

철도시스템 개선을 위한 용량분석에 관한 연구

A Study on the Capacity Analysis for improving Railway Systems

김동희*, 김성호**

Kim, Dong-Hee Kim, Seong-Ho

Abstract

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. All of these is intended to increase transport capacity by improving the 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 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. Korea Railroad Research Institute(KRRI) proposed a new line capacity estimation system based on the probability simulation method. In this research, we perform analysis of line capacity for the railway improvement alternatives, and to represent the results.

1. 서론

한국철도의 수송분담율은 60년대초 88.2% 이던 것이 90년대에는 20.7% 로 더욱 열악한 상황으로 전개되고 있으며, 수송능력 증대를 위하여 많은 노력을 기울이고 있다. 이를 위해서는 시설, 신호, 차량 등의 자원에 자본을 투자하는 방법과 운영최적화를 통해 이용율을 극대화하고 선로를 균형적으로 활용하는 등의 운영효율향상의 방법이 있다. 이들은 모두 선로용량을 개선하여 수송능력을 증대시키고자 하는 것이다. 철도시스템은 선로, 노반, 신호, 차량 등의 자원으로 구성되어 있으며, 철도운영기관은 이러한 제한된 자원을 활용하여 운영효율을 극대화하여야 한다. 철도에서 운영효율은 대부분 계획단계에서 결정된다. 이러한 투자계획이나 수송계획을 분석하는데 있어 선로용량(line capacity)은 평가기준치(evaluation criterion)나 한계기준치(bound criterion)로서 중요한 역할을 담당하고 있다[7]. 특히 고가의 인프라와 열차로 구성된 철도시스템이기에 용량의 오추정으로 인한 손실 및 용량증대를 위한 투자재원 규모는 엄청나다고 할 수 있다[2].

현재 철도에서 사용하고 있는 선로용량 산출방법은 1945년 일본인 야마기시 테루오가 작성한 식을 근간으로 하고 있으며[3], 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 운용조건에 따라 동적(dynamic)으로 변하는 특성을 가지고 있어 근본적인 문제점을 내재하고 있다[2].

* 한국철도기술연구원, 철도운영·정보시스템연구팀, 선임연구원, 공학박사, 031-460-5483, kdh777@krri.re.kr

** 한국철도기술연구원, 철도운영·정보시스템연구팀, 선임연구원, 공학박사, 031-460-5482, shkim@krri.re.kr

따라서 한국 철도시스템의 실정에 적합하면서 합리적인 새로운 용량추정체계가 필요하며, 한국철도기술연구원(KRRI)에서는 확률실험(시뮬레이션)에 기반한 새로운 용량추정체계를 제시하고 적용사례를 통해 기존방법들의 결과와 비교·분석한바 있다[1]. 본 연구에서는 확률실험에 의한 용량추정체계를 활용하여 철도시스템에서 주요 개선요인들에 대하여 용량분석을 수행하고 그 결과를 제시하고자 한다.

2. 확률실험에 의한 선로용량 추정체계

2.1 수송능력과 선로용량

철도수송시스템(railway transit system)에서 용량은 수송능력의 주요 측정도구이며, 기존의 용량계산은 이론과 실제를 접목하기 위하여 각종 제약과 비율모수 및 환원계수들의 적용과 같은 여러 가지 방법들을 사용하고 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[4]. 또한 한국철도에서 사용하고 있는 선로용량은 “일반적으로 임의의 일정한 선로구간에서 1일 동안 일방향으로(편도) 운행 가능한 최대 열차횟수를 말한다. 선로용량에는 역간운행시분, 폐색방식, 열차속도, 대피시설유무 등이 영향을 미치며, 주로 역간을 단위로 계산하게 된다”라고 정의된다[3]. 열차용량은 객차당 승객수, 열차당 객차수, 조정계수로 구성되어 있다.

선로용량은 개념상 한계용량과 실용용량, 경제용량으로 구분할 수 있으며, 한계용량은 설계용량과도 같은 의미이고 물리적인 한계치를 말한다. 실용용량은 유효시간대, 유지보수, 운전취급 등과 같은 실제 운전조건을 고려하고 있는 개념이며, 일반적인 선로용량이 여기에 해당된다. 경제용량은 최저의 수송원가를 반영한 1일 최대열차횟수를 나타내는 개념이다[6]. 또한 Krueger(1999)는 한계용량과 실용용량 외에도 점유용량(used capacity)과 가용용량(available capacity)의 활용 필요성을 추가로 제시한 바 있다[5]. 지금까지 사용된 선로용량 계산법에는 일본의 야마기시 데루오가 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 다음식과 같이 대상으로 하는 주기시간(T)을 운행시격(headway)으로 나눈 수치, 즉 운행횟수(frequency)에 해당되는 개념이며, 운행시격은 다시 최소안전시격(minimum safe separation time), 제어역 정차시간, 그리고 운영여유시간으로 구성된다. 따라서 선로용량의 최대화는 운행시격의 최소화를 의미하며, 이는 다시 최소안전시격, 정차시간, 여유시간의 최소화를 의미하게 된다.

$$\cdot \text{선로용량} = \frac{\text{주기시간}}{\text{운행시격}} = \frac{\text{주기시간}}{\text{최소안전시격} + \text{제어역정차시간} + \text{운영여유시간}}$$

2.2 확률실험에 의한 용량추정체계

실험에 의한 선로용량 추정체계는 그림 1과 같이 대상구간의 선로용량을 모집단으로 설정하고 혼합패턴에 따른 무작위추출을 수행하여 N개의 표본집단을 구성한다. N개의 표본집단에 대한 열차횟수에 대하여 통계분석을 수행하고 그 결과로서 대상구간의 선로용량을 설명하는 방식이다. 제안된 시뮬레이션 방식의 용량추정 체계에서는 모의실험을 위하여 사용자가 다음과 같은 실험모수(experiment parameter)들을 설정할 수 있도록 하고 있다.

- 실험횟수(N)
- 실험주기(T)
- 선로이용율(α)
- 주행시간 여유율(β)
- 안전시각 여유율(γ)
- 구간수 조정 여유율(δ)

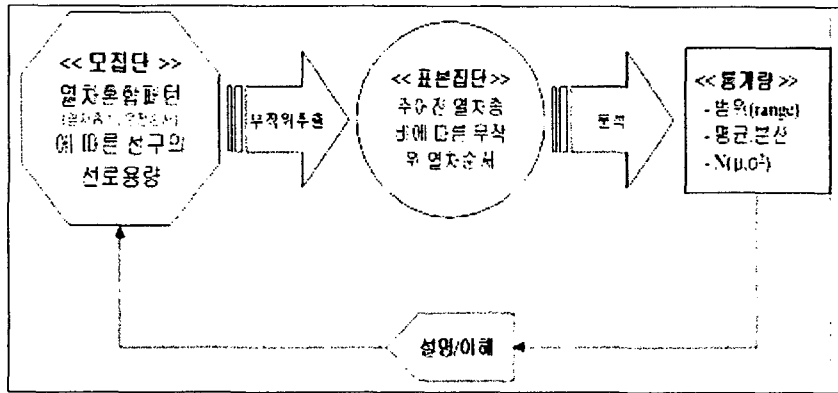


그림 1. 선로용량 추정체계의 개념

여기에서 실험횟수를 통하여 표본집단을 구성하는 실험결과치의 갯수를 조정할 수 있으며, 선로이용율, 주행시간 여유율, 안전시각 여유율, 구간수 조정 여유율은 모두 열차간 최소차두간격 결정시 여유시간을 첨가하는 용도로 사용된다. 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 조성해 나가는 실험 수행시에 열차간 차두간격을 산정할 때 이용되는 모수들로써, 측정 또는 산출된 열차종간 최소안전시격을 기준으로 첨가되는 여유시간을 결정하게 된다.

선로용량에 상응하는 값을 도출하기 위하여 구간운행 열차종 비율에 따른 열차를 발생시켜 실제로 붙여나가는 방식으로 실험이 수행된다. 여기에서 그림 2와 같이 열차종 순서 유형에 따른 열차간 차두간격을 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 식3과 같이 적합한 산출식에 의하여 추정을 해야만 한다.

- 출발시격 = $\frac{0.06 \times (N2 \cdot \text{평균신호간격} + \text{열차장} + \text{절연거리})}{\text{고속열차속도}} + \text{전철기취급시분}$
- 도착시격 = $\frac{0.06 \times (N1 \cdot \text{평균신호간격} + \text{열차장} + \text{신호확인거리} + \text{절연거리})}{\text{고속열차속도}} + \text{전철기취급시분}$

단, N1, N2는 확보해야만 하는 신호폐색의 개수이며, 5현시 구간의 경우 각각 4와 3을, 3현시 구간의 경우 2와 2를 사용한다. 평균신호간격은 대상으로 하는 선구의 신호폐색거리 평균값이며, 열차장은 상급고속열차의 열차길이를 말한다. 신호확인거리는 기관사가 육안으로 신호를 확인할 수 있는 거리를 나타내며, 전철기취급시분은 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.

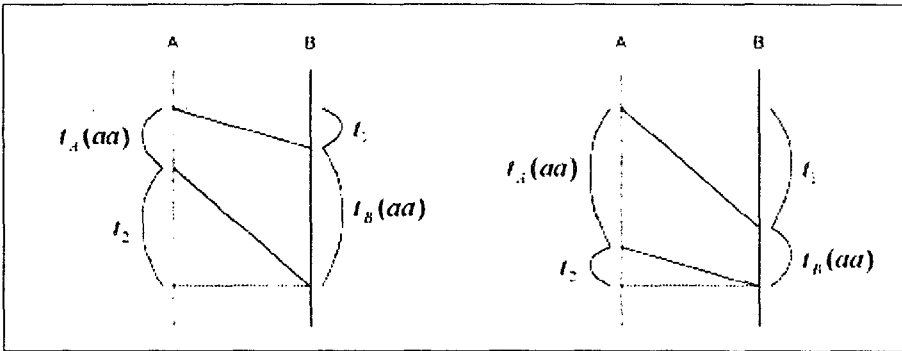


그림 2. 열차간 안전시격 체계(복선구간의 경우)

선로이용율에 영향을 미치는 인자들에는 선로유지보수 시간 이외에도 여러 가지가 있다. 따라서 4~5시간의 유지보수 시간을 제외한 약 20시간(0.83%)의 시간대 전체를 열차설정에 사용할 수는 없다. 본 연구에서 제시하는 실험에 의한 용량추정 체계에서는 실험횟수를 제외한 나머지 조정모수들로 인한 추가 여유시간이 여기에 해당된다. 선로용량 즉, 열차횟수는 주기시간과 열차운행시격으로 구성되며, 실제로 운용 가능한 유효열차간격을 설정함으로써 선로용량을 도출할 수가 있게 된다. 사용자 조정모수들은 아래식과 같이 유효열차간격(운행시격)을 도출할 때 사용된다.

- 평균운행시분 = (표준운전시분 + 평균정차시분) × β
- 운행시격 = (최소안전시격 × (1 + α)) × γ + (구간수 × δ)

실험은 대상으로 하는 선구내의 애로구간에 해당되는 단위구간에 대하여 수행하게 되며, 전술한 조정모수들을 사용하지 않고 실험을 수행하여 결과를 도출할 경우 최소한의 운행시분과 최소한의 안전시격만을 사용하고 해당 구간의 특성만을 고려한 한계용량에 해당되는 값이 산출된다.

97년 5개 선구에 대하여 야마기시방식으로 산정한 선로용량 결과 및 운행설치치와 확률실험에 의한 용량결과치를 비교하면 그림 3과 같다. 야마기시 결과는 실제 운행설치치보다 전반적으로 낮게 나오고 있으며, 실험 결과치는 운행 설치치를 포함하고 있는 것으로 나타났다.

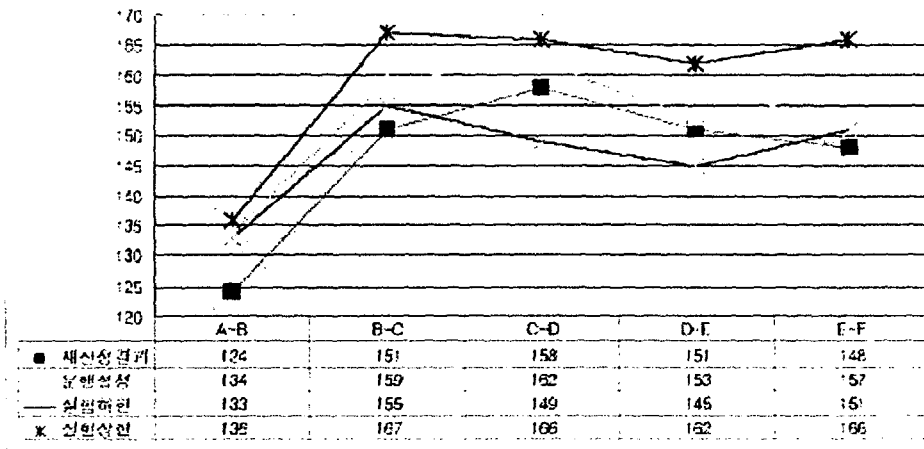


그림 3. 재산정 결과 및 운영실적과의 비교

3. 철도시스템 개선방안과 선로용량 분석

앞에서 언급한바와 같이 철도에서 수송능력을 증대시키기 위해서는 열차용량을 늘리거나 선로용량을 늘려야 한다. 전자의 경우 유효장 등 시설적인 측면이나 기관차 성능 등 차량적 측면, 그리고 전력공급과 같이 제한이 되어 있으며, 수송력에 대한 양적 개선은 가능하더라도 다양한 고객서비스 개선은 불가능하다. 따라서 수송력 증대와 서비스 개선 측면에서 열차횟수, 즉 선로용량을 개선하여야 하며, 본 연구에서는 실험에 의한 선로용량 산정방식을 활용하여 선로용량 증대방안들에 대하여 그 효과를 분석하고자 한다. 알려져 있는 일반적인 선로용량 증대방안들은 다음과 같은 것들이 있다.

- 열차운전등급의 단순화
- 열차성능의 향상
- 폐색방식(열차제어시스템)의 첨단화
- 폐색구간 길이의 단축
- 선로 및 분기기의 개량
- 정차 지체시간의 단축

먼저 열차등급의 단순화는 저급열차의 성능을 향상시켜 상급열차와 비슷하게 하거나 운행열차의 종류를 단순화시키는 것을 말하며, 열차간 운행시격의 단축효과로 인하여 선로용량이 증가된다. 열차성능의 향상은 기관차의 성능을 향상시켜 열차의 최고속도를 상향하거나 열차의 가속/제동성능을 향상시켜 평균속도를 증가시키는 것으로서, 구간운전시분 및 운행시격의 단축효과를 볼 수 있으며 따라서 선로용량은 증가된다. 신호폐색구간 길이를 단축하거나 첨단 열차제어시스템을 도입함으로써 열차간 운행시격의 단축효과를 볼 수 있으며, 선로 및 분기기의 개량을 통하여 열차운행속도를 향상시키고 정차 지체시간의 단축으로 평균운행시분을 단축할 수 있게 된다. 이들은 모두 선로용량의 증대로 연결된다. 이들 주요 영향인자들에 대하여 선로용량 증대효과를 분석한 결과 다음과 같았다.

3.1 기초자료

- 대상선구 : E 선구
- 구간거리 : 7.5km
- 열차군 : 1군 ; 2군 ; 3군
- 구간평균운전시분 : 4.49 ; 6.22 ; 6.70
- 대상구간(용량결정구간) : a-b 구간
- 구간수 : 7
- 열차군비 : 108 ; 2 ; 47

3.2 열차등급 단순화

단순화 전	단순화 후
NI = 4, N2 = 3 평균신호간격 = 650m 절연거리 = 76m 신호확인거리 = 600m 열차군비 = 108 : 2 : 47	NI = 4, N2 = 3 평균신호간격 = 650m 절연거리 = 76m 신호확인거리 = 600m 열차군비 = 157 : 0 : 0
Distribution Summary Distribution: Normal Expression: NORM(171, 1.12) Square Error: 0.000824	Distribution Summary 평균 : 179 분산 : 0 No spread in Data
100 %	104.7 %

3.3 열차속도향상 (등급단순화 전 대비)

속도 5% 증가	속도 10% 증가
NI = 4, N2 = 3 평균신호간격 = 650m 절연거리 = 76m 신호확인거리 = 600m 평균운행시분 = 4.3 : 5.98 : 6.4	NI = 4, N2 = 3 평균신호간격 = 650m 절연거리 = 76m 신호확인거리 = 600m 평균운행시분 = 4.18 : 5.74 : 6.16
Distribution Summary Distribution: Normal Expression: NORM(175, 1.11) Square Error: 0.000931	Distribution Summary Distribution: Normal Expression: NORM(178, 1.07) Square Error: 0.001547
102.3 %	104.1 %
속도 15% 증가	속도 20% 증가
NI = 4, N2 = 3 평균신호간격 = 650m 절연거리 = 76m 신호확인거리 = 600m 평균운행시분 = 4.0 : 5.56 : 5.98	NI = 4, N2 = 3 평균신호간격 = 650m 절연거리 = 76m 신호확인거리 = 600m 평균운행시분 = 3.88 : 5.38 : 5.74
Distribution Summary Distribution: Normal Expression: NORM(181, 1.17) Square Error: 0.000577	Distribution Summary Distribution: Normal Expression: NORM(184, 1.1) Square Error: 0.000581
105.8 %	107.6 %

3.4 신호폐색 길이단축

폐색길이 단축 전
$N1 = 4, N2 = 3$ 평균신호간격 = 756m 절연거리 = 76m 신호확인거리 = 600m
Distribution Summary
Distribution: Normal Expression: NORM(162, 1.16) Square Error: 0.000895
100 %

5% 단축	10% 단축
$N1 = 4, N2 = 3$ 평균신호간격 = 718m 절연거리 = 76m 신호확인거리 = 600m	$N1 = 4, N2 = 3$ 평균신호간격 = 680m 절연거리 = 76m 신호확인거리 = 600m
Distribution Summary	Distribution Summary
Distribution: Normal Expression: NORM(165, 1.19) Square Error: 0.000555	Distribution: Normal Expression: NORM(168, 1.16) Square Error: 0.000899
101.9 %	103.7 %

15% 단축	20% 단축
$N1 = 4, N2 = 3$ 평균신호간격 = 643m 절연거리 = 76m 신호확인거리 = 600m	$N1 = 4, N2 = 3$ 평균신호간격 = 605m 절연거리 = 76m 신호확인거리 = 600m
Distribution Summary	Distribution Summary
Distribution: Normal Expression: NORM(172, 1.15) Square Error: 0.000976	Distribution: Normal Expression: NORM(175, 1.17) Square Error: 0.000527
106.2 %	108.0 %

3.5 열차제어시스템 첨단화 (ATP 시스템의 도입)

ATS 시스템	ATP 시스템
$N1 = 4, N2 = 3$ 평균신호간격 = 650m 절연거리 = 76m 신호확인거리 = 600m	$N1 = 3, N2 = 2$ 평균신호간격 = 650m 절연거리 = 76m 신호확인거리 = 0m
Distribution Summary	Distribution Summary
Distribution: Normal Expression: NORM(171, 1.12) Square Error: 0.000824	Distribution: Normal Expression: NORM(200, 1.26) Square Error: 0.000360
100 %	117.0 %

상기 실험은 모두 E 선구를 대상으로 수행하였으며, 사용된 데이터는 최신 상황과는 차이가 있을 수 있다. 또한 용량에 해당하는 평균치값들은 선로용량에 대한 절대수치가 아니라 대안들간의 상대비교로만 의미를 가지며, 현재 용량산정을 위한 실험방식에 사용된 대표적인 모수(parameter)들의 적정수준에 대한 연구가 진행중임을 밝혀둔다. 열차등급 단순화 실험의 경우 열차등급을 모두 1군 수준으로 상향조정해서 운행한 경우를 가정하여 분석하였으며, 열차속도 향상 실험은 최고속도 혹은 감가속 성능의 향상정도를 단계적으로 변화시키면서 분석하였다. 폐색길이 단축실험도 속도향상실험과 마찬가지로 평균 폐색길이 단축정도를 단계적으로 변화시키면서 실험하였다. 마지막으로 열차제어시스템 첨단화실험에서는 현재 ATS시스템인 구간을 ATP시스템 Level 1 수준으로 개량할 경우를 가정하여 분석하였으며, 이때 변화 데이터는 신호전문가의 자문 결과를 활용하였다.

4. 결론

선로용량의 확충은 철도수송능력을 증대시키고 고객서비스 개선을 위한 유일한 수단이다. 특히 고가의 인프라로 구성된 철도시스템에서 선로용량 증대를 위한 투자분석은 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 실험방식의 용량산정체계를 활용하여 용량 영향인자들에 대한 증감분석 및 감도분석(sensitivity analysis)을 수행하였으며, 이는 실시간 투자 의사결정 지원체계를 위한 기반 분석체계라 할 수 있다. 실제로 용량확충을 위한 시스템 개량을 위해서는 복합인자들을 동시에 고려하여야 한다. 이러한 환경의 분석을 지원할 수 있는 분석체계는 필수적이라 할 수 있으며, 본 연구를 기반으로 확장하여 복합인자 감도분석 체계에 관한 연구가 반드시 수행되어야 할 것이다.

참고문헌

1. 김동희, 홍순흠, 김봉선, "철도선로의 용량추정체계", 안전경영과학회지, 제4권 제3호, 2002
2. 김연규, 박인기, 철도운영체계 개선을 통한 수송능력 증대방안, 교통개발연구원, 1997
3. 이종득, 철도공학, 노해출판사, 1994
4. Parkinson, Tom and Fisher, Ian, "Rail Transit Capacity", TCRP Report 13, Transportation Research Board, 1996
5. Krueger, H., "Parametric modeling in rail capacity planning", Proceedings of the Winter Simulation Conference, 1999
6. TCRP Web Document 6, "Transit Capacity and Quality of Service Manual", TCRP, 1999
7. M.R. Bussieck, T. Winter and U.T. Zimmermann, "Discrete Optimization in public Rail Transport", Working Paper, 1997