

열차 속도향상과 다양화를 감안한 선로용량 산정에 관한 연구

Estimating Line Capacity Considering High-Speeding and Diversification of Trains

기형서[†] · 박동주* · 최중빈** · 추준섭***

Hyung-seo Ki · Dongjoo Park · Jongbin Choi · Junsup Choo

Abstract The Korean railway system is a mass transit system consisting of a variety of train types such as common trains, high-speed train (KTX) and Metropolitan Express Railway (EMU). Its operation is based on the official timetable and it provides us with safe, accurate, quick and comfortable service. The objective of this study is to propose and prove more practical method for estimating line capacity by considering high-speeding and diversification of trains. In particular, the focus of this study is to reduce the discrepancy between the result of the theoretical line capacity estimation and the real line capacity of the operating agency of the Korean railway. In order to achieve the object, this study introduces a new railway capacity notion by considering TPS of line alignment, the operation type, train control and signaling system, etc. Through a practical schedule diagram exemplification, the result of the proposed method is verified as well.

Keywords : Railway capacity, Line capacity, Official timetable, TPS (Train Performance Simulation), Operation type, Train control system, Signaling system, Train category, Verification of a practical schedule Diagram exemplification

요 지 한국철도시스템은 일반열차(각종 여객열차, 화물열차), 고속열차(KTX), 광역전철 급행열차(EMU) 등 다양한 종류의 열차가 사용되는 대중교통시스템이다. 철도시스템의 특징은 공시된 시간표에 의하여 열차가 운행되며, 안전, 정확, 신속, 쾌적한 서비스를 제공한다는 것이다. 본 연구의 목적은 기존 열차의 속도향상과 다양화를 반영하여 보다 현실적인 선로용량 산정방식을 제시하고 검증하는 것이다. 본 논문은 이론식에 근거한 선로용량과 철도운영기관의 실용용량과의 차이를 최소화 하는데 역점을 두었다. 이를 위해 노선선형에 대한 TPS 시행, 운전방식과 열차제어방식 및 신호시스템 등을 고려한 새로운 철도용량 개념을 도입하였다. 실용Dia예시를 통해 새로운 선로용량산정방식의 결과를 검증하였다.

주요어 : 철도용량, 선로용량, 공시 시간표, TPS, 운전방식, 열차제어방식, 신호시스템, 열차종별, 실용Dia예시 및 검증

1. 서론

철도관련기술의 발전에 따라 일반열차(새마을, 무궁화 통근, 화물열차), 고속열차(KTX), 광역전철 급행열차(EMU) 등 빠르고 다양한 여러 종류의 열차가 운영되고 있다. 표 1은 1960년~2004년까지의 열차속도 변천과정의 개략이다.

기존의 선로용량 연구 사례에서는 열차 다양화와 속도향상에 대한 영향이 충분히 반영되지 않았다. 이에 따라 방대한 철도기반시설 투자사업의 타당성조사 및 계획과정에서 철도용량 산정과정에서 쟁점화 되는 경우가 발생하고 있다.

또한 광역전철의 급완행패턴 도입과 고속철도 도중역 증설로 정차패턴이 다양해지고 열차종별이 많아진다. 따라서 기본계획상 운전시각(4분)이 변화되어 재검토가 요구된다.

본 연구의 목적은 기존 선로용량 산정방식의 한계를 검토 분석하고 철도시스템의 특성을 제대로 반영하는 선로용량 산정식을 제시하는 것이다. 아울러 선로용량 산정식에서 도출된 값을 Train Diagram(이하 Dia로 표시) 예시를 통하여

[†] 책임저자 : 정희원, (주)케이알티씨, 이사

* 교신저자 : 정희원, 서울시립대학교, 교통공학과, 교수
E-mail : djpark@uos.ac.kr

TEL : (02)2210-5708 FAX : (02)2210-2653

** 한국철도시설공단 열차계획처 팀장

*** 한국철도시설공단 KR연구소 차장

계산한 선로용량과 비교하여 본 연구에서 제안한 선로용량 산정방식의 타당성도 검증하고자 한다.

표 1. 한국철도 열차속도 변천과정 개략

시기	구 간	열 차	소요시간	표정속도	비 고
1960	서울~부산	통일호	6:40	67(95)	
1966	서울~부산	맹호호	5:45	77(100)	
1969	서울~부산	관광호	4:50	92(110)	
1985	서울~부산	새마을	4:10	107(140)	시간단축
2004	서울~부산	KTX	2:50	145(300)	고속철도

() 내 숫자는 선로 최고속도 (Km/h)

주) 자료출처 : Korail website 인용 정리

그림 1은 연구 수행방법과 연구수행 절차를 나타낸다.

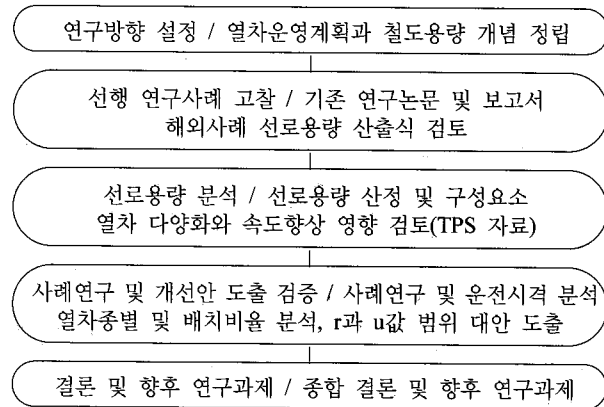


그림 1. 연구수행 절차

2. 열차운영계획 수립과정과 철도용량 검토

2.1 열차운영계획 단계별 구성요소

표 2는 열차운영계획 수립과정을 5단계로 나눠서 그 구성요소를 제시한 것이다. 선로용량산정은 제 4단계에서 검토되고 구성요소들을 감안하여 이루어진다.

2.2 철도용량 개념

교통망에서의 용량은 지정주기(period) 동안 일정지점(또는 구간)을 통과하는 최대통과량(maximum flow) 또는 지정된 시간에서 일정 영역 내에 수용할 수 있는 최대 수송량(maximum load)을 의미한다.¹⁾ 현재 통용되는 철도용량은 선로용량, 정거장 구내용량, 견인정수²⁾ 등 3가지로 구분되고, 견인정수는 21개 종류³⁾(고속185~화정15Km/h)가 사용된다.

1) 김훈 · 김찬성 · 김연규(2006), “지역간철도 선로용량 관리를 위한 지표개발연구,” 한국교통연구원, pp.11.
 2) KORAIL(2005), “열차운전시행세칙,” pp.22.(사정구배상의 균형 속도로 표현하는 최대견인능력의 지표라고 할 수 있다)

표 2. 열차운영계획 단계별 구성요소

단계	수행사항	구 성 요 소
1단계	조 사 및 자료수집	- 철도운영 주체의 영업방침 - 수송수요예측(기존 개량시 실적포함) · 여객 및 화물수송 O/D · 최근 실적 동향 통계자료 등
2단계	계획 수행	- 노선의 영업은행 열차종별 선정 - 열차회수 산정 · 승차정원 산정 및 견인정수 산출 · 여객 승차율, 화물 적재율 설정
3단계	TPS 수 행	- 노선 선형자료(곡선곡률(m), 기울기량(%), 터널위치 및 길이, 정거장 중심) - 투입 예상 차량종별 제원 등 정리 - Input Data 정리(속도제한 사항, 정거장 배선, 열차운영 요소 등) - TPS 실행 ⇒ 결과물 출력 - Output자료 분석 및 운전시간 산출
4단계	표준운전시간 사정 선로용량 산정	- 운전시각(Headway 및 Gap과 유사) - 열차배열(열차 조합과 간격 조정) - 운전설비 등 (열차 및 차량 운영 배선, 등)
5단계	열차운영계획 작성	- 최종 열차운행도표(Dia)를 통한 검증

기획예산처(2005)⁴⁾는 철도용량(Rail Capacity)을 설계용량과 실용용량으로 대별하였고, 김훈·김찬성·김연규(2006)는 이론적 최대용량, 실용용량, 영업용량으로 구분하였다. 그리고 FTA(1996)⁵⁾는 설계용량, 최대허용용량, 선로용량, 열차용량, 차량용량으로 구분하며 자세한 내용은 다음과 같다.

- 설계용량(Design Capacity): 1개 선로에서 방향별 시간당 한 지점을 통과하는 최대 승객수로 정의되며 최대용량, 이론상 용량 혹은 이론상 최대용량 등과 유사하다. 선로용량 단위는 산정주기 시간당 최대열차수(max. trains/hour), 열차용량은 승차정원(100%), 설계용량은 운행방향당 시간당 승객수 (pphd: passengers per hour per direction)로 표현한다. 설계용량은 선로용량과 열차용량의 합이다.

- 최대 허용용량(Achievable Capacity): 수요변동에 부응하여 방향별 시간당 수송 가능한 최대 승객수로 표현된다. 승차율의 적용은 수요변동주기(피크시)에 따라 고객의 안락감과 안전에 대한 사회적 용인을 전제로 한다. 최대허용용량은 설계용량과 피크승차율의 곱으로서 Stock개념이며, 수송량을 나타내므로 열차수인 Flow개념과 구별되어야 한다.

- 선로용량(Line Capacity): 일정 주기당 선로의 운행 가능한 최대열차수를 의미하며 1시간 용량(예시)은 아래와 같다.

3) 도로교통에서 분류하는 최대오르막 속도(Crawl Speed)와 같은 개념이다
 4) 기획예산처(2005), “철도 선로용량 산정 및 선로용량 증대 방안-최종보고서,” 한양대학교 산학협력단
 5) FTA(1996), “TCRP Report 13-Rail Transit Capacity,” TRB.

$$\text{선로용량} = \frac{3600}{(\text{최대열차시격} + \text{정거장정차시분})}$$

- 열차용량(Train Capacity): 열차단위 수송량을 의미하며 Stock개념으로서 아래와 같이 산정된다.

$$\text{열차용량} = \text{차량정원} \times \text{편성수} \times \text{승차율}$$

- 차량용량(Car Capacity): 차량단위 용량을 의미한다.

국제교류가 일상화된 현실에서 FTA(1996)가 정의하는 용어개념으로 용어정립을 제시한다. 그리고 철도용량 개념을 구분할 때, 경제용어에서 비롯된 Stock와 Flow개념을 도입하여 구분하자면, Stock개념은 어느 일정 시점에서의 존재량 또는 비축량의 의미로서 차량 및 열차의 수송능력(수송인원 및 수송톤수)을 말한다. Flow개념은 일정 기간 흐르는 양의 의미로서 일정시간 운행하는 열차회수로 표현할 수 있다. 동일 열차회수라도 피크시와 평시 승차율(혹은 적재율), 즉 Stock의 량의 차이에 유의하면 혼동이 없고 확연하게 구별된다.

3. 선로용량 고찰

선로용량은 열차운영계획 측면의 일정한 선로구간(line section)에서 실제로 운행이 가능한 1일 총 운행가능 열차수이다. 이론적 용량이 아닌 실용적인 즉, 아무런 장애나 저항이 없는 상황을 전제할 경우 정해진 노선의 시종점에 계획한 열차들이 공시된 시간에 맞춰 지연되지 않고 운행될 수 있는 최대열차수로서 Flow개념에 속한다. 특히 투입열차의 분포비율, 열차들의 속도·거리·시간 상호작용과 수요조건 및 환경변화와 투입차량별 가변성 때문에 산정시기별로 값이 다르다.

3.1 선로용량 산정과 구성요소

선로용량은 지정주기(일일, 1시간)를 구간 운전시격과 도중정차시간의 합으로 나눈 값이다. 특히 운전방식, 열차시간계획(Train Scheduling-이하 열차Dia로 표시: Net Dia, 평행Dia, 규격Dia 등)에 영향 받으며, 그 외 인자들은 아래와 같다.

- 선로의 단선, 복선
- 폐색방식과 폐색구간 분할 및 신호제어시스템
- 노선선형 및 열차속도(역간거리와 평균 운전시분)
- 열차종별의 회수비와 정차시분
- 교행 및 대피설비의 유무(착발선 용량)
- 열차제어장치의 취급시분
- 선로유지보수시간
- 열차운전 여유시분
- 기타 철도환경 등

3.2 야마기시식(山岸輝雄)선로용량 산출방식⁶⁾

야마기시식(山岸式, 1945)은 실제 열차운행도표를 기준으로 복선구간의 열차의 추월 대피, 단선구간의 교행 대피할 때 지연시간을 착안한 산출식이다. 이 식은 『최대 운전시분이 소요되는 두 역간에서 최저속열차의 총운전시간과 그 구간에서 저속열차 모두가 고속열차에 대피 당하며 발생하는 지연시간(d, 고속열차운전시분과 신호취급시분 포함)을 합한 값이 1일 작업시간 1440분과 같다』고 가정한다. 현재 일본과 한국철도에서 사용하는 그 약산식과 요소들은 아래와 같다.

$$N = \frac{f \cdot T}{hv' + (r+u+1)\Sigma v} \quad (1)$$

$$N = \frac{f \cdot T}{h(v' + \Sigma v - \Sigma w) + \Sigma wd} \quad (2)$$

$$d = \frac{p}{2q}(tn' - tn) + r + u - (1 - \frac{p}{2q}) \times (s' - s) \quad (3)$$

N: 선로용량, T: 1일 총시분(1,440분)

f: 선로이용율(보통0.6)

h: 속행하는 1군의 고속열차 상호 시격(분)

v': 저속열차회수비{저속열차회수(설정)/편도열차회수(설정)}

v: 고속열차 회수비{고속열차회수(설정)/편도열차회수(설정)}

d: 저속열차가 단독의 고속열차를 1회 대피 추정지연시분

w: 열차군수비, p: 지정구간의 총 역간수

q: 지정구간의 총 대피역간수(시종착역은 대피역으로 계산)

tn': 저속열차 1구간 평균운전시분

tn: 고속열차 평균운전시분

r: 안전도착시격(감속하지 않고 진행신호 현시 조건)

u: 안전출발시격(진행지시 신호현시 조건)

s': 저속열차 표준정차시분, s: 고속열차 표준정차시분

야마기시식⁷⁾을 이용하며 일률적 운전시격 h=6분을 사용하며, 고속열차군을 하나로 취급할 경우 열차속도향상과 다양화를 반영치 못하는 한계를 갖는다. 이에 본 연구는 최근 다양화된 열차속도를 감안한 선로용량 산정식을 제안하고자 한다.

3.3 UIC CODE 선로용량 산출방식⁸⁾

UIC CODE 선로용량 산출식(2004)은 유럽철도에서 주로 사용되고 있다. 이 식 (4)는 실제 40개 철도구간 샘플 통계

6) 日本國有鐵道(1984) “JNRにおける最近の線路容量理論.”

7) KNR 선로용량 산정(1989), p.23.

8) UIC(2004), UIC Code 405-1R

자료를 응용한 간략식으로서 평균최소시격과 운영상 여유 시분 및 추가시분을 적용하고 있다.

$$L = \frac{T}{t_{fm} + t_r + t_{zu}} \quad (4)$$

L: 노선구간 용량[열차수/기준주기]

T: 기준주기(일일, 1시간주기)

t_{fm} : 최소 열차운전시격의 평균시분[분]

t_r : 여유시분[분], t_{zu} : 추가시분[분]

운전시각표의 유무에 따라 평균시분 t_{fm} 은 열차들의 전체 최소운전시격의 평균치로서 복선과 단선으로 구분한다. 여유시분은 최소운전시격에 추가된 휴식시격(breathing space)을 의미하며 실제 운영조건 하에서 실험을 기초로 선로이용율이 $N=60\%$ 때 $t_r = 0.67t_{fm}$ [분/열차], $N=75\%$ 때 더 짧은 $t_r = 0.33t_{fm}$ [분/열차]을 적용한다. 추가시분은 선로구간수 a에 열차당 0.25분을 곱하여 사용한다. 위 야마기시 약산식과 UIC산출식을 비교하면, UIC산출식은 하루 중 열차운용 가용시간 T(예, 미운용시간 제외)에 따라 다르다는 점을 간과해선 안 되며, 운영상 여유시분 t_r 과 추가시분 t_{zu} 을 산입하고 있기 때문에 상대적으로 선로용량 산정값이 낮아진다.

4. 열차 속도향상 및 다양화를 반영한 선로용량 산정식 도출을 위한 기초분석

4.1 단선철도 선로용량 분석

단선에서 운전시분이 가장 긴 구간이 결정용량구간이며, 역간거리와 차량성능, 폐색방식⁹⁾ 및 각 열차구성비가 영향을 미친다. 식 5에서 폐색취급시분은 궤도회로를 이용하는 자동구간의 경우, 일반적으로 분기기 및 신호전환시분 0.5분 신호확인과 출발전호시분 0.4분, 합계 0.9분 정도가 소요되므로 1.5분에서 1.0분¹⁰⁾으로 단축하는 것이 타당하다고 판단된다.

$$N = \frac{f \cdot T}{t + c} \quad (5)$$

N: 선로용량, f: 선로이용률(60%), T: 1일 1,440분

t: 각종 열차 상하행 운전시분의 최대평균치(분)

c: 폐색취급시분(자동1.0분, 연동1.5분, 기타 2.5)

9) 폐색방식: 일정 구간에서 동시에 2이상의 열차를 운전시키지 않도록 그 구간을 열차의 운전이 점용시키는 방식

10) 철도관제센터 원격제어/ 열차도착확인 10초, CTC 제어반 분기 기전환시분 6~7초, 신호전환 2초 이내, 관제상황판 확인 10초 합계 0.5분, 출발신호확인 5초, 출발전호 15~20초 합계 0.4분, 총 55초 = 0.9분으로서 실용단위 1분 적용(현장조사)

4.2 복선구간 선로용량 분석

4.2.1 전동열차 전용노선(기존 완행전동 노선)

한 종류의 전동열차만 운행하는 경우, 식 6과같이 평행 Dia를 구성하여 가용시간을 Peak Time 기준 최소운전시격으로 나눠서 산정한다. 이는 최대허용용량으로서 일정 승차율을 적용한 설비용량에 약간의 여유가 더해진 실용용량이다. 예를 들어 전동열차 전용구간은 2.5~3분 시격을 적용하고, 고속철도는 TVM-430시스템의 설비용량 3분 시격에 여유 1분을 추가한 4분 시격으로 선로용량을 산정한다(예: 경부고속철도기본계획보고서).

$$N = \frac{1440 \times f}{h} \quad (6)$$

N: 선로용량, f: 선로이용률 (0.70~0.75)

T: 1440(분), h: 운전시격 (분)

전동열차 급완행방식의 경우는 추가로 규격Dia를 작도하고 최소평균시격 h값을 이용하여 선로용량을 산정한다. 이때 h값은 급완행열차 배치비율에 따라 달라진다(표 5 참조).

4.2.2 열차종류 다른 경우(여객, 화물 혼용)

열차종류가 다양하고 속도향상이 이뤄진 경우 속도차, 도중 대피, 상이한 열차배열 등으로 인하여 상수(h: 6분, r: 4분, u: 2.5~4분)의 단일 값 적용은 정확한 선로용량 산정이 곤란하다. 기존 식은 한국과 일본철도의 환경 유사성 때문에 유용한 공식으로 인정되지만, 일반적으로 난해하다는 지적도 있다.

최대한 정확한 열차운영환경의 검토와 분석 하에 군수비와 추정지연시분도 활용하고 ABS5현시, ABS4현시, ATC, 그리고 도입 예정된 ATP시스템에 대한 특성 등을 감안하여 사례연구와 함께 다음과 같은 세부과정을 수행하였다.

- 노선선형 자료수집 정리
- TPS 실행과 결과물 출력
- TPS 출력자료 응용, 고속열차와 EMU, 일반열차 폐색 구간시분 정리와 선로용량 산출
- 차량성능에 따른 속도값 비교 검토
- 정차와 통과시 저속열차 고속열차의 거동 비교
- 간략한 Dia 예시를 통한 열차운영 검증, 기타

궁극적으로 선로용량 산정식으로 산정된 계산용량이 철도운영계획상 실용성을 담보하려면 Dia 작성이 한층 유효하므로 그 한계를 극복하고자 본 연구는 Dia에서 검증방안을 시도하였다.

4.3 운전시격 분석

운전시격은 선로용량과 열차Dia 작성의 필수사항으로서 열차운행의 안전확보와 정확성을 보장하기 위한 열차상호 간 거리간격과 시간간격을 동시에 만족시키는 요소이다.

운전시격 영향인자는 열차성능, 열차 운행속도, 도중 정차 시분, 제동거리 및 신호시스템과 폐색구간길이(Block length), 신호설비, 열차길이(열차종별 편성에 따라 변화) 등이다.

본 연구의 기초인 국내철도 신호방식 중 ABS5현시와 고속철도 ATC TVM-430시스템 차내신호 현시단계를 도시하면 그림 2와 같다(다만, 고속선 RRR신호는 방호를 요하는 개소의 절대정지표지가 설치된 구간에 적용).

ABS 5현시		B열차	block 1	block 2	block 3	block 4	block 5
Start	→	R					
Start→	→	yy	R				
	→	Y	yy	R			
	→	GY	Y	yy	R		
	→	G	GY	Y	yy	R	

ATC TVM-430		B열차	RRR	block 1	block 2	block 3	block 4	block 5	block 6
Start	→	000	RRR						
→	→	170	000	RRR					
(2구간)	→	230	170	000	RRR				
	→	270	230	170	000	RRR			
3.0Km)	→	300	270	230	170	000	RRR		
	→		300	270	230	170	000	RRR	

그림 2. 폐색방식과 신호현시 비교

그림 3은 경부선 ABS5현시 신호체계 약도이다.

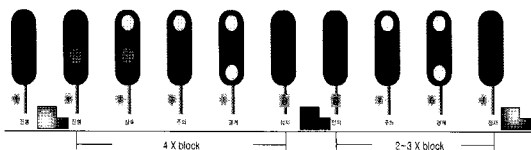


그림 3. ABS5현시 앞뒤열차 거리간격 비교

4.3.1 열차별 대피거리와 운전시격 관계 분석

속도가 다른 열차 운용시 대피위치를 구하는 간편 식을 시간거리곡선으로 분석하면 그림 4와 같다.

위 그림을 이용하여 대피거리 및 운전시격을 산출하는 실용식은 식 (7)과 같다.

$$S = \frac{(V_b \times V_a)}{(V_b - V_a)} \times H \quad (7)$$

Ta: 저속(선행)열차a 운전시간

Tb: 고속(후속)열차b 운전시간

S: 거리, H: 운전시격, Lt: 열차길이(km)

Va: 저속(선행)열차a 평균속도

Vb: 고속(후속)열차b 평균속도

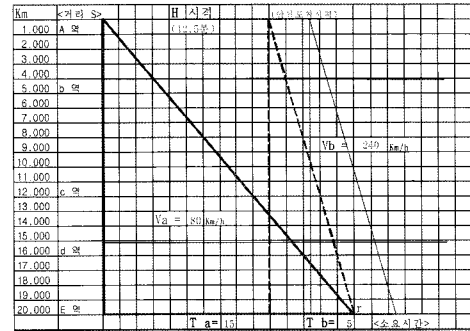


그림 4. 열차별 대피시격 산출도

식 (7)의 H(Headway)를 분으로 계산하고 대피거리에 차량길이 Lt와 안전도착시격 r을 추가하면 식 (8)이 유도된다

$$S = \frac{(V_b \times V_a)}{(V_b - V_a)} \times \frac{(H - r)}{60} - Lt \quad (8)$$

4.3.2 Headway 산출식 도출 및 운전곡선으로 분석

본 연구는 그림 5의 목표지점까지 두 열차의 누적운전시분을 이용하여 간단한 운전시격 산출식(수식 (9))을 도출하였다.

이 대피거리와 운전시격은 선로용량 검증을 위한 Dia 작성 및 열차운영계획상 편리하며 식 (9)를 통해 추정된다.

$$HW_2 = \left(\frac{\sum t_{xn} + r}{\sum t_{ym}} - 1 \right) \times \sum t_{ym} \quad (9)$$

HW₂: 후속 고속#y 열차의 Headway

r: 안전도착시격(2.5~2.0)

Σt_{xn}: 선행 저속#x 열차 소요시간

Σt_{ym}: 후속 고속#y 열차 소요시간

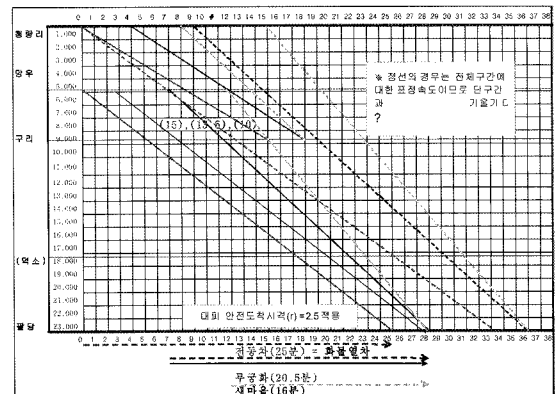


그림 5. 중앙선 열차종별 사례연구
주) 청량리~팔당간 전동열차, 화물열차, 무궁화 운전시격

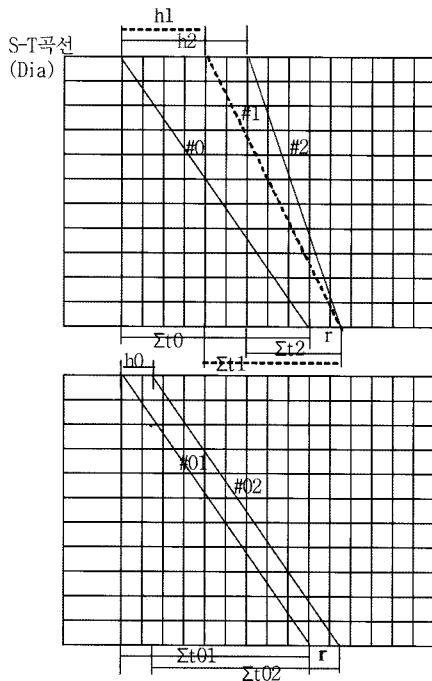


그림 6. Headway 산출 운전곡선 분석

위 그림 6에서 열차종별을 #0열차와 #2열차라고 가정할 때, #0열차의 시점과 도착역까지 소요시간 합은 Σt_0 이며, #2열차의 소요시간은 Σt_2 이다. 또한 저속 #0가 도착한 뒤 후속의 고속 #2열차가 안전하게 Free speed로 운행하여 대피시키려면 안전시격 r 이 필요하다(통상 2.5~4분). 따라서 이 조건을 만족하려면, 앞 뒤열차간 h_2 운전시격의 열차배열이 요구된다.

그러므로 상호관계를 수학적식으로 표현하고 경험식을 유도하여 열차운영계획에 이용할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Sigma t_0 + r &= h_2 + \Sigma t_2 \\ &= (\Sigma t_0 + r) / \Sigma t_2 = h_2 / \Sigma t_2 + \Sigma t_2 / \Sigma t_2 \\ (\Sigma t_0 + r) / \Sigma t_2 &= R \text{ 시간비라고 하면,} \\ R &= h_2 / \Sigma t_2 + 1 \\ R - 1 &= h_2 / \Sigma t_2 \\ (R - 1) * \Sigma t_2 &= h_2 \end{aligned}$$

5. 사례연구를 통한 선로용량 산정식 도출 및 검증

5.1 열차별 폐색구간별 운전시격 산출

5.1.1 KTX, 새마을, 무궁화, 화물열차 운전곡선

본 연구는 경부선 서울~수원구간 TPS 실행하여 신호기로 분할된 ABS5현시 폐색구간별 열차속도와 소요시간을 정리하였다. 그림 7의 운전곡선을 이용 구간별 최소운전시격을 계산한 다음, 각 열차비 배분방식으로 운전시격을 계산하였다.

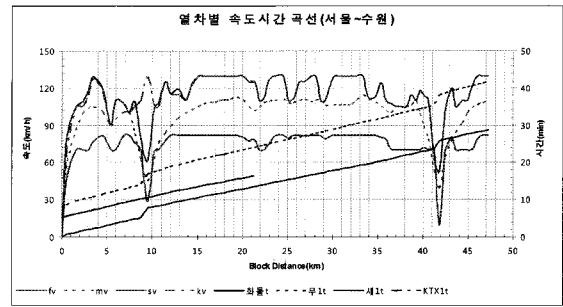


그림 7. 경부선(서울~수원) 운전선도

5.1.2 열차별 대피지점의 시간간격과 저속여부

그림 8에서 KTX와 새마을열차가 저속 무궁화 및 화물열차를 대피시킬 때, 기존 값 r : 4~3과 u : 2.5를 단축 값 r : 4~2.5와 u : 2.5~1.75 적용하여도 거리 및 시간간격 조건을 만족한다.

즉 앞뒤 대피열차간 속도제약이 없다(즉, free speed 운행)

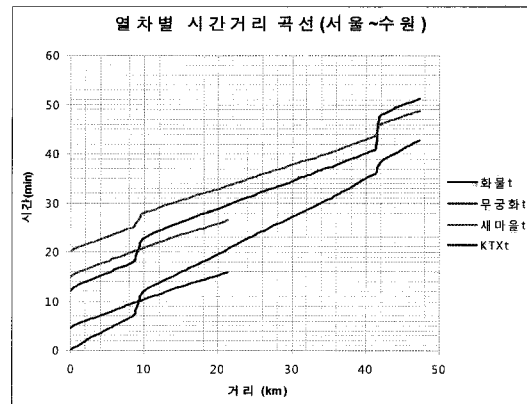


그림 8. 경부선 대피시 저속 검토

5.1.3 열차별 폐색구간 최소운전시격

표 3은 경부선 서울~수원구간의 최소운전시격 계산값이며, 열차배열에 따른 상충이나 안전도착시분 r 과 안전출발시분 u 의 조정에 관련한 문제점 발생 여부를 확인하는 것이다.

표 3. 열차별 폐색구간 최소운전시격(서울-시흥)

열차종별	열차길이	평균감속도	신호속도 (Km/h)	최소시격
KTX	400	2.5	130~105	2.83
새마을	400	2.0	120~105	4.08
무궁화	200	1.75	120~105	4.32
화물	600	1.0	90~65	5.59

$$\begin{aligned} \text{운전시격} &= \{(B1 \sim B4) + S_b + 0.6 + 0.05\} \times 1000 \times 0.06 / \text{표정속도} \\ B1 \sim B4 &: \text{폐색구간장, } 0.05: \text{여유장 } S_b: \text{신호제동거리} \frac{(105^2 - 65^2)}{7.2\beta} / 1000 \\ 0.6 &: \text{열차길이, } \beta: \text{제동평균감속도} \end{aligned}$$

5.2 사례연구: 구간 안전시각 추정값 계산

표 4는 Block length: 600~800m, 표정속도: 110~45km/h 로 가정하여 도출한 안전시각 r , u 값의 변화를 비교한 것이다. 야마기시식에서 적용하는 r : 4.0, u : 2.5 값은 60km/h 속도 범주에서 유효한 것으로 확인된다. 본 연구는 현행 열차 평균속도 110~100km/h에 대한 안전시각 값을 단축시켜서 r : 4.0~2.5, u : 2.5~1.75 수준으로 적용하고, h 값도 열차운용 시격을 고려하여 4~6분으로 조정하였다 (단, 4: 특정한 고속열차와 단일 전동열차 50% 이상, 6: 기타 열차).

표 4. 폐색구간거리, 속도별 r , u 추정값 비교

속도	r	u	block-len	r	u	block-len
110	1.88	1.28	600m	2.32	1.61	800m
100	2.07	1.41		2.55	1.77	
80	2.59	1.76		3.19	2.21	
60	3.45	2.35		4.25	2.95	
55	3.76	2.56		4.64	3.22	

5.3 새로운 선로용량 산출식

식 (10)은 본 연구의 새로운 선로용량 산출식으로서 일반 철도에서 운용 중인 여러 열차군 즉, 1군(KTX, 새마을), 2군(무궁화), 3군(화물열차)의 속도차와 대피관계를 반영하였다. 정확한 추정을 위하여 안전시각 r , u 값을 열차제어 및 신호시스템 특성에 맞도록 조정하고, 열차간 대피와 추정지연시분, 대피역수 등의 인자를 모두 고려하여 실용화를 추구하였다.

$$N = \frac{f \cdot T}{a \cdot \max} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \text{최대 평균시격, } a_{1,2,3} &= h_{1,2,3}(v' + \Sigma v - \Sigma w) + \Sigma ud \\ \text{추정지연시분, } d_{1,2,3} &= \frac{p}{2q}(t'n - tn) + r + u - (1 - \frac{p}{2q}) \cdot (s' - s) \end{aligned}$$

- N 선로용량
- f 선로이용률(일반0.6~전동0.75)
- $h_{1,2,3}$ 속행하는 고속열차군 시격
- T 기준주기(1시간, 혹은 일일)
- v' 저속열차 회수비
- v 고속열차 회수비
- tn' 저속열차 운전시분
- tn 고속열차 운전시분
- p 노선의 역간수
- q 총대피역간수(시종착역 포함)
- s' 저속열차 평균정차시분

- s 고속열차 평균정차시분
- r 선행열차 도착안전시분
- u 후속열차 출발안전시분
- w 열차군수비
- $d_{1,2,3}$ 1 열차가 2, 3군열차를 대피시키는 데 소요되는 추정 지연시분
- $a_{1,2,3}$ 1 열차가 2, 3군열차를 저속으로 본 경우 평균시격

안전시각 추정값 $r = \frac{(b \cdot 4 + 400 + 600 + 50)}{v} \times 0.06$,
 $u = \frac{(b \cdot 3 + 400 + 100 + 50)}{v} \times 0.06$ 의 영역에 따라 적용 값의 조정은 열차평균속도와 신호시스템 및 열차비율에 따라 r , u 값이 변화되기 때문이다. 본 연구는 안전시각 계산영역 $r \leq 2.5$ 이면 2.5, $r > 2.5$ 이면 3.0, $u \leq 2.0$ 이면 2.0, 그리고 최저속 열차끼리는 r : 4, u : 2.5를 선별 적용할 것을 제시한다.

5.3.1 새로운 계산식에 의한 선로용량 산정

그림 9는 새로운 계산 스위트이며, 표본열차(4종)일 경우 기존 용량산출방식의 경우 152회(단일 상수값 적용), 본 연구에서 제시한 용량산출방식의 경우 174회로서 22회 증가된다.

구분	1730	KTX	새마을					무궁화	화물	계
표정속도	89.22	108.46	88.34							
역간 평균시격	2.44	0.00	2.89	0.25	0.00	0.00	0.00	3.38	0.50	3.94
구간 열차군수	70		31		0		0	53		11
열차 회수비 v	0.40		0.19				0.00	0.32		0.07
평균 운전정차시간							2.51	0.15	3.38	0.50
총열차 회수비 vw				계	0.61	0.61		0.32		0.97
열차군수							101	53		11
열차군수 n							101	53		11
군차비율 w				계	0.61	0.61		0.32		0.07
회수비 군차비율 vw							0.60	0.00		0.00
군발							0.21	0.52		0.81
열차정차 시간							4.11	5.78		4.39
열차출발 시간							3.00	2.28		4.94
제원 및 산출	거리 km	운전시격	역간수	대피역간수	안전도차	안전정차	block-len			
d1	17.30	6.00	4	4	2.50	2.00	700			d11
d2		4.00			2.50	2.00	700			d21
d3		6.00			4.00	2.50	700			d32
검산			70	471	2.29	1.98	700	선로용량	174	

그림 9. 선로용량 계산스리트

5.3.2 Dia 예시를 통한 평균시격과 선로용량 검증

그림 10은 80분간 17개 열차를 배열한 Dia예시로서 경부선 서울-시흥간 165회(현재 운용열차)를 하루에 수용 가능하다. 검증결과 평균시격 4.94분(여유 5%)이 도출되었고, 하루 총가용시간 864분으로 계산하면 선로용량 174회가 산출되어 계산식과 같은 값이 도출된다.

여기서 유의할 사항은 1개 저속도열차가 시종점간에서 몇 회 대피하느냐에 따라 열차간 배열 및 시격을 크게 제약한다는 점이다. 예를 들면 서울~대전 무궁화 1회 대피 경우 새마을 13.5분, KTX 67.5분의 운전시격이 요구된다.

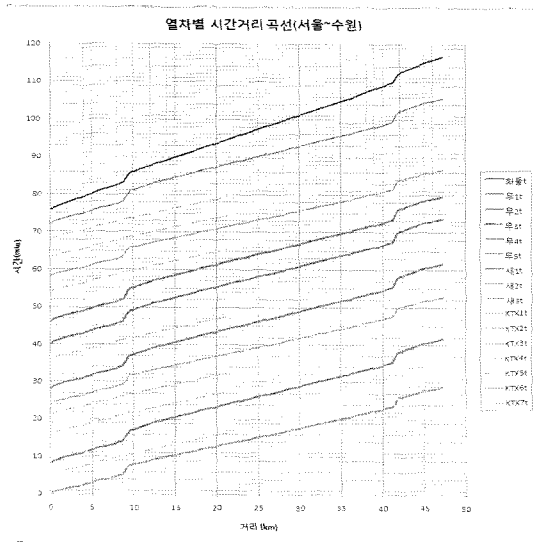


그림 10 열차Dia 예시

5.3.3 전동열차 급원배열에 따른 선로용량 변화 비교

표 5는 전동전용선에서 급원행 운영시 열차운용 Dia 작도를 통한 운전시격과 선로용량을 비교한 결과로서 완행 3:급행1 비율에서 선로용량이 가장 많게 산출되었다(173~193회).

표 5. 급행60, 완행40 km/h속도 시격과 선로용량 변화

운차별	대피거리	Z te1	HBacksv	평균속도	완급비 1:1	시격	완급비 2:1	시격	완급비 3:1	시격
열1e1(완선)	30,000	45	2.50	49.0		9.17		7.43		6.21
열1e2(급전)		30	12.00	60.0						
열1e3(완전)	24,000	35	2.30	49.0	완급비 1:1	117	완급비 2:1 17:24.5	145	완급비 3:1 17:24.5	173
열1e4(급전)		21	14.00	60.0	완급비 1:1					
열1e5(완전)	20,000	30	2.30	49.0		완급		완급		완급
열1e6(급전)		20	12.00	60.0						
열1e7(완전)	12,000	18	2.50	49.0		6.55		5.17		3.54
열1e8(급전)		12	3.00	60.0						
열1e9(완전)	10,000	15	2.50	49.0	완급비 1:1	176	완급비 2:1 17:24.5	177	완급비 3:1 17:24.5	186
열1e10(급전)		10	7.00	60.0	완급비 1:1					
열1e11(완전)	6,000	8	2.70	50.0		완급		완급		완급
열1e12(급전)		6	3.00	60.0						

주) 영업시간 1080분, 대피거리 30~12km일 때 평균시격

6. 결론 및 향후 연구과제

본 연구는 기본 선로용량산정 관련 연구와는 달리, 속도 향상에 대한 반영으로 인자 상수의 조정(선로용량 요소 h, r, u; 운전시격 h: 6~4분, 도착안전시격 r: 4~2.0분 및 출발

안전시격 u: 2.5~1.75분의 선별 적용)과 신호시스템의 특성을 검토하여 안전시격을 조정하고 그 수정값을 반영하여 산출의 정확도를 높였다. 또한 사례연구를 통하여 열차운행상 앞뒤 열차 시간, 거리간격에 대한 열차운행의 안전을 검증하였으며, 선로용량 계산값에 대한 Dia에서 검증으로 실용성을 확보하는데 중점을 두었다. 또한 철도용량의 의미상 혼동을 피하도록 flow와 stock개념을 제시하였다.

본 연구에서 제시한 새로운 선로용량 산출식은 철도관련 투자사업 평가에 활용 가능할 뿐 아니라, 철도운영효율 증진에 기여할 것으로 기대된다. 향후 선로용량 산정과 Dia작성을 위한 통합적 수학적 모형의 개발 및 프로그램화를 통한 본 연구결과 일반화에 대한 후속 연구가 필요하다.

참고 문헌

1. 기획예산처(2005), "철도 선로용량산정 및 선로용량 증대 방안-최종보고서," 한양대학교 산학협력단.
2. 김의일(1983), "運轉理論," 廷文社文化株式會社.
3. 김훈·김찬성·김연규(2006), "지역간철도 선로용량관리를 위한 지표개발연구," 한국교통연구원.
4. 도철웅(2002), "交通工學原論(上)-개정판," 청문각.
5. 철도청(1989), "선로용량 산정," 철도청.
6. 한국철도공사(2007), "선구별 선로용량 재산정 요약," 수송안전실.
7. 久保田博(1997), "鐵道工學ハンドブック," 株式會社グランプリ出版.
8. 日本國有鐵道(1984), "JNRにおける最近の線路容量理論," 運輸局.
9. FTA(1996), "TCRP Report 13-Rail Transit Capacity," TRB NRC.
10. Leo G. Kroon, Rommert Dekker and Michiel J.C.M. Vromans (2005), "Cyclic Railway Timetabling: a Stochastic Optimization Approach," Erim Report Series Research in Management.
11. UIC CODE(2004), "405-1R, Method to be used for the determination of the capacity of lines," UIC.

접수일(2008년 9월 29일), 수정일(2009년 9월 14일),
제재확정일(2009년 9월 25일)