

한국형 고속열차 경제운전 모형 개발

이태형, 박춘수

Development of Economical Run Model for High Speed Rolling stock 350 eXperimental

Taehyung Lee, Choonsoo Park

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.

1. 서 론

본 논문에서는 고속철도의 운행 시간 여유분을 고려하여 에너지 소비를 최소화하는 경제운전 패턴을 인공지능을 이용하여 찾는 방안을 제시한다.

철도차량의 경제운전은 주행하는 선로에 존재하는 수많은 곡선과 경사, 속도 제한 조건 때문에 열차성능해석 계산시 열차의 견인, 제동 특성이 비선형이기 때문에 해석적인 방법으로 해를 구하는데 어려움이 많다. 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.

경제운전 패턴은 추진단계에서의 경제속도와 제동단계에서의 타행끝점속도로 정의한다. 이를 위해 기존의 TPS(Train Performance Simulation)를 경제운전까지 계산할 수 있도록 기능을 확장하였다. 고속선구간에서 시운전시험 수행중인 한국형 고속열차를 대상으로 데이터를 추출하고 퍼지를 이용하여 모델링하고 차분진화 알고리즘을 이용하여 최적화한 결과를 제시한다.

본 연구는 별도의 추가 비용 없이 노선의 특성을 고려하여 에너지 소비를 절감하므로써 운영 비용을 줄일 수 있는 운전 전략을 찾는 데 최종적인 목적이 있다.

2. 본 론

2.1 문제의 정식화

상업운행을 위해서는 주행시간을 고정해야하며 이 주행시간은 최대 성능 계산 즉, 정상조건에서의 최소 주행시간을 기반으로 해서 일정한 여유분을 추가하여 결정하게 된다. 여기서, 정상조건이라함은 견인과 제동특성이

정상이며 반마모된 차륜, 정상조건외의 선로와 차륜의 슬립과 슬라이드가 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(1)과 같이 계산한다.

$$M_{econtriptime} = \frac{(T_{econtrip} - T_{econduell}) - (T_{maxtrip} - T_{maxduell})}{T_{maxtrip} - T_{maxduell}} \times 100 \quad (1)$$

여기서, $M_{econtriptime}$, $T_{econtrip}$ 와 $T_{econduell}$ 는 각기 경제 운전의 주행시간 여유분, 주행시간과 정차시간이고, $T_{maxtrip}$ 와 $T_{maxduell}$ 는 각각 최대 성능에 의한 주행시간과 정차시간이다. 주어진 조건하에서 에너지 저감은 식(2)에 의해 계산한다.

$$E_{econoring} = \frac{E_{max} - E_{econ}}{E_{max}} \times 100 \quad (2)$$

여기서, $E_{econoring}$ 은 경제 주행을 통한 에너지 소비 저감 비율이고 E_{max} 와 E_{econ} 은 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 최소화 하는 경제최고속도와 타행끝점속도를 원소로 하는 속도집합 $V_{speed} = \{V_{conospeed}, V_{coastspeed}\}$ 를 찾는 것으로 정식화한다. 따라서 에너지 저감에 대한 최적화문제로 식(3)과 같이 정식화할 수 있다.

목적함수 최대화 : $E_{econoring}$
 제약조건 : $T_{econtrip} \leq T$ (주어진 주행시간) (3)
 속도구하기 : $V_{speed} = \{V_{conospeed}, V_{coastspeed}\}$

2.2 문제해결 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(3)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 격자탐색기법(grid search technique)을 사용하여 두 개의 입력, 경제최고속도, 타행 끝점속도($V_{econspeed}$, $V_{coastspeed}$)를 사용하여 두 개의 출력, 주행시간과 소비에너지를 결정하는 것이 효율적이다. 다음은 각 격자점 V_{speed} 에서 격자탐색기법을 사용하여 최적화하는 과정이다.

- 1) $V_{econspeed}$, $V_{coastspeed}$ 를 사용하여 열차 성능 계산을 수행하여 탐색범위에서 경제최고속도, 타행 끝점속도, 주행시간, 소비에너지 데이터를 얻는다.
- 2) 획득된 데이터에 대한 퍼지모델을 사용하여 퍼지규칙의 수를 찾아내고 클러스터의 중심을 좌표축에 투영함으로써 입출력공간의 퍼지 분할수를 획득하는 구조 인식을 수행한다. 이때, 구조인식을 하기 위해 Fuzzy C-Mcans(FCM) 클러스터링을 이용하였다.
- 3) 제약조건이 있는 최적화 문제를 구성하고 차분진화 알고리즘을 사용하여 해를 찾아내는 파라미터 인식을 수행한다. 여기서 최적해를 찾기 위해 적합도를 평가할 때 목적함수와 주행시간 여유분, 즉, $E_{econosaving}(V_{speed})$ 와 $M_{econo-trip-time}(V_{speed})$ 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, 시스템 고장에 의해 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. 참고로 신차륜 직경은 0.92[m], 완전마모 차륜의 직경은 0.85[m]으로 가정한다.

본 연구에서 검증한 TPS 프로그램을 사용하여 최대성능해석(all out run) 조건으로 주행성능해석을 수행하였다 그 결과는 표 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. 표 1의 결과는 운행 여유분을 1-9[%]로 변화시켰을 때 에너지소비 저감율의 기준으로 사용한다.

표1 All out run TPS result

구간	거리 [km]	주행 시간 [분]	속도 [km/h]	입력 에너지 [kWh]	회생 에너지 [kWh]	소비 에너지 [kWh]
부산 대구	144.62	36.61	237.04	5262.35	757.72	4504.63
대구 대전	127.04	33.18	227.65	4419.30	701.17	3718.13
대전 광명	137.29	32.79	251.21	4558.08	590.51	3967.57
계	408.96	105.88	231.74	14239.73	2049.40	12190.33

그 다음으로 격자탐색기법(grid search technique)을 사용하여 퍼지 모델링을 수행할 데이터를 얻기 위하여 최대성능 주행성능해석에 사용했던 TPS 프로그램을 사용하여 두 개의 입력, 경제최고속도, 타행 끝점속도 ($V_{econspeed}$, $V_{coastspeed}$)와 두 개의 출력, 주행시간과 소비에너지에 대한 데이터를 얻었다. 경제최고속도는 260[km/h]에서 295[km/h]까지 5[km/h] 단위로, 타행 끝점속도는 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. 그림 1은 경제최고속도의 변화에 따른 주행시간 관계를 보여주고 있다. 경제최고속도가 낮아짐에 따라 주행시간은 증가하는 경향을 보이고 있다.

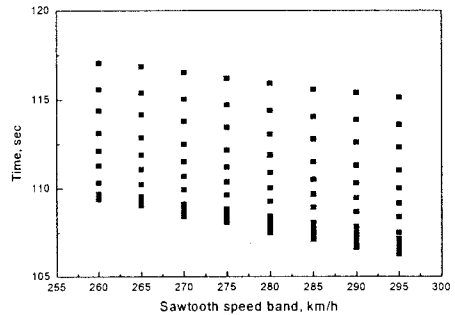


그림 1 경제최고속도에 대한 주행시간 관계

그림 2는 차분진화를 사용하여 소비에너지와 주행시간 모델에 대해 파라미터 인식을 수행한 결과를 보이고 있다. 세대수가 진행됨에 따라 설정한 적합도값으로 수렴하고 있는 것을 볼 수 있다.

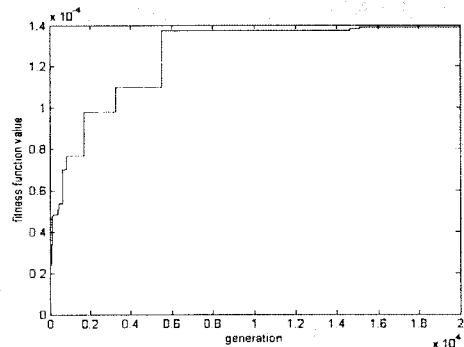


그림 2 차분진화를 이용한 소비에너지 퍼지모델링 결과

그림 3은 시간여유분을 최대성능해석(all out run) 조건의 주행시간 대비 3[%]로 하였을 때의 세대수에 대한 적합도함수 결과를 보인 것이다. 표 4.3은 주행시간여유분에 대한 최적 속도제어 결과를 보인 것이다. 주행시간 여유분은 영업운행시 적용되는 값을 사용하였다.

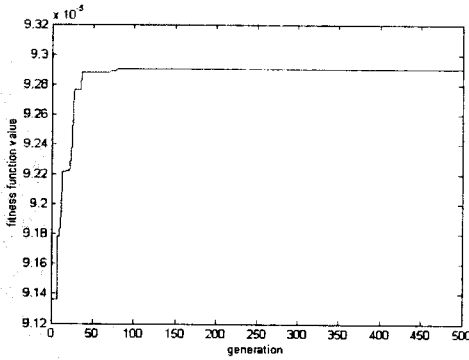


그림 3 차분진화를 이용한 최적화 결과(시간여유분 3%)

에너지모델의 경우 파라미터 인식을 통해서 6개의 규칙을, 주행시간 모델의 경우 5개의 규칙을 각각 표 3, 4과 같이 찾았다.

표 3 소비에너지 모델에 대한 규칙

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

표 4 주행시간 모델에 대한 규칙

경제최고속도					
구분	규칙 1	규칙 2	규칙 3	규칙 4	규칙 5
c_1^i	276.13	168.66	285.01	212.81	276.60
dc_1^i	32.66	15.83	0.02	8.86	26.30
dl_1^i	22.36	2.19	32.00	0.00	26.42
dr_1^i	22.37	59.02	19.10	34.42	34.56
타행끝점속도					
구분	규칙 1	규칙 2	규칙 3	규칙 4	규칙 5
c_2^i	206.33	267.52	241.41	311.24	250.72
dc_2^i	54.04	40.00	90.24	40.00	52.61
dl_2^i	20.71	35.55	19.78	32.05	70.07
dr_2^i	129.93	39.98	129.84	30.50	129.99

에너지소비 모델과 주행시간 모델을 사용하여 운행여유분 변경시 최적화한 경제최고속도와 타행끝점속도는 표 4.5와 같다. 주행시간 여유율은 최대성능해석 계산의 결과인 최소 운행 시간에 일정 비율(3 ~ 10[%])을 곱하여 산정하고 철도운영자는 열차 시격과 열차 밀도를 고려하여 열차운행계획에 반영한다.

경제최고속도와 타행끝점속도는 총 주행시간(최소주행시간 + 주행시간여유분) 내에서 에너지소비를 최소로 하는 주행패턴을 의미한다. 따라서 주행시간 여유율이 0[%]인 경우, 즉 최소주행시간 내에 있으면서 소비에너지가 최소로 되는 주행패턴은 존재하지 않는다. 표 4.5를 통해 여유율을 기준으로 두 그룹으로 구분할 수 있다. 하나는 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.

표 5 시간여유율에 대한 최적 주행패턴 결과값

주행시간 여유율	경제최고속도 [km/h]	타행끝점속도 [km/h]	실제주행시간 [min]	소비에너지저감율[%]
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. 결 론

본 논문에서는 고속철도의 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.

[참 고 문 헌]

- [1] 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
- [2] 이태형, 박준수, 신종린, "한국형 고속전철 열차성능해석 프로그램", 한국철도학회논문집, 제6권, 제2호, 2003
- [3] 이태형, 박준수, 신종린, "한국형 고속전철 개발열차 열차성능해석 및 평가", 한국철도학회논문집, 제7권, 제2호, pp. 120 - 124, 2004