

철도투자 및 운영을 위한 용량분석에 관한 연구

Capacity Analysis for the Railway Investment and Operation

김동희 *, 홍순흠 * , 김재희 *

Kim, Dong-Hee Hong, Soon-Heum Kim, Jae-Hee

Abstract

Railway system is consisted of various resources such as rail-line, signal, and railcar. It is necessary to efficiently utilize these limited and expensive resources as much as possible up to given line capacity. So far, we treat the line capacity as the criteria for evaluating investment alternatives or for restricting train frequencies, and this criteria is calculated statial and experimental numerical formula. But, line capacity has special attribute that changes dynamically according to operational conditions, so there is a need of new line capacity estimation system.

In this paper, we present an improved systematic line capacity model. The proposed model has three main components ; TPS(tain performance simulator), PES(parameter evaluation simulator), LCS(line capacity simulator). The concept of each sub-component is described, including the evaluation method of capacity parameters. And capacity parameter evaluation and estimation results using sample line section data are presented.

1. 서론

철도에서 선로용량은 인프라 투자를 위해서 혹은 수송계획 수립의 기준으로서 매우 중요한 역할을 수행한다. 철도시스템은 선로, 신호, 차량 등의 고가의 인프라 및 열차자원으로 구성되어 있으며, 따라서 선로용량 증대를 위한 투자재원 규모는 가히 엄청나다고 할 수 있으며, 정확한 선로용량의 산출 및 평가는 매우 중요한 문제이다. 특히 이를 효율적으로 지원할 수 있는 체계의 도입은 필수적이다. 현재까지 국내에서 사용하고 있는 선로용량 산정방법은 1945년 일본인 야마기시 테루오가 제시한 용량 산정법에 기반을 두고 있으나, 경험식에 기반한 산출계산 방식의 한계로 인하여 UIC방법과 같은 다른 방법의 적용을 시도한바 있다. 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.

본 연구에서는 기존에 제안되었던 실험방식의 선로용량 산정체계의 개선된 체계적 선로용량 통합모형을 제시하고, 모델의 각 서브모델별 설명과 함께 사용된 용량모수의 합리적인 평가방안이 설명될 것이다. 또한 실제 선구자료를 사용하여 통합모형을 적용한 분석사례를 보여줄 것이다.

2. 선로용량의 개념과 산정방식

1) 철도수송능력과 선로용량

철도수송시스템(railway transit system)에서 용량(capacity)은 고객서비스 능력의 매우 중요한 측정도구이다. TCRP(transit cooperative research program)에서 일반적으로 사용하고 있는 철도 수송능력(railway transit capacity)은 "동일 선로에서 동일 방향으로 시간당 수송할 수 있는 편도 최대 승객수"와 같이 정의되고 있다.

* 한국철도기술연구원

수송능력은 열차용량(train capacity)과 선로용량(line capacity)으로 구성되며, 열차용량은 다시 열차당 객차수(number of cars in train)와 객차당 승객수(passengers per car)로 구분된다. 선로용량은 다음 식과 같이 운행시격(headway)으로 구성되며, 운행시격은 다시 안전시격(safety separation time)과 정차시분(dwell time), 그리고 운영여유시분(operating margin)으로 구성된다.

$$\text{선로용량} = \frac{\text{용량계산시간}}{\text{운행시격}} = \frac{\text{용량계산시간}}{\text{안전시격} + \text{정차시간} + \text{운영여유}}$$

여기에서 안전시격이란 선행열차와 후속열차간의 시간간격을 나타낸 것으로 선구 전체에 걸쳐서 적용하고 그 최소치를 최소안전시격이라 한다. 선로용량의 최대화는 안전시격 및 정차시간의 최소화를 의미한다. 최소안전시격의 거리적 개념은 후속열차의 주속속도로 선행열차까지 필요한 제동거리와 최소한의 안전여유거리를 합한 값으로 볼 수 있다.

2) 선로용량 산정방식

① 야마기시 방식

야마기시 방식은 용량계산 단위시간 중에서 선로이용율에 해당되는 시간만을 대상으로 열차를 최대한 설정하는 개념으로 선로용량을 산정하며, 선로이용율에는 선로유지보수 시간 이외에 각종 여유시간들이 포함된다.

i) 단선구간의 선로용량

$$N = \frac{1440 \times f}{T + C}$$

단, T = 역간 평균운행시분(분)

C = 폐색취급시분(분)

통표방식-2분 30초

기계연동-2분

자동·연동 폐색-1분 30초

f = 선로이용률, 통상 0.5~0.75

ii) 복선구간의 선로용량(다중 열차운행)

$$N = \frac{1440}{hV' + (r + u + 1) \sum V} \times f$$

단, N = 편도선로용량(열차수/1일)

h = 고속열차 상호간의 운전시격(분)

r = 정차장에 도착한 저속열차와 후속

고속열차간에 필요한 최소운전시격(분)

u = 정차장을 출발한 고속열차와 후속

저속열차간에 필요한 최소운전시격(분)

V = 고속열차운행비

= 고속열차회수/전 체열차회수

V' = 저속열차운행비

= 저속열차회수/전 체열차회수

f = 통상 0.6 또는 0.75(피크타임 계산시)

② UIC 방식

세계철도연맹에서 유럽 각국의 국가간 연결철도망의 개발 및 평가에 있어 동일성을 꾀하기 위하여 개발된 방법으로 서로 소속이 다른 철도노선 혹은 국제간 연결철도망에 대한 용량의 비교를 위한 보편적인 방법으로 제시되고 있다. 용량계산은 선구내의 애로구간에 해당되는 단위구간을 기반으로 계산하며 선구의 대표 용량값으로 사용된다. 선구의 용량계산식은 다음과 같다.

$$C = \frac{T}{t_{fm} + t_r + t_{zu}} \text{ (회/주기)}$$

단, C = 선구의 용량(열차운행회수), T = 용량계산주기(1일 또는 1시간을 분으로 표시)

t_{fm} = 최소 열차차두시간의 평균값(분), t_{zu} = 추가시분(분) = 0.25 · 구간수

t_r = 여유시분(분) = 0.67 · t_{fm} (단, 시간용량 계산시 0.33 사용)

③ 체계적 선로용량 분석방식(Systematic Line Capacity Analysis)

한국철도기술연구원(KRRI)에서 제안한 체계적 선로용량 분석방법으로서 그림 1에서와 같이 열차성능 시뮬레이션(TPS), 모수평가 시뮬레이션(PES), 그리고 선로용량 시뮬레이션(LCS)으로 구성되어 있다.

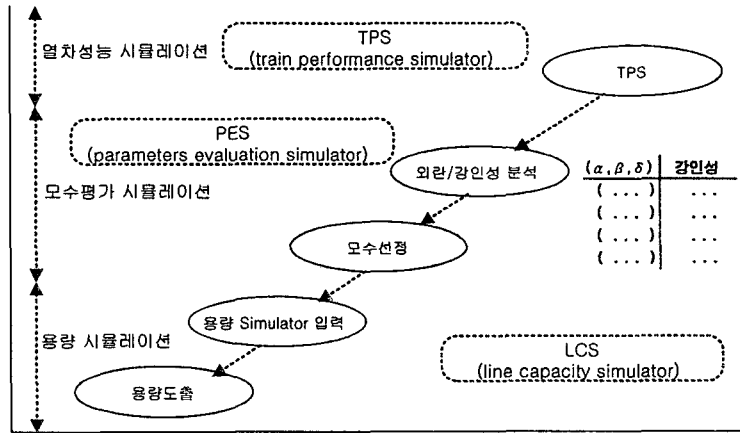


그림 1 선로용량 분석체계

3. 체계적 선로용량 분석체계

한국철도기술연구원에서 제안된 용량분석체계를 구성하고 있는 모듈별 기능은 다음과 같다.

1) 열차성능 시뮬레이션(TPS ; train performance simulation)

열차성능 시뮬레이션은 주로 트랙(선로)과 열차의 동적 특성을 추출하는 것이 목적으로, 일반적으로 최소주행시간에 대한 표준을 결정하고, 구간속도조정の影響을 평가하고, 연료소모를 예측하고, 신호시스템 성능에 따른 제동거리를 체크하기 위해서 사용된다.

본 연구에서 제시된 선로용량 분석체계에서 첫 단계인 열차성능 시뮬레이션은 시설, 차량, 신호, 운영 특성을 고려한 구간별, 열차종별 성능데이터(TPS Data)를 열차운동방정식에 의하여 상세하게 계산하게 된다. 이렇게 산출된 열차성능 데이터는 두 번째 단계인 모수평가 시뮬레이션에서 기본 입력데이터로 사용된다.

2) 모수평가 시뮬레이션(PES ; parameter evaluation simulation)

모수평가 시뮬레이션 단계에서는 열차성능 시뮬레이션에서 산출된 열차별 성능데이터를 기반으로 하여 열차설정에 필요한 최소한의 시간, 즉 표준시간을 산출하고 여기에 여유시간을 반영하여 가상적인 열차설정을 하게 된다. 이렇게 선구를 대상으로 작성된 다이어agram을 정상다이어agram이라 한다. 정상다이어agram에 통상적인 범위의 외란을 산입시켜서 그 파급영향이 나타나도록 작성된 다이어agram을 외란다이어agram이라 한다. 이러한 실험이 강인성실험이며, 그 결과로서 선구특성 및 여유모수가 반영된 파급지연시간, 파급열차수/역수 등과 같은 강인성 척도치들을 추출하게 된다. 그림 2에서와 같이 분석자는 이러한 강인성 결과를 기반으로 적정수준의 여유시간에 해당되는 실험모수를 선정할 수 있게 된다.

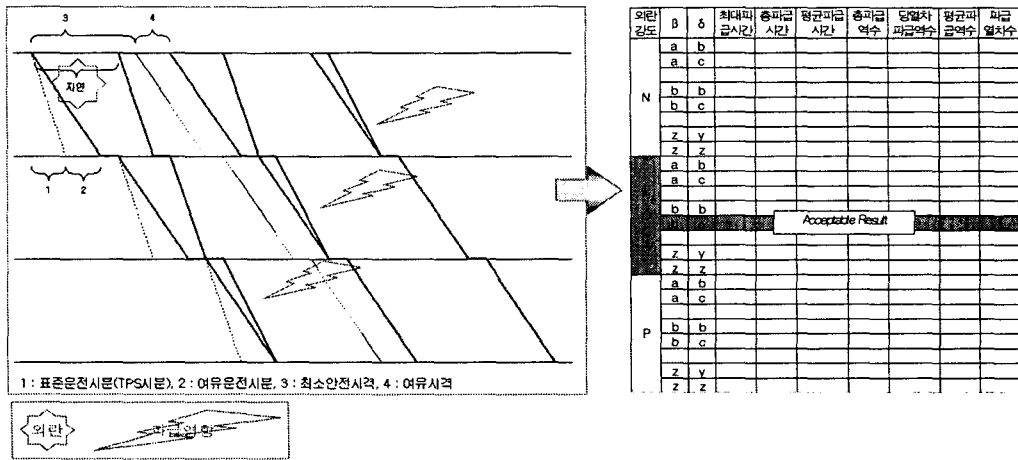


그림 2 강인성 실험의 개념

그림 1의 분석체계에서 사용되는 여유모수에는 α (선로 불가용시간), β (주행시간 여유모수), $\delta 1$ (구간수조정 여유모수), $\delta 2$ (운행시격여유모수)가 있으며, 구간수조정 여유모수는 $\delta 11$ (선행구간수 조정모수)과 $\delta 12$ (후행구간수 여유모수)로 나누어 적용된다. 모수평가 시물레이션에서 정상다이아 작성시 직접 사용되는 여유모수는 β (주행시간 여유모수), $\delta 2$ (운행시격여유모수)이며, $\delta 11$ (선행구간수 조정모수)과 $\delta 12$ (후행구간수 여유모수)는 선구를 대상으로 한 정상다이아와 선구내 단위구간만을 대상으로 한 다이아와의 시격 비교를 통하여 아래 수식과 같이 추정된다.

$$\text{LCS 평균출발시격} + \text{선행구간수} \times \delta 11 = \text{PES 평균출발시격}$$

$$\text{LCS 평균도착시격} + \text{후행구간수} \times \delta 12 = \text{PES 평균도착시격}$$

여기에서 LCS 평균출발/도착시격은 단위구간(B-C역간)에서 β 와 $\delta 2$ 만을 고려한 실험으로 구한 시격평균에 해당되며, PES 평균출발/도착시격은 선구전체에 β 와 $\delta 2$ 를 고려한 실험에서 단위구간에 해당되는 시격의 평균치를 나타낸다. 이렇게 추정할 경우 단위구간의 위치가 선행구간에 치우칠수록 $\delta 12$ 의 크기가 크며, 반대의 경우 $\delta 11$ 의 크기가 크게 된다.

3) 선로용량 시물레이션(LCS ; line capacity simulation)

선로용량 시물레이션은 대상 선구내의 단위구간을 대상으로 하여 열차혼합패턴을 고려한 확률실험에 의한 일종의 시물레이션에 의한 선로용량 추정방식이다. 이때 열차의 성능 및 구간 특성 뿐만 아니라 실제 운용상황에 필요한 여유시간을 실험모수에 의하여 반영하여 N개의 결과치를 도출한다. 이렇게 산출된 N개의 결과치는 각각이 열차회수에 해당되며, 이들에 대한 통계분석결과를 대상 선구의 용량특성으로 제시하게 된다.

선로용량 시물레이션에서 사용되는 실험방식의 산술적 표현은 다음과 같다.

$$\frac{\text{실험주기}(T)}{\text{운행시격}(H)} = \frac{24\text{hr} - \text{선로불가용시간}}{\text{안전시격}(SST) + \text{여유시분}(OM)}$$

$$= \frac{24\text{hr} - \alpha}{(SST(\beta\text{포함}) + \text{선후행구간수} \times \delta 1 + \delta 2) \times \gamma}$$

단, 실험주기(T) : 용량산정기간에 해당

선로불가용시간(α) : 선로유지보수 등으로 실제 선로를 사용하지 못하는 시간

운행시분 여유모수(β) : 열차의 주행시간에 덧붙여지는 여유율로서 PES에서 추정됨

구간수조정 여유모수($\delta 1$) : 구간의 수에 따라 시격에 덧붙여지는 추가시분으로 선행

구간수조정 여유모수($\delta 11$)과 후행구간수 조정여유모수($\beta 12$)로 구분 적용됨

안전시격(SST) : 안전시격으로 출발/도착안전시격에 해당됨. 출발시격 산정시 선행구

간수 조정여유모수를 사용하며 도착시각 산정시 후행구간수 조정여유모수를 사용함
 시격 여유모수(γ) : 실험결과와의 정도조정을 위한 모수로서 기본값으로 1.0을 적용함

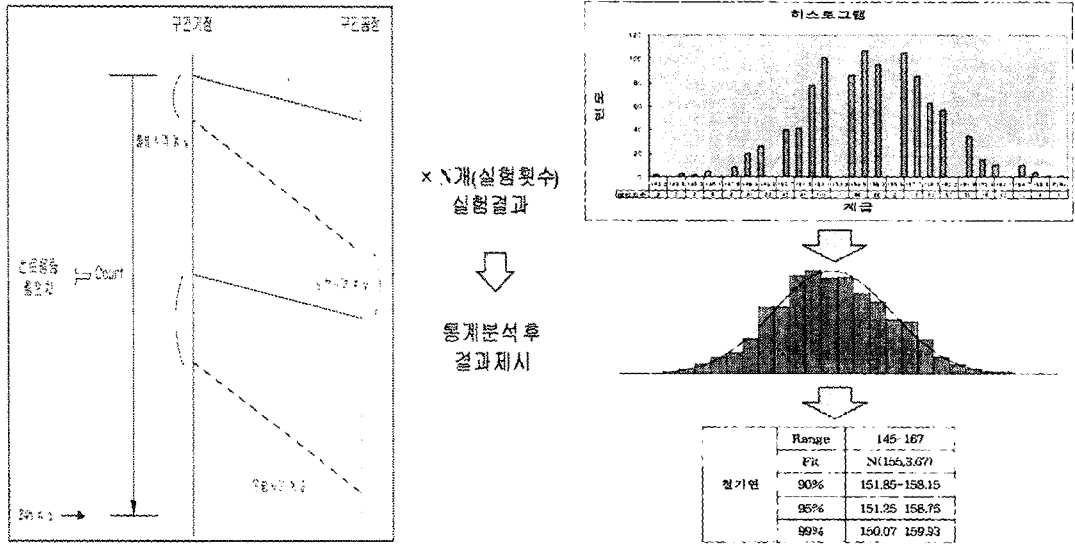


그림 3. 실험의 개념 및 결과도출

4. 분석사례

본 절에서는 앞에서 제시된 체계적 선로용량 통합모델을 사용하여 분석한 사례를 제시한다. 표 1은 분석에 사용된 샘플구간의 기초데이터이다.

표 2는 표 1의 데이터를 사용하여 모수평가 시뮬레이션(PES)을 수행한 결과이다. 물론 PES에서 산출되는 강인성척도에는 여러 가지가 있으나 단순화를 위하여 본 논문에서는 총파급시간만을 제시하였다. 위 결과에서 운전시분 여유모수 1.06, 운행시격 여유모수 0 수준일 때의 강인성 척도값(총파급시간)이 적합하다고 가정할 경우, 선행구간수모수 및 후행구간수모수는 각각 1.07, 2.35분으로 추정된다. 즉, $\beta=1.06$, $\delta_{11}=1.07$, $\delta_{12}=2.35$, $\delta_2=0$ 와 같은 실험여유모수를 사용하여 선로용량 시뮬레이션(LCS)을 수행하면 그 결과로서 $N(174.6, 1.78^2)$ 인 선로용량 특성치가 산출된다. 이는 (하한, 상한)치가 (169.22, 179.90)의 범위를 갖게 되며, 주어진 열차종별 운행비를 가급적 최대한 혼합하여 열차설정을 할 경우에 유의수준 1%로 상/하한 범위내인 선로용량 특성을 나타낸다고 할 수 있다. 이때 N회 실험의 평균 군수비는 42:20:30:7 인 특성을 나타내며, 군수비는 열차종별 혼합 정도와 밀접한 관계를 가지고 있다고 할 수 있다.

표 1. 분석을 위한 샘플데이터

| 선구 | 선구 면적 | 구간수 | 단위 구간 | 열차 등급 | 운행비 | 평균 운전시분 | 신호 평균거리 | 궤도 절면거리 | 신호 방식 |
|-----|-------|-----|-------|-------|-----|---------|---------|---------|--------------|
| A선구 | 3.3km | 4 | a구간 | 고속 | 59 | 2.37 | 600m | 53m | 5행시 ATS구간 |
| | | | | 새마을 | 13 | 3.30 | | | |
| | | | | 우궁화 | 21 | 3.30 | | | |
| | | | | 화물 | 4 | 3.50 | | | |

표 2. 용량 여유모수 변화에 따른 강인성척도

| 총과급 시간 | δ_2 | | | | | | |
|-----------|------------|------|------|------|------|------|------|
| | 0 | 0.05 | 0.1 | 0.15 | 0.2 | 0.25 | |
| β | 1 | 6767 | 6476 | 5320 | 5079 | 4863 | 5449 |
| | 1.01 | 6469 | 5310 | 5066 | 4850 | 5432 | 5215 |
| | 1.02 | 6171 | 5037 | 4821 | 5399 | 5178 | 5024 |
| | 1.03 | 4990 | 4774 | 5347 | 5126 | 4974 | 4845 |
| | 1.04 | 4784 | 5354 | 5128 | 4960 | 4831 | 4703 |
| | 1.05 | 5325 | 5098 | 4928 | 4798 | 4669 | 4561 |
| | 1.06 | 5047 | 4879 | 4748 | 4619 | 4511 | 4403 |
| | 1.07 | 4859 | 4723 | 4594 | 4482 | 4374 | 4266 |
| | 1.08 | 4684 | 4555 | 4443 | 4335 | 4227 | 4119 |
| | 1.09 | 4510 | 4397 | 4289 | 4181 | 4073 | 3965 |
| | 1.1 | 4372 | 4264 | 4156 | 4048 | 3940 | 3838 |

| β | δ_2 | 평균출발시격 | 평균도착시격 | 611 | 612 | LC추정치 |
|---------|------------|--------|--------|------|------|--------------------|
| 1.06 | 0 | 6.08 | 6.85 | 1.07 | 2.35 | $N(174.6, 1.78^2)$ |

철도수송능력 증대를 위한 철도투자 및 운영향상과 관련된 선로용량 증대 인자와 이들 중 일 반적으로 사용하는 인자변화에 대한 민감도 분석결과는 그림 4와 같다.

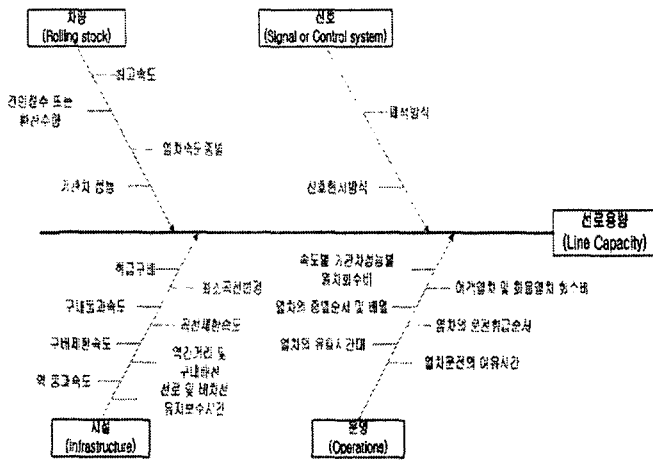


그림 4. 선로용량 영향인자 및 민감도 분석결과

1)운전등급단순화

| 영향인자 | 용량변화 |
|-------------------|--------|
| 기준 시나리오 | 100.0% |
| 운전등급단순화(세마물, 무급회) | 111.7% |

2)열차속도향상

| 영향인자 | 용량변화 |
|----------------------------|--------|
| 기준 시나리오 | 100.0% |
| 평균속도 5% 증가→평균운전시분 4.7%감축 | 103.0% |
| 평균속도 10% 증가→평균운전시분 9.0%감축 | 105.5% |
| 평균속도 15% 증가→평균운전시분 13.0%감축 | 108.6% |
| 평균속도 20% 증가→평균운전시분 16.6%감축 | 111.1% |

3)신호폐색길이단축

| 영향인자 | 용량변화 |
|-------------|--------|
| 기준 시나리오 | 100.0% |
| 폐색길이 5% 단축 | 102.3% |
| 폐색길이 10% 단축 | 104.6% |
| 폐색길이 15% 단축 | 107.1% |
| 폐색길이 20% 단축 | 109.8% |

4)첨단열차제어시스템

| 영향인자 | 용량변화 |
|---------|--------|
| 기준 시나리오 | 100.0% |
| ATP 시스템 | 123.0% |

5. 결론

본 논문에서는 한국철도기술연구원에서 기존에 제시되었던 실험방식의 선로용량 분석을 체계 적으로 지원할 수 있는 체계적 선로용량 분석 통합모델 개념 및 기능을 제안하였으며, 이러한 개념에 따라 실제 샘플 선구데이터에 대하여 적용한 분석사례를 보여주었다.

제시된 선로용량 평가체계를 활용함으로써, 정확한 의사결정기준 활용을 통한 신선투자 및 선 로개량 비용의 효율성 증대, 그리고 철도네트워크 용량의 균형적 활용을 통한 비용절감 및 수익증 대가 기대된다. 특히 남북철도 및 대륙철도와의 연계를 위한 철도네트워크 설계기술의 기반연구로 서 그 의미가 있을 수 있겠다.

현재 차년도 연구로서 체계적 선로용량 분석 통합프로그램 개발을 계획하고 있으며, 그 결과 로서 개발된 통합프로그램을 활용하여 여러 가지 선로용량 영향인자들에 대한 민감도분석 결과를 제시할 계획이다.

참 고 문 헌

1. 김동희, 홍순흠, 이원순, 조민영, "용량모수 평가체계", 한국철도학회 추계학술대회 논문집, 2004
2. 김동희, 홍순흠, 김봉선, "철도선로의 용량추정체계", 안전경영과학회지, 제4권 제3호, 2002.
3. 김동희, 홍순흠, 류상환, "다중열차 시뮬레이션 프로그램 개발", 산업공학회 추계학술대회 논문집, 2002
4. 서정호, 철도선로용량의 증대방안-이론과 현실에의 적용-, 인하대학교 교통대학원 석사학위논문, 1999
5. Bergmark, R., "Railroad capacity and traffic analysis using SIMON", Comp. in Railway V, 1996
6. Fransoo, J.C. and Bertrand, J.W.M., "An aggregate capacity estimation model for the evaluation of railroad passing constructions", Transportation Research Part A 34, 2000
7. Parkinson, T. and Fisher, I., "Rail Transit Capacity", TCRP Report 13, 1996
8. TCRP Web Document 6, "Transit Capacity and Quality of Service Manual", 1999