

## 철도선로용량 부족에 따른 지체발생 연구 - 경부선 서울~금천구청 구간을 대상으로

### Arrival Delay Estimation in Bottleneck Section of Gyeongbu Line

이장호\*

Jang-Ho Lee

**Abstract** This research shows the relationship between the number of trains and the probability of trains with arrival delay and suggests way to estimate the benefits of improved punctuality in a bottleneck section of the Gyeongbu Line. The arrival delays of high-speed and conventional trains were estimated using the train operation data of KORAIL. Linear regression models for the probability of trains with arrival delay by train type are presented in this paper. The probabilities of trains with arrival delay were more affected by the number of conventional trains than by the number of high-speed rail trains. For the empirical analysis, a project for increasing the capacity in the Seoul-Geumcheongu office section was tested. The benefits of the improved punctuality were estimated to be 4.2~4.5 billion Korean won every year. This research has some limitations but it can help evaluate more precisely the feasibility of the project of increasing the capacity in bottleneck sections.

**Keywords** : Capacity utilization, Bottleneck, Delay, Reliability, Benefit

**초 록** 본 연구는 대표적 선로용량 부족구간인 경부선 서울~금천구청 구간을 분석대상으로 열차운행횟수에 따른 열차 지연도착 발생확률을 추정하고, 이를 통해 정시성 개선 편익을 반영할 수 있는 방안을 마련하였다. 코레일의 열차운행자료를 기초로 연도별/월별/시간대별 지체발생수준을 분석하였고, 고속 및 일반열차의 열차운행횟수에 따른 지연발생확률을 선형회귀분석으로 모형화하였다. 분석결과, 해당구간 지연발생확률에 일반열차 운행횟수가 고속열차 운행횟수 보다 1.4~2.8배 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이를 기초로 정시성 개선 편익의 산정방법론을 제시하였고, 실제 서울~금천구청간 선로용량 확충사업에 대하여 사례분석을 수행한 결과, 연간 42~45억원 규모의 편익이 발생하는 것으로 분석되었다. 본 연구를 통해 선로용량 부족구간에 대한 용량확충사업의 편익과 경제적 타당성을 제고시킬 수 있을 것으로 기대된다.

**주요어** : 선로이용률, 병목구간, 도착지체, 정시성, 편익

## 1. 서 론

2004년 경부고속철도 개통 이후 경부선 서울~금천구청 구간은 고속열차(KTX), 새마을호, 무궁화호, 누리로, 화물열차 등 다양한 종류의 많은 열차들이 운행을 하게 되면서 대표적인 선로용량 부족구간이 되고 있다. 「2013 철도통계연보」를 보면, 해당구간은 선로용량 171회 중 188회를 운행하고 있다. 또한, 중앙선 청량리~망우구간도 중앙선 열차와 경춘선 열차가 합류하는 구간으로 선로용량 부족으로 인해 경춘선 운행열차 중 준고속열차인 ITX-청춘만 청량리를 경유하여 용산역까지 운행하고, 일반 수도권 전철은 청량리역으로 진행하지 못한 채 경원선 광운대역까지 운행 중에 있다.

이렇듯 선로용량 부족구간이 존재함에도 불구하고, 해당 구간에 대한 선로용량 확충사업은 (예비)타당성조사 시 타당성 확보가 쉽지 않은 상황이다. 2006년 고시된 제1차 국가철도망 구축계획에서는 당초 서울~금천구청간 3복선전철화 사업이 최우선적으로 검토되었으나, 예산당국과의 협의 단계에서 별도의 연구용역을 통해 재검토하는 것으로 결정되었다. 2011년 고시된 제2차 국가철도망 구축계획에서도 수서~평택간 수도권 고속철도 건설사업 추진으로 인해 해당사업은 구체적인 사업시기를 확정짓지 못하였다. 선로용량 확충사업의 추진이 어려운 것은 경제적 타당성 분석 시 열차운행빈도 증가에서 기인한 철도수요증가의 경제적 편익만을 고

\*Corresponding author. Tel.: +82-70-8855-1657, E-mail : transwho@ut.ac.kr.

© 2015 The Korean Society for Railway. All rights reserved.

<http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2015.18.4.374>

려할 수 있기 때문이다. 따라서 선로용량 확충사업의 편익을 보다 객관적이고 합리적으로 추정하기 위해서는 수요증가에 따른 편익 이외에 선로용량 부족해소에 따른 정시성 개선 편익을 계량화할 필요가 있다.

전술한 연구배경에 따라 본 연구에서는 철도 선로용량과 지체간의 관계를 규명한 선행연구를 고찰하고, 국내 철도망 중 대표적 선로용량 제약구간인 경부선 서울~금천구청간을 대상으로 선로이용률 수준에 따른 지체발생 빈도와 발생수준을 분석하였다. 또한, 열차운행횟수와 지체발생확률에 대한 모형구축결과를 기초로 선로용량 확충에 따른 정시성 개선 편익을 계량화할 수 있도록 하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제2장에서는 철도의 선로용량 분석, 열차의 지체, 정시성 개선에 따른 편익산정방안과 관련한 선행연구를 고찰하고, 본 연구의 시사점을 도출한다. 제3장에서는 경부선 서울~금천구청간 열차운행자료를 기초로 연도별, 월별, 시간대별 지체발생수준을 살펴본다. 제4장에서는 동 구간의 고속 및 일반열차 운행횟수와 지체발생비용간 관계를 고찰하고, 선형회귀 분석을 통해 모형화한 뒤 실제 타당성 조사 시 편익으로 계량화할 수 있는 방안을 제시한다. 끝으로 제5장에서는 본 연구의 결론과 한계점, 그리고 향후 과제 등에 대하여 기술한다.

## 2. 철도의 선로용량, 정시성 및 지체 관련 선행연구 고찰

### 2.1 철도 선로용량 분석 관련

철도의 선로용량 분석과 관련된 대표적인 연구로는 Abril *et al.*[1]의 연구를 꼽을 수 있는데, 여기서는 철도 선로용량 분석에 있어서 주요한 개념과 방법론을 제시하였다. 우선 선로용량을 이론적 용량(theoretical capacity)과 실용적 용량(practical capacity)로 구분하고, 이론적 용량은 수학적으로 완벽한 조건에서 최소운행시각으로 운행할 수 있는 열차운행횟수로 정의하였다.

Burdett and Kozan[2]도 이론적인 용량은 네트워크 중 포화상태에 이른 임계(critical) 구간에서만 나타나며 이는 계획목적의 상한선으로서만 사용될 수 있다고 하였다. 한편, 실용적 용량은 적절한 수준의 정시성(신뢰성)을 유지하는 범위에서 열차구성, 우선순위 등을 반영한 열차운행횟수로 정의하였는데, Kraft[3]의 연구를 기초로 실용적 용량은 이론적 용량의 60~75% 수준으로 보았다.

Mattsson[4]은 사용된 용량(used capacity)을 실제로 통과한 열차운행횟수로 정의하고, 실용적 용량보다도 낮은 값이라고 하였다. 따라서 어떤 상태에서 가용한 용량(available capacity)은 실용적 용량(practical capacity)에서 사용된 용량(used capacity)을 차감한 값이 된다. 또한, 선로이용률(utilization rate)이 0~40% 범위에 있으면 추가적인 열차서비스가 가능하고, 40~60% 범위에 있으면 서비스 수준(Level of Service)과 열차운행횟수가 균형을 맞출 수 있다고 하였다. 반면 60~80% 범위에 있으면 지체의 회복이 어려운 수준으로, 80~100% 수준이면 용량자체가 부족한 것으로 보았다.

또한 그는 철도 선로용량에 영향을 미치는 요인은 크게 세 가지 - 시설(infrastructure)조건, 교통(traffic)조건, 운영(operation)조건 - 로 구분하였다. 시설 조건에는 폐색구간이나 신호시스템, 단/복선 여부, 노선의 정의, 네트워크 효과, 궤도의 구조나 제한속도, 역간거리 등이 포함되고, 교통 조건에는 신선/기존선 여부, 열차혼용(train mix)여부, 정규(regular) 스케줄, 침두율, 열차통행 우선권(priority) 등이 있으며, 운영(operating)조건에는 궤도유지보수, 열차운전장애, 최대가능 지연시간, 시간단위(time window), 서비스의 질, 신뢰성(정시성) 등이 포함된다고 기술하였다.

Landex *et al.*[5]은 철도 선로용량이 평균속도, 열차구성의 다양성(heterogeneity), 열차운행횟수, 안정성(Stability)-정시성, 평균속도의 복합적인 결과물이라고 언급하면서 UIC leaflet 406의 선로용량 산정방법에 대하여 설명하였다. 대신 UIC leaflet 406의 방법은 선로용량이 다양하게 설명될 수 있어서 용량이용이 서로 달라질 수 있음을 언급하였고, 덴마크 사례에 적용하여 선로용량 산정 시 구간설정의 중요성과 추가용량 사용을 위한 가능성을 제시하였다.

Mitra *et al.*[6]은 철도 선로용량 산정을 위한 여러 방법론들을 살펴보고, 이용자들이 친숙하게 사용할 수 있도록 다변량 회귀분석 방법을 적용하였다. 영향요인으로는 운행열차의 동일속도 여부, 평균속도, 방향별 계수, 폐색구간길이, 대피선(측선) 간격, 구간길이 등이 제시되었다.

Harrod[7]는 네트워크와 속도차이 간 54개 조합에 대하여 열차통행량, 지체, 여유시간(idle time)에 대한 목적함수를 가지고 선로용량을 최적화하는 방안을 제시하였다. 여기서는 노선간 합류점(meeting point)에서의 대피선(측선) 용량을 높이는 것이 전체적인 선로용량을 높이는 데에 중요하다고 하였다.

선로이용률과 정시성과의 관계에 대한 연구로는 Kaas[8]과 Skjaeret[9]의 연구가 있는데, Kaas[8]는 선로이용률이 높아지면, 정시성은 낮아진다는 점을 보였고, Skjaeret[9]은 선로이용률이 75~80% 이상 되면 정시성이 크게 떨어지며, 침두시가 아니면 60% 이상 사용하는 것도 바람직하지 않다고 하였다.

한편, Landex *et al.*[5]도 선로이용률과 지체와의 관계를 밝히면서, 평균적인 지체는 포화수준을 넘으면서 기하급수적으로 증가하

게 되므로, 포화수준 이상의 열차운행은 부적절하다고 기술하였다. 따라서 열차 사이에 계획된 여유시분(scheduled slacks)을 둔다면 선로용량은 저하되지만, 일시적인 지체를 회복할 수 있는 여력이 생기므로 신뢰성(정시성)은 높아질 수 있다고 언급하였다.

## 2.2 철도 정시성 및 지체 분석 관련

Murali *et al.*[10]은 회귀분석을 통하여 열차혼용여부, 네트워크 지형조건 등의 함수로서 지체를 추정하는 방법을 제시하였다. 독립변수로는 열차종별 운행횟수, 도착률, 네트워크 연장, 제한속도, 분기기 수, 역간거리 등을 검토하였는데, 모형구축결과, 열차운행횟수가 늘어날수록 지체가 증가함으로 보였다.

Olsson *et al.*[11]은 열차 정시성의 개념과 영향요인, 정시성 개선을 위한 전략 등을 제시하였는데, 정시성 영향요인으로는 승객수, 좌석점유율, 선로이용률, 열차취소, 일시적인 속도감소, 공사구간, 출발역과 종착역 정시성, 열차통행 우선권 등을 꼽았다. 실증분석을 통해 오슬로 지역을 대상으로 시간대별 선로이용률(열차운행횟수), 승객 수와 정시성의 관계식을 도출하였다. 분석결과 혼잡구간에서의 정시성 개선을 위해서는 승객의 승하차에 대한 관리가 필요하고, 혼잡하지 않은 단선구간은 열차교행의 관리가 중요하다고 하였다. 또한, 정시성 개선을 위한 여유시분(slack) 전략의 유용성에 대해서 언급하였다.

Heinz[12]도 승객들의 승하차시간을 정시성의 주요한 요인으로 보았고, NEA[13]에서는 일본 JR 큐슈철도의 정시성이 높은 것은 혼잡열차에서 승객들의 승하차에 대한 숙련된 행동에서 기인한다고 보았다.

반면, 스웨덴 국립회계감사원인 Riksrevisionsverket[14]는 기상요인을 추가로 고려하여 1976~1986년 사이에 발생한 열차 지체 중 50% 가량은 평균 온도, 평균 강수량, 통행자 수 등으로 설명될 수 있다고 하였다. 통행자 수가 정차시간에 영향을 미치고, 평균기온이 5도 정도 내려가면 정시성도 5% 가량 낮아지는 것으로 분석되었다.

그 외의 열차 정시성의 영향요인으로 Harris[15]는 열차길이, 도착 전 정거장 수, 운행거리, 기관차 차령, 선로점유 등을 꼽았고, Banverket[16]는 특정 정거장, 열차운행횟수, 주중/주말 여부 등을 제시하였다.

철도의 지체에 대한 분석은 1차적 지체 이외에 선행열차의 지체에 따른 후속지체(2차적 지체)에 대한 연구도 이루어졌는데, Gibson *et al.*[17]은 선로이용률과 1차적 지체와는 관련성이 낮으며, 혼잡 구간의 선로이용률과 2차적 지체는 지수관계를 갖는 것으로 결론지었다. Yuan and Hansen[18]은 선로이용률과 열차운영의 정시성간의 상보적(trade-off)관계가 존재하며, 노선상층, 연계지연 등으로 인한 2차적 지체의 전파를 분석적 확률모형으로 제시하였다. 또한, Vromans *et al.*[19]은 종착역에서의 불규칙적인 도착간격이 혼잡지체의 주요한 요인이 된다고 하였고, 그에 따라 규칙적 열차운영의 중요성을 언급하였다.

## 2.3 철도 정시성 편익 관련

철도의 정시성 편익을 산정하기 위해서는 우선 정시성 평가를 위한 지표가 필요한데, Rietveld *et al.*[20]은 통행시간 신뢰성(정시성)에 대한 여러 가지 지표를 제시하였다. 일정시간 지연되어 도착하는 열차의 비율, 이른 출발(early departure)의 확률, 예상도착시간과 스케줄 상 도착시간의 평균적 차이, 지연도착하는 열차의 평균 지체시간, 일정시간 이상 지연되는 도착열차의 평균 지체시간, 통행시간의 표준편차 등을 꼽았다.

van Loon *et al.*[21]도 기존의 진술선호(stated preference)자료가 아닌 현시선호(revealed preference)자료를 활용하여 네덜란드 시즈티켓 구입자 수와 철도 정시성간의 관계를 규명하여 적절한 정시성 지표를 선정하였다. 3분 이상 지연열차의 비율, 9분 이상 지연열차의 비율, 평균 지체시간, 지연열차의 지체시간, 도착/출발시간 분포의 표준편차, 80분위 - 50분위 도착/출발시간 등의 정시성 지표를 검토한 결과 80분위 값과 50분위 값의 차이가 시즈티켓 변동에 대한 설명력이 가장 높은 것으로 나타났다.

Kroes *et al.*[22]은 파리광역권의 광역철도 RER-B Nord 노선을 대상으로 정시성 개선을 위한 7단계 분석방법론을 제시하고 이에 따라 편익을 산정하였다. 해당 연구에서 제안한 7단계 분석방법론은 첫째, 정시성 개선 프로젝트의 내용을 정의하고, 둘째, 해당 프로젝트 내용에 따른 전체 시스템의 성능(system performance)변화를 추정한다. 셋째, 서비스 수준의 변화를 파악하고, 넷째, 이용객(승객)에 미치는 영향을 추정한다. 다섯째, 화폐가치로 환산하고, 여섯째, 수요에 미치는 영향을 추정한다. 끝으로 계량화된 편익을 산정한다. 다만, 이 연구는 프랑스 사례를 근간으로 하여 국내 편익산정 단계에 적용하는 데에는 한계가 있다고 하였다.

장수은[23]은 교통시설 투자사업 타당성 분석에 있어서 통행시간 신뢰성을 평가하고 이를 계량화하여 편익산정에 반영하는 방안을 제시하였다. 지역간 철도의 경우 통행시간 신뢰성(정시성)을 열차운행계획 상 도착시간과 실제 도착시간의 차이로 정의하였으며, 도시철도는 열차운행간격의 지연으로 정의하였다. 또한, 정시성 평가지표는 운행거리 1km당 지연시간으로 정의하고, 고속철도는 운행거리 1km당 0.268초, 일반철도는 운행거리 1km당 0.384초의 지연이 생기는 것으로 분석하였다. 다만, 이 방법은 철도유형별 차이에 따른 지연시간의 차이만을 분석하였을 때 선로이용률에 따른 지연시간의 차이를 규명하고 있지는 못하다.

이 준[24]의 연구에서도 철도부문 혼잡 및 지체에 의한 사회적 비용을 산정하면서 열차의 계획도착시간과 실제도착시간의 차이

를 각 역별, 요일별로 집계하여 분석한 뒤 도착승객 수요를 해당역별로 지연시간에 곱하여 산정한 바 있다. 정시성에 따른 비용을 산정하는 방법은 본 연구와 동일하며, 다만 열차운행횟수에 따른 영향을 분석한 것은 아니어서 본 연구와는 차별화된다고 하겠다.

## 2.4 시사점

앞선 선행연구 고찰결과를 정리하면 다음의 표와 같다.

**Table 1** Railway capacity, delays, punctuality in previous studies

Topic	Previous Studies	Contributions
Railway capacity	Abril <i>et al.</i> [1] Burdett and Kozan [2] Kraft [3]	Presentation of the definition of railway capacity (Theoretical capacity / Practical capacity)
	Mattsson [4] Mitra <i>et al.</i> [6] Harrod [7]	Identification of factors affecting railway capacity
	Mattsson [4] Landex <i>et al.</i> [5] Kaas [8] Skjaeret [9]	Identification of relationship between capacity utilization and level of service (Punctuality)
Railway punctuality and delay	Murali <i>et al.</i> [10]	Estimation of delay in railway
	Olsson <i>et al.</i> [11] Heinz [12] NEA [13] Riksrevisionsverket [14] Harris [15] Banverket [16]	Identification of factors affecting punctuality in railway such as number of trains, number of passengers, weather conditions, etc.
	Gibson <i>et al.</i> [17] Yuan and Hansen [18] Vromans <i>et al.</i> [19]	Identification of relationship between capacity utilization and secondary(knock-on) delays
	Rietveld <i>et al.</i> [20] van Loon <i>et al.</i> [21]	Presentation of measures to evaluate the punctuality
Economic benefits of railway punctuality	Kroes <i>et al.</i> [22] J.S. Chang [23]	Suggestion of methodology to evaluate the benefit form punctuality improvement
	J. Lee <i>et al.</i> [24]	Calculation of social costs from delays in Korean railway

전술한 선행연구에서 철도 선로용량의 결정하는 주요한 변수로 열차구성, 열차운행횟수, 요구되는 정시성 수준 등을 언급하였고, 노선간 합류지점에서 병목구간이 발생하고 이 구간이 전체 노선의 선로용량을 결정짓게 되어 지체가 발생함을 확인하였다. 또한, 정시성을 악화시키고, 지체를 발생시키는 주요한 요인으로 열차운행횟수와 열차의 승하차인원을 꼽았다. 이에 따라 본 연구에서는 열차운행횟수와 지체와의 관계를 규명하며, 경부고속선과 기존 경부선이 합류하는 합류점인 금천구청역을 기준으로 경부선 서울~금천구청간 상행선을 대상으로 분석을 수행한다.

지체의 정의는 장수은[23]의 연구에서 정의한 바와 같이 열차운행계획 상 도착시간과 실제 지연도착시간의 차이로 정의하고, 선로이용률(열차운행횟수)에 따라 지체수준이 달라지는 것을 밝히고, 열차운행횟수 변화에 따라 지체수준을 계량화하여 편익화할 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

## 3. 경부선 고속철도 및 일반철도의 종착역 정시성 분석

### 3.1 분석 자료

본 연구에서는 장수은[23]의 연구에서와 같이 열차운영계획 상의 예상 도착시각과 실제 도착시각과의 차이를 지체로 정의하고,

경부선 서울~금천구청간을 대상으로 상행선 열차의 종착역의 지체수준을 분석하였다.

본 연구의 분석대상에서 하행선 열차를 제외한 것은 상행선은 금천구청역에서 고속열차와 일반열차간 합류가 이루어져 열차운행 횟수에 따른 지체가 발생되지만, 하행선은 금천구청역에서 분기가 되어 통행량이 분리되어 열차운행횟수에 따른 지체의 발생이 이루어지지 않기 때문이다.

분석 자료는 국토교통부(철도정책과) 협조를 통해 구득한 한국철도공사(관제처)의 자료이며, 대상기간은 2009년, 2011년, 2013년, 3개년도의 각각 3월과 6월로 국한되었다. 이는 지체발생에 있어서 열차운행횟수 이외의 요인인 고속선로 유지보수에 따른 열차운행시간 지연이나 기상조건에 따른 영향을 배제하기 위함이었다.

코레일에서 제공받은 원자료는 날짜별 및 열차별로 각 정차역의 계획도착시각과 실제도착시각, 계획출발시각과 실제출발시각 자료로 되어 있다. 이를 가공하여 날짜별, 열차별 종착역 계획도착시간과 실제도착시각의 차이를 가지고 지체를 분석하였다.

### 3.2 연도별/월별 도착시간 분포

고속열차의 종착역 도착지연시간을 분석해 보면, 열차운행횟수가 가장 적었던 2009년 6월에는 계획보다 일찍 도착한 열차를 포함하여 5분 미만의 지체를 보인 열차가 2,650회로 전체 고속열차 운행횟수 대비 98.3%의 비율을 나타내었다. 반면, 열차운행횟수가 가장 많았던 2013년 3월에는 5분 미만의 지체를 보인 열차가 2,841회로 85.1%의 비중을 차지해, 2009년 6월 대비 13% 가량 떨어졌다(Table 2, Fig. 1 참조).

Table 2. Arrival time distribution of high-speed trains by year/month.

Year/month	~-5 (mins)	-5~0 (mins)	0~5 (mins)	5~10 (mins)	10~15 (mins)	15~20 (mins)	20~25 (mins)	25~30 (mins)	30~ (mins)	Total
2009/03	18	295	2,316	38	12	8	1	2	6	2,696
	0.7%	10.9%	85.9%	1.4%	0.4%	0.3%	0.0%	0.1%	0.2%	100.0%
2009/06	27	246	2,377	36	3	3	1	1	2	2,696
	1.0%	9.1%	88.2%	1.3%	0.1%	0.1%	0.0%	0.0%	0.1%	100.0%
2011/03	1	156	2,768	168	75	5	2	0	7	3,182
	0.0%	4.9%	87.0%	5.3%	2.4%	0.2%	0.1%	0.0%	0.2%	100.0%
2011/06	3	190	2,308	335	59	7	1	2	1	2,906
	0.1%	6.5%	79.4%	11.5%	2.0%	0.2%	0.0%	0.1%	0.0%	100.0%
2013/03	0	199	2,642	435	40	6	0	2	13	3,337
	0.0%	6.0%	79.2%	13.0%	1.2%	0.2%	0.0%	0.1%	0.4%	100.0%
2013/06	0	308	2,542	345	25	2	0	1	0	3,223
	0.0%	9.6%	78.9%	10.7%	0.8%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%

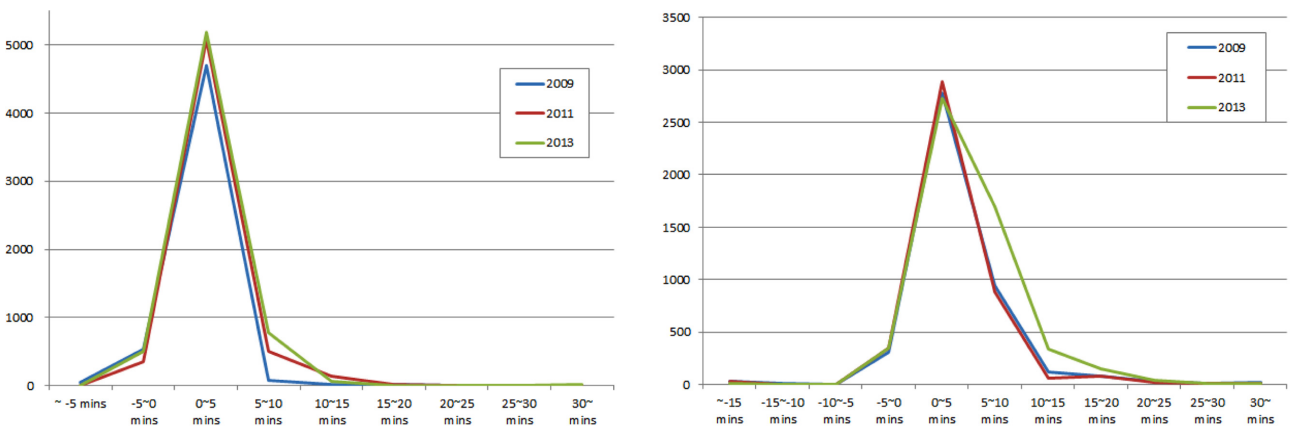


Fig. 1. Arrival time distributions of high-speed trains (left), conventional passenger trains (right) by year.

Table 3. Arrival time distribution of conventional passenger trains by year/month.

Year/month	~-15 (mins)	-15~-10 (mins)	-10~-5 (mins)	-5~0 (mins)	0~5 (mins)	5~10 (mins)	10~15 (mins)	15~20 (mins)	20~25 (mins)	25~30 (mins)	30+ (mins)	Total
2009/03	26	3	2	170	1,408	424	65	40	18	4	18	2,178
	1.2%	0.1%	0.1%	7.8%	64.6%	19.5%	3.0%	1.8%	0.8%	0.2%	0.8%	100.0%
2009/06	0	5	1	137	1,372	520	53	43	10	3	6	2,150
	0.0%	0.2%	0.0%	6.4%	63.8%	24.2%	2.5%	2.0%	0.5%	0.1%	0.3%	100.0%
2011/03	17	0	3	185	1,527	420	29	25	8	6	3	2,223
	0.8%	0.0%	0.1%	8.3%	68.7%	18.9%	1.3%	1.1%	0.4%	0.3%	0.1%	100.0%
2011/06	15	0	1	164	1,357	459	34	55	12	3	9	2,109
	0.7%	0.0%	0.0%	7.8%	64.3%	21.8%	1.6%	2.6%	0.6%	0.1%	0.4%	100.0%
2013/03	3	0	0	169	1,385	909	129	79	20	8	10	2,712
	0.1%	0.0%	0.0%	6.2%	51.1%	33.5%	4.8%	2.9%	0.7%	0.3%	0.4%	100.0%
2013/06	3	0	0	178	1,344	788	207	74	17	7	4	2,622
	0.1%	0.0%	0.0%	6.8%	51.3%	30.1%	7.9%	2.8%	0.6%	0.3%	0.2%	100.0%

일반열차의 종착역 도착지연시간을 분석결과도 동일하였는데, 2009년 6월에는 5분 미만의 지체를 보인 열차가 1,515회로 70.5%의 비중을 차지하였고, 2013년 3월에는 5분 미만의 지체를 보인 열차가 1,557회로 57.4%의 비중을 차지해, 2009년 6월 대비 13% 가량 떨어졌다(Table 3, Fig. 1 참조).

### 3.3 시간대별 도착시간 분포

앞서와 동일한 분석기간에 대하여 10분 이상 일찍 도착하는 열차를 제외하고, 나머지 모든 열차에 대하여 도착시간대별 지체발생수준을 분석하였다.

고속열차는 5분 미만 지체를 보이는 열차의 비율이 오전 7~11시에 95% 수준이지만, 상행선 열차가 집중되는 오후 4~8시대에 85% 미만으로 떨어지고 심야시간대에는 90% 이상 수준으로 다시 높아졌다. 반면, 일반열차는 오전 8~11시대에 80% 수준, 오후 12~2시대에 평균수준인 70% 수준을 보이고, 퇴근시간대인 저녁 6~11시대에 60% 수준으로 낮아졌다(부록 참조).

오전 9시대, 오후 3시대, 저녁 7시대만을 뽑아서 비교하면 다음의 그림과 같다. 고속열차는 오전 9시대에 정시성이 좋으며, 저녁 7시대에 떨어지지만, 일반열차는 오전시간대에서 오후, 저녁시간대로 이동할수록 정시성이 악화됨을 확인할 수 있다(Fig. 2 참조).

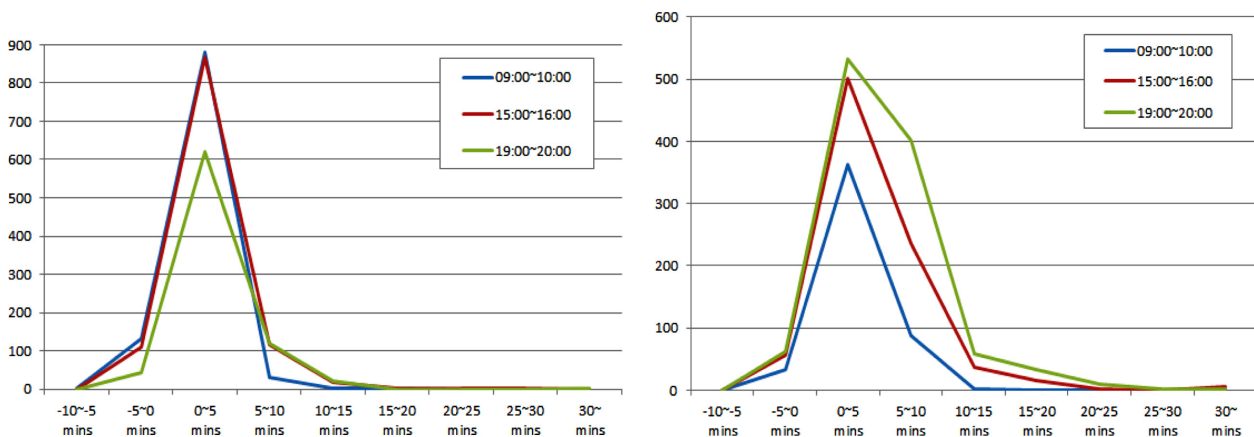


Fig. 2. Arrival time distributions of high-speed trains (left) and conventional passenger trains (right) by time of day.

### 4. 경부선 서울~금천구청간 열차운행횟수와 지체수준 분석

#### 4.1 연도별/월별 지체발생확률 및 평균지체

경부선 서울~금천구청 구간의 선로용량 부족에 따른 지체수준을 파악하기 위하여 제3장에서 검토하였던 자료 중에서 경부선 서울~금천구청간을 통과하지 않는 광명역 도착열차의 자료를 제외하고 분석하였다. 이에 따라 2009년 6월의 2,696개 자료 중 광명역 도착 고속열차 76개 자료가 제외되었다.

계획도착시각을 넘겨서 도착한 고속열차는 2009년 3월 68.5% 수준이었지만, 2011년 3월에는 76.8%로 높아졌고, 2013년 3월에는 93.6%의 비율을 차지하여 대부분의 열차가 계획도착시각보다 늦게 도착하는 것으로 나타났다. 다만 지연도착열차의 평균지체시간은 3~4분 정도에서 크게 변화하지 않고 있다. 일반열차도 2009년 3월에는 74.7%의 비율을 보였고, 2011년 3월에는 68.1%로 감소했다가 2013년 3월에는 93.5%로 높아졌다. 평균지체시간도 5~6분 정도로 분석되었다. 종합하면 열차운행빈도가 높아지면서 지연되는 열차의 비율이 높아짐을 알 수 있으며, 지체시간에는 큰 변화가 없는 것으로 분석되었다(Table 4 참조).

**Table 4.** Arrival delays of high-speed trains and conventional passenger trains by year/month.

Year/month	High-speed trains				Conventional passenger trains			
	Number of trains	No. of trains with arrival delay	Rate of trains with arrival delay(%)	Average arrival delays (min)	Number of trains	No. of trains with arrival delay	Rate of trains with arrival delay(%)	Average arrival delays (min)
2009/03	2,696	1,847	68.5	3.0	2,178	1,627	74.7	5.2
2009/06	2,620	1,907	72.8	2.8	2,150	1,632	75.9	5.0
2011/03	3,182	2,445	76.8	3.8	2,223	1,513	68.1	4.5
2011/06	2,906	2,291	78.8	4.2	2,109	1,509	71.6	5.1
2013/03	3,337	3,123	93.6	3.5	2,712	2,537	93.5	5.8
2013/06	3,223	2,898	89.9	2.6	2,622	2,439	93.0	5.6

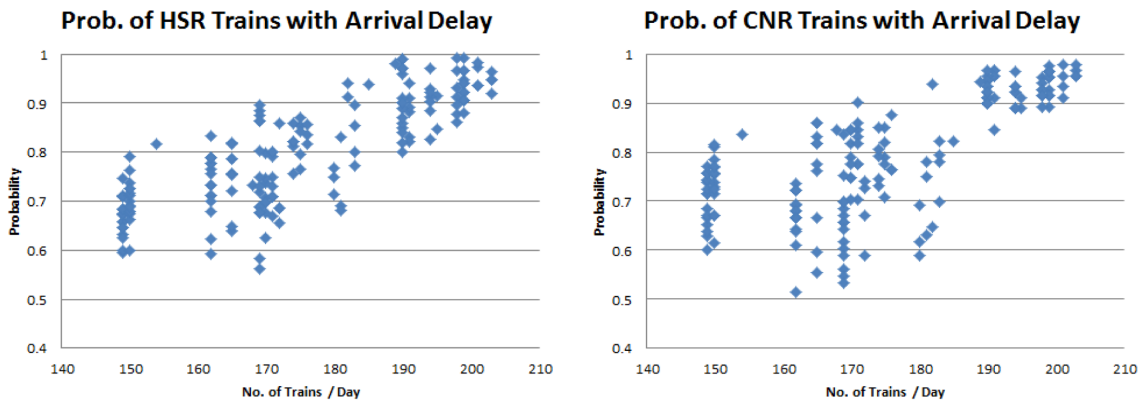
Source : Korail

#### 4.2 열차운행횟수와 지체발생확률간 관계

전절에서 열차운행횟수가 많았던 시기에 지체발생확률이 높아짐을 확인할 수 있었다. 이에 본 절에서는 경부선 서울~금천구청간의 전체 열차운행횟수에 따른 지체 발생확률을 도식화하였다(Fig. 3 참조).

경부선 서울~금천구청간 열차운행횟수가 편도 150회 수준일 때에는 고속열차의 지연발생확률이 70% 수준에 머무르지만, 170회를 넘을 경우 80% 수준으로 높아지고, 190회를 넘을 때에는 90% 수준까지 높아짐을 확인할 수 있다. 또한 200회를 넘을 경우에는 95% 이상의 열차가 지연을 겪게 되는 것으로 나타났다.

일반열차도 고속철도의 경우와 비슷하여, 열차운행횟수가 편도 150회 수준일 때에는 일반열차의 지연발생확률이 평균 70% 수준에 머무르지만, 170회를 넘을 경우 80% 수준으로 높아지고, 190회를 넘을 때에는 90% 이상의 열차가 지연을 경험하게 되는 것



**Fig. 3.** Relationship between probability of trains with arrival delay and total number of trains.

로 나타났다. 다만, 고속열차 보다는 산포도가 크게 나타나 열차운행횟수가 160~170회 수준에서 지체발생이 50% 수준까지 낮아지기도 하고, 반면 90%까지 높아지는 날도 존재하는 것으로 나타났다. 이는 지체가 열차운행횟수 이외의 다른 요인에 의해 발생하였기 때문으로 판단되며, 그럼에도 열차운행횟수가 증가할수록 지연도착열차의 비율이 높아짐은 명확하게 보인다.

열차종별 운행횟수와 지체발생확률간의 관계를 모형화하기 위하여 경부선 서울~금천구청간 열차운행횟수에 따른 지체발생확률을 선형회귀분석을 통하여 추정하였다. 선형회귀분석모형을 적용하기 위해서는 사전에 자료의 등분산성, 정규성에 대한 가정이 필요하다. 등분산성에 대한 가정은 잔차도를 통해 검토 가능한데, 자료 점들이 골고루 분포하여 등분산성 가정에 문제가 없었으며, 오차항이 정규분포를 따르는지 검토하는 데에는 정규확률도를 통해 확인할 수 있는데, 직선에 가까운 모습을 나타내어 정규분포로 판단할 수 있었다.

종속변수는 열차종별 지체발생확률로 보았고, 독립변수는 고속열차 운행횟수와 일반열차 운행횟수를 적용하였다. 분석자료는 부록 A1에 제시된 바와 같다. 물론 선행연구에서 살펴 본 바와 같이 정시성(지체발생)에 영향을 주는 요인으로는 열차종별 운행횟수 이외에 승객 수나 기상요인, 시설요인 등이 영향을 미칠 수 있다. 다만, 본 연구는 선로용량 확충사업 시행 시에 발생할 수 있는 정시성 개선 편익을 계량화하기 위해서 진행되었으므로 기상요인 등과 같이 타당성 조사 단계에서 변수로 입력이 불가능한 변수는 배제하였다. 또한, 승객 수 등 수요측면 요인은 반영 가능하지만, 코레일로부터 열차별 승객 수 자료 등을 구득할 수 없어서 반영하지 못하였다.

회귀모형은 고속열차의 지체발생확률 모형과 일반열차의 지체발생확률 모형으로 추정되었는데, 추정된 회귀모형이 통계적으로 유의한 지 검증하기 위하여 분산분석(F-검정)과 계수분석(t-검정)을 수행하였다. 회귀모형 전체의 유의성을 판단하기 위한 분산분석은 표본자료에서 다중회귀식을 통해 설명된 변동과 설명되지 않는 변동의 비율로 이루어지는 데 본 연구에서 추정된 두 모형 모두 F-통계량이 181.16, 129.76으로 나타나 통계적으로 유의함을 확인하였다. 종속변수와 독립변수 하나하나가 서로 선형관계를 맺고 있는지를 판단하기 위한 계수분석결과, 열차운행횟수 변수의 t-통계량은 모두 5.4 이상으로 나타나 유의수준 99.99% 이상에서 통계적으로 유의하게 나타났고, 상수도 모두 2.56 이상으로 분석되어 유의수준 98%에서 통계적으로 유의한 결과를 보였다.

또한, 열차운행횟수의 모수는 모두 (+)의 부호를 가져서 열차운행횟수의 증가에 따라 지체발생확률이 높아짐을 확인할 수 있다. 고속열차 지체발생확률 모형의 경우, 고속열차 운행횟수 모수는 0.0045, 일반열차 운행횟수 모수는 0.0063로 추정되어 고속열차 지체발생확률에 일반열차 운행횟수가 고속열차 운행횟수 보다 1.4배 가량 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한, 일반열차의 지체발생확률은 고속열차 운행횟수 모수는 0.0030, 일반열차 운행횟수 모수는 0.0085로 추정되었는데, 일반열차 운행횟수가 고속열차 운행횟수 보다 2.8배 가량 더 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었다(Table 5, 6 참조).

다만, 전반적으로 적합도 통계량은 그다지 높지 않은 것으로 분석되었다. 결정계수가 0.6~0.7 범위에 있는데, 이는 전반적으로 열차운행횟수별 지체발생확률의 분산이 크다는 점에서 기인하며, 더불어 열차운행횟수 이외에 지체발생에 영향을 미치는 다른 요인들을 반영하지 못하였기 때문으로 판단된다.

**Table 5.** Estimation results of regression models (probability of hsr trains with arrival delay).

Summary statistics					
Multiple correlation coefficient	0.817				
R-squared	0.668				
Adjusted R-squared	0.664				
Standard error	0.063				
Number of observations	183				
Analysis of variance					
Source	Degree of freedom	Sum of squares	Mean square	F-value	Pr > F
Model	2	1.4481	0.7241	181.16	7.8E-44
Error	180	0.7194	0.0040	-	-
Corrected total	182	2.1676	-	-	-
Variables	Parameters	Std.error	t-statistics	Pr >  t	
Constant	-0.125010	0.048872	-2.56	0.0113	
Number of HSR trains	0.004468	0.000449	9.96	6.91E-19	
Number of CNR trains	0.006346	0.000630	10.08	3.15E-19	



**Table 6.** Estimation results of regression models (probability of cnr trains with arrival delay).

Summary statistics					
Multiple correlation coefficient	0.768				
R-squared	0.590				
Adjusted R-squared	0.586				
Standard error	0.077				
Number of observations	183				
Analysis of Variance					
Source	Degree of freedom	Sum of squares	Mean square	F-value	Pr > F
Model	2	1.5448	0.7724	129.76	1.28E-35
Error	180	1.0714	0.0060	-	-
Corrected total	182	2.6162	-	-	-
Variables	Parameters	Std.error	t-statistics	Pr >  t	
Constant	-0.152430	0.059640	-2.56	0.01142	
Number of HSR trains	0.002992	0.000548	5.46	1.53E-07	
Number of CNR trains	0.008549	0.000768	11.13	3.18E-22	

**4.3 열차운행횟수 변화에 따른 정시성 편익 산정 방안**

이상에서 열차종별 운행횟수에 따른 지체발생확률을 선형회귀분석을 통하여 모형화하였다. 본 절에서는 앞선 모형구축결과를 기초로 정시성 개선 편익의 계량화 방안을 검토한다.

기존 교통시설 투자평가지침에서 철도부문 통행시간 신뢰성 편익은 고속철도, 일반철도, 도시철도 등 열차종별로 통행거리에 따른 평균적인 지체를 산정한 뒤, 수단별 통행량 변화에 따라 정시성 변화에 따른 통행시간 신뢰성 편익을 산정하도록 한다. 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$TRCS = TRC_{\text{미시행}} - TRC_{\text{시행}} \tag{1}$$

$$TCS = \sum_l \sum_k \left( \frac{1}{3600} \cdot R_l^k \times P^k \times D_l \times Q_l^k \right) \tag{2}$$

- 여기서, TRCS: 통행시간 신뢰성(정시성) 개선 편익
- TRC: 통행시간 신뢰성(정시성) 비용
- $R_l^k$ : 해당 링크 l에서 열차등급 k의 통행시간 신뢰성(정시성) 지표(초/km)
- $P^k$ : 열차등급 k의 통행시간 신뢰성 가치(원 · 인/시)
- $D_l$ : 해당 링크 l의 길이(km)
- $Q_l^k$ : 해당 링크 l에서 열차등급 k의 통행량(인/시)
- k: 열차등급(고속철도, 일반철도)

그러나 이러한 방법은 동일한 열차 종류 내에서도 열차운행횟수 변화에 따른 정시성 변화를 반영할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 앞서 제시한 회귀분석모형을 이용하여 열차운행횟수에 따른 지체발생확률을 추정하고, 여기에 평균 지체시간(도착 지연시간)을 곱하여 총 지체시간을 산정하도록 하였다. 그리고 최종적인 통행시간 신뢰성(정시성) 비용은 총 지체시간과 해당구간 통행량, 통행시간 신뢰성 가치를 곱하여 산정하였다. 이를 기초로 개별 사업 시행에 따른 정시성 개선편익은 식 (1)과 같이 사업미시행시 정시성 비용에서 사업시행 시 정시성 비용을 차감하여 산정토록 한다. 이를 정리하면 다음의 수식과 같다.

$$TCS = \sum_k \left( P^k \times PROB_l^k \times \frac{DT_l^k}{60} \times Q_l^k \right) \tag{3}$$

여기서, TRC: 통행시간 신뢰성(정시성) 비용

$P^k$ : 열차등급  $k$ 의 통행시간 신뢰성 가치(원 · 인/시)

$PROB_l^k$ : 해당 구간  $l$ 에서 열차등급  $k$ 의 지체발생확률

$$PROB_l^{HSR} = -0.125010 + 0.004468 \cdot NHSR + 0.006346 \cdot NCNR$$

$$PROB_l^{CNR} = -0.152430 + 0.002992 \cdot NHSR + 0.008549 \cdot NCNR$$

NHSR: 해당 구간  $l$ 에서 고속열차 운행횟수(회/일)

NCNR: 해당 구간  $l$ 에서 일반열차 운행횟수(회/일)

$Q^k$ : 해당 구간  $l$ 에서 열차등급  $k$ 의 통행량(인/일)

$DT^k$ : 해당 구간  $l$ 에서 열차등급  $k$ 의 평균지체시간(분)

$Q^k$ : 해당 구간  $l$ 에서 열차등급  $k$ 의 통행량(인/일)

$k$ : 열차등급(고속철도, 일반철도)

본 연구에서는 제시한 방법론의 사례분석을 위하여 서울~금천구청간 선로용량 확충사업에 대하여 적용하여 보았다. 서울~금천구청간 선로용량 확충사업은 서울~광명간 고속열차 전용선로를 확보하는 것으로 사업시행 시 고속열차와 일반열차의 운행은 별도의 선로에서 운행이 이루어지게 된다.

사업 미시행시 고속철도 열차운행횟수는 『수도권 고속철도 건설사업 실시설계 보고서 중 열차운영계획』 (한국철도시설공단, 2010)에서 제시한 수치를 적용하였으며, 주말 열차운행횟수는 해당 보고서에 별도로 제시되지 않아 현재의 주중 대비 주말 열차운행횟수 비율의 차이를 반영하여 12% 정도 추가하는 것으로 가정하였다. 일반열차 운행횟수는 현재와 동일하다고 가정하였고, 사업시행 후 고속 및 일반열차의 운행횟수는 사업 미시행 시와 동일하지만, 고속전용선에는 고속열차만, 기존 경부선에는 일반열차만 운행하는 것으로 가정하였다.

지체발생확률을 추정하기 위하여 제4장에서 제시한 회귀분석식에 적용하였다. 선로용량 확충사업에 따라 신설되는 고속전용선(서울~광명구간)에서 고속철도의 지체발생확률은 일반열차 운행이 없어지면서 주중에는 사업미시행 시 89%에서 사업시행 시 37%로 감소하고, 주말은 99%에서 42%로 감소하는 것으로 추정되었다. 또한, 기존 경부선 일반철도의 지체발생확률은 고속열차 운행이 없어지면서 주중 89%에서 56%로 줄어들며, 주말은 99%에서 62%로 감소하는 것으로 산정되었다.

평균지체시간은 <표 4>에서 보는 바와 같이 열차운행횟수에 따라 크게 다르지 않으므로 평균값을 적용하였다. 고속철도 평균지체는 3.32분, 일반철도 평균지체는 5.20분을 적용하였다.

Table 7. Benefits of improved punctuality from the capacity increasing project in seoul~geumcheongu office.

Classifications		Newly constructed high-speed rail line (Seoul~Gwangmyeong)		Existing gyeongbu line (Seoul~Geumcheongu-office~Suwon)	
		Weekdays	Weekends	Weekdays	Weekends
No. of trains per day (HSR/CNR)	Do-nothing	110 / 83	123 / 90	110 / 83	123 / 90
	Do-action	110 / 0	123 / 0	0 / 83	0 / 90
Prob. of trains with arrival delay	Do-nothing	89.32%	99.57%	88.63%	98.50%
	Do-action	36.65%	42.46%	55.71%	61.70%
No. of in-bound passengers (passengers/day)	2020	38,448	45,697	32,658	47,614
	2030	38,381	46,028	38,690	57,237
	2040	36,522	42,865	37,448	55,696
Total reduced delay times (hrs/day)	2020	1,121	1,444	932	1,519
	2030	1,119	1,455	1,104	1,826
	2040	1,064	1,355	1,068	1,776
Total benefits (10 <sup>6</sup> won/ year)	2020	2,468		1,711	
	2030	2,471		2,038	
	2040	2,334		1,977	

지체발생확률에 평균지체와 서울~금천구청간 상행선 통과량, 통행시간 신뢰성 가치를 곱하여 정시성 비용을 구하고, 사업미시행 시에서 사업시행시 비용을 차감하여 편익을 산정하였다. 해당구간 상행선 통과량은 『2층 고속열차 수요 및 경제성 조사분석』(한국철도기술연구원, 2015)에서 추정된 값을 적용하였으며, 통행시간 신뢰성 가치는 기존 교통시설 투자평가지침에 제시된 값을 적용하였다.

지침 상에서 제시한 통행시간 신뢰성 가치는 고속철도는 시간당 5,115원, 일반철도는 시간당 3,913원인데, 원단위 산정시기와 편익 산정시기의 시기적 차이를 보정하기 위하여 정시성 가치를 물가상승률로 보정하여 적용하였다.

위의 방법론에 따라 서울~금천구청간 선로용량 확충사업 시행에 따른 정시성 개선 편익은 연간 42~45억원 가량으로 산정되었으며, 이 중 고속철도의 정시성 개선에 따른 편익이 23~25억원 규모였으며, 일반철도 정시성 개선에 따른 편익은 17~20억원 규모로 추정되었다(Table 7 참조).

## 5. 결 론

본 연구에서는 철도 선로용량 확충사업의 경제적 편익으로 열차운행횟수 증가에 따른 편익 이외에 열차운행횟수 변화에 따른 정시성 개선 편익을 계량화할 수 있는 방안을 제시하고자 하였다.

우선 선형연구 고찰을 통해 철도 선로용량의 결정하는 주요한 변수로 열차구성, 열차운행횟수, 요구되는 정시성 수준 등이 있고, 노선간 합류지점에서 병목구간이 발생하고 이 구간이 전체 노선의 선로용량을 결정짓게 됨을 확인하였다. 또한, 정시성을 악화시키고 지체를 발생시키는 주요한 요인으로 열차운행횟수와 열차의 수요규모(승하차인원)가 있음을 살펴보았다.

2004년 경부고속철도 개통 이후 대표적인 선로용량 부족구간이 되고 있는 경부선 서울~금천구청 구간을 분석대상으로 연도별, 월별, 시간대별 열차지체의 발생수준을 살펴보았고, 고속 및 일반열차 운행횟수와 지체발생확률간의 관계를 선형회귀분석으로 모형화하였다.

모형구축결과, 모형은 통계적으로 유의한 것으로 분석되었고, 열차운행횟수의 모수는 모두 (+)의 부호를 가져서 열차운행횟수의 증가에 따라 지체발생확률이 높아짐을 확인할 수 있었다. 또한, 고속열차 지체발생확률에 일반열차 운행횟수가 고속열차 운행횟수보다 1.4배 더 큰 영향을 미치고, 일반열차 지체발생확률에도 2.8배 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이는 경부고속선과 기존 경부선이 합류하는 금천구청역에서 고속열차에게 우선권을 주는 관제 방식에서 기인하는 것으로 판단된다. 다만, 개별변수의 통계적 유의성에도 불구하고 모형의 전체적인 결정계수는 0.6~0.7 범위에 머물렀는데, 이는 전반적으로 열차운행횟수별 지체발생확률의 분산이 크다는 점에서 기인하며, 더불어 열차운행횟수 이외에 지체발생에 영향을 미치는 다른 요인들을 반영하지 못하였기 때문으로 판단된다.

고속 및 일반열차의 운행횟수 변화에 따른 정시성 개선 편익을 계량화하기 위한 방법론을 제시하였다. 선형회귀분석을 통해 추정된 지체발생확률에 평균 지체시간과 통과수요를 곱하고 다시 통행시간 신뢰성 가치를 곱하여 편익을 산정할 수 있도록 하였다. 제시된 방법론을 기초로 경부선 서울~금천구청간 선로용량 확충사업(3복선전철화) 사업에 대하여 사례분석을 수행하였는데, 해당 사업 시행 시 고속열차는 지체발생확률이 50% 가량 감소하고, 일반열차도 30% 가량 낮아지는 것으로 분석되었다. 이에 따른 편익은 연간 42~45억원 규모에 이르는 것으로 추정되었다.

물론 본 연구는 열차종별 운행횟수와 지체발생확률간의 관계를 밝힌 연구로서 여러 가지 한계점을 갖고 있다. 향후 보완되어야 할 내용을 정리하면 다음과 같다. 우선 다른 노선의 열차운행자료를 통해 본 모형의 구축결과를 검증하는 것이 필요하지만, 다른 선로용량 부족구간인 중앙선 청량리~망우구간의 경우 열차의 구성이 상이하여 적용하지 못하였다. 향후 수도권 고속철도 개통 이후에 수서~동탄구간에 대하여 검증을 해 볼 수 있을 것으로 기대된다. 둘째, 독립변수인 열차운행횟수가 1일 편도 140회 미만일 때의 자료를 추가하여 선형회귀분석모형을 구축한다면, 통계적 적합도를 높일 수 있을 것으로 기대된다. 셋째, 열차운행횟수 외에 각 열차별 승하차 인원(수요규모) 등 열차 지연에 영향을 미치는 다른 요인을 함께 반영하여 모형화하는 것이 필요하다. 동시에 자료의 분석기간을 더욱 확대하여 기상조건, 선로유지보수 작업 등에 대한 영향을 동시에 고려하는 것도 필요하다고 하겠다. 다만, 이를 위해서는 철도운영자(코레일)의 자료협조가 필수적이라고 하겠다.

그럼에도 본 연구의 결과를 통해 선로용량 부족구간에 대한 용량확충사업의 편익을 제고시킬 수 있을 것으로 기대되며, 이러한 사업의 경제적 타당성을 확보하는 데에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

## 후 기

이 논문은 2014년도 한국교통대학교 교내학술연구비의 지원을 받아 수행한 연구임.

## References

- [1] M. Abril, F Barber, L. Ingolotti, M.A. Salido, *et al.* (2008) An assessment of railway capacity, *Transportation Research Part E*, 44, pp. 774-806.
- [2] R.L. Burdett, E. Kozan (2006) Techniques for absolute capacity determination in railways, *Transportation Research Part B*, 40, pp. 616-632.
- [3] E.R. Kraft, E (1982) Jam capacity of single track rail lines, *Proceedings of Transportation Research Forum*, 23(1), pp. 461-472.
- [4] L.G. Mattsson (2007) Railway Capacity and Train Delay Relationships, *Critical Infrastructure: Reliability and Vulnerability*, Springer Berlin Heidelberg, New York, pp. 129-150.
- [5] A. Landex, A.H. Kaas, B. Schittenhelm, J. Schneider-Tilli (2006) Practical use of the UIC 406 capacity leaflet by including timetable tools in the investigations, *Computers in Railway X*, pp. 643-652.
- [6] S. Mitra, D. Tolliver, S. Mitra (2010) Estimation of railroad capacity using parametric methods, *Journal of the Transportation Research Forum*, 49(2), pp. 111-126
- [7] S. Harrod (2009) Capacity factors of a mixed speed railway network, *Transportation Research Part E*, 45, pp. 830-841.
- [8] A. H. Kaas (2000) Punctuality model for railways, *Proceedings of the 7th International conference on Computers in Railways*, Bologna, Italy, pp. 853-860.
- [9] J. Skjaeret (2002) *Kapasitetsberegninger*, En revisjon, NSB Bane Ingeniørtjenesten, Oslo, Norway, pp. 47-50.
- [10] P. Murali, M. Dessouky, F. Ordonez, K. Palmer (2010) A delay estimation technique for single and double track railroad, *Transportation Research Part E*, 46, pp. 483-495.
- [11] N.O.E. Olsson, H. Haugland (2004) Influencing factors on train punctuality - results from some Norwegian studies, *Transport Policy*, 11, pp. 387-397.
- [12] W. Heinz (2000) *Passagerutbyte I tåg. Mätningar av av-och påstigningstider samt ansats till modell för att beskriva samband*, TRITA IP AR 00-86, Royal Institute of Technology, Sweden.
- [13] NEA (2003) *BOB Railway Case - Benchmarking Passenger Transport in Railways*, NEA Transport Research And Training, Rijswijk, The Netherlands, pp. 37-46.
- [14] Riksrevisionsverket (1986) *Tågtrafiken-Punktlighet, Revisionsrapport*, Dnr. 1986:1091, Riksrevisionsverket, Stockholm, Sweden.
- [15] N.G. Harris (1992) *Planning Passenger Railways: A Handbook*, Transport Publishing Co. UK, pp. 130-142.
- [16] Banverket (2001) *Tågtrafiken-Punktlighet och förseningar, Förstudie FoU-projekt 2001*, Rapport 2001:1, Banverket, Borlänge, Sweden.
- [17] S. Gibson, G. Cooper, B. Ball (2002) The evolution of capacity charges on the UK rail network, *Journal of Transport Economics and Policy*, 36(2), pp. 341-354.
- [18] J. Yuan, I.A. Hansen (2007) Optimizing capacity utilization of stations by estimating knock-on train delays, *Transportation Research Part B*, 41, pp. 202-217.
- [19] M. Vromans, R. Dekker, L. Kroon (2006) Reliability and heterogeneity of railway services, *European Journal of Operational Research*, 172, pp. 647-655.
- [20] P. Rietveld, F.R. Bruinsma, D.J. Van Vuuren (2001) Coping with unreliability in public transportation chains: a case study for Netherlands, *Transportation Research Part A*, 35, pp. 539-559.
- [21] R. van Loon, P. Rietveld, M. Brons (2011) Travel time reliability impacts on railway passenger demand: a revealed preference analysis, *Journal of Transport Geography*, 19, pp. 917-925.
- [22] E. Kroes, H. Duchateau, L. Phillipart, M. Kouwenhoven (2006) Benefits of punctuality improvements for the Paris suburban railway network, Technical report, RAND Europe.
- [23] J.S. Chang (2010) Assessing travel time reliability in transport appraisal, *Journal of Transport Geography*, 18, pp. 419-425.
- [24] J. Lee, D.S. Moon, S.J. Park (2009) Assessment of railway delay costs, *Proceedings of 2009 Autumn Conference of the Korean Society for Railway*, Jeju, Korea, pp. 2938-2944.

(Received 8 May 2015; Revised 10 June 2015; Accepted 13 July 2015)

---

**Jang-Ho Lee:** transwho@ut.ac.kr

Dept. of Railroad Facility Engineering, Korea National University of Transportation,  
157 Cheoldobangmulgwan-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do, 437-763, Korea

부 록

A1. 분석자료

Date	No. of HSR trains	No. of CNR trains	Prob. of HSR with arrival delay	Prob. of CNR with arrival delay	Date	No. of HSR trains	No. of CNR trains	Prob. of HSR with arrival delay	Prob. of CNR with arrival delay
2009-3-1	97	71	0.7320	0.8451	2009-6-1	81	69	0.6790	0.7681
2009-3-2	80	69	0.7125	0.7391	2009-6-2	81	81	0.5926	0.6420
2009-3-3	79	70	0.6329	0.7571	2009-6-3	81	81	0.7654	0.6914
2009-3-4	79	70	0.6582	0.6286	2009-6-4	81	81	0.6790	0.6790
2009-3-5	79	70	0.6835	0.7429	2009-6-5	94	81	0.7660	0.7901
2009-3-6	94	71	0.6383	0.7606	2009-6-6	100	71	0.7900	0.8310
2009-3-7	100	71	0.7100	0.8451	2009-6-7	99	71	0.7980	0.7465
2009-3-8	99	71	0.6768	0.8451	2009-6-8	81	69	0.7901	0.7391
2009-3-9	80	69	0.6750	0.6522	2009-6-9	80	70	0.6750	0.7857
2009-3-10	79	70	0.6582	0.6000	2009-6-10	80	70	0.7000	0.6714
2009-3-11	79	70	0.7089	0.7571	2009-6-11	80	70	0.6625	0.7286
2009-3-12	79	70	0.5949	0.6857	2009-6-12	94	71	0.7872	0.8169
2009-3-13	94	71	0.7553	0.8592	2009-6-13	100	71	0.7500	0.8169
2009-3-14	100	71	0.6700	0.7746	2009-6-14	99	71	0.6263	0.7042
2009-3-15	99	71	0.7071	0.7465	2009-6-15	81	69	0.6790	0.7536
2009-3-16	80	69	0.6250	0.6667	2009-6-16	80	70	0.7250	0.7143
2009-3-17	79	70	0.6709	0.7571	2009-6-17	80	70	0.7125	0.7571
2009-3-18	79	70	0.7089	0.7143	2009-6-18	80	70	0.7375	0.7571
2009-3-19	79	70	0.6835	0.7143	2009-6-19	94	71	0.8191	0.8592
2009-3-20	94	71	0.7553	0.7746	2009-6-20	100	71	0.8000	0.8592
2009-3-21	100	71	0.7100	0.7042	2009-6-21	99	71	0.6970	0.7887
2009-3-22	99	71	0.7374	0.8451	2009-6-22	81	69	0.7160	0.8116
2009-3-23	80	69	0.6750	0.6377	2009-6-23	80	70	0.6000	0.6143
2009-3-24	79	70	0.6456	0.6714	2009-6-24	80	70	0.7625	0.8143
2009-3-25	79	70	0.6835	0.7429	2009-6-25	80	70	0.7250	0.7714
2009-3-26	79	70	0.7468	0.7571	2009-6-26	94	71	0.7872	0.8169
2009-3-27	94	71	0.6489	0.8310	2009-6-27	100	71	0.8000	0.9014
2009-3-28	100	71	0.7300	0.7746	2009-6-28	99	71	0.7475	0.7746
2009-3-29	99	71	0.6970	0.8169	2009-6-29	81	69	0.6914	0.7246
2009-3-30	80	69	0.6000	0.7246	2009-6-30	80	70	0.6875	0.6714
2009-3-31	79	70	0.6456	0.7714					
2011-3-1	96	73	0.7500	0.6575	2011-6-1	90	72	0.6222	0.5139
2011-3-2	96	73	0.5833	0.6164	2011-6-2	90	72	0.7111	0.6667
2011-3-3	96	73	0.6875	0.6027	2011-6-3	104	72	0.8173	0.7639
2011-3-4	110	73	0.8545	0.7808	2011-6-4	108	67	0.8704	0.8507
2011-3-5	113	68	0.6903	0.6324	2011-6-5	107	67	0.8131	0.7910
2011-3-6	112	68	0.7679	0.6912	2011-6-6	93	61	0.8172	0.8361
2011-3-7	99	73	0.6869	0.6712	2011-6-7	90	72	0.8333	0.7361
2011-3-8	96	73	0.7188	0.5616	2011-6-8	90	72	0.7889	0.6944

A1. 분석자료 (Continued)

Date	No. of HSR trains	No. of CNR trains	Prob. of HSR with arrival delay	Prob. of CNR with arrival delay	Date	No. of HSR trains	No. of CNR trains	Prob. of HSR with arrival delay	Prob. of CNR with arrival delay
2011-3-9	96	73	0.6771	0.5479	2011-6-9	90	72	0.7556	0.6667
2011-3-10	96	73	0.6875	0.5342	2011-6-10	103	72	0.8544	0.7083
2011-3-11	110	73	0.8000	0.6986	2011-6-11	107	67	0.8224	0.8507
2011-3-12	113	68	0.6814	0.7500	2011-6-12	107	67	0.7570	0.7313
2011-3-13	112	68	0.7143	0.5882	2011-6-13	93	72	0.7204	0.5556
2011-3-14	99	73	0.6869	0.5890	2011-6-14	90	72	0.7111	0.6806
2011-3-15	96	73	0.6771	0.6712	2011-6-15	90	72	0.7778	0.6667
2011-3-16	96	73	0.7292	0.6849	2011-6-16	90	72	0.7000	0.6806
2011-3-17	96	73	0.5625	0.5890	2011-6-17	104	72	0.8558	0.7639
2011-3-18	110	73	0.7727	0.8219	2011-6-18	108	67	0.7963	0.7761
2011-3-19	113	68	0.8319	0.7794	2011-6-19	107	67	0.8224	0.7463
2011-3-20	112	68	0.7500	0.6176	2011-6-20	93	72	0.8172	0.6667
2011-3-21	99	73	0.6566	0.7260	2011-6-21	90	72	0.7333	0.7222
2011-3-22	96	73	0.8021	0.6575	2011-6-22	90	72	0.7778	0.7222
2011-3-23	96	73	0.8854	0.6986	2011-6-23	90	72	0.7889	0.7222
2011-3-24	96	73	0.8958	0.8356	2011-6-24	104	72	0.8365	0.8750
2011-3-25	112	73	0.9375	0.8219	2011-6-25	108	67	0.8426	0.8209
2011-3-26	115	68	0.8957	0.7941	2011-6-26	107	67	0.8598	0.8060
2011-3-27	114	68	0.9123	0.6471	2011-6-27	93	72	0.7527	0.5972
2011-3-28	99	73	0.8586	0.7397	2011-6-28	90	72	0.7333	0.6667
2011-3-29	96	73	0.8646	0.7534	2011-6-29	90	72	0.7889	0.6389
2011-3-30	96	73	0.8750	0.6438	2011-6-30	90	72	0.7889	0.6111
2011-3-31	96	73	0.8646	0.6986					
2013-3-1	111	83	0.9279	0.9639	2013-6-1	116	83	0.9397	0.9639
2013-3-2	116	83	0.9052	0.8916	2013-6-2	115	83	0.9130	0.9398
2013-3-3	116	83	0.9052	0.9277	2013-6-3	104	90	0.9038	0.9222
2013-3-4	105	90	0.8476	0.8889	2013-6-4	100	90	0.9000	0.9333
2013-3-5	101	90	0.8317	0.9111	2013-6-5	100	90	0.9700	0.9667
2013-3-6	101	90	0.8218	0.8444	2013-6-6	100	82	0.9400	0.9390
2013-3-7	101	90	0.9406	0.9667	2013-6-7	113	90	0.9646	0.9556
2013-3-8	111	90	0.9369	0.9333	2013-6-8	116	83	0.9655	0.9518
2013-3-9	116	83	0.9397	0.9518	2013-6-9	115	83	0.8609	0.9277
2013-3-10	116	83	0.9483	0.9157	2013-6-10	104	90	0.8846	0.8889
2013-3-11	105	90	0.9143	0.9111	2013-6-11	100	90	0.9100	0.9111
2013-3-12	101	90	0.8812	0.9556	2013-6-12	100	90	0.8500	0.9111
2013-3-13	101	90	0.9109	0.9667	2013-6-13	100	90	0.8600	0.9000
2013-3-14	101	90	0.8911	0.9556	2013-6-14	113	90	0.9469	0.9667
2013-3-15	111	90	0.9369	0.9778	2013-6-15	116	83	0.9052	0.9639
2013-3-16	116	83	0.9224	0.9639	2013-6-16	115	83	0.9304	0.8916
2013-3-17	116	83	0.9224	0.9518	2013-6-17	104	90	0.9231	0.9222
2013-3-18	104	90	0.9135	0.8889	2013-6-18	100	90	0.8900	0.9000

A1. 분석자료 (Continued)

Date	No. of HSR trains	No. of CNR trains	Prob. of HSR with arrival delay	Prob. of CNR with arrival delay	Date	No. of HSR trains	No. of CNR trains	Prob. of HSR with arrival delay	Prob. of CNR with arrival delay
2013-3-19	100	90	0.9700	0.9444	2013-6-19	100	90	0.8700	0.9000
2013-3-20	100	90	0.9900	0.9222	2013-6-20	100	90	0.9000	0.9222
2013-3-21	100	90	0.9600	0.9111	2013-6-21	113	90	0.9204	0.9778
2013-3-22	111	90	0.9730	0.9556	2013-6-22	116	83	0.9052	0.9157
2013-3-23	116	83	0.9914	0.9639	2013-6-23	115	83	0.8783	0.9157
2013-3-24	115	83	0.9652	0.9277	2013-6-24	104	90	0.8269	0.9333
2013-3-25	104	90	0.9712	0.9333	2013-6-25	100	90	0.8200	0.9000
2013-3-26	100	90	0.9700	0.9556	2013-6-26	100	90	0.8000	0.9333
2013-3-27	100	90	0.9900	0.9444	2013-6-27	100	90	0.8400	0.9222
2013-3-28	100	89	0.9800	0.9438	2013-6-28	113	90	0.9469	0.9556
2013-3-29	111	90	0.9820	0.9111	2013-6-29	116	83	0.8793	0.9639
2013-3-30	116	83	0.9655	0.9759	2013-6-30	115	83	0.8957	0.9157
2013-3-31	115	83	0.9913	0.9518					

A2. 일반열차 시간대별 도착분포

Table A2. Arrival time distributions of high-speed trains by time of day.

Time of day	-10~-5 (mins)	-5~0 (mins)	0~5 (mins)	5~10 (mins)	10~15 (mins)	15~20 (mins)	20~25 (mins)	25~30 (mins)	30~ (mins)	Total
01:00~07:00	1	47	177	24	0	1	0	0	0	250
	0.4%	18.8%	70.8%	9.6%	0.0%	0.4%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
07:00~08:00	0	62	679	17	4	0	0	0	1	763
	0.0%	8.1%	89.0%	2.2%	0.5%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	100.0%
08:00~09:00	0	32	958	46	8	3	0	0	1	1,048
	0.0%	3.1%	91.4%	4.4%	0.8%	0.3%	0.0%	0.0%	0.1%	100.0%
09:00~10:00	3	131	882	31	2	1	0	0	0	1,050
	0.3%	12.5%	84.0%	3.0%	0.2%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
10:00~11:00	0	52	593	40	4	1	0	0	0	690
	0.0%	7.5%	85.9%	5.8%	0.6%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
11:00~12:00	1	95	851	27	1	2	1	1	3	982
	0.1%	9.7%	86.7%	2.7%	0.1%	0.2%	0.1%	0.1%	0.3%	100.0%
12:00~13:00	0	34	865	50	12	0	0	0	5	966
	0.0%	3.5%	89.5%	5.2%	1.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.5%	100.0%
13:00~14:00	0	98	807	39	4	1	0	1	4	954
	0.0%	10.3%	84.6%	4.1%	0.4%	0.1%	0.0%	0.1%	0.4%	100.0%
14:00~15:00	0	102	752	70	14	4	0	3	4	949
	0.0%	10.7%	79.2%	7.4%	1.5%	0.4%	0.0%	0.3%	0.4%	100.0%
15:00~16:00	0	110	868	118	18	1	1	1	0	1,117
	0.0%	9.8%	77.7%	10.6%	1.6%	0.1%	0.1%	0.1%	0.0%	100.0%

Table A2. Continued.

Time of day	-10~-5 (mins)	-5~0 (mins)	0~5 (mins)	5~10 (mins)	10~15 (mins)	15~20 (mins)	20~25 (mins)	25~30 (mins)	30~ (mins)	Total
16:00~17:00	0	29	896	152	24	3	0	1	0	1,105
	0.0%	2.6%	81.1%	13.8%	2.2%	0.3%	0.0%	0.1%	0.0%	100.0%
17:00~18:00	0	80	793	123	19	1	0	0	1	1,017
	0.0%	7.9%	78.0%	12.1%	1.9%	0.1%	0.0%	0.0%	0.1%	100.0%
18:00~19:00	0	60	773	87	26	7	2	0	4	959
	0.0%	6.3%	80.6%	9.1%	2.7%	0.7%	0.2%	0.0%	0.4%	100.0%
19:00~20:00	0	42	620	119	22	0	0	0	1	804
	0.0%	5.2%	77.1%	14.8%	2.7%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	100.0%
20:00~21:00	0	82	968	85	18	1	0	0	0	1,154
	0.0%	7.1%	83.9%	7.4%	1.6%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
21:00~22:00	0	25	867	83	15	0	0	0	2	992
	0.0%	2.5%	87.4%	8.4%	1.5%	0.0%	0.0%	0.0%	0.2%	100.0%
22:00~23:00	0	70	1,003	152	14	0	0	0	0	1,239
	0.0%	5.6%	81.0%	12.3%	1.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
23:00~24:00	0	50	623	37	4	1	1	1	1	718
	0.0%	7.0%	86.8%	5.2%	0.6%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	100.0%
24:00~01:00	0	193	978	57	5	4	0	0	2	1,239
	0.0%	15.6%	78.9%	4.6%	0.4%	0.3%	0.0%	0.0%	0.2%	100.0%
Total	5	1,394	14,953	1,357	214	31	5	8	29	17,996
	0.0%	7.7%	83.1%	7.5%	1.2%	0.2%	0.0%	0.0%	0.2%	100.0%

### A3. 일반열차 시간대별 도착분포

Table A3. Arrival time distributions of conventional passenger trains by time of day.

Time	-10~-5 (mins)	-5~0 (mins)	0~5 (mins)	5~10 (mins)	10~15 (mins)	15~20 (mins)	20~25 (mins)	25~30 (mins)	30~ (mins)	Total
01:00~07:00	0	92	628	360	95	55	30	8	7	1,275
	0.0%	7.2%	49.3%	28.2%	7.5%	4.3%	2.4%	0.6%	0.5%	100.0%
07:00~08:00	0	24	212	28	1	1	0	0	0	266
	0.0%	9.0%	79.7%	10.5%	0.4%	0.4%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
08:00~09:00	0	78	538	104	5	3	0	1	2	731
	0.0%	10.7%	73.6%	14.2%	0.7%	0.4%	0.0%	0.1%	0.3%	100.0%
09:00~10:00	0	33	363	87	3	0	0	1	3	490
	0.0%	6.7%	74.1%	17.8%	0.6%	0.0%	0.0%	0.2%	0.6%	100.0%
10:00~11:00	0	18	383	129	7	4	1	1	0	543
	0.0%	3.3%	70.5%	23.8%	1.3%	0.7%	0.2%	0.2%	0.0%	100.0%
11:00~12:00	0	38	378	92	8	1	3	0	0	520
	0.0%	7.3%	72.7%	17.7%	1.5%	0.2%	0.6%	0.0%	0.0%	100.0%
12:00~13:00	1	66	742	278	48	23	7	1	0	1,166
	0.1%	5.7%	63.6%	23.8%	4.1%	2.0%	0.6%	0.1%	0.0%	100.0%



Table A3. Continued.

Time	-10~-5 (mins)	-5~0 (mins)	0~5 (mins)	5~10 (mins)	10~15 (mins)	15~20 (mins)	20~25 (mins)	25~30 (mins)	30~ (mins)	Total
13:00~14:00	0	66	458	209	22	31	6	3	1	796
	0.0%	8.3%	57.5%	26.3%	2.8%	3.9%	0.8%	0.4%	0.1%	100.0%
14:00~15:00	1	118	458	125	15	8	4	0	8	737
	0.1%	16.0%	62.1%	17.0%	2.0%	1.1%	0.5%	0.0%	1.1%	100.0%
15:00~16:00	0	56	501	237	38	16	2	1	7	858
	0.0%	6.5%	58.4%	27.6%	4.4%	1.9%	0.2%	0.1%	0.8%	100.0%
16:00~17:00	1	69	528	228	24	25	5	2	6	888
	0.1%	7.8%	59.5%	25.7%	2.7%	2.8%	0.6%	0.2%	0.7%	100.0%
17:00~18:00	0	37	334	137	8	9	1	0	4	530
	0.0%	7.0%	63.0%	25.8%	1.5%	1.7%	0.2%	0.0%	0.8%	100.0%
18:00~19:00	0	64	313	142	42	43	4	1	3	612
	0.0%	10.5%	51.1%	23.2%	6.9%	7.0%	0.7%	0.2%	0.5%	100.0%
19:00~20:00	0	62	533	402	59	33	9	3	3	1,104
	0.0%	5.6%	48.3%	36.4%	5.3%	3.0%	0.8%	0.3%	0.3%	100.0%
20:00~21:00	0	16	463	255	36	16	4	4	1	795
	0.0%	2.0%	58.2%	32.1%	4.5%	2.0%	0.5%	0.5%	0.1%	100.0%
21:00~22:00	0	51	394	197	12	14	4	3	0	675
	0.0%	7.6%	58.4%	29.2%	1.8%	2.1%	0.6%	0.4%	0.0%	100.0%
22:00~23:00	1	34	470	254	38	19	2	1	1	820
	0.1%	4.1%	57.3%	31.0%	4.6%	2.3%	0.2%	0.1%	0.1%	100.0%
23:00~24:00	3	48	404	148	19	9	2	1	1	635
	0.5%	7.6%	63.6%	23.3%	3.0%	1.4%	0.3%	0.2%	0.2%	100.0%
24:00~01:00	0	33	293	108	37	6	1	0	3	481
	0.0%	6.9%	60.9%	22.5%	7.7%	1.2%	0.2%	0.0%	0.6%	100.0%
Total	7	1,003	8,393	3,520	517	316	85	31	50	13,922
	0.1%	7.2%	60.3%	25.3%	3.7%	2.3%	0.6%	0.2%	0.4%	100.0%