

## 특이구조를 갖는 선로구간의 용량분석에 관한 연구

### Analysis of Line Capacity for the Special Structure in Railway

김동희<sup>1</sup>, 홍순흠<sup>2</sup>

Dong-Hee Kim and Soon-Heum Hong

#### Abstract

Line Capacity is a criteria for transport capacity and is used to evaluate railroad investment alternatives or to decide train frequency when establish transportation plan. There are two methodologies to increase transport capacity of railway. One is to invest railroad equipment or vehicles, and the other is to improve operation efficiency through optimization. Such all efforts are intended to increase transport capacity by improving line capacity. So far, this criteria is calculated statical 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 a new estimation method of line capacity based on the probability simulation, and apply to normal railline section and special structured railline section.

*Keywords* : Line Capacity, Train Frequency, Probability Simulation

#### 1. 서 론

한국철도는 국가기간산업을 주 동태으로서 국가 경제발전에 많은 기여를 하였다. 그러나 그 수송 분담율은 60년대 초 88.2%이다가 90년대에는 20.7%로 더욱 열악한 상황으로 전개되고 있는 이유로 철도시스템의 수송능력 증대를 통한 국가물류비 감소를 위하여 많은 노력을 기울이고 있다. 이러한 수송능력의 증대를 위해서는 시설, 신호, 열차 등의 철도시설에 자본을 투자하는 방법과 운영 최적화를 통해 이용율을 극대화하고 선로를 균형적으로 활용하는 운영효율 향상의 방법이 있다. 이러한 방법은 모두 선로용량을 개선하여 수송능력을 증대시키고자 하는 것이다[2].

철도시스템에서는 선로, 신호, 차량 등과 같은 철도자원을 개량하거나 이러한 제한된 자원을 최대한 활용하여 운영효율을 극대화 시켜야만 한다. 철도의 운영효율은 대부분 계획단계에서 결정되어지며, 신설/개량 투자계획이나 수송계획이 여기에 해당된다. 선로용량(line capacity)은 이들 투자계획이

나 수송계획을 위한 평가기준치나 한계기준치로서 매우 중요한 역할을 담당하고 있다. 특히 고가의 인프라와 열차로 구성된 철도시스템에서는 선로용량의 오추정으로 인한 운영손실 및 용량증대를 위한 투자재원 규모는 엄청나다 할 수 있다.

한국철도에서 지금까지 사용하고 있는 선로용량 산출방법은 1945년 일본인 야마기시 데루오가 작성한 식을 근간으로 한 경험식을 사용하고 있으나, 내재된 문제점으로 인하여 UIC 방법과 같은 다른 방법의 적용을 시도하고 있다. 이들은 모두 경험적 수식에 기반한 산출방법들로서 용량에 영향을 주는 인자들의 평균치 및 경험치에 해당하는 값을 사용하고 있으나, 선로용량은 구간운행비율, 운행패턴 등과 같은 실제 운행조건에 따라 동적(dynamic)으로 변하는 특성을 가지고 있어 근본적인 문제점을 내재하고 있다. 따라서 한국 철도시스템의 실정에 적합하면서 합리적인 새로운 용량추정체계가 필요하다[2,3].

본 논문에서는 철도교통 계획단계의 중요한 시작부분인 선로계획의 기본이라 할 수 있는 선로

<sup>1</sup> 정회원, 한국철도기술연구원 운영·정보시스템연구팀, 선임연구원

<sup>2</sup> 정회원, 한국철도기술연구원 운영·정보시스템연구팀, 책임연구원

용량 산출을 위하여 확률 시뮬레이션에 기반한 새로운 용량추정체계를 소개하고 적용사례를 통해 기존 방법들의 결과와 비교·제시한다. 또한 합류구간과 같은 특이한 구조를 갖는 선로구간에 적용하기 위하여 변형된 용량추정체계 및 적용결과를 제시하고자 한다.

## 2. 철도교통계획과 선로용량

철도교통계획(railway traffic planning)은 장기계획, 중기계획, 단기계획, 실시간 관리와 같이 단계적으로 해당 범위의 문제들을 접근함으로써 체계적이고 합리적으로 수행될 수 있다. Bussieck(1997)은 그림 1과 같은 철도교통계획의 단계구조를 제시하고 각 단계별 연구사례들을 조사·비교한 바 있다[4].

전략적 수준인 장기계획은 신선 혹은 역건설, 용량증설/감소계획, 수송수요예측과 같은 내용을 포함하고 있는 네트워크 계획(network planning)이 해당되며, 전략적 혹은 전술적 수준인 중기계획에는 운행선로선정 및 운행횟수결정, 선로이용율 극대화 및 균형활용 등과 같은 내용을 포함하는 선로계획(line planning)이 해당된다. 그리고 전술적 수준인 단기계획에는 정규열차 스케줄 작성(train schedule generation)과 기관차 및 승무원 스케줄 작성(rolling stock/personnel schedule generation)이 해당된다. 마지막으로 계획대로 운영하면서 실시간으로 발생하는 지연, 사고, 고장과 같은 이례적 사건, 즉 외란요인들에 대한 대처와 그로 인한 스

케줄의 국부적 조정문제와 같은 운영수준의 실시간 흐름제어 기능(real-time traffic control)이 있다.

여기에서 선로계획은 전략적 단계인 장기계획과 전술적 단계인 수송계획(열차, 차량, 승무원 스케줄링)을 연결하는 중간자 역할이라 볼 수 있으며, 철도선전국 뿐만 아니라 중국에서도 활발한 연구가 이루어지고 있으나 국내에서는 아직 체계적인 연구가 없는 실정이다. 선로계획에서는 먼저 철도네트워크 상에서 합리적인 구간별 선로용량(line capacity)을 산출해야만 하며, 네트워크상의 OD간 추정 수요 및 용량제한을 최대한 만족하면서 거리 혹은 비용최소화나 수익최대화 등과 같은 목적함수를 최적화시킬 수 있는 OD별 경로할당 및 수송량(빈도)을 결정하게 되며 라인최적화(line optimization)문제로 불린다. 또한 선로계획은 용량 영향인자의 변화나 네트워크 구조의 변화에 따라 라인최적화의 결과들이 어떠한 영향을 받을 것인가를 다루는 용량조정문제 혹은 민감도분석(sensitivity analysis)을 포함하고 있다. 라인최적화 및 용량조정문제는 수송계획 및 철도투자분석을 위해서는 반드시 선행되어야만 하는 것으로 국내에서도 체계적인 연구가 필요한 분야이다. 이러한 선로계획은 철도네트워크가 복잡해질수록 더욱 중요한 문제이며, 여기에서 선로용량은 매우 중요한 역할을 담당하고 있다.

수송능력의 일반적인 정의는 “동일 선로에 단위시간당 수송할 수 있는 편도 최대승객수”라고 할 수 있으며, 수송능력-선로용량(열차수/시간)×열차용량(고객수/열차)으로 구성된다[5,7]. 또한 한국철도에서 사용하고 있는 선로용량은 “일반적으로 일의 일정한 선로구간에서 1일 동안 일방향으로(편

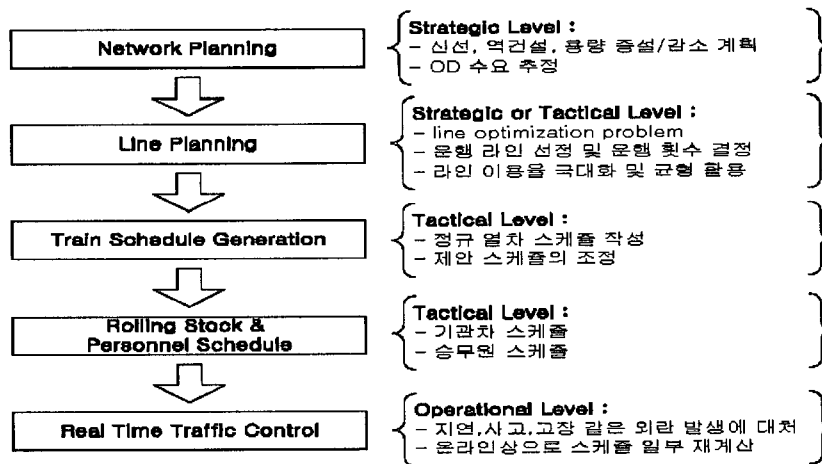


그림 1. 철도교통계획의 단계구조

도) 운행 가능한 최대 열차횟수를 말한다. 선로용량에는 역간운행시분, 폐색방식, 열차속도, 대피시설 유무 등이 영향을 미치며, 주로 역간을 단위로 계산하게 된다"라고 정의된다[3].

선로용량 계산법에는 일본의 야마기시 테루오가 1945년에 작성한 식을 근간으로 한 야마기시 방식과 유럽철도연맹의 UIC 산정방식이 있으며, 김연규와 박인기(1997)는 야마기시 방식의 문제점을 지적하고 UIC 방식을 적용하고 그 결과를 비교·제시하였다[2]. 이들 방법은 모두 이론적인 한계용량을 산출하고 여기에 경험적인 선로이용율 혹은 운영여유율을 반영하여 실용용량을 계산하고 있으며, 아직까지는 실용용량을 직접 계산할 수 있는 방법은 알려져 있지 않다. 선로용량은 대상으로 하는 주기시간(T)을 운행시격(headway)으로 나눈 수치, 즉 운행횟수(frequency)에 해당되는 개념이며, 운행시격은 최소안전시격(minimum safe separation time), 제어여 정차시간, 그리고 운영여유시간으로 구성된다. 따라서 선로용량의 최대화는 운행시격의 최소화를 의미하며, 이는 다시 최소안전시격, 정차시간, 여유시간의 최소화를 의미하게 된다.

### 3. 확률실험에 의한 용량추정체계

실험에 의한 선로용량 추정체계는 대상구간의 선로용량을 모집단으로 설정하고 혼합패턴에 따른 무작위추출을 수행하여 N개의 표본집단을 구성한다. N개의 표본집단에 대한 실험결과인 열차횟수에 대하여 통계분석을 수행하고 그 결과를 이용하여 대상구간의 선로용량을 설명하는 방식이다. 실험을 위하여 사용자에게 여러 가지 실험모수(parameter)를 설정할수 있도록 하고 있다.

실험횟수(N)를 통하여 표본집단을 구성하는

실험결과치의 갯수를 조정할 수 있으며, 실험주기(T)는 선로용량 산출시 기준시간을 지정하는 것으로 일반적으로 1일(1440분) 또는 시간단위를 사용한다. 선로이용율( $\alpha$ ), 주행시간 여유율( $\beta$ ), 안전시격 여유율( $\gamma$ ), 구간수 조정 여유율( $\delta$ )은 모두 열차간 최소시격 결정시 여유시간을 첨가하는 용도로 사용된다. 김연규, 박인기(1997)에서는 선로이용율은 1일을 대상으로 할 경우 0.67을, 하루보다 적은 시간단위 용량을 대상으로 할 경우 0.33을 기본값(default value)으로 설정하고 있으며, 구간수 조정 여유율은 구간수당 0.25분이라는 기본값으로 설정하고 있다. 나머지 여유율들은 모두 그 기본값으로 1.0 이라는 비율로 설정하게 된다. 이들은 모두 실제로 열차를 발생시켜 순서를 조정해 나가면서 열차간 시격을 산정할 때 이용되는 모수들로써, 측정 또는 산출된 열차중간 최소안전시격을 기준으로 첨가되는 여유시간을 결정하게 된다.

선로용량에 상용하는 값을 도출하기 위하여 구간운행 열차종 비율에 따른 열차를 발생시켜 실제로 붙여나가는 방식으로 모의실험이 수행된다. 여기에서 그림 2와 같이 열차종 순서에 따른 열차간 시격을 알아야 한다.  $t_1, t_2$ 는 각각 선행열차와 후행열차의 구간운전시분을 나타내며,  $t_A(aa)$ ,  $t_B(aa)$ 는 열차간 출발시격과 도착시격을 의미한다. 이를 위해서는 실제 해당구간의 운행 차두간격을 실측을 통하여 파악하는 것을 원칙으로 하며, 불가능할 경우 아래의 식과 같이 적합한 산출식에 의하여 추정을 해야만 한다.

$$\text{출발시격} = \frac{0.06 \cdot (N2 \cdot B + t + \delta)}{V} + P$$

$$\text{도착시격} = \frac{0.06 \cdot (N1 \cdot B + t + c + \delta)}{V} + P$$

N1, N2는 확보해야만 하는 신호폐색의 개수이며, 5현시 구간의 경우 각각 4와 3을, 3현시 구간의 경우 2와 2를 사용한다. 평균신호간격(B)은 대상

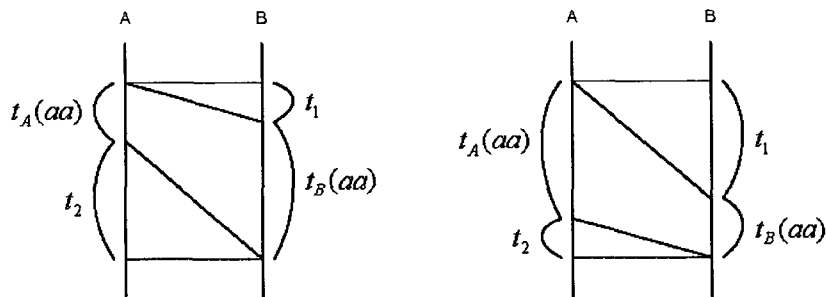


그림 2. 열차간 안전시격 체계(복선구간의 경우)

표 1. 5개 선구에 대한 비교

선구	A-B	B-C	C-D	D-E	E-F	
혼합비율	108:10:4	108:33:8	107:37:7	106:17:22	103:33:6	
UIC방식	142	157	150	143	148	
야마기시 방식	121	155	140	134	134	
실험 방식	Range	127-142	156-174	148-164	124-160	132-153
	Fit	N(136, 2.54)	N(167, 3.08)	N(156, 2.46)	N(142, 5.66)	N(145, 3.45)
	90%	133.38-138.62	164.11-169.89	153.42-168.58	138.09-145.91	141.94-148.06
	95%	132.88-139.12	163.56-170.44	152.93-169.07	137.34-146.66	141.36-148.64
	99%	131.89-140.11	162.48-171.52	151.96-160.04	136.88-148.12	140.22-149.78

으로 하는 선구의 신호폐색거리 평균값이며, 열차장( $l$ )은 상급고속열차의 열차길이를 말한다. 신호확인거리( $c$ )는 기관사가 육안으로 신호를 확인할 수 있는 거리를 나타내며, 전철기취급시분( $P$ )은 선행열차의 통과 후 후행열차의 진로설정을 위하여 필요한 전철기 전환시간을 의미한다. 선행열차가 고속일 경우 출발시격 공식을, 후행열차가 고속일 경우 도착시격 공식을 적용한다. 후자의 경우 도착시격으로부터 출발시격이 역으로 계산 가능하다. 출발역 혹은 도착역 기점에서의 열차간 시격이 최소안전시격이 된다. 선로용량 즉, 열차횟수는 주기시간과 열차운행시격으로 구성되며, 실제로 운용 가능한 유효 열차간격을 설정함으로써 선로용량을 도출할 수가 있게 된다. 사용자 조정모수들은 다음 식에서와 같이 유효 열차간격(운행시격)을 도출할 때 사용된다 ; 평균운행시분-(표준안전시분+평균정

차시분) $\times \beta$ , 운행시격-(최소안전시격 $\times(1+\alpha)$ ) $\times \gamma +$ (구간수 $\times \delta$ ).

김연규와 박인기(1997)의 기존연구에서는 야마기시 방식을 적용한 결과에 비해 실제 운행설정회수가 상회하고 있다는 문제점을 지적하고, UIC 방법을 적용하여 선로용량 값을 산출하여 야마기시 결과와 비교하였다[2]. A역에서 F역까지 5개 선구를 분석대상으로 하였으며, 열차종은 모두 3개 급으로 분류하였다. 동일호 이상의 열차를 1급으로, 비둘기열차를 2급으로, 그리고 화물열차를 3급으로 분류하고, 각 선구별로 열차종 혼합비를 사용하였다. 시뮬레이션 실험에서는 표본크기를 1000회로 하였으며, 그 결과 및 비교내용이 표 1에 제시되어 있다. 모수는  $\alpha=0.67, \beta=1.0, \gamma=1.0, \delta=0.25$ 를 사용하였다. 야마기시 방식의 결과와 비교를 살펴 보면, 5개 선구중에 3개 선구가 범위값을 벗어남을

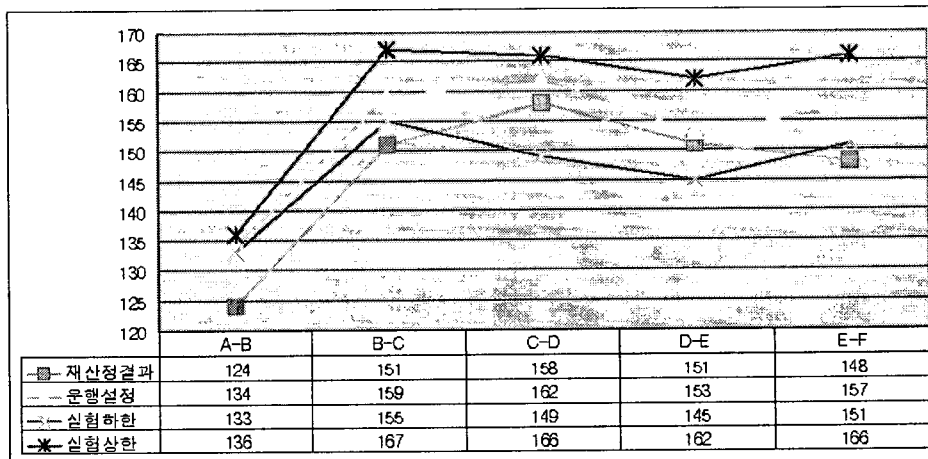


그림 3. 계산정 결과 및 운행설정과의 비교

알 수 있다. UIC 결과와의 비교에서 보면 전체적으로 범위값 사이에서 결과들이 나타남을 보여주고 있다. 또한 열차스케줄의 전면 개편 및 선로용량에 영향을 주는 인자들의 변화들로 인하여 99년 야마기시 방식으로 재산정한 선로용량 값과의 비교가 그림 3에 제시되어 있다. 재산정 결과는 여전히 실제 운행횟수보다 전체적으로 낮게 나오고 있으며, 실험결과는 실제 운행횟수를 포함하고 있는 것으로 나타나 있다.

#### 4. 합류구간을 위한 용량추정체계

본 절에서는 앞 절에서 설명한 실험에 의한 용량추정체계를 일부 개선하여 합류가 일어나는 특이한 구조를 갖는 선로구간에 대한 용량추정체계와 그 적용결과를 제시하고자 한다.

S역과 J역 구간의 경우 S역 구내와는 상관없이 하행 S역 기점 약 2.83km 지점에 분기선이 합류하게 되며, 합류 후 첫 폐색신호를 통과하기까지 S역 출발신호는 5현시 신호를 받아 그린(G)신호를 현시할 수 있도록 설계되어 있다. 이러한 상황에서 실험을 할 경우 선후행 열차종간 시격산출의 개념은 그림 4와 같다.

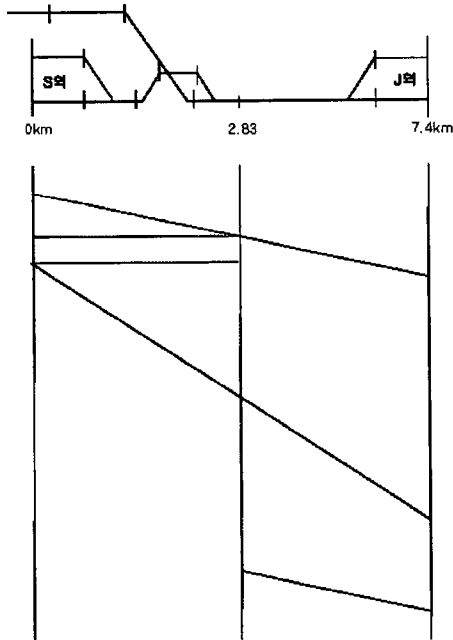


그림 5. 합류구간의 용량실험 개념

이 구간의 열차종 운행비율은 운영계획상의 운행비, 즉 고속열차 66편, 새마을열차 14편, 무궁화열차 30편, 화물열차 43편을 사용하였으며, 구간 운전소요시분은 고속, 새마을, 무궁화, 화물이 각각 3.5, 3.75, 4.0, 10.0분으로 설정하였다. 실험은 1000개의 표본크기를 발생시켰으며, 수행결과 수행시간(run time)은 약 32초 정도 소요되었다. 그림 5~그림 7은 각각 실험결과, 히스토그램, 적합상세결과 및 결과치를 보여주고 있다.

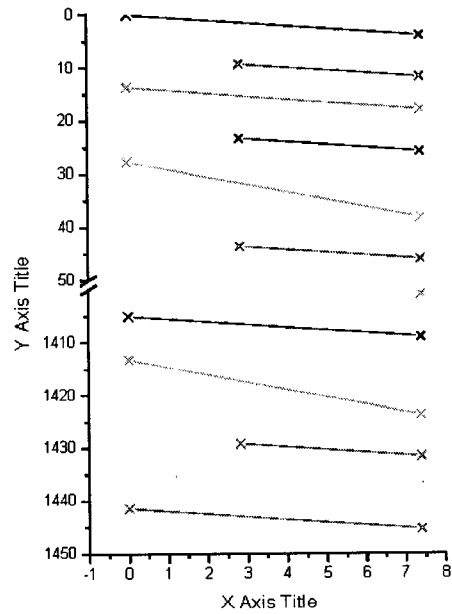


그림 5. S역-J역 합류구간의 실험결과

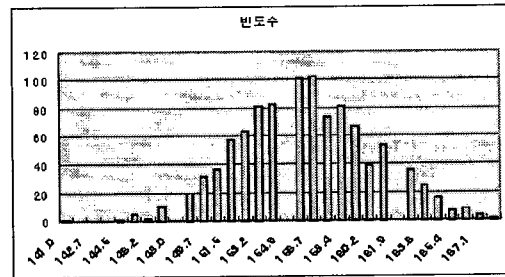


그림 6. S역-J역 합류구간의 히스토그램

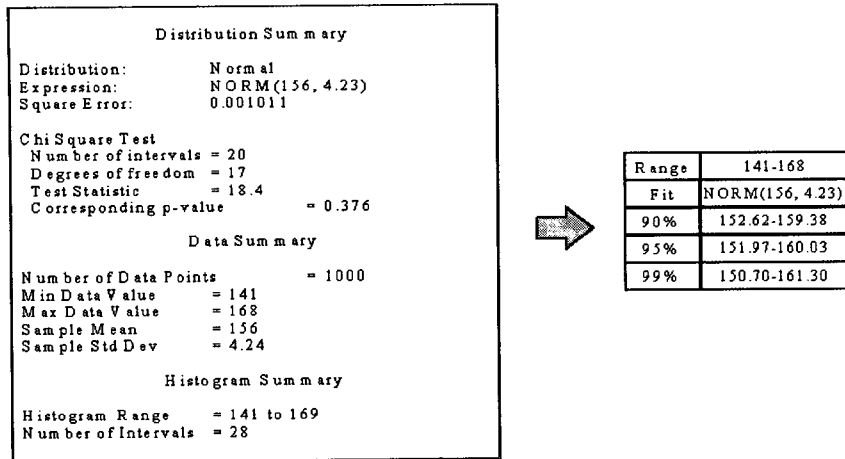


그림 7. S역-J역 합류구간의 적합 및 실험결과

## 5. 결론

본 연구에서는 철도에서의 교통계획 및 선로 계획의 위상을 소개하였으며, 투자분석과 운영계획의 기준치로서의 선로용량의 개념을 제시하였다. 또한 확률실험에 기반한 새로운 선로용량 추정체계를 소개하고 기존 용량계산방법의 결과들과의 비교 분석을 수행하였다. 또한 분기합류와 같은 특이구조를 갖는 선로구간을 위한 변형된 용량추정체계 및 그 적용결과를 제시하였다.

추후연구과제로는 실험에 사용되는 각종 모수들의 추정 혹은 적합분석이 수행되어야 하며, 역을 포함한 특수구간의 확장적용에 대한 연구가 있어야 하겠다. 또한 선구단위가 아닌 한국철도 전체 네트워크 차원에서의 이용율의 균형적 극대화를 위한 네트워크 용량분석에 관한 연구가 수행되어야 할 것이다.

## 참고 문헌

1. 김동희, 홍순흠, 김봉선, "철도선로의 용량추정체계", 안전경영과학회지, 4권4호, 2002.
2. 김연규, 박인기, 철도운영체계 개선을 통한 수송능력 증대방안, 교통개발연구원, 1997
3. 이종득, 철도공학, 노혜출판사, 1994
4. Bussieck, M.R., Winter, T. and Zimmermann, U.T., "Discrete Optimization in public Rail Transport", Working Paper, 1997
5. Kittelson & Associates, Inc., "TCRP Web Document 6 - Transit Capacity and Quality of Service Manual", Transit Cooperative Research Program, 1999
6. Krueger, H., "Parametric modeling in rail capacity planning", Proceedings of the Winter Simulation Conference, 1999
7. Parkinson, T. and I. Fisher, "TCRP Report 13 - Rail Transit Capacity", Transit Cooperative Research Program, 1996