

철도이용수요에 따른 선로용량 변화 분석 연구*

김익희[†] · 김인철 · 배영규 · 왕연대
한국철도공사 연구원 경영연구처

A Study on Railroad Track Capacity According to Transit Railway Demand

Ickhee Kim · Incheol Kim · Yeong-Gyu Bae · Yeondae Wang
Management Research Department, Korail Research Institute,
Korea Railroad Corporation

■ Abstract ■

It is very important that the calculation of railroad track capacity in infrastructure investment analysis and train operation planning. The dwelling time is one of the factors that influence in railroad track capacity. Current research in dwelling time has been focusing on theoretical investigation, the state of the research in effective variable (dwelling time etc) is insufficient. In this paper, we clearly draw the concept of railroad track capacity and the estimate on modeling of relationship railway demand and dwelling time. Also, we compare and analyze the variation of railroad track capacity according to transit railway demand in Gyeongin Line (Guro~Inchon). This paper is expected to contribute for improving on the in-using equations and methods in train operation planning as well as for improving level of service on railway user.

Keyword : Train Operation Planning, Railroad Track Capacity, Block Section, Dwell time,
Transit railway Demand, Gyeongin Line

논문접수일 : 2013년 05월 03일 논문게재확정일 : 2013년 06월 19일

논문수정일(1차 : 2013년 06월 10일, 2차 : 2013년 06월 18일)

* 본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업 열차운영계획시스템 개발의 연구비지원(과제번호 12PRTD-C059365-02)에 의해 수행되었습니다.

† 교신저자 nike77@korail.com

1. 서 론

철도는 사람과 화물을 운송하기 위해 건설, 운영되며 시설, 차량 및 신호 등 다양한 구성 요소들이 체계적, 복합적으로 결합된 운송서비스 시스템으로 주어진 시설 조건하에서의 최적 운영을 위한 계획의 수립이 요구된다.

현재 열차운영계획은 열차운행을 위한 계획단계에서 체계적 비교 및 검증없이 작성되고 있으며, 일부 열차계획 담당자의 수작업에 의존하고 있어 인적오류에 대한 검증 및 리스크관리가 불가능하다. 이로 인해 열차운영계획의 신뢰성이 미흡하고 복잡한 작업공정에 의해 많은 시간이 소요되어 열차 운영의 적시성 확보가 곤란하며 열차 서비스 수준의 향상을 저하시키고 있다[2].

한국철도공사에서는 1998년에 개발 운영하고 있는 열차다이나전산시스템을 기술적으로 보완하고 현재의 복잡하고 다양한 열차운영조건에 능동적으로 대응하기 위해 열차운영계획시스템(TOPS, Train Operation Planning System)을 개발 중에 있다.

[그림 1]은 열차운영계획시스템의 전체 12개 독립 모듈에 대한 개략도를 나타낸 것이며 본 연구에

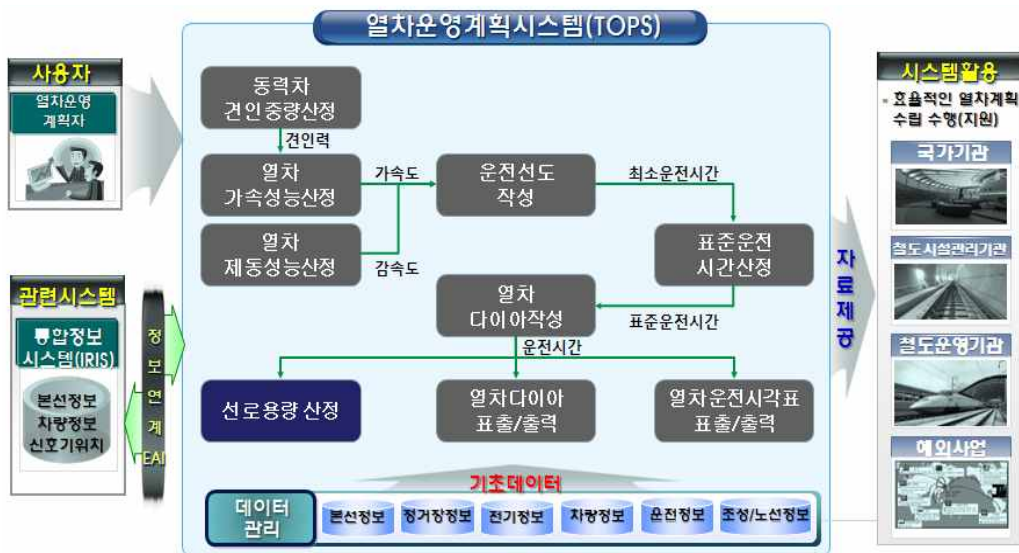
서는 선로용량 산정 모듈의 기본적 이론을 근거로 검토하였다.

선로용량은 합리적 투자분석 및 효율적 운영계획에 있어 매우 중요한 지표[14]이며, 운행차종 및 운행 속도 등의 운영 특성, 노선 연장 및 선로수 등의 시설 특성, 철도이용수요 및 도착 패턴 등의 이용자 특성에 영향을 받는다.

철도에서 사용되고 있는 용량의 개념은 이론적 최대 열차운행횟수를 의미하는 한계용량과 현실적 운영 조건을 고려한 실용용량, 열차운영주체가 보유 설비 및 인력, 이용수요규모 등을 감안한 열차운행 횟수인 영업용량으로 구분된다[4].

본 연구에서는 선로용량 산정 모형의 종류와 특성을 검토하고 전동차 전용 운행구간인 경인선(구로~인천)을 대상으로 역별 승하차수요가 정차시분과 선로용량에 미치는 영향을 분석하여 산정 모형을 정립하였다.

회귀분석을 이용하여 철도 이용수요에 따른 정차시분 추정 모형을 제시하고 이에 따른 선로용량 산정 결과를 비교하고자 하는 본 연구의 목적은 두 가지이다. 첫째, 선로용량 산정의 중요 변수인 정차시간의 경우 실측조사에 의해 자료가 수집되어 많은 시간과 비용이 소요되므로 시스템에 의해 비교적 자료



[그림 1] 열차운영계획시스템 개략도

집계가 용이한 이용수요를 근거로 추정하는 방법을 제안하고자 하였다.

둘째, 역별 승하차수요는 역세권 규모 및 도시 특성(상업, 주거, 업무지역 등) 등에 의해 다르게 나타나며 정차시간에 영향을 미치는 것으로 판단되나 기존 선로용량 산정 모형에서는 이를 고려하지 않고 동일한 값을 적용하였다. 이에 본 연구에서는 정차시간이 선로용량 변화에 미치는 영향을 분석하여 추가 가능용량 수준을 검토하였다.

본 연구는 전체 제 5장으로 구성되어 있다. 제 1장은 서론으로 연구 배경 및 목적, 연구의 내용과 전체적인 연구 구성에 대해 기술하였고 제 2장은 본 연구에서 사용한 관련 용어의 정의 및 선로용량 산정 모형 등 기본적 이론을 제시하였으며 국내외 기존 연구를 고찰하였다.

제 3장은 이용수요에 따른 정차시간 추정 모형을 산정하고 통계적으로 검증하였으며 제 4장은 경인선 구로~인천구간을 대상으로 역별 승하차수요를 분석하고 이에 따른 정차시간을 추정하였다. 또한 앞서 추정한 역별 정차시간을 근거로 선로용량을 산정하여 그 결과를 비교하였다.

마지막으로 제 5장에서는 본 연구에서 도출한 분석 결과를 종합적으로 정리하고 연구의 한계점 및 보완점을 고려한 향후 연구 과제를 제시하였다.

2. 이론적 고찰

2.1 용어 정의

선로용량은 일정한 선로구간에 1일 동안 운전 가능한 최대 열차횟수로 정의되며, 시설보수시간 및 열차운전취급시간, 운전 여유시간 등 차량, 선로, 운영 조건 등의 영향을 받는다[4].

<표 1>은 선로용량을 유형별로 설명한 내용이며 일반적으로 선로용량의 경우 실용용량을 의미한다. 단, 본 연구에서는 열차운영자가 열차운영조건(이용 가능한 설비 및 인력)과 이용자 수요 분포에 의한 영업용량을 의미한다.

<표 1> 선로용량 유형

구 분	설 명
한계용량	기술적, 물리적으로 열차를 운전할 수 없다고 판단되는 한계 열차운행회수임 (이론적으로 최대용량과 유사한 의미)
실용용량	열차 시설보수시간, 운전취급시간, 운전 여유시간 등을 고려(일반적으로 사용하는 선로용량의 의미)
영업용량	열차운영자가 이용 가능한 설비 및 운영인력 범위내에서 수송수요 분포특성을 감안하여 실제 제공되는 열차운행시간표상의 운행회수
경제용량	열차운행 원활하며 최저 수송원가로 운행되는 열차운행횟수를 의미 (실제 산출방법이나 적용사례 거의 없음)

정차시간은 플랫폼 규모 및 열차장, 열차 속도 등과 함께 선로용량을 결정하는 중요변수 중의 하나이며 출입문 열리는 시간, 승객 승하차 시간, 출입문 닫히는 시간으로 구성된다[5].

승객 승하차 시간을 제외한 두 요소(출입문 개폐 시간)는 일반적으로 고정적인 기계작동시간이므로 이를 제외한 실제 정차시간은 승하차수요와 이용자의 정거장 도착 분포에 의해 결정된다.

전체 운행노선에서의 모든 역별 정차시간 합계를 정차시분이라 하며 본 연구에서는 실제 정차시간만을 고려하여 승하차수요에 따른 정차시간 추정 모형을 산정하였다.



[그림 2] 정차시간(Dwell time)의 구성요소

폐색구간(Block Section)은 정차장 상호간에 열차 충돌 또는 추돌을 방지하기 위해 열차사이에 일정한 간격을 확보하여 원칙적으로 2개 이상의 열차를 동시에 운전시키지 않기 위해 정한 구간을 의미한다. 자동구간의 경우 신호기와 신호기 사이, 비자동구간의 경우 장내신호기와 인접역 장내신호기 사이 구간으로 정의되며 자동폐색과 연동폐색, 통표폐색으로 구분된다[2].

자동폐색은 정거장 사이를 여러 개의 연속케도로 분할하여 운행열차 자체에 의해 자동적으로 신호 현시하는 방식이며, 연동폐색은 출발신호기와 상대역과의 폐색취급조건을 전기적으로 연동시키는 방식, 통표폐색은 단선운행에 많이 사용되며 폐색구간 양 끝의 역에 한 대씩 설치하여 협의 및 협동조작에 의해 폐색취급하는 방식이다[4].

2.2 선로용량 산정 모형

선로용량 산정 모형은 수학적 모형(해석적 모형, 확률적 모형)과 시뮬레이션 기반 모형, 이들 모형의 장점을 결합시킨 복합 모형으로 구분되며 <표 2>는 선로용량 산정 모형의 특성 및 종류를 검토한 결과이다[4].

<표 2> 선로용량 산정 모형

구분	특성
수학적 모형	해석적 모형 <ul style="list-style-type: none"> · 분석시간을 연속하는 열차의 최소시간으로 나누어 용량 산정 (용량 = $\frac{\text{분석 시간}}{\text{연속차량간의 평균 최소시간}}$) · 특정구간을 운행하는 열차특성에 의해 용량 분석하기 때문에 구간 경유 노선특성과 철도망 고려한 용량산정 어려우나 계산식이 용이하여 국내·외 용량 산정시 많이 활용 · 해당 모형(UIC모형, Banverket모형, CAPACITY모형, FRA모형, Ferrovie dello Stato모형, 야마기시모형, 니시노모형)
	확률적 모형 <ul style="list-style-type: none"> · 대기행렬이론 이용한 철도용량 산정 방법(시스템 내 열차도착분포와 시스템 처리 시간 모델링) · 선로용량보다 정거장 용량산정 중심 연구임 · 해석적 모형에 비해 좀 더 현실적 결과 도출 · 관련자료 없는 용량계획과정 적합(실제 운영노선 적용 부적합)
시뮬레이션 기반 모형(시스템최적화)	<ul style="list-style-type: none"> · 상세 입력자료 구축 필요(전체 네트워크 용량평가 가능) · 해당 모형(유럽 많은 국가 : VIRIATO, CAPRE, RAILCAP)
복합 모형(수학적+시뮬레이션)	<ul style="list-style-type: none"> · 수학적 모형과 연계 → 시뮬레이터 기능 수행 · 실제 운행자료 없는 계획 단계에서 수학적 모형은 용량 산정의 한계 있으며 보완을 위해 시뮬레이터에 의한 입력변수값 산출

국내에서 주로 활용되는 철도 선로용량 산정 모형은 일본의 야마기시 모형이며[7], 선로 구간 및 운행차종, 폐색구간의 유형에 따라 산정 모형이 구분 적용된다. <표 3>은 선로구간 특성에 따른 선로용량 산정식을 제시한 결과이며, 본 연구에서의 선로용량 산정 사례 분석 대상노선인 경인선의 경우 전동차만 전용 운행하는 복선 자동폐색 구간이므로 모형 3을 적용하였다.

<표 3> 선로구간 특성에 따른 선로용량 산정식

모형	구분	폐색구간	운행차종	선로용량 산정식
1	복선	연동폐색	혼용전용	$N = \frac{f \times T}{t + c}$ f : 선로이용률(60%) T : 1일 운행시간(1,440분) t : 역간 평균 운전시간 c : 폐색취급시간(1.5분)
2			혼용	$N = \frac{f \times T}{h(v' + \sum v - \sum w) + \sum wd}$ h : 고속열차 상호 시격 v : 고속열차 횡수비 v' : 저속열차 횡수비 w : 열차군수비 d : 열차군별 추정지연시분
3		전용	$N = \frac{f \times T}{h}$ h : 열차간 운전시격	
4	단선	연동/자동/통표폐색	혼용전용	$N = \frac{f \times T}{(t + c) \times 2}$ t : 역간 평균 운전시간 c : 폐색취급시간 (연동 및 자동폐색 : 1.5분, 통표폐색 : 2.5분)

주) 음영은 본 연구의 사례 분석시 적용한 선로용량 산정 모형임.
 자료) 열차운영계획시스템(TOPS) 개발 최종보고서(1차년도), 한국철도공사 연구원, 2012.

2.3 연구 현황

선로용량에 관한 국내·외 연구사례를 살펴보면 산정 모형의 특성 및 적용변수에 대한 이론적 고찰, 실측자료 분석에 의한 선로용량 산정 결과 비교, 산정 모형의 한계점 검토 및 국내 적용 활성화 방안 도출 등으로 구분할 수 있으며 정차시간은 모형 추정과 용량 영향 분석 연구로 구분할 수 있다.

<표 4> 국내·외 연구 현황

구분	분석 대상	저자	연구내용
선로용량 산정	실험자료에 의한 선로용량 산정	김동희 등 [14]	<ul style="list-style-type: none"> · 철도 교통계획시 선로용량 중요성 및 정의 제시 · 기존 산정 모형(야마기시, UIC)의 경우 운행 조건에 따른 동적 특성 고려하지 못하며 이에 해당 연구에서는 서울~대전구간 실험자료를 근거로 선로용량을 산정하였음 ※ 본 연구의 경우 선로용량 산정시 이용수요변화 특성을 반영하기 위한 방법을 검토하였음
	선로용량 산정 모형 국내 적용방안 검토	오석문 등 [7]	<ul style="list-style-type: none"> · 대표적 선로용량 산정 모형인 야마기시, UIC 406, TCRP 13의 모형식 및 적용 변수 설명 · 분석 전제조건하에서의 선로용량 산정 사례 제시 ※ 본 연구에서는 실제 열차운행 중인 경인선 구간을 대상으로 선로용량 산정 사례를 분석하였음.
	선로용량 정의 및 이론적 개략식 제시	Kruger [18]	<ul style="list-style-type: none"> · 이론적 용량, 실제 용량, 사용 용량, 이용가능 용량으로 구분 · 운행 열차종 동일하고 일정한 시간 간격으로 운행되는 단선 구간의 양방향 선로용량 산정식 제시 $N = \frac{1,440}{E_t + W_t + V_t} \times 2E_f$ <ul style="list-style-type: none"> ※ 왕복운행시간($E_t + W_t$) 및 감가속시간(V_t), 시스템 효율(E_f)을 근거로 선로용량 산정
	선로용량 산정 모형 주요 파라미터	Kruger[18] Leilich[19]	<ul style="list-style-type: none"> · 산정 모형별 주요 파라미터의 민감도 연구 수행 · 철도시설, 교통 및 운영조건 변화에 따른 단선 및 복선철도의 용량 변화 시뮬레이션 제시
정차시간 추정 모형	실측자료에 의한 정차시간 예측 모형 개발	박정수 등 [10]	<ul style="list-style-type: none"> · 정차시간 영향 요인 도출(승차인원, 하차인원, 차내혼잡, 차내승객수 등) · 역별 정차시간 추정을 위한 다중회귀모형 산정 · 서울 도시철도 동대문, 충무로 등 역을 대상으로 추정 결과 검증
	정차시간 모형 개발 및 용량 영향 분석	김상역 등 [5]	<ul style="list-style-type: none"> · 승하차인원 및 정차시간 실측자료를 근거로 선형회귀모형 산정 · 모형 추정 결과 및 오차율을 제시하였으나 모형에 대한 충분한 검증이 되지 않아 보완 필요 ※ 본 연구에서는 다양한 모형 대안을 설정하고 적합도 및 오차 검증을 통해 최소오차 모형을 제시하였음
	정차시간 모형 개발	서선덕 등 [6]	<ul style="list-style-type: none"> · KTX 승하차인원 및 정차시간 실측자료를 근거로 회귀모형 산정 · 모형 추정 결과 제시하였으나 모형 및 예측 오차에 대한 충분한 검증이 되지 않음.

<표 4>는 국내·외 선로용량 산정 모형과 정차시간 추정 관련 연구현황을 정리한 것이다.

선로용량 산정 관련 기존 연구 검토 결과를 보면, 김동희 등[14]은 철도교통계획에서의 선로용량 중요성 및 정의를 제시하고 서울~대전구간의 실험자료를 토대로 선로용량을 산정하였다. 단, 기존의 선로용량 산정 방법에 대한 특성과 변수 설명은 다소 보완이 필요할 것이라 판단된다.

오석문 등[7]은 국내외 철도 선로용량 산정의 주요 모형 3가지에 대해 특성을 비교하였다.

상기 연구에서는 야마기시 모형의 경우 다른 모

형에 비해 열차운영특성 반영 및 해석적 산식 편리성을 지니고 있어 국내에서 가장 일반적으로 적용되고 있으며 TCRP의 경우 야마기시 모형, UIC 405 모형과 달리 1시간 동안 수송하는 승객수를 기준으로 용량을 산정하며 운행차종이 동일한 도시 철도에는 적합하다고 판단되나 운행차종이 다양한 지역간 철도에서는 한계가 있음을 제시하였다.

Kruger[18]은 철도 선로용량에 대한 정의를 이론적 용량과 실제 용량, 사용 용량, 이용가능용량으로 구분 설명하였으며 열차운행시간 및 감가속시간, 시스템 효율에 의한 선로용량 산정 간략식을 제시하였다.

또한 Kreuger[18], Leilich[19]는 철도 선로용량 산정 모형의 주요 파라미터에 대해 민감도 연구를 수행하였다. 철도시설 및 운영조건, 교통환경 변화에 따른 용량 변화를 시뮬레이션하여 결과를 제시하였다.

김상역 등[5]은 지하철 4호선 사당역을 대상으로, 서선덕 등[6]은 천안아산역을 대상으로 승하차 수요 및 정차시간을 조사하여 추정 모형 및 오차율을 제시하였다. 단, 추정 모형에 대한 충분한 검증이 검토되지 않아 정차시간 추정 결과 및 변화 분석에 대한 보완이 필요하다고 판단된다.

박정수 등[10]은 서울 지하철 4호선의 승하차수요가 많은 동대문, 충무로를 대상으로 승하차수요 및 각 량당 승객 수, 차량 내 혼잡 등 정차시간 영향 요인에 대해 조사하여 역별 다중회귀모형에 의해 추정 모형을 도출하였다.

3. 정차시간 추정 모형 산정

3.1 개요

정차시간은 열차표정속도에 영향을 미치며 선로용량 산정시 고려하여야 할 중요 변수이다.

철도이용수요는 승차권 발매실적 및 현장조사 등에 의한 Data집계가 비교적 용이한 반면, 실정차시간의 경우 실측조사에 의한 자료수집이 필요하여 많은 시간과 비용이 소요된다.

본 연구에서는 선로용량을 산정하기 위해 정거장 정차시분¹⁾을 매개변수로 설정하였으며 철도이용수요와 정차시간과의 추정 모형 정립을 위해 김상역[5]의 침두시간²⁾ 사당역 실측자료를 활용하였다. 본 연구의 경우 선로용량 변화 분석 대상노선인 경인선 실측자료를 근거로 정차시간 추정 모형을 정산하는 것이 타당할 것으로 사료되나, 분석상의 제약으로 실측조사를 시행하지 못하였다. 단, 사당역의 경우 경인선과 동일한 수도권 도시철도이며 전동열차만

운행되는 전용구간, 주중 출퇴근시간 수요가 집중되는 열차운행특성이 유사하다고 판단하여 추정 모형 산정시 근거자료로 활용하였다.

사당역의 실측조사자료를 분석한 결과, 침두 3시간 동안 열차운행횟수는 62회였으며 평균운행시격은 2.9분/회로 조사되었다.

정차시간은 승하차인원의 대기공간(플랫폼 규모)과 열차운행시격(서비스 공급, 철도이용자(수요) 등 다양한 요인에 의해 영향을 받으나, 본 연구에서는 시설 및 서비스 공급 측면은 고려하지 않았으며 철도 이용수요가 정차시간에 미치는 영향만을 반영하였다.

역별 정차시간 및 승차인원과 하차인원, 승하차인원에 대해 추정 모형 변수로 적합한지를 판단하기 위해 상관분석을 시행하였으며 그 결과 승차 및 하차 특성을 지닌 변수간의 상관성이 높은 것으로 나타났다. 다중회귀분석의 경우 각 독립변수들간의 상관관계가 존재하여 상호 독립이 아닌 경우를 다중공선성(Multi-collinearity)이라고 하며 변수간 종속성이 있는 경우 적용이 불가능하다[1].

따라서 본 연구에서는 실정차시간과 상관계수가 가장 높은 승하차인원을 설명변수로 선정하였으며 변수간 상관분석 결과는 <표 5>와 같다.

<표 5> 변수간 상관분석 결과

	실정차시간	승차인원	하차인원	승하차인원
실정차시간	1.00			
승차인원	0.89	1.00		
하차인원	0.85	0.73	1.00	
승하차인원	0.93	0.97	0.86	1.00

3.2 모형 산정 및 검증

본 연구에서는 실정차시간과 승하차 인원 실측자료를 근거로 정차시간 추정 모형을 산정하였다. 정차시간은 도착 열차의 출입문이 열리고 닫히는 개폐시간(기계운영시간)과 실질적으로 승객의 승하차를 위해 사용되는 시간으로 구성된다.

1) 선로용량 산정을 위한 분석 대상노선의 전체 역별 정차시간의 총합.

2) 1일 중 이용수요가 가장 많은 시간대(Peak Hour).

출입문 개폐시간의 경우 승하차수요에 영향을 받지 않는 고정시간이므로 본 연구에서는 정차시간 추정 모형을 산정함에 있어 이를 제외한 실제 정차 시간만을 고려하였으며 승하차수요와 정차시간과의 관계 분석을 통해 모형 대안을 설정하였다.

수정결정계수(Adjusted R²)의 경우 모든 모형 대안이 0.85~0.93의 범위를 나타내고 있어 모형

설명력이 높은 것으로 분석되며, t-value가 95% 신뢰계수인 1.96을 초과하고 p-value는 0.00에 근접하므로 통계적으로 유의하다고 판단된다.

본 연구에서는 역별 승하차수요를 기준으로 선형 회귀모형 또는 복합모형(상수 및 비선형회귀모형)을 구분 적용하였으며 모형 대안별 모형식과 통계적 검증 결과는 <표 6>과 같다.

<표 6> 정차시간 추정 모형 및 통계 검증 결과

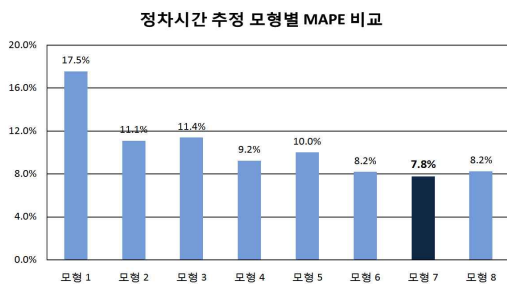
모형 대안	모형식	Adjusted-R ²	통계적 검증	
			t-value	p-value
1	단일모형 $y = 0.048975x + 1.629378$ (선형회귀)	0.93	28.192	0.00
2	복합모형 $y_1 = 11.0, y_2 = 12.0, y_3 = 13.0$ (상수) $y_4 = 0.046593x + 4.275773$ (선형회귀)	0.88	18.116	0.00
3	복합모형 $y_1 = 12.0$ (상수) $y_2 = 0.045211x + 5.778656$ (선형회귀)	0.87	16.996	0.00
4	복합모형 $y_1 = 12.0$ (상수) $y_2 = 37.312171\ln(x) - 204.536946$ (로그회귀)	0.91	20.345	0.00
5	복합모형 $y_1 = 12.0$ (상수) $y_2 = -0.000031x^2 + 0.100825x - 15.473614$ (비선형회귀)	0.90	-3.214	0.00
6	복합모형 $y_1 = 12.0$ (상수) $y_2 = 0.095644x - 21.323931$ (선형회귀) $y_3 = 0.032167x + 20.648156$ (선형회귀)	0.85	12.606	0.00
7	복합모형 $y_1 = 12.0, y_2 = 15.5$ (상수) $y_3 = 35.399283\ln(x) - 191.271104$ (로그회귀)	0.89	17.567	0.00
8	복합모형 $y_1 = 12.0, y_2 = 15.5$ (상수) $y_3 = -0.000021x^2 + 0.079495x - 5.494510$ (비선형회귀)	0.88	-1.996	0.05

3.3 정차시간 추정 결과 검증

앞서 산정한 정차시간 추정 모형에 대해 관측치와 모형치를 비교하여 추정 결과를 검증하였다.

평균 오차(Mean Error) 및 평균 오차율(Mean Percent Error)의 경우 오차 크기에 비해 부호 +, -의 영향으로 상쇄되어 전체 검증지표 값이 감소될 수 있으므로 부호에 상관없이 오차 크기를 비교할 수 있는 절대오차율(Absolute Percent Error, APE) 또는 평균 절대오차율(Mean Absolute Percent Error, MAPE)을 검증지표로 적용하였다.

본 연구에서는 평균 절대오차율(MAPE)이 가장 낮은 모형 7을 기준으로 경인선의 역별 침두시 정차시간을 추정하였다.



[그림 3] 정차시간 추정 모형별 MAPE 비교

4. 경인선 선로용량 산정 사례 분석

4.1 분석 개요

본 연구에서는 경인선을 대상으로 선로용량 산정 사례를 분석하였으며 개략적 산정 절차는 <표 7>과 같다.

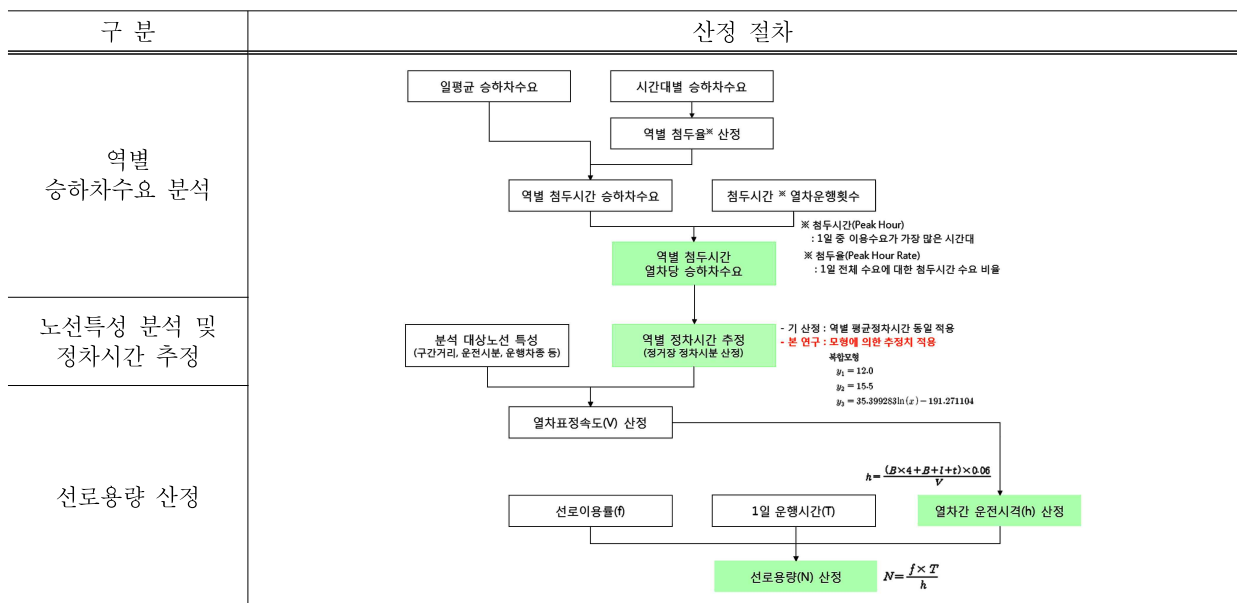
경인선(구로~인천)구간은 총 21개 역으로 구성되어 있으며 역별 승하차수요는 정차시간에 영향을 미치고 전체 대상노선 정거장 정차시분과 열차표정 속도, 열차간 운전시격을 결정한다.

침두시간 승하차수요는 대부분 1일 중 출퇴근 시간(8~9시)에 발생하며 일평균 승하차수요와 시간대별 침두율을 근거로 추정하였다.

4.2 경인선 역별 승하차수요 분석

역별 승하차수요 분석 결과, 부천, 송내, 부평 3개역에서 전체 승하차수요의 35.8%를 차지하는 것으로 나타났으며 시간대별 승하차수요 분석 결과 인천을 제외한 대부분의 역에서 오전, 오후 침두시간 이용수요가 높아 일반적 출퇴근 통행특성을 보이고 있다.

<표 7> 선로용량 산정 절차



또한 일평균 승하차수요의 경우 부천, 부평에 비해 송내가 1만 여명 적은 것으로 나타났으나 첨두 1시간 승하차수요는 약 7,800명으로 유사한 결과를 보였다. 이는 송내가 부천, 부평에 비해 첨두시간 승하차비율(첨두시간 통행률)이 크기 때문에 첨두 1시간에 집중되는 수요가 많음을 의미한다.

<표 8> 경인선 역별 승하차수요 분석

역명	일평균 승하차수요	첨두 1시간 승하차수요	열차당 승하차수요
구일	11,871	1,307	63
개봉	46,795	4,164	201
오류동	22,580	2,081	101
온수	13,765	1,327	64
역곡	60,715	5,932	287
소사	28,382	2,436	118
부천	90,445	7,724	374
중동	20,718	1,962	95
송내	74,858	7,801	377
부개	21,910	2,063	100
부평	85,468	7,821	378
백운	17,735	1,464	71
동암	54,571	4,505	218
간석	13,356	1,101	53
주안	61,760	5,020	243
도화	6,465	611	30
제물포	14,894	1,337	65
도원	7,932	886	43
동인천	39,359	3,501	169
인천	6,523	531	26
경인선(전체)	700,101	63,574	3,076

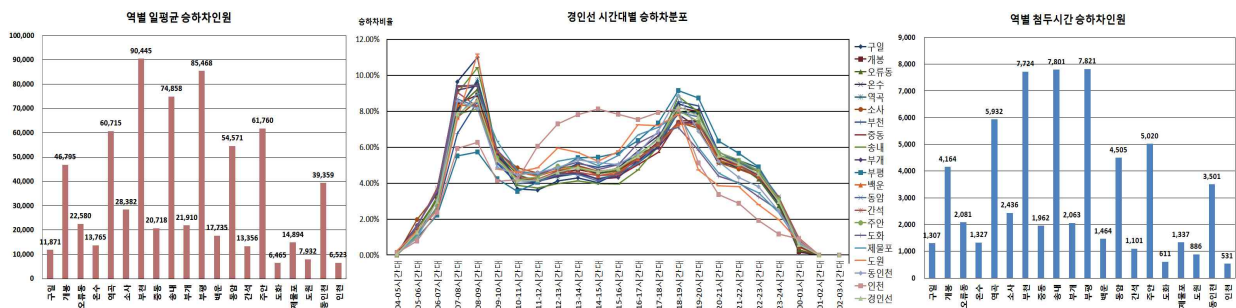
4.3 경인선 역별 승하차수요 분석

경인선 역별 일평균 승하차수요를 근거로 역별 첨두율 및 열차운행횟수 등을 고려하여 첨두시간 열차당 승하차수요를 산정하였다.

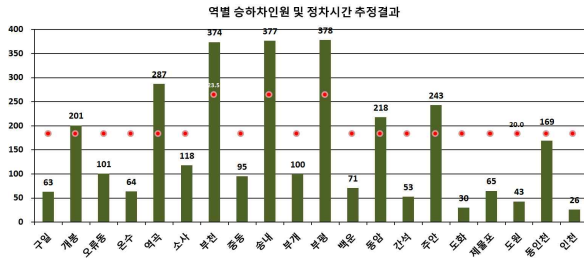
이에 따른 역별 정차시간을 추정한 결과 20.0초~23.5초로 나타났으며 이는 역별 정차시간이 증가하는 승하차 기준수요(430명)를 초과 역이 존재하지 않기 때문이라 분석된다.

<표 9> 경인선 역별 정차시간 추정 결과

역명	열차당 승하차수요(인)	역별 정차시간(초)
구일	63	20.0
개봉	201	20.0
오류동	101	20.0
온수	64	20.0
역곡	287	20.0
소사	118	20.0
부천	374	23.5
중동	95	20.0
송내	377	23.5
부개	100	20.0
부평	378	23.5
백운	71	20.0
동암	218	20.0
간석	53	20.0
주안	243	20.0
도화	30	20.0
제물포	65	20.0
도원	43	20.0
동인천	169	20.0
인천	26	20.0
경인선(전체)	3,076	410.5



[그림 4] 경인선 승하차수요 분석 결과



[그림 5] 경인선 역별 정차시간 추정 결과

4.4 경인선 대상구간 특성 분석

경인선의 시설 및 열차운행특성을 검토한 결과, 전체 구간거리는 27km이며 정차시간을 제외한 전체 구간운전시분은 36.5분이며 구로~인천구간 사이에 19개역이 존재하고 전동차만 전용으로 운행되고 있다[2]. 본 연구에서는 구간거리 및 신호구간수 등 시설 특성이 동일하다는 전제하에서 정거장 정차시분 차이에 따른 선로용량 변화를 분석하였다.

기존에는 정거장 정차시분을 전체 노선구간의 역별 정차시간 총합으로 산정한 반면, 본 연구에서는 역별 승하차수요에 따른 정차시간을 추정 모형에 의해 산정하고 전체 역별 추정의 총합으로 산정하였다.

<표 10> 경인선 대상구간 특성

경인선 구간특성	단위	내용
구간	-	구로~인천
역간수	개	20
표정속도	V	km/h 35.2
신호구간수	K	개 100
구간거리	L	m 27,000
선로이용률	f	% 60
열차장	l	m 220
궤도절연거리	t	m 29.3
신호기 평균거리	B	m 270.0
정거장 정차시분	기산정	분 9.5
	본연구	분 6.8
구간운전시분	분	36.5
표정시분	분	46.0
역간 평균운전시분	분/개	1.8
운행차종	-	전기동차

4.5 경인선 선로용량 산정 결과

본 연구에서는 승하차수요가 정차시간 및 선로용량에 어떠한 영향을 미치는지를 분석하기 위해 경인선을 대상으로 사례 분석을 하였으며 경인선은 전동차 전용, 복선 자동폐색구간이므로 <표 11>의 선로용량 산정 모형 3을 적용하였다.

<표 11> 경인선 선로용량 산정 모형

구분	내용
모형 3	$N = \frac{f \times T}{h}$ $* h = \frac{(B \times 4 + B + l + t) \times 0.06}{V}$
변수 설명	<ul style="list-style-type: none"> - T : 1일 물리적 시간(24시간, 1,440분) - f : 선로이용률(60%) - h : 열차간 운전시격 (열차운행 및 시설특성을 고려한 열차 운행간격) - V : 열차 표정속도 - t : 궤도절연거리 (열차가 표정속도로 3초간 주행한 거리 적용)

주) 모형 3은 본 논문 <표 3> 선로구간 특성에 따른 선로용량 산정식 참조.

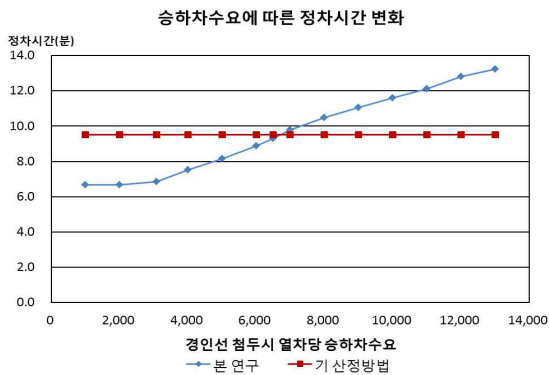
선로용량(N)은 열차간 운전시격(h)에 의해 결정되며 이는 열차 표정속도(V)와 열차장(l), 신호기 평균거리(B) 등에 영향을 받는다. 이 중 열차장과 신호기 평균거리 등은 시간에 따른 변화가 비교적 적은 고정 변수라 할 수 있고, 구간운전시분은 대상 노선 전체 구간을 주행하는데 소요되는 시간으로 승하차수요 영향보다는 운행차종 및 선로 특성(구배, 곡선, 신호확인거리 등)에 의한 영향이 클 것이라 판단된다. 반면 정거장 정차시분의 경우 이용수요에 따른 영향이 크기 때문에 가변 변수로 설정하여 분석하였다.

경인선 대상구간 특성이 <표 10>과 같을 경우 기산정시에는 역별 정차시간을 평균값인 30초로 동일하게 적용하여 정거장 정차시분이 9.5분으로 산정되었으며 그 결과 열차간 운전시격(h)은 2.7분, 1일

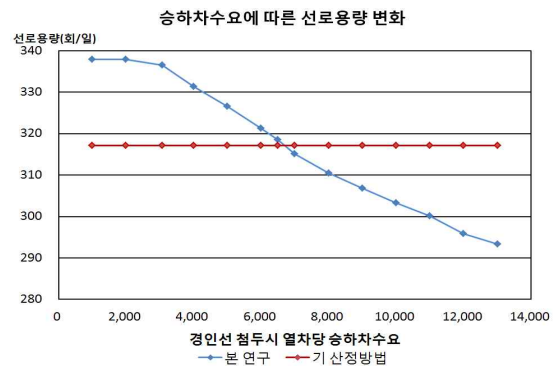
<표 12> 경인선 승하차수요에 따른 정차시분 및 선로용량 변화

승하차수요 (인/회)	정차시분(분)		표정속도(km/h)		선로용량(회/일)		
	본연구	기산정방법	본연구	기산정방법	본연구	기산정방법	증감
1,000	6.7	9.5	37.5	35.2	14.1	13.2	338
2,000	6.7	9.5	37.5	35.2	14.1	13.2	338
3,076	6.8	9.5	37.4	35.2	14.0	13.2	337
4,000	7.5	9.5	36.8	35.2	13.8	13.2	331
5,000	8.2	9.5	36.3	35.2	13.6	13.2	327
6,000	8.9	9.5	35.7	35.2	13.4	13.2	321
6,500	9.3	9.5	35.4	35.2	13.3	13.2	318
7,000	9.8	9.5	35.0	35.2	13.1	13.2	315
8,000	10.5	9.5	34.5	35.2	12.9	13.2	310
9,000	11.0	9.5	34.1	35.2	12.8	13.2	307
10,000	11.6	9.5	33.7	35.2	12.6	13.2	303
11,000	12.1	9.5	33.3	35.2	12.5	13.2	300
12,000	12.8	9.5	32.9	35.2	12.3	13.2	296
13,000	13.2	9.5	32.6	35.2	12.2	13.2	293

주) 기 산정방법 : 이용수요와 관계없이 역별 정차시간을 동일하게 적용.



[그림 6] 승하차수요에 따른 정차시분 변화



[그림 7] 승하차수요에 따른 선로용량 변화

선로용량은 317회/일로 분석되었다.

반면, 본 연구의 경우 정차시간 추정 모형에 의해 역별 정차시간을 산정하였으며 정거장 정차시분은 6.8분으로 분석되었다. 그 결과 열차간 운전시격은 2.6분, 1일 선로용량은 337회/일로 산정되어 기산정시에 비해 1일 20회 정도 큰 것으로 나타났다.

5. 결 론

선로용량에 따른 열차운행횟수의 결정은 이용자 서비스 수준과 운영비용 측면에서 매우 중요한 문제

이며, 열차운행횟수 증가는 이용자 대기시간 및 차내 혼잡도 저감에 따른 이용자 편의를 향상시키는 반면 차량구입비 및 운영비용 증가로 인해 운영자 부담은 가중시킨다[15].

따라서 단순히 선로용량을 증대하여 열차운행횟수를 증가시키는 것이 효율적 열차운영대안이라 할 수는 없을 것이라 판단된다. 다만, 본 연구에서는 선로용량 산정시 중요 변수인 정차시간을 이용수요에 의해 추정하는 방법을 제안하였으며 경인선을 대상으로 수요 변화에 따른 선로용량 차이를 분석 제시함으로써 향후 역세권 개발 및 열차운행 패턴 변화

에 따른 장래 이용수요 변화시 운영자 측면에서의 추가 가능용량 수준을 검토하고자 하였다.

경인선 구로~인천 구간에서의 침두시간 열차당 승하차수요는 약 3,000여 명으로 분석되었으며 정거장 정차시분은 6.8분으로 추정되었다. 또한 이에 따른 선로용량은 337회/일로 산정되어 기 산정방법 적용시(317회/일)에 비해 약 20회/일 높게 나타났다.

본 연구의 부족한 점을 보완하고 본 논문과 관련하여 지속적으로 검토되어야 할 향후 연구 과제를 다음과 같이 제시하였다.

본 연구에서는 정차시간 추정 모형 산정시 사당역에서의 실측자료를 근거로 하였으며 모형 대안별 통계적 검증 결과를 제시하였다. 단, 이용수요 이외의 열차운영 특성(열차길이, 신호구간수 등)영향은 고려하지 못한 면이 있다. 또한 본 연구에서 사례 분석한 경인선의 경우 전동차 전용 운행구간이므로 운행차종이 다양한 혼용구간의 선로용량 분석을 위해서는 보완 연구가 필요하다고 판단된다.

또한, 본 연구를 통해 얻은 결과에 의하면 이용수요에 따른 정차시간 및 선로용량을 산정할 경우 추가 가능용량으로 인해 열차운행 증대 방안이 가능할 것으로 검토되나, 이는 운영비용 증가라는 측면에서 민감한 문제라고 판단되며 이에 따른 경제적 효과 분석에 대해 향후 추가 검토가 필요할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] 강성룡, 손기형, 「경영통계」, 무역경영사, 1996.
- [2] 한국철도공사 연구원, 「열차운영계획시스템(TOPS) 개발 최종보고서(1차 년도)」, 2012.
- [3] 한국철도시설공단, 「효율적인 철도시설 인프라 활용을 위한 선로용량 산정 및 관리 연구 최종 보고서」, 2010.
- [4] 김 훈, 김찬성, 김연규, 「지역간철도 선로용량 관리를 위한 지표 개발 연구」, 한국교통연구원, 2006.
- [5] 김상역, 「서울시 지하철 정차시간 관계식의 개발과 용량에의 영향분석」, 석사학위논문, 한양대학교 대학원, 2002.
- [6] 서선덕, 신영호, 심현진, 김환수, “고속철도(KTX) 수요에 따른 dwelling time 예측 모형 개발”, 「2008년 한국철도학회 춘계학술대회」, 한양대학교, (2008), pp.1612-1627.
- [7] 오석문, 노학래, 김영훈, 홍순흠, “철도 선로용량 산정방법 비교 연구”, 「한국철도학회논문집」, 제15권, 제6호(2012), pp.670-681.
- [8] 김동희, 홍순흠, 김영훈, “선로용량 분석체계와 용량모수 평가”, 「2002년 한국철도학회 학술대회」, 한국철도기술연구원, 2002.
- [9] 김연규, “UIC 방식을 이용한 경부선 선로용량 산정 연구”, 「2010년 한국철도학회 춘계학술대회」, 한국교통연구원, (2010), pp.397-402.
- [10] 박정수, 신동희, 원제무, “도시철도 정차시간 분석을 통한 모형식 개발에 관한 연구(서울시 도시철도 4호선을 중심으로)”, 「대한교통학회지」, 제24권, 제2호(2006), pp.147-156.
- [11] 김명규, 서선덕, 이재훈, 양근율, “한국의 지역간 철도 용량 및 서비스수준 산정을 위한 UIC 406방법의 적용방안 연구”, 「2000년 한국철도학회 학술대회」, pp.1845-1854.
- [12] 김무룡, 김한신, 이창호, 김봉선, 김동희, 홍순흠, “선로용량 산정과 민감도 분석의 신뢰성 향상에 관한 연구”, 「대한안전경영과학회지」, 제7권, 제4호(2005), pp.207-217.
- [13] 이병권, 김학식, 이창호, 김봉선, 김동희, “철도 선로용량 계산을 위한 모수 평가모형 개발”, 「2003년 안전경영과학회 춘계학술대회」, 한국철도기술연구원, (2003), pp.407-412.
- [14] 김동희, 김봉선, “철도에서의 선로용량 산정에 관한 연구”, 「2002년 안전경영과학회 춘계학술대회」, 한국철도기술연구원, (2002), pp.257-262.
- [15] 김익희, 윤동희, 금기정, 이상명, “전동열차 편성량수 설계를 위한 최적화 시뮬레이션”, 「대한교통학회지」, 제30권, 제3호(2012), pp.95-106.

- [16] 선구별 열차운행횟수 및 선로용량, 한국철도공사, 2012.
- [17] 철도통합정보시스템(IRIS) 열차별 수송실적, 한국철도공사, 각 년도.
- [18] Kreuger, H., "Parametric Factors Affecting Rail Line Capacity," Proceedings of the 1999 Winter conference for World Bank, Washington, D.C., 1999.
- [19] Leilich, R.H., "Application of Simulation Models in Capacity Constrained Rail Corridors," Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference, 1998.
- [20] IAN FISHER, TOM PARKINSON., "Rail Transit Capacity," TCRP Report 13, 1996.
- [21] Banverket, Banverket Annual Report 2005, 2006.
- [22] IMPROVERAIL, Method for Capacity and Resource Management, 2003.
- [23] UIC. UIC Code 406, 2004.
- [24] TCRP. TCRP Report 13, TRB, 1998.