

# 철도선로용량 계산을 위한 강인성 분석모형에 관한 연구

이창호<sup>1\*</sup> · 김봉선<sup>1</sup> · 김학식<sup>1</sup> · 이병권<sup>1</sup> · 김동희<sup>2</sup> · 홍순흠<sup>2</sup>

<sup>1</sup>인하대학교 산업공학과 / <sup>2</sup>한국철도기술연구원 운영정보시스템연구팀

## A Study on Robustness Analysis Model for Calculating Line Capacity in Railroad System

Chang-Ho Lee<sup>1</sup> · Bong-Sun Kim<sup>1</sup> · Hak-Sik Kim<sup>1</sup> · Byung-Kwon Lee<sup>1</sup> · Dong-Hee Kim<sup>2</sup> · Sun-Hm Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Industrial Engineering, Inha University, Incheon, 402-751

<sup>2</sup>Railroad Operations Research Group, Korea Railroad Research Institute, Ulwang, 437-050

Railroad system is consisted of resources of rail track, signal system, and vehicles. Railway operation must use these limited resources and maximize resource utilization. Line capacity(number of trains throughput/day) is determined by such as parameters, line utilization rate( $\alpha$ ), dummy rate for the break-through hour( $\beta$ ), and dummy rate for the number of rail track intervals( $\delta$ ). Line capacity simulation(LCS) determined the line capacity through simulation given  $\alpha$ ,  $\beta$ , and  $\delta$ . This paper deals with the development of parameter evaluation simulation(PES). PES presents the decision maker with the relationship of line capacity and measurement of robustness for various scenarios in different parameters and then the decision maker can determine the appropriate parameters.

**Keywords:** line capacity, robustness, line capacity simulation, parameter evaluation simulation

### 1. 서론

철도시스템은 선로, 신호, 차량 등의 자원으로 구성되어 있으며, 철도운영기관은 이러한 제한된 자원을 활용하여 운용효율을 극대화시켜야만 한다. 철도운용 효율은 대부분 계획단계에서 결정되어지며, 신설/개량 투자계획이나 열차 스케줄 작성 등과 같은 수송계획이 여기에 해당 된다. 효과적인 투자계획이나 수송계획을 위한 분석에 있어서 선로용량이라는 개념은 평가기준치(evaluation criterion)나 한계기준치(bound criterion)로서 매우 중요한 역할을 담당하고 있다(한국철도기술연구원, 2002).

선로용량을 산정하는 것은 열차운전계획상 최적(최대)이면서 가장 효율적으로 운행할 수 있는 열차 횟수의 결정과 열차를 운행하고 있는 선로의 애로구간을 판단하고 수송력의 증강에 필요한 투자우선순위 결정이라는 두 가지 목적을

가지고 있다(서정호, 1999).

선로용량을 산정하기 위해 현재 철도청에서 사용하고 있는 산정식은 1945년 일본인 야마기시 데루오가 제시한 용량 산정법에 기반을 두고 있으나, 경험식에 기반한 산술계산 방식의 한계로 인하여 UIC 방식과 같은 다른 방법의 적용을 시도한 바 있다(김연규, 1997). 그러나 여전히 동적인 특성을 고려하지 못하고 일률적인 산정 및 평가기법으로 선구별 특성을 반영하지 못하는 한계를 벗어나지 못하고 있는 실정이다.

따라서 한국 실정에 적합하면서 동적인 용량특성을 반영할 수 있는 선로용량 산정 및 평가기술의 개발은 중요한 의미를 가지고 있다(김동희, 2003).

이를 위해, 한국철도기술연구원에서는 실험에 의한 선로용량 계산 방법을 제시하였고, 이에 기반한 선로용량 시뮬레이션(LCS; Line Capacity Simulation)을 개발하여 선로용량 산정에 적용한 결과를 제시하였다(한국철도기술연구원, 2002).

\*연락처 : 이창호, 402-751 인천광역시 용현3동 253 인하대학교 기계공학부 산업공학과, Fax : 032-867-1605,  
E-mail : lch5601@inha.ac.kr

그러나 이러한 실험방식에서 사용된 모수(파라미터) 체계 및 각 모수별 적용값들은 기존 사례 및 연구결과를 그대로 적용하였으며, 이의 타당성 검토 및 적정수준에 대한 분석이 필요하다.

따라서 본 논문에서는 ‘모수(파라미터)에 영향을 주는 구간특성인자의 결정’을 통하여 모수 설계분석을 실시하고, ‘파라미터 결정을 위한 추정 기법의 선정 및 모델 구축’을 통하여 적합한 모수 추정 기법을 마련하고, 모수의 적정수준을 분석 및 제시할 수 있는 모수적합 및 평가 분석을 수행하기 위한 시뮬레이션 프로그램 모형을 제시하고자 한다. 또한 ‘파라미터 적합성 분석 모델의 시스템 설계 및 개발’을 통하여 앞의 사항들이 포함된 모수 평가 시뮬레이션 프로그램(PES, Parameters Evaluation Simulator)을 개발하여 제시한다.

## 2. 모수 평가 시뮬레이터의 구성 및 기능

모수 평가 시뮬레이터의 목적은 선 구내 구간특성인자를 반영한 적정 수준의 모수를 도출하는 데 있으며, 이는 용량산정의 타당성에 근거를 마련해주기 위한 것이다.

모수들은 ‘선로이용율( $\alpha$ )’, ‘주행시분 여유율( $\beta$ )’, ‘구간수 조정 여유율( $\delta$ )’로 분류·적용되며, 선로이용률은 선로의 유지보수시간으로 기본값을 설정하고 있으며, 주행시간 여유율은 기존의 경험치인 1.02~1.06을 좀더 확장하여 PES에서는 1.00~1.07 사이의 값을 0.01 증가단위로 실험하였다. 또한 구간수 조정 여유율은 구간 수당 0.25분이라는 기본값으

로 설정되어 있으나 PES에서는  $\pm 0.1$ 의 범위로서 0.01의 증가단위로 실험하였다.

이러한 모수들은 실제로 열차를 발생시켜 순서를 조정해 나가는 모의실험 수행시 열차간 출발 및 도착안전시격을 산정할 때 여유시분의 값으로 반영되며, 열차중간 출발 및 도착안전시격에 첨가되는 비율로서, 열차운행 스케줄의 결정에 영향을 준다.

<그림 1>에서 보듯이 모수 평가 시뮬레이터(PES; Parameters Evaluation Simulator)는 열차 성능 시뮬레이터(TPS; Train Performance Simulator)의 결과값을 입력받아 적절한 프로세스(process)를 거쳐 적합모수를 추정하고, 이는 다시 선로용량 시뮬레이터(LCS; Line Capacity Simulator)의 입력자료로 사용되어 최종적으로는 선로용량이 산출된다. 단, 열차성능 시뮬레이터(TPS)는 본 논문에서 직접적으로 사용할 수 없으므로, 그 대체용으로서 한국철도기술연구원에서 개발한 다중열차 시뮬레이터(m-TMS; multi-Train Movement Simulator)를 활용하여 TPS 데이터를 도출한다.

여기에서, TPS 데이터는 이상적인 수치이므로 그 자체로 시뮬레이션에 반영되기에는 그 타당성이 떨어진다고 볼 수 있다. 따라서 TPS 데이터를 기반으로 하여, 실제 열차운행시 사용되고 있는 표준시분 및 표정시분의 개념을 도입 및 활용하였다.

제시된 모수 평가 시뮬레이터는 선로용량에 영향을 끼치는 모수들의 강인성 분석을 위해, 특정 외란에 대한 반복적인 실험에 의해 추정되어진다. 적합모수를 추정하기 위한 모수평가 시뮬레이터의 기능은 다음과 같이 구분된다.

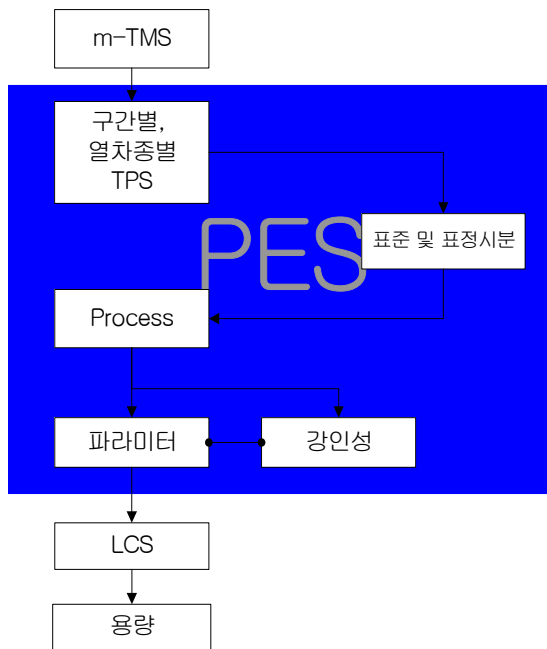


그림 1. 용량산정 체계에서의 모수 평가 시뮬레이터의 역할.

### 2.1 정상다이나 작성

정상적인 열차 스케줄의 작성 단계로서 외란이 적용되기 이전의 열차 스케줄을 작성한다. 열차는 표정시분과 운행시격을 기준으로 운행되고 필요에 따라 추월 및 대피가 발생하며 이때는 추월 및 대피의 방법을 적용한다.

### 2.2 추월 및 대피 기능

열차의 추월/대피의 방법은 정상다이나 작성과 회복다이나 작성에 모두 적용되며, 발생하는 상황에 따라 조금씩 다른 형식으로 적용된다.

추월/대피 기능은 크게 ‘기본 추월/대피’와 ‘맞춤 추월/대피’로 구분하여 적용된다. 기본 추월 및 대피 운행은 표정시간을 기본으로 하여 표준시간과 표정시간 사이의 속도로 운행하는 체계이고, 맞춤 추월 및 대피 운행은 표준시간을 기본으로 하여 표준시간과 표정시간 사이의 속도로 운행하는 체계이다.

### 2.3 외란 삽입 기능

정상다이어 작성 후, 외란을 삽입할 수 있는 기능이 필요하며, 이는 외란 정도에 따라 적합모수의 변화를 측정하기 위한 것이다. 외란의 형식은 발생 시간대, 발생역, 크기로 구성된다.

2.4 회복다이어 작성

외란 발생 후, 열차운행 스케줄은 변형되며, 열차운행은 빠른 시간 내에 정상 스케줄로 회복되어야 한다. 열차는 표준시분과 안전시격을 기준으로 운행되고 필요에 따라 추월 및 대피가 발생하며 이때는 추월 및 대피의 방법을 적용한다.

2.5 결과처리

모든 프로세스가 진행된 후에는 사용자에게 분석된 결과를 제시하여야 한다. 결과처리는 ‘열차운행 다이어’를 이용해 시각적으로 표출할 수 있어야 하며, 분석된 모수에 대한 ‘강인성’을 측정하여 그 값을 제시하여야 한다.

다음은 <그림 2>로 도시화해 놓은 모수 평가 시뮬레이터의 체계를 순서에 맞게 설명한 것이다.

- ① 입력된 데이터를 기반으로 표정시간 및 표준시간과 운행시격 및 안전시격을 산출한다.
- ② 산출한 시격들을 이용하여 열차를 중별비율을 기반으로 랜덤하게 발생시킨다.
- ③ 열차들은 출발 이벤트를 발생시켜 생성하고 도착이벤트로 종료시키며, 추월 및 대피 또는 외란의 삽입으로 인해 지연이 되었을 경우에는 열차의 출발시간(시격조정 이벤트)을 조정한다.
- ④ 추월 및 대피는 아래 <표 1>의 규칙에 의해 여부를 결정한다.

표 1. 추월 및 대피 규칙

후행 고속열차의 도착시간 - 선행 저속열차의 도착시간 < 출발운행시격	· 역 이후의 폐색구간에서 경합예측 · 당 역에서 추월 및 대피
후행 고속열차의 도착시간 - 선행 저속열차의 도착시간 > 출발운행시격	· 정해진 도착운행시격으로 열차 출발

- ⑤ 외란 여부와 회복 여부를 판단해 상황에 맞는 운행 스케줄로 운행하여 결과처리 한다.
- ⑥ 회복운행은 외란적용당 열차로부터 이후의 모든 열차들의 운행이 표준시간을 기준으로 표준시간과 표정시간 사이의 속도로 운행한다.

⑦ 위와 같은 순서로 선구의 마지막 역까지 순환한다.

다음 <그림 2>는 모수 평가 시뮬레이터의 대략적인 기능과 체계를 나타낸 도시화한 것이다.

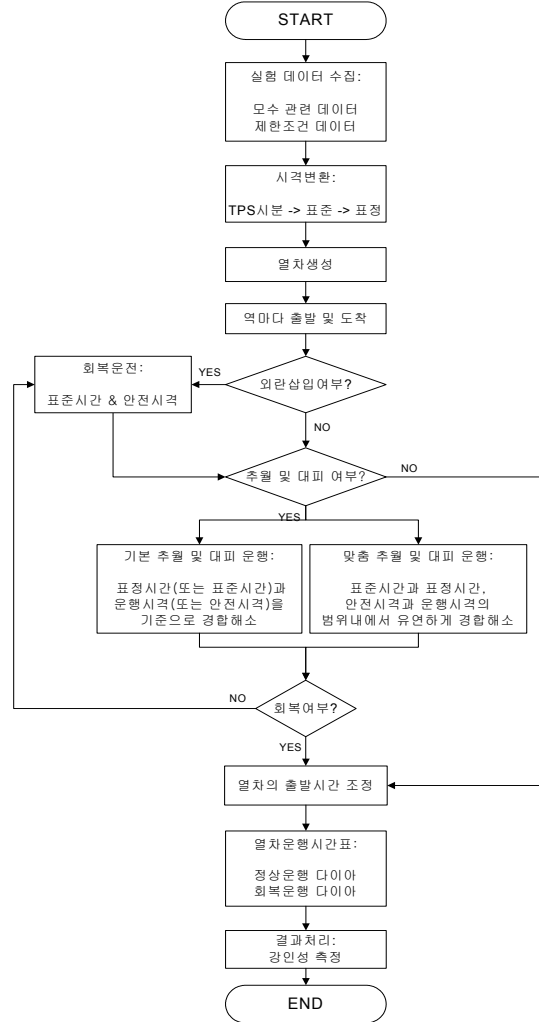


그림 2. 모수 평가 시뮬레이터의 체계.

3. 모수 평가 시뮬레이터의 강인성

열차 스케줄의 강인성이란, 열차운행시 특정 외란 강도에 대한 모수의 영향으로 전체 열차운행 스케줄에 파급되는 정도를 정량적으로 나타낸 것이다. 이는 정성적인 모수값을 강인성이라는 정량적인 척도로 분석함으로써, 모수들에 대한 적정수준을 판단할 수 있도록 하기 위한 것이다.

본 논문에서는 다각적인 강인성 측정을 위해 9가지 강인성 척도를 제시한다.

- (1) 최대 파급시간 - 외란으로 인한 열차의 지연시간 중 가장 큰 지연시간.

- (2) 총 파급시간 - 외란으로 인해 지연되는 열차시간의 합계.
- (3) 전체열차 평균 파급시간 - 총 파급시간을 전체 발생된 열차 수로 나눈 값, 파급영향 없는 열차도 포함.
- (4) 지연열차 평균 파급시간 - 총 파급시간을 지연된 열차수로 나눈 값, 지연된 열차들의 평균파급시간.
- (5) 총 파급역수 - 외란으로 인해 열차가 정시에 도착하지 못하는 역수의 합.
- (6) 당 열차 파급역수 - 외란이 발생한 해당 열차의 파급역수.
- (7) 전체열차 평균 파급역수 - 총 파급역수를 전체 발생한 열차수로 나눈 값, 파급영향 없는 열차도 포함.
- (8) 지연열차 평균 파급역수 - 총 파급역수를 지연된 열차수로 나눈 값, 지연된 열차들의 평균 파급역수.
- (9) 파급 열차수 - 외란으로 인해 정시에 도착을 하지 못하는 열차들의 총 수.

외란삽입에 따른 강인성 분석은 <그림 3>으로 설명될 수 있다.

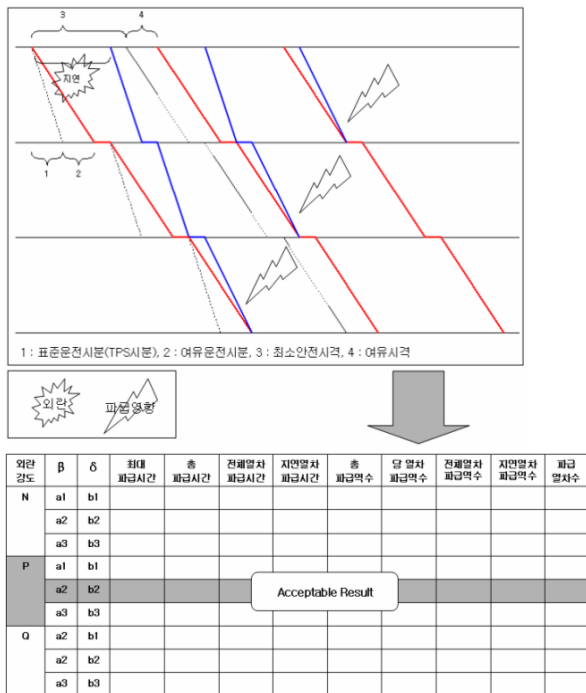


그림 3. 모수 평가 시뮬레이터의 강인성 분석 적용.

앞서 언급한 바와 같이 강인성의 역할과 그 척도는 모수 평가 시뮬레이션에 그대로 반영된다.

<그림 3>과 같이 모수평가 시뮬레이터는 열차를 발생시켜 열차운행시 외란에 따른 파급효과를 강인성 척도에 따라 측정하고 이를 사용자에게 제시한다. 즉, 정성적인 요소인 모수를 강인성이라는 정량적인 측정값으로 표현하므로, 사

용자는 이러한 정량적인 수치를 용량결정의 판단 기준으로 활용할 수 있다. <그림 3>은 모수 평가 시뮬레이터의 출력 결과로서, 모수 평가 시뮬레이터에서 강인성 분석이 이루어지고 이중 사용자에게 의해 타당하다고 판단되어지는 값을 선별하는 작업을 나타내고 있다.

#### 4. 모수 평가 시뮬레이터를 활용한 모수 분석결과

본 논문에서는 모수적합 분석을 위해 4가지의 시나리오를 설정하여 모수 평가 시뮬레이터를 이용하였다. 시나리오들의 기초적인 실험배경은 경부선 중 용량한계에 다다른 서울~대전 구간을 대상으로 하며, 재조정된 선구단위로 실시한다.

본 연구의 실험 선구는 서울~부곡 구간을 대상으로 하였고 시뮬레이션에 사용된 열차는 새마을호, 무궁화호, 통일호의 3종의 열차이며 열차의 비율은 임의로 고정하였으며 시나리오별로 비교·분석을 하기 위해 열차종별 순서는 동일하게 구성하였다.

다음은 모수 평가 시뮬레이터에 적용한 4가지 시나리오이다.

##### 4.1 기본운행에서의 모수값의 변화(시나리오 1)

- 기본운행조건에서 모수값의 변화만으로 강인성의 변화 정도를 분석.
- 결과분석 : <표 1>과 같이  $\beta$ 를 증가시켰을 때 최대파급시간 및 기타 강인성 척도들이 감소됨을 볼 수 있다.

##### 4.2 맞춤운행에서의 모수값의 변화(시나리오 2)

- 맞춤운행 조건에서 모수값의 변화만으로 강인성의 변화 정도를 분석.
- 결과분석 : <표 1>과 같이 시나리오 1과 같이  $\beta$ 를 증가시켰을 때 시나리오 1보다 최대파급시간 및 기타 강인성 척도들이 감소됨을 볼 수 있다. 이 같은 결과를 종합해보면 기본운행 조건보다 맞춤운행 조건시 강인성이 감소됨을 알 수 있다.

##### 4.3 외란설정의 변화(시나리오 3)

- 외란삽입 역, 외란시간대, 외란 크기의 3가지를 변화시켜 강인성의 영향 비교·분석(외란시간대 고정)
- 결과분석 : <표 1>과 같이 외란삽입 역, 외란 크기에 따라 강인성 척도들이 변화함을 볼 수 있다.

##### 4.4 평균정차시분의 변화(시나리오 4)

- 운영조건에 변경에 해당하는 열차의 평균정차시분이

선로용량에 영향을 끼친다는 가정하에 평균정차시분을 조정하여 그 결과 비교·분석.

- 결과분석 : 평균정차시분은 주행시간의 여유분이기 때문에 평균정차시분을 증가시켰을 때 <표 1>과 같이 강인성 척도들이 감소됨을 볼 수 있다(초를 분으로 환산 오차 감안).

표 1. 시나리오별 강인성 비교·분석

영향인자	강인성 척도					
	최대 파급 시간	총 파급 시간	전체 열차 파급 시간	지연 열차 파급 시간	기타	
시나리오 1	$\beta=1.00$ $\delta=0.25$	3분	16.9분	0.8분	5.6분	...
	$\beta=1.02$ $\delta=0.25$	3분	14.9분	0.8분	5분	...
시나리오 2	$\beta=1.00$ $\delta=0.25$	3분	16.6분	0.8분	2.8분	...
	$\beta=1.02$ $\delta=0.25$	3분	15.1분	0.8분	2.5분	...
시나리오 3	서울 외란:2분	9.8분	82분	4.1분	20.5분	...
	영등포 외란:5분	5분	36.1분	1.8분	12분	...
시나리오 4	평균 정차시분 20초	3분	16분	0.8분	5.4분	...
	평균 정차시분 30초	3분	16분	0.8분	5.3분	...

### 5. 결론 및 추후 연구과제

기존의 연구 결과로서 한국철도기술연구원이 개발하여 제시한 선로용량 시뮬레이터에서는 실용용량 산출을 위해 모수(파라미터)들을 사용하고 있으며, 이미 알려져 있는 경험적 수치를 적용하였다. 따라서 이러한 모수들은 선로용량 산출값에 직접적인 영향을 미치게 되며, 이들 모수들에 대한 타당한 수준의 결정은 매우 중요하다.

이에 본 논문에서는 이러한 선로용량 시뮬레이터에서 사용되는 모수들에 대한 적정수준 결정을 지원할 수 있는 체

계로 모수 평가 시뮬레이터를 제시하였다. 주 내용은 모수 평가 시뮬레이터의 개념설계, 시뮬레이터의 체계와 서버 모듈별 기능 및 구성, 모수들의 강인성, 그리고 시뮬레이터를 활용한 모수평가 분석 결과이다.

우선 보다 정확한 모수 분석을 위하여 모수체계를 재검토하였고, 운행시분 체계 및 실험체계에 필요한 요구조건을 분석하였다. 또한, 모수 분석을 위해 강인성 분석체계를 정립하여 이를 목적으로 하는 모수 평가 시뮬레이터의 모형을 제시하였으며, 상세 설계를 통하여 모수 평가 시뮬레이션 프로그램을 개발하였다. 마지막으로, 개발된 모수 평가 시뮬레이터를 활용하여 경부선 복선구간에 대하여 재조정된 선구를 대상으로 적용한 사례 결과를 제시하였다.

향후 연구과제로는 본 연구의 대상인 경부선과 같은 복선 구간이 아닌, 장항선과 같은 단선구간의 분석을 위해 별도의 모수 평가 시뮬레이터가 필요하며 차량, 시설 등과 같은 인자들의 변화도 반영될 수 있도록, 기존의 다중열차 시뮬레이터(m-TMS)와의 시스템 통합이 필요하며, 분석된 모수들이 선로용량 산정에 그대로 적용될 수 있도록 선로용량 시뮬레이터(LCS)와의 통합도 그 필요성이 요구되어진다.

### 참고문헌

김동희, 김성호(2003), 철도시스템 개선을 위한 용량분석에 관한 연구, 한국철도학회 춘계학술대회 논문집.  
 김동희, 홍순흠(2003), 특이구조를 갖는 선로구간의 용량분석에 관한 연구, 대한산업공학회 춘계학술대회 논문집.  
 김연규, 박인기(1997), 철도운영체계 개선을 통한 수송능력 증대방안, 교통개발연구원 연구보고서.  
 서광석(1999), 기존 철도시설의 효율적 개선방안 연구, 교통개발연구원 연구보고서.  
 서사범(2000), 철도공학의 이해, 열과열 출판사.  
 서정호(1999), 철도선로용량의 증대방안 - 이론과 현실에의 적용, 인하대학교 교통대학원 석사학위논문.  
 한국철도기술연구원(2002), 기존간선과 고속선의 수요분담과 선로용량 할당시스템 개발, 철도청 연구보고서.  
 한국철도기술연구원(2001), 수송계획 및 제어관리 최적화, 한국철도기술연구원 연구보고서.  
 Bergmark, R.(1996), Railroad capacity and traffic analysis using SIMON, Computers in Railway V, 1.  
 Kittelson & Associates, Inc.(1999), Transit Capacity and Quality of Service Manual, Transit Cooperative Research Program Web Document 6.  
 Parkinson, T. and Fisher, I.(1996), Rail Transit Capacity, Transit Cooperative Research Program Report 13.