

전기철도차량 경제운전 모형 개발

Development of Economical Run Model for Electric Railway Vehicle

이태형* · 황희수*

Tae-Hyung Lee · Hee-Soo Hang

Abstract

The Optimization has been performed to search an economical running pattern in the view point of trip time and energy consumption. Fuzzy control model have been applied to build the meta-model. To identify the structure and its parameters of a fuzzy model, fuzzy c-means clustering method and differential evolutionary scheme are utilized, respectively. As a result, two meta-models for trip time and energy consumption were constructed. The optimization to search an economical running pattern was achieved by differential evolutionary scheme. The result shows that the proposed methodology is very efficient and conveniently applicable to the operation of railway system.

Keywords : Economical Run(경제운전), High Speed train(고속철도차량), Fuzzy(퍼지)

1. 서론

고속으로 주행하는 전기철도차량은 주행시간을 비약적으로 단축시켜 국민 생활을 혁신적으로 바꿔놓은 반면 운행할 때마다 대량의 에너지를 소모한다. 따라서 주어진 운행 시간 요구 조건을 만족시키면서 에너지 소비를 최소화할 수 있는 방안이 있으면 대단히 유용할 것이다. 에너지 소비는 운행 시간에 대략 반비례하기 때문에 운행 시간과 에너지 소비간의 절충이 이루어져야 한다[12].

철도차량의 경제운전은 주행하는 선로에 존재하는 수많은 곡선과 경사, 속도 제한 조건과 열차성능해석 계산시 열차의 견인, 제동 특성이 비선형이기 때문에 해석적인 방법으로 해를 구하는데 어려움이 많다[1-10].

퍼지모델은 시스템이 복잡하거나 정의하기 어렵고 불확실한 경우에 유용하게 사용할 수 있으며 명확한(crisp) 판단을 내릴 수 없는 명제를 대상으로 애매성(fuzziness)을 다룰 수 있다. 또한 퍼지모델은 인간이 다루기 쉬운 언어적인(linguistic) 모델로 표현이 가능하여 철도운영자가 에너지 소비를 저감하는 경제운전 전략을 수립하는데 도움을 줄 수 있다[11,12].

본 논문에서는 전기철도차량의 운행 시간 여유분을 고려하여 에너지 소비를 최소화하는 경제 운전 모형을 제시한다. 이를 위해 선행연구[13,14]를 통해 개발한 열차성능계산(Train Performance Simulation, TPS) 프로그램에 경제 운전 기능을 추가하고 입력으로 경제최고속도와 타행끝점 속도, 출력으로 주행시간과 소비에너지 데이터를 생성하고 인공지능을 이용하여 경제주행패턴을 찾는 방안을 제시하였다. 경제운전모형을 한국형 고속열차에 적용하여 그 타당성을 입증하였다.

2. 본론

2.1 문제의 정식화

경제 주행 패턴은 Fig. 1과 같이 추진단계에서의 경제최고속도(Eco)와 Fig. 2와 같이 제동단계에서의 타행끝점속도로 정의한다.

상업운행을 위해서는 주행시간을 고정해야하며 이 주행시간은 최대 성능 계산 즉, 정상조건에서의 최소 주행 시간을 기반으로 해서 일정한 여유분을 추가하여 식 (1)과 같이 결정한다.

$$\text{주행시간} = \text{최소 주행 시간} + \text{여유분} \quad (1)$$

여기서, 정상조건이라함은 견인과 제동특성이 정상이며 반마모된 차륜, 정상조건인 선로와 차륜의 슬립(slip)과

* 책임저자 : 정희원, 한국철도기술연구원, 고속철도사업단 신뢰성평가팀
E-mail : thlee@krti.re.kr
TEL : (031)460-5624 FAX : (031)460-5649
* 정희원, 한라대학교

슬라이드(slide)가 발생하지 않는 것을 의미한다. 이런 상태에서 최대 성능 계산은 사구간에서의 타행과 급전설비와 신호에 의해 결정되는 속도제한을 포함하여 수행한다. 여유분은 외란으로 인한 운행 방해를 조정하기 위해 실제 주행시간에 부가된 것이다. 따라서 각 주행패턴에 대한 주행시간 여유분은 아래 식 (2)와 같이 계산한다.

$$M_{econotriptime} = \frac{(T_{econotrip} - T_{econodwell}) - (T_{maxtrip} - T_{maxdwell})}{T_{maxtrip} - T_{maxdwell}} \times 100 \quad (2)$$

여기서, $M_{econotriptime}$, $T_{econotrip}$ 와 $T_{econodwell}$ 는 각각 경제 운전의 주행시간 여유분, 주행시간과 정차시간이고, $T_{maxtrip}$ 와 $T_{maxdwell}$ 는 각각 최대 성능에 의한 주행시간과 정차시간이다. 주어진 조건하에서 에너지 저감은 식 (3)에 의해 계산한다.

$$E_{econosaving} = \frac{E_{max} - E_{econo}}{E_{max}} \times 100 \quad (3)$$

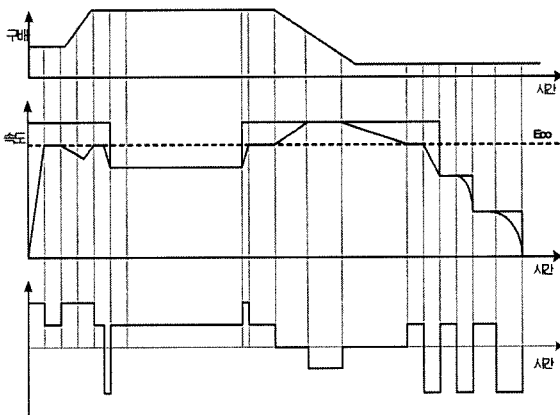


Fig. 1. Application of economic speed(Eco)

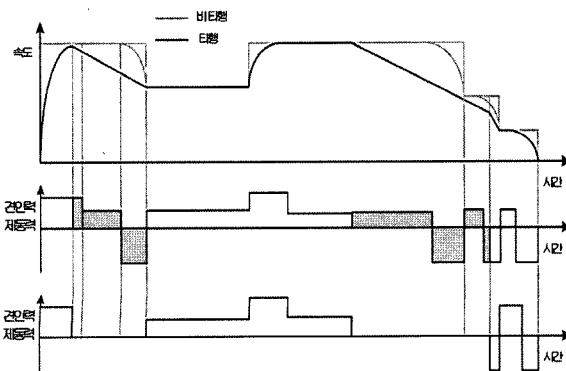


Fig. 2. Application of coasting

여기서, $E_{econosaving}$ 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.

경제운전에서 에너지 저감은 속도의 최적선택에 의해 달성되며 문제는 주어진 주행시간 제약조건하에서 에너지 소비를 최소로 하는 경제최고속도와 타행끝점속도를 원소로 하는 속도 집합 $V_{speed} = \{V_{econospeed}, V_{coastspeed}\}$ 를 찾는 것으로 정식화한다. 따라서 에너지 저감에 대한 최적화문제로서 식 (4)와 같이 정식화할 수 있다. 여기서, T 는 주어진 운행시간, $V_{econospeed}$ 는 경제최고속도, $V_{coastspeed}$ 는 타행끝점속도이다.

$$\begin{aligned} \text{목적함수 최대화 : } & E_{econosaving} \\ \text{제약조건 : } & T_{econotrip} \leq T \\ \text{속도구하기 : } & V_{speed} = \{V_{econospeed}, V_{coastspeed}\} \end{aligned} \quad (4)$$

2.2 문제 해결 방법론

주행하는 선로에 존재하는 수많은 곡선과 경사 조건 때문에 열차 성능 계산시 열차의 견인, 제동특성은 비선형으로 되어 해석적인 방법으로 해를 구하는데 어려움이 많다. 그러므로 독립변수의 변화에 따른 열차 성능을 분석하는 컴퓨터 시뮬레이션 방법이 적절한 해를 제공해준다. 식 (4)의 목적함수는 두 독립변수의 공간에 위치하는 표면을 구성한다. 이 함수는 비선형 특성 때문에 표면에 국부최소값을 갖을 것이다. 주행시간은 에너지 소비에 반비례하므로 주행시간이 주어진다면 랜덤 탐색기법이 유효하겠지만 주행시간은 열차의 효율적인 운용을 위해 결정해야 하는 것이므로 격자 탐색기법(grid search technique)을 사용하여 두 개의 입력, 경제최고속도, 타행 끝점속도($V_{econospeed}$, $V_{coastspeed}$)를 사용하여 두 개의 출력, 주행시간과 소비에너지를 결정하는 것이 효율적이다. 다음은 각 격자점 V_{speed} 에서 격자탐색기법을 사용하여 최적화하는 과정이다.

- (1) $V_{econospeed}$, $V_{coastspeed}$ 으로 열차 성능 계산을 수행하여 탐색범위에서 경제최고속도, 타행 끝점속도, 주행시간, 소비에너지 데이터를 얻는다.
- (2) 획득된 데이터에 대한 퍼지모형을 사용하여 퍼지규칙의 수를 찾아내고 클러스터의 중심을 좌표축에 투영함으로써 입출력공간의 퍼지 분할수를 획득하는 구조 인식을 수행한다.
- (3) 제약조건이 있는 최적화 문제를 구성하고 차분진화 알고리즘을 사용하여 해를 찾아내는 파라미터 인식을 수

행한다. 여기서, 최적해를 찾기 위해 적합도를 평가할 때 목적함수와 주행시간 여유분, 즉, $E_{ecosaving} (V_{speed})$ 와 $M_{econotrip\ time} (V_{speed})$ 을 사용하여 평가한다.

3. 사례연구

한국형 고속열차 영업운행 편성인 20량을 대상으로 에너지 소비를 최소로 하는 경제운전 최적화를 수행하였다.

부산 - 광명 구간을 대전과 대구에 각각 60초씩 정차하는 패턴으로 상행방향으로 최고속도 300[km/h]로 주행하는 것으로 가정하였다. 소비에너지를 저감하는 대상은 한 편성의 열차이며 사용하는 제어 변수는 경제최고속도와 타행끝점속도로 구성되는 속도 패턴이다. 이 속도 패턴은 고속전철을 운전하는 기관사에 의해 추종하게 되며 이외의 장비나 에너지 저감 기법은 배제하는 것으로 가정하였다. 견인 및 제동시스템은 정상적으로 작동한다. 즉, 시뮬레이션에 의해 계산된 견인력이 차륜을 통해 공전(slip)상태 없이 점착계수 한계 내에서 레일에 전달되어 열차를 추진한다. 이 과정에서 견인시스템의 인버터는 소비에너지 저감을 위한 별도의 속도제어를 수행하지 않는다. 제동력도 차륜을 통해 미끄러짐(slide) 없이 레일에 작용한다. 차륜은 반마모된 상태(직경 0.885[m])를 가정한다.

TPS는 한 편성의 열차가 일정 선로구간을 주행하는 데에 따른 시각별 위치, 속도, 전력소비 등의 제반 성능을 분석하는 작업이다. 선행연구에서는 개발한 TPS와 경부고속철도 시뮬레이션 결과 및 한국형 고속열차 시험결과를 비교하여 그 타당성을 확인하였다[13,14]. 본 논문에서는 기 개발한 TPS를 사용하여 최대성능해석(all out run) 조건으로 주행성능해석을 수행하였다. 그 결과는 Table 1과 같으며 이 결과를 일반 운행 기준으로 설정하였다. 즉, 최대 성능에 의한 운행시간($T_{max\ trip}$)은 105.88[분]이며 최대 열차 성능에 의한 에너지 소비(E_{max})는 12,190.33[kWh]이다.

그 다음으로 격자탐색기법(grid search technique)을 사용하여 퍼지 모델링을 수행할 데이터를 얻기 위하여 TPS 프로그램을 사용하여 두 개의 입력, 경제최고속도, 타행끝점속도 ($V_{econospeed}$, $V_{coast\ speed}$)와 두 개의 출력, 주행시간과 소비에너지에 대한 데이터를 얻었다. 경제최고속도는 260[km/h]에서 295[km/h]까지 5[km/h] 단위로, 타행끝점속도는 170[km/h]에서 290[km/h]까지 10[km/h] 단위로 격자를 구성하였다.

경제운전에 대한 TPS 결과를 얻기 위하여 경제최고속도, 타행 끝점속도의 설정에 따라 시뮬레이션이 가능하도록 프로그램에 모듈을 추가하였다.

Table 1. TPS result(All out run)

구간	거리 [km]	주행시간 [분]	속도 [km/h]	소비에너지 [kWh]
부산-대구	144.62	36.61	237.04	4504.63
대구-대전	127.04	33.48	227.65	3718.13
대전-광명	137.29	32.79	251.21	3967.57
계	408.96	105.88	231.74	12190.33

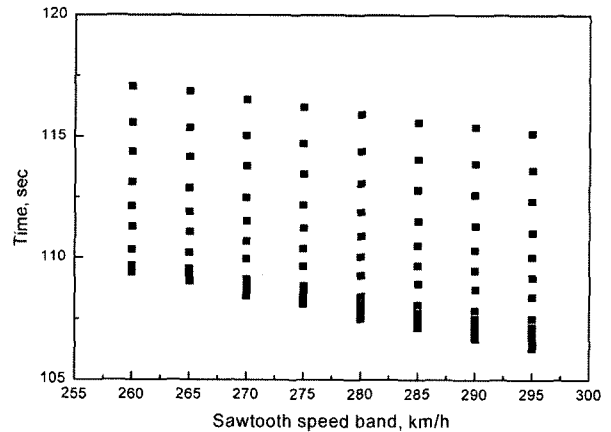


Fig. 3. Relationship between economic maximum speed and running time

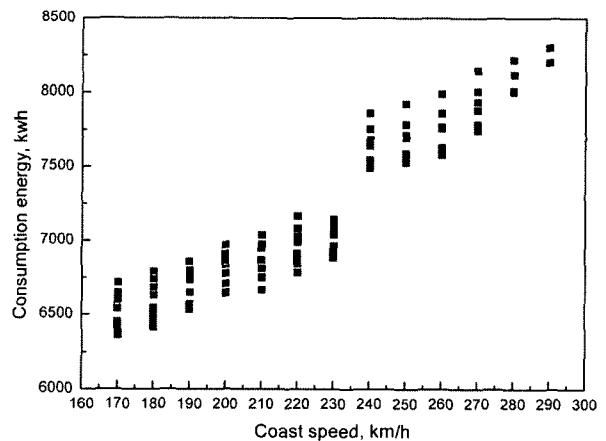


Fig. 4. Relationship between coasting end speed and energy consumption

Fig. 3과 Fig. 4로부터 각각 경제최고속도가 낮아짐에 따라 주행시간은 증가하고, 타행끝점속도가 낮아짐에 따라 소비에너지는 감소하는 경향을 확인할 수 있었다. 타행끝점속도 230km/h와 240km/h를 경제로 소비에너지 증가율이 차이가 나는데 이는 Table 1에서와 같이 평균주행속도가 231.74km/h이기 때문인 것으로 분석된다.

Table 2. Variables used in parameter identification and optimization using differential evolutionary

변수명	퍼지모델링		최적화
	소비에너지	주행시간	
최대 진화세대수(maxGen)	20000	20000	500
집단의 크기(Np)	20	20	10
목표적합도(goal)	30	1000	1.0
목표적합도 허용오차(epsFit)	1.e-5	1.e-5	1.e-5
차분 크기 조정 가중치(F)	0.5	0.5	0.5
교배율(Cr)	0.5	0.5	0.5
교배용 개체생성방법(nde)	1	1	1

Table 2는 파라미터 인식과 최적화를 수행하는데 사용한 차분진화의 변수값을 나타내고 있다. 퍼지 규칙의 후건부는 모두 실수인 경우로 계산하였다. 최대진화세대수(maxGen)는 탐색시간을 충분히 하기 위해 20000세대로 선정하였고, 집단의 크기(Np)는 최적화하려는 두 개의 변수의 10배인 20을 사용하였다. 0.5와 1사이의 값을 갖는 차분 크기 조정 가중치(F)는 0.5로, 개체 교배 여부를 결정하는 교배율(Cr)은 0.5를 사용하였다.

Fig. 5과 Fig. 6은 차분진화를 사용하여 소비에너지와 주행시간 모델에 대해 파라미터 인식을 수행한 결과를 보이고 있다. 세대수가 진행됨에 따라 설정한 적합도값으로 수렴하고 있는 것을 볼 수 있다.

Fig. 7은 시간여유분을 최대성능해석(all out run) 조건의 주행시간 대비 3[%]로 하였을 때의 세대수에 대한 적합도합수 결과를 보인 것이다.

에너지소비모델의 경우 파라미터 인식을 통해서 Table 3과 같이 6개의 규칙을 찾았으며 주행시간 모델의 경우 파라미터 인식을 통해서 5개의 규칙을 찾았다.

에너지소비 모델과 주행시간 모델을 사용하여 운행여유분 변경시 최적화한 경제최고속도와 타행끝점속도는 Table 4와 같다. 주행시간 여유율은 최대성능해석 계산의 결과인 최소 운행 시간에 일정 비율(3~10[%])을 곱하여 산정하고 철도운영자는 열차 시격과 열차 밀도를 고려하여 열차운행 계획에 반영한다.

Table 4를 통해 여유율을 기준으로 두 그룹으로 구분할 수 있다. 소비에너지 저감율이 10[%]이하인 부분과 이상인 부분이다. 보통 철도운영자가 열차운행 계획에 사용하는 여유율이 5~7[%]인 것을 감안하면 사례 연구 대상 시스템은 여유율 5~7[%] 내에서 소비에너지 저감율이 상대적으로 커서 운영효과를 기대할 수 있다.

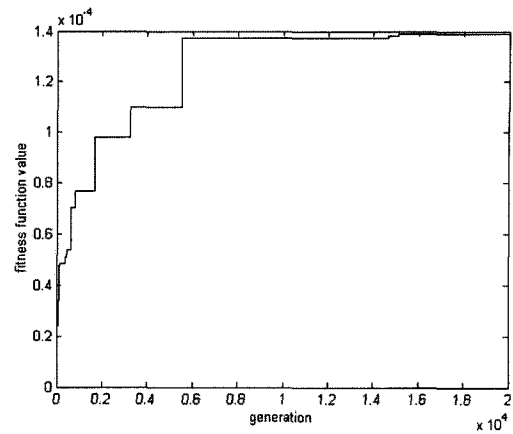


Fig. 5. Fuzzy modelling result of energy consumption using differential evolutionary scheme

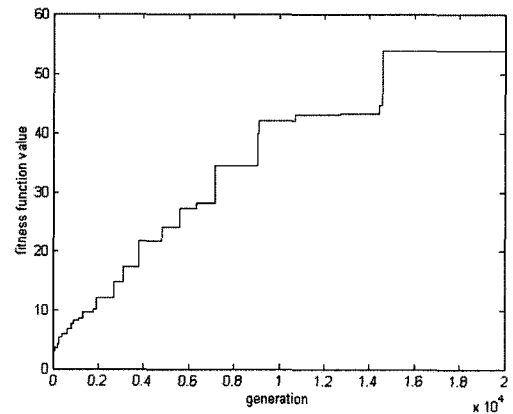


Fig. 6. Fuzzy modelling result of running time using differential evolutionary scheme

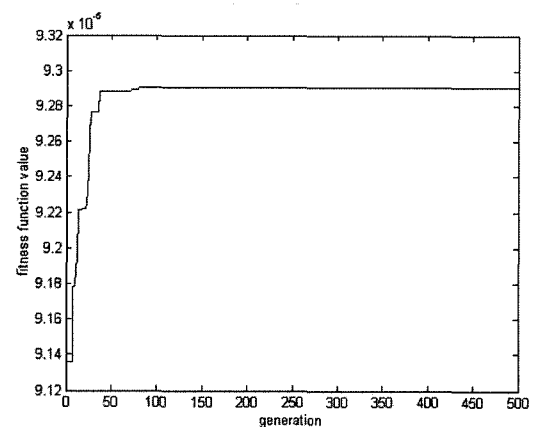


Fig. 7. Optimization result using differential evolutionary scheme (time margin 3[%])

Table 3. Fuzzy rules for energy consumption model

경제최고속도						
구분	규칙 1	규칙 2	규칙 3	규칙 4	규칙 5	규칙 6
c_1^i	251.38	211.29	301.12	365.00	277.99	139.94
dc_1^i	18.91	12.45	40.00	58.02	28.07	47.53
dl_1^i	0.00	95.07	31.65	116.09	21.74	95.18
dr_1^i	5.50	45.10	26.01	0.00	17.90	58.73
타행끝점속도						
구분	규칙 1	규칙 2	규칙 3	규칙 4	규칙 5	규칙 6
c_2^i	271.26	220.52	281.87	177.03	277.99	250.80
dc_2^i	7.72	21.02	32.43	4.73	19.02	124.19
dl_2^i	40.0	12.21	2.39	59.86	26.29	2.97
dr_2^i	31.50	107.30	38.91	11.87	40.00	84.27

Table 4. Optimal running pattern results as time margin

여유율 (주행시간)	경제최고 속도 [km/h]	타행끝점 속도 [km/h]	실제주행 시간 [min]	소비 에너지 저감율[%]
1[%](106.938)	299.2180	235.6041	106.80	7.8
3[%](109.056)	300.0000	205.5218	108.91	8.9
5[%](111.174)	292.0257	192.8836	111.05	11.2
7[%](113.291)	291.2442	185.7356	113.14	12.4
9[%](115.409)	291.2442	170.0000	115.26	13.2

4. 결론

본 논문에서는 전기철도차량의 운행 시간 여유분을 고려하여 에너지 소비를 최소화하는 경제운전 패턴을 퍼지모델을 이용하여 찾는 방안을 제시하였다.

이를 통해 해를 구하는데 어려움이 많았던 기존의 해석적인 방법의 단점을 극복할 수 있었다.

경제최고속도와 타행끝점속도를 주행패턴의 변수로 사용하고 퍼지모델과 진화알고리즘을 적용해 경제운전 모형 제안이 가능함을 확인하였다.

사례연구를 통해 주행시간 여유율이 5[%] 이상인 경우 에너지소비 저감율이 10[%] 이상인 주행패턴을 최적화하는 것이 가능하였다. 이것은 운영자가 부여한 여유율을 포함한 운행시간 이내로 주행하면서 에너지소비는 최소로 하는 경제최고속도와 타행끝점속도를 최적화한 것이다.

향후 시운전시험중인 한국형 고속열차를 대상으로 제안한 경제운전 모형을 시험을 통해 검증할 계획이다.

후 기

본 논문은 고속철도기술개발사업 “고속철도시스템 신뢰성 및 운영효율화 기술개발” 과제 연구결과의 일부임을 밝힌다.

참 고 문 헌

1. B.Benjamin, A.Long, I.Milroy, R.Payne, P.Pudney, “Control of railway vehicles for energy conservation and improved time-keeping”, Proc. of the Conference on Railway Engineering, 1987.
2. I.Milroy, “Aspects of automatic train control”, Ph.D. Thesis. Loughborough University, 1980.
3. C.Jiixin and P.Howlett, “Application of Critical Velocities to the Minimisation of Fuel Consumption in the Control of Trains”, Automatica. Vol.28, No.1, pp.165-168, 1992.
4. C.Jiixin and P.Howlett, “A Note on the Calculation of Optimal Strategies for the Minimization of Fuel Consumption in the Control of Trains”, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol.38, No.11, November 1993.
5. P.Pudney, P.Howlett, “Optimal Driving Strategies for a Train Journey with Speed Limits”, J. Austral. Math. Soc. B36, pp. 38-49, 1994.
6. P.Howlett, “Optimal Strategies for the Control of a Train”, Automatica, Vol.32, No.4, pp.519-532, 1996.
7. E.Khmelnitsky, “On an Optimal Control Problem of Train Operation”, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol.45, No.7, July 2000.
8. Iakov M.golovitcher, “Energy Efficient Control of Rail Vehicles”, 2001 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, pp.658-663, vol.1.
9. Jin Weidong, Li Chongwei, Hu Fei, Jin Fan, “A study on intelligent computation of methods of optimization operation for train”, 2000 International Workshop on Autonomous Decentralized Systems, 2000. Proceedings. pp.97-102.
10. 김치태, “전동열차의 주행에너지 소비를 최소화하는 최적 운전”, 석사학위논문, 서울산업대학교 철도차량공학과, 2001.
11. 황희수, “Train Performance Simulation and Optimal Control Strategies for Energy Saving Run in Korean High Speed Rail System”, 고속철도연구보고서(전기분야), 한국고속철도건설공단 1996. 12.
12. H.S.Hwang, “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. 1998.
13. 이태형, 박춘수, 신중린, “한국형 고속전철 열차성능해석 프로그램”, 한국철도학회논문집, 제6권, 제2호, 2003.
14. 이태형, 박춘수, 신중린, “한국형 고속전철 개발열차 열차성능해석 및 평가”, 한국철도학회논문집, 제7권, 제2호, pp.120-124, 2004.