

철도시스템 계획을 위한 통합 시뮬레이터의 개발과 적용

Development and Application of an Integrated Simulator for Rail System Planning

정 경 훈
(한양대 교통공학과 대학원)

서 선 덕
(한양대 교통공학과 교수)

목

- I. 서 론
- II. 기존연구사례고찰
 - 1. 국외사례
 - 2. 국내사례
 - 3. 국내외 사례연구결과
- III. 시뮬레이터 개발
 - 1. 개 요
 - 2. 시뮬레이터의 구성
 - 3. 수 요
 - 4. 노 선
 - 5. 차 량

차

- 6. 열차운행모형
- 7. 운행계획
- 8. 운영비
- IV. 시뮬레이터의 적용 및 결과분석
 - 1. 시뮬레이터의 적용
 - 2. 결과분석
- V. 결론 및 향후 연구과제
 - 1. 결론
 - 2. 향후연구과제
- VI. 참고문헌

I. 서 론

철도를 계획하기 위해서는 원칙적으로 노선, 수요, 운행차량 등을 고려해야 한다. 이러한 세 가지 요소는 서로 밀접하게 연관되어 있어 철도는 하나의 시스템으로 여겨지기 때문이다. 철도시스템을 계획하는 기존의 방법은 사전 검토(screening)를 거쳐 일부 대안만을 상세히 분석하고 있다. 이는 계획단계에서 도출되는 조합대안의 수가 많고 일정한 정도(detail)를 가지고 조직적으로 평가하기가 쉽지 않기 때문이다. 또한 이러한 분석을 위한 TPS(train performance simulator) 등과 같은 기존의 분석도구도 너무 자세한 자료를 요구하여 시스템이 확립되지 않은 계획단계에서 사용하기에는 난점이 있다. 많은 조합대안을 일정한 정도를 가지고 조직적으로 평가함으로써 선정된 대안의 타당성을 높일 수 있다.

본 연구의 목적은 철도시스템 계획단계에서 이러한 노선, 차량, 수요를 함께 일괄적으로 고려한 많은 조합대안의 효과를 분석하기 위한 통합 시뮬레이터를 만드는 데 있다. 구현한 시뮬레이터는 계획 요소들을 일정한 정도를 가지고

많은 조합 대안들을 비교분석하기 위한 초기노력으로 철도계획 개념을 모형화하고 적용함으로써 철도시스템을 계획하는데 도움이 되고자 한다.

II. 기존연구사례 고찰

1. 국외 연구사례

미국의 카네기 메론 대학 에너지 관리 모형(1994,[1])은 기존이나 장래의 전기차량시스템의 출력과 에너지를 실질적으로 자세히 시뮬레이션하고 시스템의 에너지 소모를 용도별로 분리하며 차량성능과 운영간의 인과관계를 파악하여 실제 시스템 적용에 앞서 에너지 소모정책을 검증하기 위해서 개발된 프로그램이다.

독일에서 개발한 ISP(Integrated System Planning,1996,[2])는 장래 철도승객수요를 만족하기 위한 철도 수송능력을 장기간에 걸쳐 배정하는 프로그램이다. ISP의 목적은 철도수송 부담율을 높이고 최적 운행계획에 따라 단거리 및 장거리 통행의 열차 승차율이 균형을 이루도록 하며 차량이나 승무원을 최적으로 확보, 배정하기 위한 것이다.

스웨덴의 국영철도에서는 사회간접시설에 대

한 투자를 결정하기 위해 RTP(Running Time Program)와 SIMON (1996,[3])이라는 프로그램을 개발하였는데 이 프로그램은 BIS라고 불리는 선로정보 시스템과 연관하여 프로그램의 입력자료를 공유할 수 있다. RTP는 특정 열차와 노선에 대한 이론적인 운행시간을 계산하거나 선로 개량에 따른 단축시간을 계산해 주고 열차의 속도나 노선의 특성을 그래프로 보여준다. SIMON은 철도의 통행상태와 용량을 분석하기 위해서 개발되었다. SIMON의 주요 출력자료는 열차 운전 선도이다.

2. 국내 연구사례

철도기술연구원에서는 운영계획의 최적화를 목적으로 철도 운영 시뮬레이터를 개발하였다(1999,[4]). 이 프로그램은 효율적인 열차 운영 계획 및 시설투자 수립을 지원하기 위하여 선로시설 및 신호설비를 데이터베이스화하여 컴퓨터 상에 모형화하고 주어진 계획에 따라 선로 상을 주행하는 다수의 열차가 실제로 어떻게 운영될 것인지를 컴퓨터에서 시뮬레이션하는 프로그램이다. 프로그램의 개발은 마친 상태이고 국내 주요 철도간선에 적용하여 시뮬레이터를 검증하는 단계를 남겨두고 있는 상태이다.

국내 철도사업이나 정책관련 프로그램 사용 현황을 보면 김(1998,[5])은 도시철도 급행화에 관한 연구에서 급행시스템을 도입할 경우에 각 역간의 통행시간을 산정하고 열차운행 조건 변화에 따른 급행지하철의 이용승객을 추정하여 총 통행시간의 변화를 예측하는 모형을 개발하여 이용자들의 교통비용절감 효과를 파악하기 위한 JERAS라는 프로그램을 개발하였다. 프로그램은 대피선 방식의 급행지하철을 도입했을 때 열차운행 계획에 대한 다이어를 그래프로 출력해주고 급행운행에 따른 시간단축효과를 추정하는데 초점을 맞추고 있다.

3. 국내외 연구사례결과

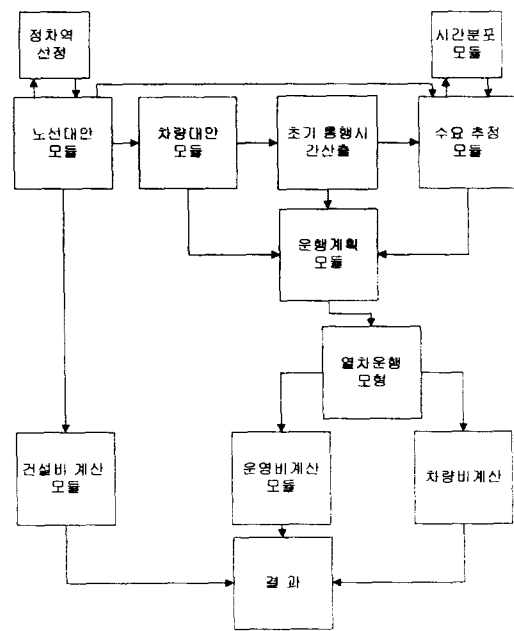
국내외 프로그램의 경우 주로 에너지 관리, 용량분석, 운전 다이어 작성 등 운영측면이나 구체적인 정책분석에 초점을 맞추어 개발되었기 때문에 노선이나 차량 자료에 관한 세부적인 자료를 요구해서 계획 단계에서 사용하기에는 난점이 있는 것으로 판단된다. 또한 철도 시스템 구성의 일부분에 초점을 맞추어져 있기 때문에 철도구성요소에 함께 고려해야 하는 계획단계에서 사용하기 어렵다. 따라서 철도 계획시 주요 구성요소인 철도 노선 및 서비스에 대한 수요의 변화, 수요에 맞는 운행계획 및 차량

운행을 고려한 시뮬레이터를 만들 필요가 있다.

III. 시뮬레이터의 개발

1. 개요

개발될 시뮬레이터는 앞서 언급한 바와 같이 철도시스템 계획시 고려되어야 하는 수요, 노선, 차량의 요소들의 상호관계와 이러한 요소와 비용과의 관계도 파악되어야 한다. 본 절에서는 이러한 요소에 대한 기본적인 사항을 살펴보고 이를 시뮬레이터로 구현하기 위한 사항에 대해서 살펴보기로 한다.



<그림 1> 시뮬레이터의 전체적인 흐름도

2. 전체 시뮬레이터의 구성

앞에서 언급한 사항을 개념화하여 나타내 보면 <그림 1>과 같다. 전체 모형의 흐름은 노선대안을 입력자료로 받아 노선의 건설비를 투자 계획에 따라 계산하고 차량대안별 통행시간의 차이를 수요모형에 반영하여 수요를 추정하며 시간대별 분포를 사용하여 수요를 나눈다. 시간대별로 차량대안에 따른 하루동안의 운행계획을 작성하고 운행계획에 따른 열차운행모형을 사용하여 연간운영비용을 계산하는데 입력자료로 사용한다. 이 과정을 설정된 분석기간동안 수행하여 분석기간동안의 조합 대안별 결과를 도출한다. 또한 차량대안별로 전체 과정을 다시 반복하여 결과를 도출한다. 프로그램은 포트란 90으로 작성하였으며 주요 입출력은 <표 1>와 같다.

< 표 1 > 시뮬레이터의 입출력 자료

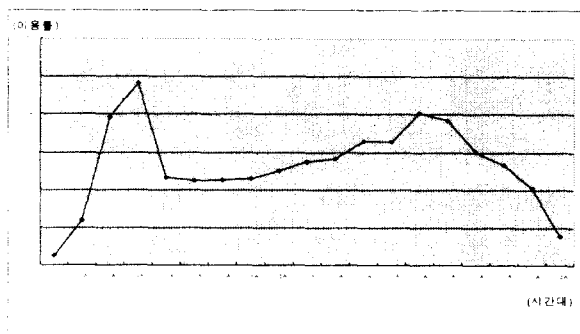
입력 자료	<ul style="list-style-type: none"> - 수요추정을 위한 사회경제적 지표 - 노선의 구매, 곡선자료, 공중별 물량 - 정차역 위치 및 정차시간 - 정차역 선정, 혼잡율
출력 자료	<ul style="list-style-type: none"> - 노선대안에 따른 일일수요, 시간대별 수요, 구간별 수요 - 연도별, 시간별 차량운행계획 - 연도별 대안 건설비 및 운영비, 차량 구입비 - 차량의 시간별 거리, 속도 등을 나타내는 운행상태 자료

3. 수요

일반적으로 수요추정방법에는 수요추정 4단계모형과 직접 수요모형이 있다. 본 고의 목적이 수요, 노선, 차량의 상호영향을 종합적으로 고려하고자 하기 때문에 차량대안이나 노선대안에 따른 노선의 운행시간의 차이나 정거장 위치와 같은 유출입 지점에 따라 수요에 영향을 미치도록 하는 수요모형을 필요로 한다. 따라서, 수요추정 4단계보다는 계획변수의 영향을 쉽게 파악할 수 있고 비교적 간단한 직접수요모형으로 수요를 추정하도록 하였다.

시뮬레이터에서는 수요변수벡터에 사회경제적 지표를 사용하고 노선이나 운행차량에 따른 통행시간을 공급변수로 설정하여 다음 연도의 수요에 영향을 미치도록 모형화하였다.

수요는 일일총량도 필요하지만 시간대별 또는 15분 수요도 필요하다. 이는 근본적으로 고려하는 수요의 단위에 따라 운행계획이나 소요 차량 등 시스템 계획에 영향을 많이 미치기 때문이다. <그림 2>는 시뮬레이터에서 적용된 서울 지하철 이용객의 평균 시간대별 분포를 나타낸 것이다.



<그림 2> 지하철 이용객의 시간대별 분포

4. 노선

노선은 경유지나 중간역에 따라 수요에도 많은 영향을 미치며 운행하는 차량에도 영향을 준다. 일반적으로 노선은 주로 그 목적과 역할에 따라 결정되어지고 운행차량에 영향을 받는다. 특히, 노선의 곡선이나 구매, 곡선, 교량이나 터널 등은 건설비나 운행비에 영향을 미치므로 이를 고려해야 한다. 본 고에서는 노선 대안의 작성은 별도의 과정이 필요하므로 시뮬레이터에서는 입력자료로 하고 중간역에 조합에 따른 효과와 주어진 노선대안에 따른 수요와 건설비용, 노선의 운행 등만을 고려하였다.

초기계획 단계에서 구상하는 사업의 개략적인 건설비를 추정할 때는 과거에 시행한 또는 현재 시행중인 유사한 건설공사의 실제자료를 이용하는 것이 일반적이다. 또한 건설비용도 항목에 따라 차이가 있으나 복선 신설을 기준으로 비용항목을 정하고 원단위 비용을 토대로 공사비를 계산하도록 하였다. 적용된 비용항목은 <표 2>와 같다.

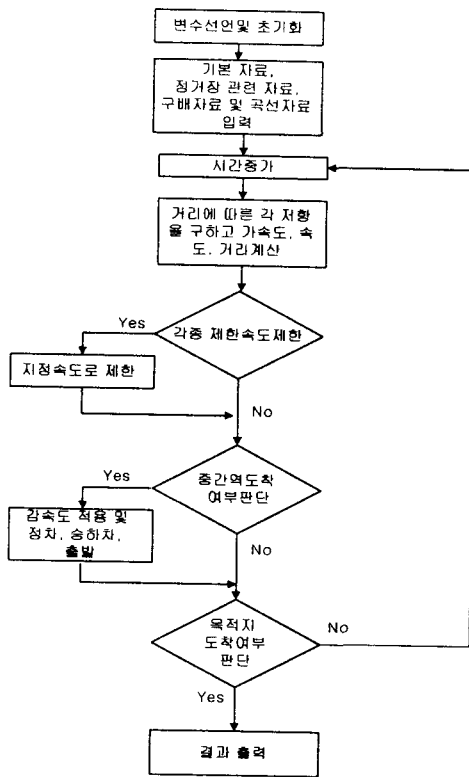
<표 2> 건설비 항목

	공	종
	용	지 비
	토	공
교 량		일반 구간
		도심 구간
		연락지반구간
터 널		산악 터널
		도심 터널
정 거 장		토 공 부
		교 량 부
	궤	도
	건	물
	전	력
	신	호
	통	신
	진	차 선
	부	대 비

5. 차량

차량은 도출된 수요를 충분한 속도로 노선을 운행할 수 있어야 한다. 계획단계에서는 운행차량의 구체적인 사항이 결정되지 않은 상황이기 는 하나 차량의 운행에 따른 통행시간, 운행비용도 고려해야 하므로 기존 지역간이나 도시내에서 운행하고 있는 대표적인 차량의 특성을 차량대안으로 사용하는 것이 하나의 방법이 된다. 본 고에서는 기존 우리나라에서 운행되고 있는 도시 철도를 기준으로 차량의 견인력, 제동력 등의 특성을 10km/h 단위로 선형 근사화

하여 시뮬레이터에서 사용하였다.



<그림 3> 열차운행모형의 흐름도

6. 열차운행 모형

차량대안별로 주어진 노선의 통행시간과 그때 소모되는 에너지를 파악하기 위해서는 열차의 움직임을 모형화해야 한다. 열차운행의 기본 모형은 뉴턴의 운동방정식을 주로 사용되는데 본 고에서 사용된 열차운행 모형식은 식(1)과 같고 열차운행모형의 흐름은 <그림 3>과 같다.

$$F_a - R_s - R_r - R_a - R_g - R_c = M_e \times \frac{dV}{dT} \quad (1)$$

여기서,

F_a =차량의 견인력 및 제동력
 R_s =출발저항, R_r =구름저항
 R_a =공기저항, R_g =구배저항
 R_c =곡선저항, M_e =열차의 총 질량

1) 열차의 저항

열차가 출발 또는 주행하고 있을 때 열차의 운동을 방해하려는 힘이 작용하는데 이를 열차저항이라고 한다. 이러한 저항들에는 출발저항, 구름저항, 궤도탄성저항, 공기저항, 바람저항, 곡선저항, 구배저항, 감/가속 저항, 터널저항 등이 있는데 본고에서 고려한 저항은 식(2)와 같다.

$$\begin{aligned}
 R_s &= 8 - 1.5 \cdot V - 0.093 \cdot V^2 \\
 R_r &= 1.3 \cdot W + 29 \cdot N + f \cdot W \cdot V \\
 R_a &= 0.6 \cdot \left(\frac{V}{10}\right)^2 \\
 R_c &= \frac{700}{R} \\
 R_g &= \frac{i}{1000}
 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,

V =속도, W =차량중량, N =축수
 f =프랜지 계수, R =곡선반경, i =구배

실제 열차저항은 상호 연관되어 복합적으로 나타나기 때문에 구분하기 어렵고 각 저항을 나타내는 식들은 여러 가지가 있어 실제 적용된 식에 따라 열차운행에 영향을 줌으로 저항식의 사용에 유의해야 한다.

2) 제한속도

열차를 운행 시에는 앞서 언급한 열차저항 외에도 안전목적이나 선로상의 이유로 제한속도를 두는 경우가 있고 운행상 이를 고려해야 한다.

7. 운행계획

운행계획은 통행수요에 맞게 설정되어야 하고 운영비를 산출하는데 기초자료를 제공한다. 운행계획을 수립할 때는 고려해야 하는 사항으로는 수요, 영업시간, 수송능력, 혼잡율, 열차편성, 열차의 표정속도, 역 정차시분 등이 있고 최소운전시격과 소요차량은 식(3)에 의해서 일반적으로 계산되어진다.(1992, [3])

$$h = \frac{60 \times n \times c}{p_{\max}} \quad (3)$$

$$N = \frac{n \times (2 \times L + t_R) \times 60}{V \times h}$$

여기서,

h =운전시격(분), N =소요차량수
 c =차량당 승객수 n =열차당 편성량수
 P_{\max} =최대혼잡구간수요, L =노선의 길이(km)
 t_R =회차여유시간 V =열차의 운행속도(km/h)

8. 운영비

운영비에는 운영하는데 필요한 요원들의 인건비, 전동차를 운행하기 위한 동력비, 설비를 유지, 관리하기 위한 유지관리비가 있다. 운영

비용의 산정방법으로는 회귀분석방법, 원단위 분석방법, 비용배정방법 등이 있는데([7],[8]), 본 고에서는 이러한 운영비 항목에 따른 원단위 방법을 토대로 운영비 모형을 만들어 비용을 산출한다. 차량운행에 필요한 동력비는 열차운행모형에서 계산하였고 인건비를 계산하기 위해 적용된 운영요원 원단위는 <표 3>과 같다.

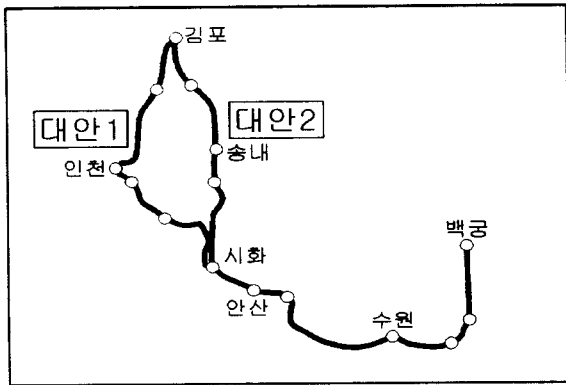
<표 3> 운영요원 원단위

구분	서울지하철 평균
선로유지	3.72명/km
전로유지	8.16명/km
차량유지	1.21명/량
운전요원	7.97명/열차당
역무원	23명/역
역무자동화	1.2명/역
보수운전관리	현업원 100명당 8.7명
본부요원	상기요원 100명당 20명

IV. 시뮬레이터의 적용 및 결과분석

1. 시뮬레이터의 적용

시뮬레이터의 적용은 경기순환철도의 기존 사업대안노선의 4가지 중 2개 노선의 일부 구간을 대상으로 선정하였다.(1998,[9]) 설정된 노선에 대한 기본적인 사항은 <그림 4>와 <표 4>와 같다.



<그림 4> 적용대상구간

<표 4> 대안노선의 주요 특징

노선 대안	연장	정거장수	주요 정차역
1	94.0 km	12	백궁, 시화, 인천, 김포
2	86.4 km	11	백궁, 시화, 송내, 김포

가용한 차량대안은 도시철도를 기준으로 중형전철과 대형전철을 대상으로 설정하였다. 노

선대안별 수요예측을 위해 설정된 역세권은 정차역을 중심으로 기존 보고서에 근거하여 설정하였다. 시뮬레이터에서 수요예측을 위한 수요모형은 직접수요모형과 기존 보고서를 참고하여 장래 년도의 분담율을 사용하였다. 사용된 수요식은 식(4)와 같다.

$$T_{ij}^t = 0.017(P_i^t)^{0.634}(G_j^t)^{0.658}(I_{ij}^t)^{0.093}e_i^{0.34D_1} \quad (4)$$

여기서,

T_{ij}^t =t년도의 i와 j 간 교통량

P_i^t =t년도 i의 인구, I_{ij}^t =i, j간 평균통행시간

G_j^t =t년도 j의 GRP, D_1 =인구더미(50만 이상)

위 사례에서 기존 연구사례를 기준으로 차량대안을 하나 더 고려하면 차량대안은 6개고 하나의 노선에서도 정차역을 고려해 보면 노선대안 1의 경우 기종점을 제외하고 1024개(=10C₀+10C₁...10C₉+10C₁₀)가 된다. 이렇게 되면 전체 조합대안으로 볼 때 원칙적으로 검토해야 하는 대안은 9024(=6*(1024+516))개가 된다.

2. 결과분석

분석결과는 사용된 입력자료가 차이가 있어 기존 보고서의 결과와 직접 비교하기 곤란하므로 기존 방법과 제시된 방법을 비교하였다. 개발된 시뮬레이터를 사용하여 기존 방법에 의하면 노선, 편성을 고려한 차량, 중간역을 기준으로 했을 때 실제 검토한 대안은 6개 대안이고 도출된 결과는 <표 5>와 같다.

<표 5>시뮬레이터를 이용한 기존방법의 결과

	선정차량	총비용	일일수요
노선 1	대형 8량	99632.58	3,899,424
노선 2	대형 8량	98565.30	4,899,564

시뮬레이터를 이용해서 중형철도를 고려해서 대안을 12개로 늘려 분석해 본 결과 <표 6>과 같았고 중간역을 일부 고려하여 48개 대안을 비교하였을 결과는 <표 7>과 같았다.

<표 6> 12개 대안을 검토했을 때 결과

	선정차량	총비용	수요 (최종년도)
노선 1	중형 10량	97976.96	3,950,777
노선 2	중형 10량	96773.69	4,975,145

<표 7> 48개 대안을 검토했을 때 결과

	선정차량	총비용	일일수요
노선 1			
총역 3개	중형 6량	37398.00	209,920
총역 6개	중형 10량	51924.17	1,091,136
총역 8개	중형 10량	63579.88	1,771,912
총역 12개	중형 10량	97976.96	3,950,777
노선 2			
총역 3개	중형 6량	34628.85	210,409
총역 6개	중형 10량	53593.73	1,508,071
총역 8개	중형 10량	64422.19	2,381,446
총역 11개	중형 10량	96773.69	4,975,145

위의 결과를 보면 기존의 방법과 같은 일부 대안을 가지고 분석한 결과 <표 5>과 같이 2번 노선에 8량을 편성한 것이 바람직하다. 그러나 <표 6>, <표 7>과 같이 많은 대안을 검토하였을 때 노선 2에 중형 10량 편성이 더 나은 결과를 나타내었다. 이는 동일한 시뮬레이터에서 검토하는 대안의 수에 따라 결과가 차이가 날 수 있음을 볼 수 있다.

V. 결론 및 향후연구과제

1. 결론

본 고의 목적은 철도 시스템 계획단계시 계획요소를 종합적으로 고려하는 분석도구가 없고 기존 도구도 구체적인 운영목적에 치우치고 있어 철도 계획단계에서 고려해야 할 노선이나 차량, 수요의 조합대안을 조직적으로 평가하는 시뮬레이터를 개념화하고 만드는 데 목적이 있었다. 이러한 개념의 기본은 철도가 노선이나 차량, 수요 각각의 요소만으로도 고려해야 할 사항이 많으므로 논지의 소지가 많지만 계획단계에서 각각의 요소에 대한 자세한 결정보다는 이 요소들의 상호영향을 고려하여 전체적으로 최적의 철도 시스템이 되도록 계획하고자 하는 것이다. 정책이나 사업의 수립시 시뮬레이터를 이용해서 가능한 보다 많은 대안을 검토하여 선정된 대안의 타당성을 높일 수 있다.

개발된 시뮬레이터를 이용하여 요소들의 조합대안을 동일한 정도를 가지고 쉽게 파악할 수 있어 사전 검토시 많은 대안을 고려해 가능한 일부 대안을 선정할 때 사용할 수 있고 장래운행특성에 관한 기본적인 정보를 얻을 수 있다. 이러한 결과를 이용해서 최적의 철도시스템을 계획하는데 도움이 될 수 있다.

2. 향후 연구과제

교통수단은 다른 수단에 영향을 받으므로 함께 고려해야 하는데 본 고의 시뮬레이터는 철도만을 대상으로 고려하였으므로 한계가 있다. 또한 요소별로 많은 개략화가 이루어졌기 때문에 정확성에 있어 문제가 있을 수도 있다. 특히, 열차운행모형은 차량의 움직임을 보다 현실적으로 반영하는 것이 중요하다. 차량의 움직임은 열차가 주행 중에 받는 각종 저항이나 열차운전행태 등을 보다 잘 반영하면 결과가 더 현실적으로 도출 될 것이다. 또한 사용된 비용항목과 원단위의 현실적인 반영도 필요하다. 프로그램의 개발 측면에서 보면 시각적 처리 등 사용자의 편의를 고려하지 못했다.

VI. 참고문헌

1. Rail Systems Center, Carnegie Mellon Research Institute, "Users Manual for The Transportation System Energy Management Model", 1994
2. J. Dreier and U. Brockmann, "Integrated system planning for railways", Mechanics Publications, 1996
3. M. Wahlborg, "Simulation models : important aids for Banverket's planning process", Mechanics Publications, 1996
4. George E. Gray and Lester A. Hoel, "Public Transportation", Second Edition, Prentice Hall, 1992
5. 최규형, 백광선, 김진환, 구세완 외 3명, "열차운용시뮬레이션 프로그램 개발에 관한 연구", 철도기술연보3권, 철도기술연구원, 1999
6. 김경철, "도시철도 급행화 계획을 위한 기초 연구", 서울시정개발연구원, 1998
7. 서선덕, 이재훈, "Development of Efficient Operating Strategies Utilizing Cost Information for Regional Passenger Railroad Service", Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, 1997
8. 서선덕, 김자영, "완전배정방법을 사용한 도시철도 운행비용함수의 개발과 적용", 대한토목학회 학술발표회 논문집, 1996
9. 교통개발연구원, "경기순환철도건설 타당성조사(최종보고서)", 1998.7
10. 이종득, "철도공학특론", 노해 출판사, 1996
11. 김선호, "철도시스템의 이해", 자작 아카데미, 1998