

시뮬레이션 기법을 통한 선로용량 산정방법

Method for calculating the line capacity by computer aided simulation

최종빈*[†], 이진선*, 기형서**Jong-Bin Choi*[†], Jin-Sun Lee*, Hyung-Seo Ki**

Abstract Line capacity of railways is a core criteria to decide maximum trips in accordance with traffic demand and a priority in railway investment for improving transportation capability. Particularly, because two operators will start the revenue services in the HSR from the mid-2016, the line capacity should be carefully calculated and controlled to avoid conflicts between Maximum KTXs, and to guarantee an effective competition of the operators. Meanwhile, there has been many arguments about calculating line capacity, because it is affected by the number of trips by train types, a stopping pattern and dwell time in each station, journey time, the crossing or passing, a safety headway between trains, etc. This study proposes the simulation method for calculating the line capacity to consider train operating according to the operator's service policies to deal successfully with these kinds of problems.

Keywords : line capacity, undertakings, operating schedule, safety headway, simulation method

초 록 선로용량은 수요에 부합되는 최대 열차회수를 결정하고 수송력 증대에 필요한 투자우선순위 판단을 위한 중요한 척도이다. 특히 2016 년 중반부터 고속철도노선에 두 철도운영자가 운송사업을 개시함에 따라 선로용량과 실제 배정 가능한 최대열차회수 간에 상충이 발생하지 않고 유효운송경쟁이 보증될 수 있도록 선로용량을 산정·관리할 필요성이 있다. 열차종별 운행회수, 도중역 정차패턴과 착발시각, 역간 운행시간, 열차의 대피 또는 교행, 열차간 안전시각 등에 따라 선로용량이 크게 달라지므로 실제 적용에 많은 논쟁이 있는 것도 사실이다. 이러한 문제점을 극복하고자 철도운영자의 운송정책을 고려한 열차종별 운행스케줄을 반영할 수 있는 시뮬레이션 기법을 통한 선로용량 산정방법을 제시한다.

주요어 : 선로용량, 철도운영자, 운행스케줄, 안전시각, 시뮬레이션 기법

1. 서 론

선로배분의 기초가 되는 선로용량의 추정은 얼마나 실용용량과 합치되게 평가되느냐가 관건이다. 단일 열차패턴으로 운용되는 전용노선을 제외하고, 여러 종별 열차가 혼용되는 일반노선이나 주요 노선축에서 분기 합류되는 간선, 지선의 영향과 저고속열차 간 경합이 다양하게 이뤄지는 중장거리 철도망의 시종점간에 대한 선로용량의 정확한 계산은 어떤 방식도 완전하다고 주장하기 곤란하다. 따라서 수요가 증대하는 주요노선에 대한 열차운행의

[†] 교신저자: 한국철도시설공단 기술본부 수송계획처 (jbchoi@kr.or.kr)

* 우송대학교 철도경영학과

** 서울시립대학교 일반대학원 교통공학과

안전을 확보하면서도 보다 객관적이며 이해관계자들을 설득할 수 있는 쉽고 정확한 선로 용량 산정방안을 도출하고 편리한 툴을 개발하는데 초점을 두었다. 본 연구는 기존 연구와 현재 산정실태를 검토하여, 열차운행형태를 실제적으로 반영할 수 있는 시뮬레이션 기법을 활용한 평균운전시격을 구하여 영업시간 주기로 곱해 주는 새로운 방안을 제시하였다. 새로운 방법의 차별성과 영향인자의 검토 및 구체적 연구방법론을 기술하고, 그 결과를 운영 실태와 비교한 후 도출된 평균운전시격을 검증하는 것으로 결론을 맺는다.

2. 기존 연구고찰과 현재 실태 및 문제 해결방안

2.1 기존연구 고찰

선로용량은 일정주기 동안 공표된 시각표에 따라 운행 가능한 최대열차횟수로서 Flow 개념으로 정의하며[1, 3], 국가별로 다양한 방법 등을 이용하여 추정하고 있다. 여러 가지 방법으로 추정하는 것은, 바로 각각의 영향인자들(인프라, 교통량, 운영측면 등)이 변수로서 작용하며 산정시기별로 변화할 수 있음을 의미한다. 대표적으로 Abril et al.(2007)은 이론용량을 모든 열차가 균일하고 하루 종일 중단 없이 균등하게 운행된다고 가정하고 현실에서 발생하는 교통량의 변화와 운영효과를 무시한 용량이라 정의하였다. 또한 실용용량은 합리적 신뢰성 수준에서 한 노선에서 이동할 수 있는 대표적 교통량의 한계로 정의하면서 이 교통량은 열차 혼합운용 및 우선순위, 교통량 쏠림현상 등을 반영하며 이론용량의 60~75% 수준으로 주장하였으며, 다른 연구들도 공통적으로 이 값을 뒷받침 한다[2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10]. 실제 예상되는 서비스수준 내에서 가장 큰 용량으로 운행하기 위한 철도인프라, 교통량 및 운영상 특정열차 조합능력(열차배열)과 관련되므로 실용용량은 선로 용량의 가장 중요한 척도로 인식되고 있다.

2.1.2 용량 개념 검토

철도에서 널리 통용되는 용어 중 혼동을 피하기 위하여 개념을 정리하면, 영업용량(used capacity)은 선로배분에서 네트워크를 통해 발생하는 실제 교통량으로 정의되며 실용용량보다 낮은 수준이다. 사용가능용량(available capacity)은 선로배분에서 영업용량(used capacity)과 실용용량과의 차이로서 행로에서 처리될 수 있는 추가 교통량으로 정의한다. 만약 새로운 열차가 추가되면 유용한 용량이 되지만 그렇지 않을 경우 손실용량(loss capacity)로 처리된다[2]. 운행 취소된 용량(uncovered capacity)은 선로배분이 확정된 후 운영을 취소하여 열차운행다이어그램(거리-시각그래프)상 열차경로가 비워진 용량으로 정의하며 임시열차 설정 및 추가 선로배분이 가능하도록 합리적인 관리가 요구된다.

2.1.2 현재 추정실태 및 문제 해결방안

선로용량의 기본원리로서 첫째, 최소운전시격(minimum headway), 둘째, 여유시간(buffer time), 셋째, 운전여유시간(running time supplements)을 주장하고 있다[11]. 이 원리는 철도운영계획 측면에서 필수적으로 수용하고 있지만 각기 노선별 인프라 특성과 운영환경에 따라 약간의 차이는 있다고 사료된다. 그렇지만 철도부문에 대한 경험과 전문성을 갖추지 못한 여타 부문의 당사자들이 선로용량 개념에 대한 혼동과 이해 부족 등으로 산정된 선

로용량 값에 대한 논쟁이 이어지고 있다. 따라서 수요가 증대하는 주요노선에서 열차운행의 안전을 보장하면서 보다 객관적으로 이해관계자들을 설득해야 한다. 더불어, 쉽고 정확하여 신뢰성을 확보할 수 있는 선로용량 산정기법 도출과 툴 개발이 요구된다. 기존 여러 산정방식들이 있는데, 대표적으로 UIC(2004) 406 code 압축방식, FRA (1996) 산출식, 김동희, 김성호 (2007) 확률실험식, Jozef Gasparik (2007) 선로용량 추정식, 야마기시식을 변형한 한국철도시설공단(2010) 새로운 선로용량 산정식 및 김인철 외 (2013)의 선로구간 특성에 따른 노선별 산정식도 있다. 또한 철도운영통합솔루션 시스템으로서 Open Track(Switzerland), RAILSIM X®(Systra), TTG (Australia) 등도 사용된다. 그러나 통합솔루션시스템은 단순히 이용하기 곤란한 검증용 프로그램이며, 기타 산정식이나 확률실험식들도 인자 적용치의 선택이 복잡하고 그 추정치에 대한 설득이 어려우며, 이를 종합하여 현재 쟁점과 해결방안을 Table 1에 요약하였다.

Table 1 Current issues and solutions for the line capacity

Current issues	Solutions
<ul style="list-style-type: none"> ① 영업단계에서 파악 가능한 매개변수들(열차회수비, 군수비 등) 적용된 산출식으로 철도투자 분석 및 건설계획단계에서 사용 곤란 ② 철도운영자의 개연성(매개변수에 따라 차이 발생), 선로형태(단선, 복선)와 노선의 수송특성 구분 없이 관행적으로 선로이용율 60%(일반혼용 노선) 적용 ③ 운행구간, 열차비율, 운행패턴 등 동적변화 특성 미반영 ④ 복수 철도운영자 개입하는 철도거래시장(2차시장)의 선로배분과정에서 산정방식 및 적정성에 대한 다툼발생 소지 	<ul style="list-style-type: none"> ① 선로배분 및 철도건설계획 단계에서도 사용 가능한 선별적 선로용량 산정 툴 개발(노선성격, 운전방식, 열차종별) ② 선로이용율과 선로유지보수시간 설정문제에 대한 검토, 지연회복 여유시분 적용범위를 용량소모 차원으로 정의 ③ 열차비율, 운행패턴, 노선성격에 따라 열차운행의 동적요소 특성을 감안하여 운행 가능한 최소운전시각 도출 적용(시뮬레이션 운전선도 활용) ④ 철도용량 및 선로용량에 대한 개념 검토와 선로용량 산정값의 변화 해석과 학술적 공인 추진

본 연구는 Table 1의 해결방안 중 실제 운영에 접목이 가능하면서도 정확하고 간편하게 그래프로 보여주는 방법으로서, ‘표본 Diagram 시뮬레이션’ 기법을 통한 평균운전시각 결정방법에 해당된다. 이 기법을 소개하면 다음 장과 같다.

3. 표본 Diagram 시뮬레이션 기법 연구

3.1 선로용량 산정을 위한 인자분석

3.1.1 정거장 이격거리 및 운전시각 관계

열차간 대피거리는 식 1을 활용하여 시격과 거리를 계산하고 저고속 열차간 대피위치를 파악할 수 있다[1, 3]. 여기에 ABS 5현시 신호 및 ATP시스템을 구분하여 정확성을 기한다. 연속되는 선행 및 후속열차의 안전추종시격은 표정시분을 적용하여 식 2로 계산할 수 있다[3]. 지연에 대비한 지연회복시간 설정은 Table 2의 Korail의 3개년 실적을 평균하여 추정하였다(열차당 0.6분). 그리고 분계점의 최소운전시격도 TPS결과를 응용하여 전후 열차 운행패턴에 따라 분석하여 적용한다. Raildelft (2005)의 선로점유시간(*Tocc*) 계산 식 (3)과 식 (4)는 복선과 단선용으로서 두 열차간 경합으로 인한 추가시간을 추정할 수 있고, 본 연구도 표본 Diagram 작성시 열차운행에 대한 안전시격을 유지하는데 활용하였다.

$$H = \text{roundup}\left(\frac{(S+l) \times (V_b - V_a)}{(V_b \times V_a)} \times 60 + r, 1\right) \quad (1)$$

여기서,

S : 대피거리[Km], H : 운전시각[min.], V_a : 선행 저속열차 속도[Km/h]
 V_b : 후속 고속열차 속도[Km/h], r : 안전도착시각[min.], l : 열차길이(선행열차)[Km]

$$Hw_{(T_2 - T_1)} = \left(\frac{\sum_{i=1}^n T_1 + r}{\sum_{i=1}^n T_2} - 1\right) \times \sum_{i=1}^n T_2 \quad (2)$$

여기서,

$Hw_{(T_2 - T_1)}$: 후속열차 T_2 와 선행열차 T_1 간 정거장 n 에서 대피 경우에 운전시각

r : 안전도착시각 (후속열차 T_2 와 선행열차 T_1 간)

$\sum_{i=1}^n T_1$: 선행열차 T_1 의 정거장 n 까지 표정시간,

$\sum_{i=1}^n T_2$: 후속열차 T_2 의 정거장 n 까지 표정시간

Table 2 Records of delays for lines

Classification	Gy-bu	Ju-ang	Honam	Ju-la	Ja-h	Gy-W	Gy-C	Gy-J	Etc.	SUM	
2012	Aver. delay	13.6	15.8	14.7	15.9	15.1	19.7	-	12.8	15.1	14.3
	Average/train	1.03	0.48	0.46	1.5	1.47	0.04		0.3	0.58	0.8
	Total trains	77466	7542	28994	14762	11709	8481	-	17867	40594	207415
Aver. Total/train	0.72	0.55	0.36	1.07	1.24	0.02	0.18	0.34	0.42	0.6 (min)	

주) Korail (2013) 실적자료 인용 정리

$$T_{occ} = \left(\sum_{k=1}^n (T_{train} + T_{conf})_j + \sum_{j=1}^m T_{cross}\right)_j \quad (3)$$

여기서,

T_{train} : 두 열차간 시격 (time between two trains, 3~5 [min])

T_{conf} : 열차 k 가 더 빠른 열차에 대피하는 경우 경합시간 (conflict time if train k is followed by a train with shorter timetable time)

T_{cross} : 어떤 열차 j 가 선로를 횡단하는 경우 추가시간 (extra time when a train j is crossing the line, 2~4 [min])

$$T_{occ} = \sum_{k=1}^n (T_{train} + T_{meeting} + T_{signal} + T_{remotecontrol})_k \quad (4)$$

여기서,

T_{train} : 인접한 두 정거장간 운전시분 (running time between two meeting stations)

$T_{meeting}$: 서비스품질과 열차유형을 고려하여 열차교행에 필요한 추가시간 (extra time for meeting, 3~5 [min], dependent on train type, time for quality included)

T_{signal} : 동시 진입이 없는 경우 추가시간 (extra time when no simultaneous entrance, 2 [min])

$T_{remotecontrol}$: 원격제어가 아닌 경우 추가시간 (extra time when no remote control)

3.1.2 열차배열 알고리즘 구상

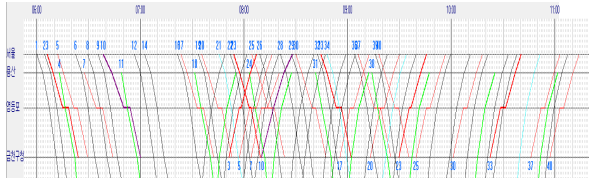
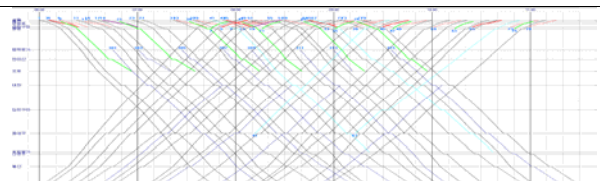
본 연구는 열차시각표(또는 표준운전시분)를 활용하였으며, 선로용량 산정 시 열차 간 최소 시격과 도중 정차시분이 주요 인자로서 그 외 반영할 열차배열 논리는 다음과 같다.

- (1) 1단계 : 단일종류 열차 이외 속도(역간운행시간) 차이로 인한 대피 또는 교행 시의 지연시간 산출한다.
 - 열차제어 및 신호시스템별로 안전도착 및 출발시격을 계산하여 활용
- (2) 2단계 : 대피 및 교행설비가 구비된 정거장 및 구간에 대한 평균운전시격을 산출한다.
 - 기본적으로 시종점 전구간에 대한 배치와 함께 경합을 처리하여 계산하며
 - 도중 분기 및 합류부를 가진 구간은 열차설정이 가능한 해당 선구 조건으로 재 산정
- (3) 3단계 : 수요에 따른 열차횟수와 종별을 최소비율로 압축하여 해당 선구의 평균시격 산출한다[16].
 - 열차순서 배열은 최대한 균형을 유지하여 규격화
 - 고속열차를 먼저 배치 후 순차 저속열차로 최소시격 배열
 - 고속열차와 저속열차 도중 경합 시 대피 및 교행으로 인한 안전도착 및 출발시격 설정
- (4) 4단계 : 시종착 정거장의 착발선 및 유치선의 수와 배치형태에 따른 구내용량 제약을 반영하고 열차지연 회복 및 임시열차운행을 고려하여 여유행로를 확보한다.
 - 물리적 회차시간 및 운영상 반복시간을 고려[16]
 - 특히 영업시간 전체를 최대열차횟수로 계산하지 않고 일부 지연회복 및 임시열차(Ad hoc) 등을 고려한 빈 열차행로(time Slot)를 확보[6, 8, 9]

3.2 표본 Diagram 시뮬레이션 기법과 평균시격 산출

이상에 제시한 제약과 인자들 그리고 열차별 구간운전시분 등을 활용하여 Diagram을 작성하여, 첫차 시각부터 막차 시각까지 주기시간을 열차횟수로 나누어 평균시격을 계산한다. 검증용 위하여 우선 경부고속선과 수서발 KTX 운영을 반영한 고속열차 운행선구에 대한 사례연구 결과를 제시하면 Table 3과 같다. 그리고 일반열차 혼용의 쟁점구간인 서울~금청구청 구간과 금청구청~고속선 부산역 구간에 대한 표본 Diagram은 Fig 1 ~ 2와 같다.

Table 3 Results of Diagram Simulation method(case study : Gyeongbu HSR line)

Line section	Up stream		Diagram Simulation
	Total trains	40	
Seoul ~ Geumcheon-Gu office	periods	03:20:45	 <p>Fig. 1 Sample Diagram (Seoul ~ Geumcheon-Gu office)</p>
	(min.)	200.75	
	Average headway	5.08	
	Total trains	32	
Geumcheon-Gu office ~ Busan (included. SuSeo)	periods	03:19:00	 <p>Fig. 2 Sample Diagram (Geumcheon-Gu office ~ Busan)</p>
	(min.)	199.00	
	Average headway	6.21	
	Total trains	40	

주1)서울~금정구청 구간 $5.08=200.75/(40)$ (하행은 평균시격 4.86분), * 결정구간 평균시격은 5.08분 적용
주2) 금정구청~부산 구간 $6.21=199/(32)$ (상하행 동일한 값 도출)

4. 결론

본 연구가 진행한 선로용량 산정방식인 표본 Diagram 시뮬레이션은 현재의 한계점을 보완하면서 보다 정확하게 그래프로 표현하는 기법이다. 특징은 계산식이나 프로그램을 통한 기존의 방식이 복잡하고 이해와 설득력을 갖추지 못했던 점을 충분히 보완하는 방식이라고 판단한다. 그 핵심은 선로배분 및 운영단계, 건설투자 판단단계를 막론하고 실제 열차운행계획과의 괴리를 최소화하는 실용 Diagram 예시를 보여준다는 점이다. 열차운행 구간의 시종점을 전반적으로 표현하면서 도중 경합을 해소를 직접 확인할 수 있고, 선로용량의 포화 또는 여유 등도 쉽게 판단할 수 있다는 점에서 진일보한 기법이라고 사료된다. 또한 논란이 되고 있는 1시간단위 용량을 도입해야 한다는 일부 주장에 대하여, 중장거리 일반 및 전용 철도노선에서는 채택이 불가하며 광역 및 도시철도 노선에서 적용 가능함을 강조하고 싶다. 향후 과제는 소프트웨어 툴을 개발하여 간편한 프로그램을 만들어 보급할 수 있는 작업을 개발진과 함께 공동 진행하는 것이다.

후기

본 연구는 국가철도망 선로배분시스템 구축 용역의 선로용량 부문 새로운 산정방안 및 툴 개발의 중간 성과물을 기초로 작성되었음을 삼가 알려드리는 바이다.

참고문헌

- [1] Korea Rail Network Authority (2010), Efficient infrastructure railway facilities for rail capacity calculation and management research, Korea Rail Network Authority.
- [2] Abril et al. (2007), An assessment of railway capacity, a Department of Information Systems and Computation.
- [3] H.S, Ki et al. (2012), Estimation of line utilization rate and track maintenance time of conventional railway, *Journal of the Korean Society for Railway* Vol.15, N0.6, pp. 638-644.
- [4] Hiroshi Kubota (1997), Railroad Engineering Handbook, Sei-Zando-Shoten Publishing Co. Ltd.
- [5] FTA (1996), TCRP Report 13-Rail Transit Capacity(3. Train Control and Signaling), TRB NRC.
- [6] AREMA (1999), AREMA Manual of Railway Engineering, *American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association*, Section 4.7 Line capacity.
- [7] Korean Transport Institute (2007), Rail service quality of evaluation, Korean Transport Institute.
- [8] UIC (2004), Leaflet 406: Capacity, UIC, Paris.
- [9] Network Rail (2007), Network Statement, Network Rail.
- [10] Train Diagram Research Association (2008), Train Diagram Service Management, (Foundation) *Transportation Research Association*, p. 79.
- [11] DOTTORANDO(2007), CAPACITY and RELIABILITY ON RAILWAY NETWORKS: A SIMULATIVE APPROACH, ANNO ACCADEMICO 2008/2009.
- [12] RailDelft(2005), Application of the UIC Capacity leaflet at Banverket, IROR.
- [13] D.H, Kim, S.H, Kim (2003), A Study on the Capacity Analysis for improving Railway Systems, Korean Society for railway, *Spring Semiannual Conferences / 2003 May 01*, pp.272-279.
- [14] Jozef Gasparik(2007), Railway transport and logistics 2/2007.
- [15] I.C, Kim et al.(2013), A study on the relationship between changes of block section distance and line capacity, Korean Operations Research and Management Science Society (KORMS), *Spring Semiannual Conferences* (2013. 5.24), pp2403-2409.
- [16]] S. M. Oh & J. H. Min (2014), A demand-responsive metro-train operation planning program, *Railway Engineering Design and Optimization, Computers in Railways XIV*, WITpress. pp595-602.