

# 고속철도 차량의 경제 주행 시뮬레이션 Simulation of An Economical Run for High Speed Train

황희수  
Hwang, Hee-Soo\*

---

## ABSTRACT

This paper presents an simulation methodology for determining an economical running pattern for a high speed train which minimizes energy consumption under an given trip time margin. The economical running pattern is defined with an economical maximum speed in traction phase, a speed at the end of coasting and a speed at the end of regenerative braking alone in braking phase. An economical run for subways is also described. As a case study, the simulation is carried out for an economical run of high speed NamSeoul-Pusan line, and the results described. To do this, train performance simulation program is built and extended to be able to find an economical running pattern and then to simulate the defined economical run.

---

## 1. 서론

지하철 및 철도 시스템에서 에너지를 효율적으로 사용하기 위한 연구는 꾸준히 수행되어 오고 있다.[1-3]. 에너지 소비를 줄이면서 지속적인 수송량을 유지하는 것은 고속철도 및 일반 대중 교통 시스템에서 주요 목표 가운데 하나이다. 고속철도는 상대적으로 높은 에너지 효율성(타 교통 시스템 보다 낮은 승객 킬로미터당 에너지 소비)에도 불구하고 많은 전기 에너지의 소비를 초래할 것이다[4]. 또한 고속철도는 엄청난 초기 투자 비용(주로 지상 구조물의 비용)을 요구하며 이는 보다 단축된 운행시간에 의해 보상되어야 한다. 따라서 주어진 운행 시간 요구 조건을 만족시키면서 에너지 소비를 최소화할 수 있는 방안이 있으면 대단히 유용할 것으로 생각된다. 에너지 소비는 운행 시간에 대략 반비례하기 때문에 운행 시간과 에너지 소비간의 절충이 이루어져야 한다. 정상 상태에서 열차의 최대 가감속 성능에 의한 최소 운행 시간은 고속철도 사업의 경제성 검토시 결정되지만 실제 열차 운행시에는 여기에 운행 여유분(대략 최소 운행 시간의 3~10%으로 노선의 운전 시격 및 운행 열차의 밀도 등을 고려하여 결정)을 더한 운행 시간이 사용되는데, 이는 열차 운행중에 교통 흐름을 방해하는 사건이 발생하여 열차가 지연되는 경우 이를 만회하여 계획된 열차 일정을 추종할 수 있도록 하기 위함이다. 정상 상태시 이러한 여유분은 운전사가 재량으로 운전할 수 있는 여유를 제공하며 동시에 경제 운전을 통해 에너지 소비를 줄일 수 있는 기회를 제공한다. 따라서 본 연구는 이 운전 여유분내에서 에너지 소비를 줄일 수 있는 체계적인 방안을 제시하고 시뮬레이션을 통해 이를 검증하는데 목적이 있다.

본 연구에서는 고속철도 시스템의 운행 시간 여유분을 고려하여 에너지 소비를 최소화하는 경제 주행 패턴을 찾는 방안을 제시한다. 경제 주행 패턴은 속도 트리플렛, 추진 단계에서의 최대 경제 속도, 타행 끝점 속도와 제동 단계에서 회생제동 끝점의 속도에 의해 정의되며 타행 끝점의 속도로부터 타행 구간이 결정된다. 사례 연구로써 경부 고속철도의 남서울-부산 구간에서의 경제 주행 패턴을 탐색하고 그 결과를 분석한다. 이를 위해 열차의 경제 주행을 시뮬레이션할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 이 프로그램은 최대 성능에 의한 열차 주행을 시뮬레이션(기존의 열차 성능 해석 프로그램) 할 수 있고 주어진 경제 주행 패턴하에서 에너지 소비를 최소화하는 타행 구간을 찾을 수 있으며 최대 경제 속도, 타행 구간 및 회생제동만에 의한 제동이 끝나는 지점의 속도에 의해 정의되는 경제 주행을 시뮬레이션 할 수 있다. 본 연구는 별도의 추가 비용 없이 노선의 특성을 고려하여 에너지 소비를 저감하므로써 운영 비용을 줄일 수 있는 운전 전략을 찾는 데 목적이 있으며, 실험 노선에 대해 그 실효성을 입증한다면 그 효율성이 매우 크다고 할 수 있다. 이

---

\* 한국철도기술연구원 고속철도기술개발사업단 시스템개발팀 선임연구원, 정희원

연구는 지하철 시스템에도 적용될 수 있으며 그 방안도 논의된다.

## 2. 열차 성능 해석 프로그램

### 2.1 개요

기존의 열차 성능 해석 프로그램[5-8]은 추진 및 제동 장비의 성능 평가와 변전소의 부하 해석 및 운전시각 분석 등을 위한 기초로 사용되어 왔다. 이 프로그램은 열차의 특성(추진 및 제동 특성, 중량, 관성 질량, 열차 길이, 주행 저항, 터널 저항 등), 역의 위치, 노선의 구배, 곡선 반경, 속도 제한 등의 데이터를 입력으로 사용하여 열차의 움직임을 시뮬레이션 하며 그 결과로 거리(또는 시간)에 따른 열차의 속도와 사용한 에너지 궤적을 출력한다. 이 프로그램은 이산 거리(또는 시간)에서 운동 방정식을 적분하며 사용된 전기 에너지는 추진 모델의 속도대 추진력 곡선에 기초하여 계산된다. 단순 열차 성능 해석 프로그램(정상 상태에서의 최대 추진력과 최대 제동력 사용)의 핵심은 전방향 및 후방향 궤적 계산 방식이다. 전방향 계산에서는 열차의 운동 방정식이 양의 시간이나 전방향의 거리 단위로 적분되는 반면에 후방향 계산에서는 음의 시간이나 후방향 단위로 적분된다. 궤적 계산의 예가 그림1에 보여진다. 이 그림에서 A 지점에서 B 지점으로 이동하기 위해서는 최소 궤적이 사용된다는 가정하에 다음과 같은 단계를 거쳐야 한다.

- 단계 1: 최대 추진력을 사용하여 A지점으로부터 C 지점까지의 전방향 궤적을 만들며 이때 보다 낮은 속도제한의 시작인 C 지점까지 최대 속도 제한을 유지한다.
- 단계 2: C 지점으로부터 최대 제동력으로 제동하여 F 지점까지 후방향 궤적을 생성한다. F 지점은 이전의 전방향 궤적과 후방향 궤적의 교차점으로 결정된다.
- 단계 3: C 지점으로부터 보다 높은 속도 제한을 갖는 D 지점까지 전방향 궤적을 만든다.
- 단계 4: D 지점으로부터 보다 낮은 속도 제한을 갖는 B 지점까지 최대 추진력을 사용하여 전방향 궤적을 만든다.
- 단계 5: 최대 제동력을 사용하여 B 지점으로부터 E 지점까지 후방향 궤적을 만든다. E 지점은 후방향 궤적과 이전의 전방향 궤적의 교차점이다.
- 단계 6: 전방향 및 후방향 궤적이 시간 또는 거리 단위로 이어지도록 한다.

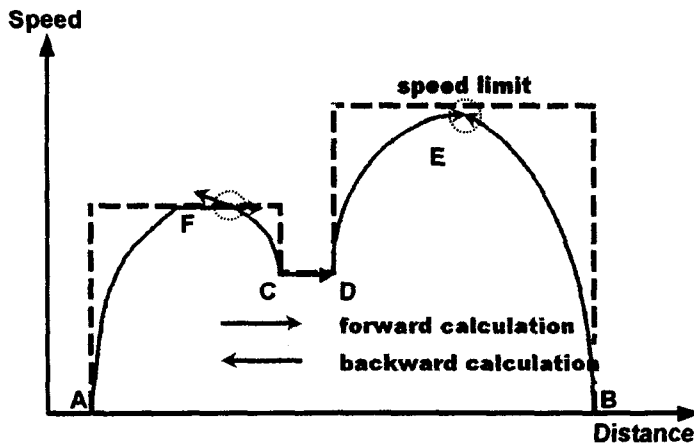


그림 1. 열차 성능 해석 프로그램의 궤적 계산

속도 제한이 있는 경우 열차 길이가 고려되어야 한다. 즉, 열차의 선두부가 속도 제한에 보다 낮은 지역으로 진입할 때 열차의 속도는 속도 제한과 같거나 작아야 하며 이 열차 속도는 열차의 후미가 속도 제한 구간을 빠져나올 때까지 유지되어야 한다.

### 2.2 방법론

열차 성능 해석 프로그램은 출력으로 시간 또는 거리의 함수로 속도, 위치, 소비 전력 등을 발생하며 이를 위해 식(1)을 적분한다.

$$f_{(v/b)} - f_c - f_g - f_r = m \times v \quad (1)$$

여기서  $m$ 은 열차의 총 중량,  $m = m_s + m_r$ ,  $m_s$  열차의 정적 중량,  $m_r$  열차의 관성 등가 질량,  $v$  가/감속도이다.  $f_{v/b}$ 는 추진력(양)/제동력(음)이고  $f_c = c/r$ ,  $f_c$ 는 곡선저항,  $c$ 는 열차의 형태에

따라 다르며  $r$ 은 곡선 반경,  $f_g = m_s \cdot g \cdot \sin(a)$ ,  $f_g$ 는 구배에 의한 힘이다.  $f_r = a + bu + cu^2$ 는 주행저항으로  $a$ ,  $b$ 와  $c$ 는 열차 길이 및 열차 형태에 따라 다르다. 거리 축에 의한 위치, 속도와 시간은 식(2)-(4)에 의해 계산된다.

전방향 계산:  $s(n+1) = s(n) + \delta s$  (2)

후방향 계산:  $s(n) = s(n+1) - \delta s$

여기서  $s(n)$ 은  $n$ 번째 단계까지의 열차 주행 거리이고  $\delta s$ 는 각 단계에서의 거리 증가분이다.

전방향 계산:  $v(n+1) = \sqrt{(v(n))^2 + 2v\delta s}$  (3)

후방향 계산:  $v(n) = \sqrt{(v(n+1))^2 - 2v\delta s}$

여기서  $v(n)$ 은  $n$ 번째 단계까지의 열차 속도이다.

전방향 계산:  $t(n) = t(n+1) + \frac{\sqrt{(v(n))^2 + 2v\delta s}}{v}$  (4)

후방향 계산:  $t(n) = t(n+1) - \frac{\sqrt{(v(n))^2 + 2v\delta s}}{v}$

여기서  $t(n)$ 은  $s(n)$ 을 주행하는데 걸린 시간이다.

필름에서 사용된 에너지는 식(5)에 의해 전방향으로 계산된다. 이 계산과 관련하여 후방향 계산은 존재하지 않는다.

$e(n+1) = e(n) + p(n)dt$  (5)

여기서  $e(n)$ 과  $p(n)$ 은 추진 또는 제동 동안  $n$ 단계에서 소비된 에너지와 전력이다.  $dt$ 는 각 단계 동안 경과한 시간이다.

### 2.3 경제 주행

서론에서 설명한 것처럼 경제 주행은 주어진 운행 시간 요구조건을 만족시키면서 에너지 소비를 최소화하는 주행을 말하며 속도 트리플릿에 의해 정의된다. 이 트리플릿은 최대 경제 속도, 타행 끝점의 속도와 회생제동만에 의한 제동이 끝나는 지점의 속도로 구성된다. 최대 경제 속도는 소프트 속도제한으로 단지 추진 단계에서만 유지되는 속도제한이다. 노선의 긴 하구배와 같은 어떤 이유로 제동을 걸어야 할 필요가 있는 경우 열차는 제동을 인가하지 않고 타행을 하며 열차의 속도가 초과해서는 안될 속도 제한(하드)과 소프트 속도제한 사이에서 유지될 수 있는 한 이 타행은 계속된다. 그러나 열차의 속도가 하드 속도제한을 초과하는 경우에는 당연히 제동을 인가해서 하드 속도제한을 초과하지 않도록 한다(참고 그림2). 그림2에서 색칠되어 있는 구간이 경제 속도 도입으로 인해 에너지 소비를 줄인 곳이다. 타행은 열차 성능 해석 프로그램에서 추진력을 0으로

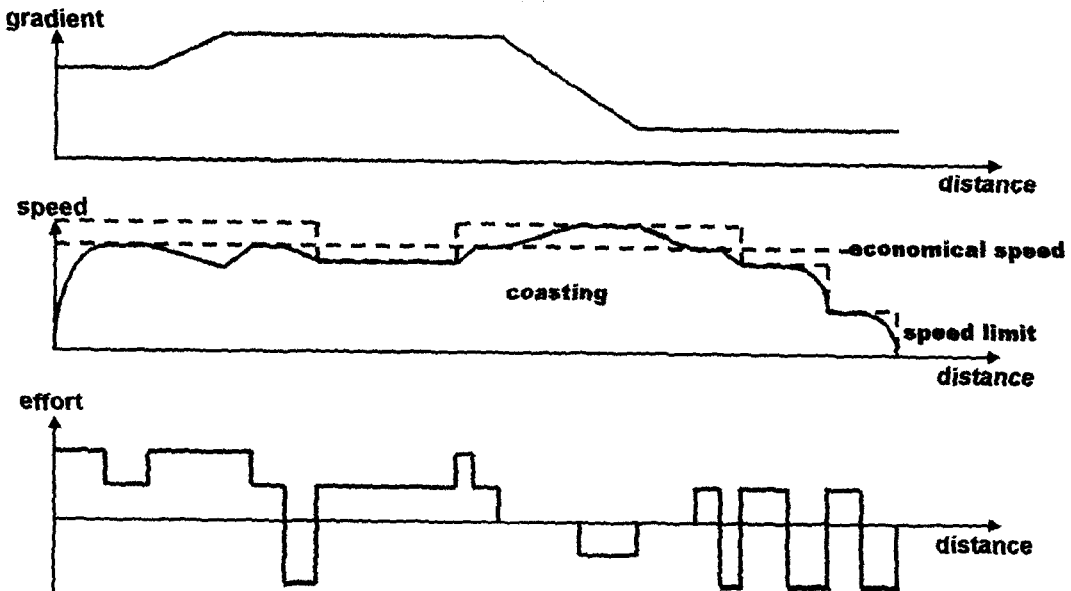


그림 2. 경제 속도를 사용한 고속철도 차량 주행

하여 구현한다. 노선에서 타행을 하는 부분을 타행 구간이라 정의한다. 따라서 노선의 하구배를 고려하면 에너지 소비를 줄이기 위해 타행 구간을 찾는 것이 필요함을 알 수 있다.

제동 방법의 선택도 에너지 소비를 줄일 수 있는 방법이 된다. 고속철도의 경우 제동 시스템은 회생 제동과 기계적 제동으로 구성된다. 경제적 이유로 일정 속도 이상에서 회생제동만을 사용하고 그 이하의 속도에서는 회생제동과 기계 제동을 결합하여 사용하도록 할 수 있다. 따라서 경제 주행시 정상 제동의 순서는 타행 끝점 속도에 도달할 때까지 타행을 먼저하고 회생제동을 인가한 후 회생 제동 끝점의 속도에 도달하면 회생 제동과 기계 제동을 결합하여 인가한다.

지하철의 경우 회생 제동 대신에 저항 제동을 사용하기 때문에 경제 주행시 제동방식은 고려 대상이 되지 못한다. 그림3에 보여진 것처럼 경제 주행 방식은 하드 속도제한으로 주행하다가 역 근처에서 경제 속도(flow speed)에 도달할 때까지 타행한 후 제동한다. 따라서 지하철의 경우, 경제 주행을 위해서는 운행시간 제한하에서 에너지 소비를 최소화하는 경제 속도를 찾아내어야 한다.

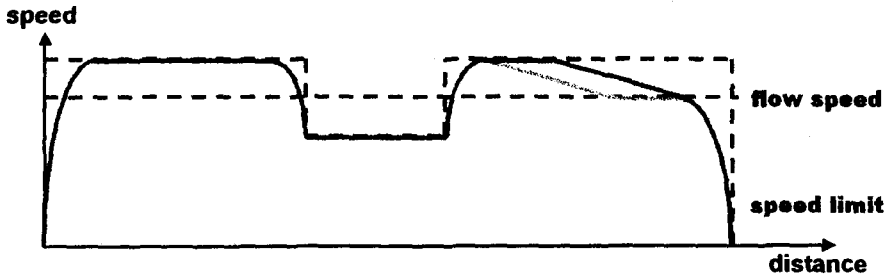


그림 3. 지하철의 경제 운행

### 3. 에너지 소비 최소화

영업 운전의 경우 열차 운행 시간은 고정되며, 이 시간은 정상 조건하에서 최대 열차 성능에 의한 운행 시간에 운전 여유분을 더하여 결정된다. 고속철도의 경우 정상 조건은 장비의 정상 상태 유지, 중간 마모 차륜의 사용, 정상 상태의 궤도와 바퀴의 미끄럼이 없는 상태를 의미한다. 이 상태에서 최대 열차 성능에 의한 주행은 사구간에서의 타행을 포함한다. 운전 여유분은 외란에 의한 교통 흐름 방해를 제어하여 계획된 일정을 추종할 수 있도록 부여된다. 운전 여유분은 식(6)에 의해 계산된다.

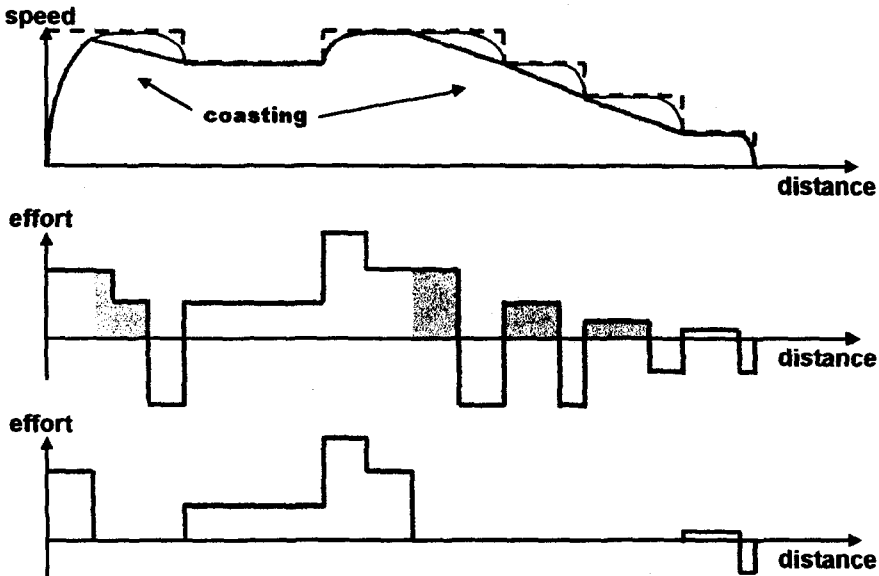


그림 4. 타행에 의한 에너지 소비 절감

$$M_{\text{econo trip time}} = \frac{(T_{\text{econo-trip}} - T_{\text{econo-dwell}}) - (T_{\text{max-trip}} - T_{\text{max-dwell}})}{T_{\text{max-trip}} - T_{\text{max-dwell}}} \times 100 \quad (6)$$

여기서  $M_{\text{econo-trip-time}}$ ,  $T_{\text{econo-trip}}$  와  $T_{\text{econo-dwell}}$  는 각기 경제 주행의 운행시간 여유율, 운행시

간과 정차시간이고  $T_{max-trip}$  와  $T_{max-dwell}$  는 각각 최대 성능에 의한 운행시간과 정차시간이다. 주어진 조건하에서 에너지 저감은 식(7)에 의해 계산된다.

$$E_{econo-saving} = \frac{E_{max} - E_{econo}}{E_{max}} \times 100 \quad (7)$$

$E_{econo-saving}$  은 경제 주행을 통한 에너지 소비 저감 비율이고  $E_{max}$  와  $E_{econo}$  는 각기 최대 열차 성능에 의한 에너지 소비와 경제 주행에 의한 에너지 소비량이다.

영업 운전은 주어진 운행 시간하에서 시물레이션을 통해 찾은 경제 주행에 근사화되어야 한다. 타행 구간은 속도 트리플릿에 기초해서 불필요한 추진 및 제동을 제거하여 결과적으로 에너지 소비를 저감하도록 결정된다. 이와 관련하여 그림4에 타행 구간을 결정하는 방식을 설명한다. 타행 구간은 추진 및 제동에 사용된 에너지의 합이 0이 되도록 결정되며 그림4에서 색칠된 부분에 해당한다.

#### 4. 고속철도의 경제 주행 시물레이션

하나의 사례 연구로써 경부고속철도의 남서울-부산 왕복 노선에 대해 경제 주행을 시물레이션 하였다. 이 사례 연구에서는 대구 이하 구간의 기존선 이용은 고려하지 않았으며 남서울-부산간 약 431km의 초기 고속철도 노선 데이터를 사용하였다. 최대 운영 속도는 300kph이고 남서울-부산간에 4개의 중간역이 존재하고 각 역에서 동일한 정차 시간을 갖는다고 가정한다. 경제 주행 시물레이션 프로그램의 초기 차량 및 노선 생성 화면이 그림5에, 입력 데이터 준비 예로 주행저항 계산 화면이 그림6에 그리고 그림7에 최대 성능, 타행 구간 선정 및 경제 주행 시물레이션을 선택하고 입력된 차량 데이터를 보여주는 화면이 보여진다. 그림8의 경제 주행 결과는 경제 속도 290kph, 타행 끝점의 속도 250kph와 회생제동만에 의한 제동 끝점의 속도 170kph를 사용한 경우이다. 이 그림에서 작은 사각형은 사구간을 표시하고 큰 사각형은 에너지 소비 최소화를 위해 탐색된 타행 구간을 표시한다. 고속철도의 정상 제동 프로파일인 {300, 270, 230, 0kph}을 고려하여 경제 속도는 280에서 300까지 5kph 간격으로, 타행 끝점 속도는 230에서 300까지 10kph 간격으로 회생 제동만에 의한 제동 끝점의 속도는 170에서 290까지 10kph 간격으로 격자점을 구성하고 3가지 격자점을 결합한 트리플릿을 형성한다. 트리플릿 중 경제 속도 > 타행 끝점의 속도 > 회생 제동만에 의한 제동 끝점 속도를 만족하는 트리플릿에 대해 시물레이션을 수행하여 트리플릿 구성 요소간의 상관 관계와 적절한 트리플릿 값을 찾아본다(참고 그림 9-11). 시물레이션 결과 경제 속도는 290에서 300kph, 타행 끝점 속도는 230에서 240kph와 회생 제동만에 의한 제동 끝점 속도는 170에서 230kph 범위가 경제적인 것으로 보인다.

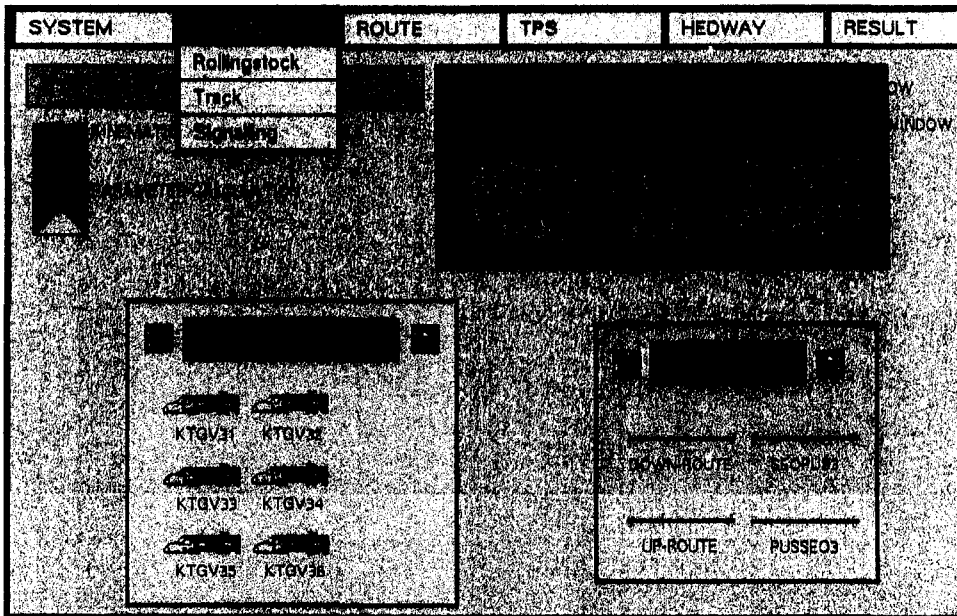


그림 5. 시물레이션을 위해 차량 및 노선 객체 생성 화면

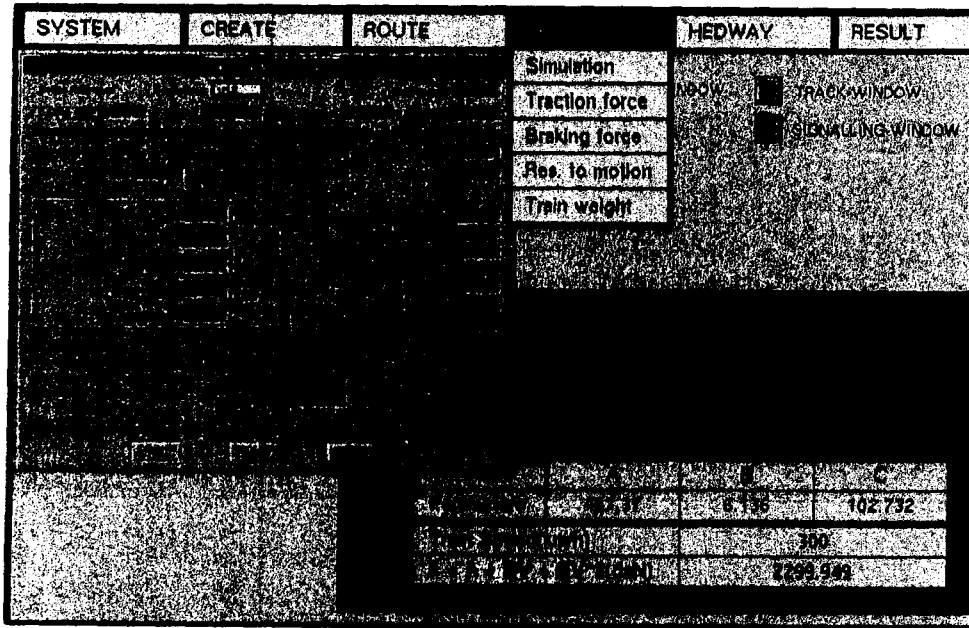


그림 6. 주행저항 계산 화면

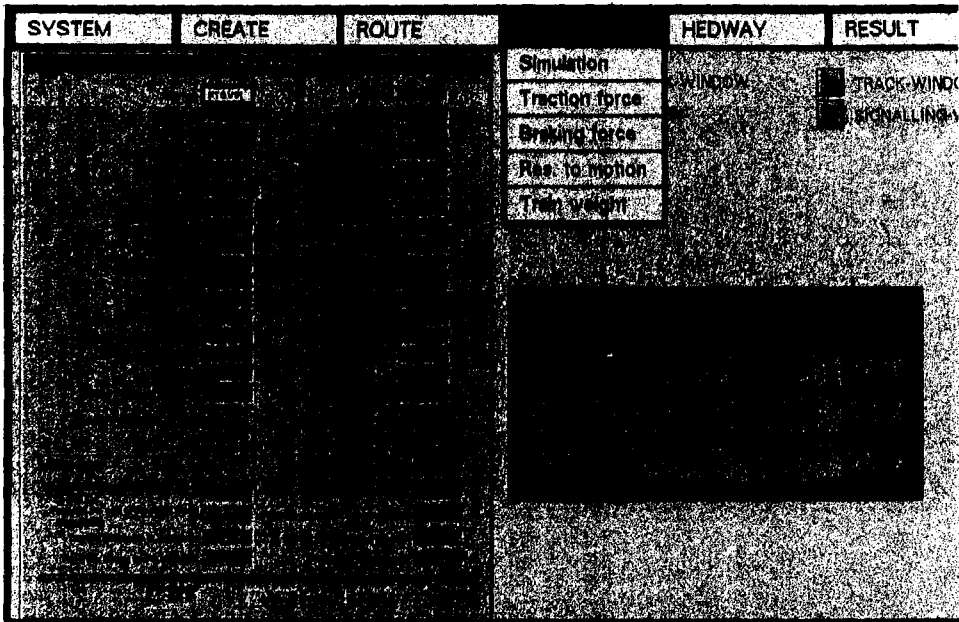


그림 7. 시뮬레이션 선택 화면

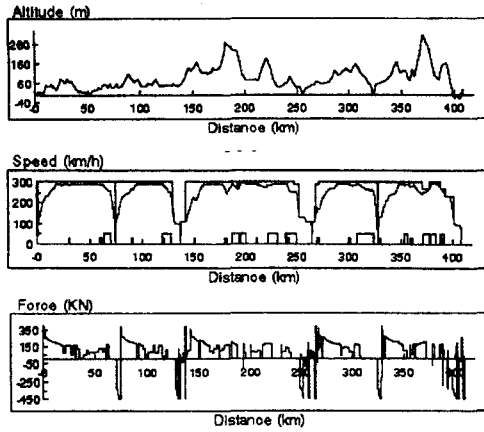


그림 8. 경제 주행 궤적 출력 화면

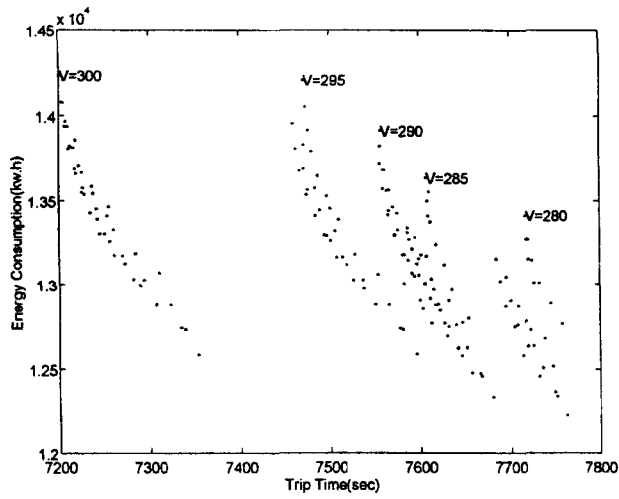


그림 9. 경제 속도가 운행시간과 소비 에너지에 미치는 영향

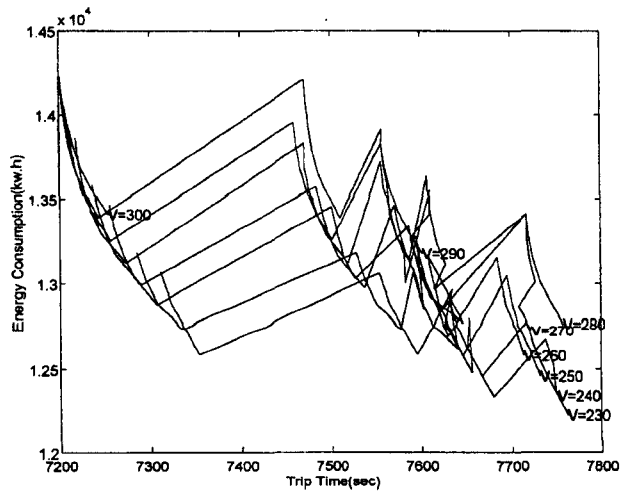


그림 10. 타행 끝점 속도가 운행시간과 소비 에너지에 미치는 영향

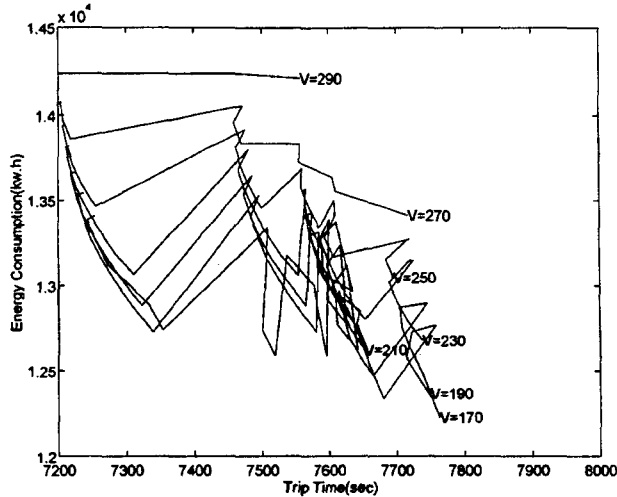


그림 11. 회생 제동만에 의한 제동 끝점 속도가 운행시간과 소비 에너지에 미치는 영향

## 5. 결론

본 연구에서는 고속철도/지하철 차량의 경제적 운전 전략을 수립할 수 있는 시뮬레이션 기법을 제안하였다. 특히 이 방법은 별도의 추가 비용 없이 노선의 특성에 따른 에너지 소비 최적화를 통해 운영 비용을 줄일 수 있는 운전 전략을 찾는데 그 목적이 있었고 실험 노선을 통해 그 실효성을 입증한다면 그 효용성이 매우 크다고 할 수 있다.

경부고속철도의 사례 연구를 통해 찾은 남서울-부산 하행선의 경우, 최상의 결과는 경제속도 300, 타행 끝점 속도 230과 회생 제동만에 의한 제동 끝점 속도 170으로 이 경우 운전 여유분은 3%이고 에너지 저감은 10% 정도이다. 이는 경부 고속철도의 운전 여유분이 5에서 7% 사이인 것을 고려하면 계획된 일정에 맞춰 정상 운영을 하면서도 에너지 저감 효과를 충분히 거둘 수 있음을 입증하는 것이다.

## 참고문헌

1. R. A. Uher(1987), "Rail Traction Energy Management Model," in *Computers In Railway Operations*, Computational Mechanics Publications, Springer Verlag, pp. 39-60.
2. P. Firpo and S. Savio(1994), "Optimal control strategies for energy management in metrorail transit systems," in *Computers In Railway IV-Vol. 2*, Computational Mechanics Publications, pp. 91-99.
3. M. Ashiya and M. Yasuda(1994), "Total system simulation of electrical railway of power consumption study," in *Computers in Railways IV-Vol. 1: Railway Design and Management*, Computational Mechanics Publications, pp. 429-436.
4. High-Level Group(1995), Relevance of the trans-european high-speed train network for the european union: study results, in *High Speed Europe*, Office for official publications of the european communities, February pp. 54-55.
5. T. Liden(1993), "The New Train Traffic Simulation Program," *ASU Newsletter*, Vol. 21, No. 2, pp.2-15, August.
6. J. Eichler and A. Turnheim(1997), "Simulation of transit systems," a review, *SCIENTIA ELECTRICA*, pp.47-61.
7. Jane Lee-Gunther, Mickie Bolduc, and Scott Butler(1995), "Vista<sup>TM</sup> Rail Network Simulation," *Proc. Of The IEEE/ASME Joint Railroad Conference*, pp. 93-98, April.
8. Y. Liu and X. Wang(1994), "The analysis of train transportation simulation system," in *Computers In Railway IV-Vol. 2, Railway Operations*, Computational Mechanics Publications, pp. 297-304.
9. H. S. Hwang(1998), "Control Strategy for Optimal Compromise between Trip Time And Energy Consumption in a High Speed Railway," *IEEE Trans. on System Man and Cybernetics, Part A: System and Humans*, Vol. 28, Issue 6, Nov.