잡도 등 철도 서비스에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 추가 연구가 필요하다. 아울러 향후 도입되는 광역급행열차(GTX)와 한국형고속열차(EMU)의 국내 철도 노선에 투입 등을 고려한 기존 철도 노선 노선용량 재 산정 및 향후 확대되는 신규 철도 노선에 대한 노선용량 계획이 필요할 것으로 판단된다.

References

- Jeong, S. B., Jeon, J. G. and Nam, B. G. (2012). "A study on the optimal train operation system for bottlenecks in high-speed ships in the metropolitan area." *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 15, No. 6, pp. 631-637 (in Korean).
- Kim, D. H. and Kim, S. H. (2003). "A study on capacity analysis for improvement of railroad system." *Proceedings of the KSR Conference, Journal of the Korean Railroad Society*. pp. 272-279 (in Korean).
- Kim, H., Kim, C. S. and Kim, Y. G. (2006). *Development of methods for capacity management of inter-regional railway*, Korea Transport Institute (in Korean).
- Kim, I. H., Kim, I. C., Bae, Y. G. and Wang, Y. D. (2013). "A study on railroad track capacity according to transit railway demand," *Journal of the Korean Operations Research and Management Science Society*, Vol. 38, No. 3, pp. 23-35 (in Korean).
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2013). *Road capacity manual* (in Korean).
- Shon, E. Y., Kim, H. J. and Jeong, E. H., (2013). "The study on the capacity calculation of high-speed rail bottleneck section according to the train operation pattern." *Proceedings of the KSR Conference, Journal of the Korean Society for Railway*, pp. 577-582 (in Korean).
- Taiwan Manual (2013). *Railway capacity manual of taiwan railway administration*, Institute of Transportation, Taipei, Taiwan.
- Transit Cooperative Research Program (TCRP) 13 (1996). *Transit capacity and quality of service manual*, Third Edition, National Academy of Science, Washington, D.C, USA.
- Union Internationale des Chemins de fer (UIC) 405 (1983). *Method to be used for the determination of the capacity of lines*, Paris, France.
- Union Internationale des Chemins de fer (UIC) 406 (2004). *Capacity*, Paris, France.
- Yamagishi, D. (1951). *Theory and practice on railway track capacity*, Japan National Railway - Operation Department (in Japanese).