

실시간 열차 속도 프로파일 최적화 기법에 관한 연구

김무선^{1*}, 김정태¹, 박철홍²

¹한국철도기술연구원 광역도시철도융합연구실, ²한국철도기술연구원 지능형신호통신연구팀

A Study on the Real-time Optimization Technique for a Train Velocity Profile

Moosun Kim^{1*}, Jungtai Kim², Chul-Hong Park²

¹Metropolitan Transit Convergence Research Division, Korea Railroad Research Institute

²Signalling & Communication Research Team, Korea Railroad Research Institute

요약 열차 운영사의 관점에서, 열차 운행에 관한 주요 관심사는 정해진 운행시간의 준수뿐만 아니라, 그와 동시에 열차 운행을 위해 소비되는 에너지량을 최소화하는 것이다. 일반적인 수동 운전시, 기관사는 운행 노선의 특성에 따라 미리 규정된 최대 속도 프로파일을 기준으로, 노치를 제어함에 따라 규정 속도를 넘지 않도록 열차의 가감속을 조절한다. 이때 규정 속도를 준수하면서 동시에, 전체 운행 중에 소요되는 에너지량의 절감을 위해, 기관사가 적절한 노치를 선택할 수 있는 구간별 노치 지정 가이드가 있어야 하며, 이는 운행구간에서의 노치 단계 최적화라는 절차를 통해 가능하다. 본 논문에서는 일반적인 운행 환경뿐만 아니라, 열차가 운행 중에 일시적으로 잔여구간의 트랙 정보 또는 규정속도 정보가 변경되는 이벤트 발생시에도 변화된 정보들을 기반으로 실시간으로 잔여구간의 노치 단계를 최적화 할 수 있는 유전 알고리즘을 활용한 실시간 노치 최적화 방안을 제안하였다. 또한 유전 알고리즘을 통해 얻어진 최적해를 적용할 때 에너지 절감 효과와 최적해 수렴 특성에 관하여 분석하였다.

Abstract In the point of view of a train operator, the main concern with a train operation is not only to maintain a time schedule, but also to decrease the energy consumption as much as possible. Generally for a manual drive, a train conductor controls the train acceleration and deceleration by controlling the notches not to exceed the regulation velocity by considering the given maximum velocity profile for an operation route. For this case, the guideline for a conductor is needed to choose the proper notches by applying the notch optimization so as to drive at the regulation velocity and minimize energy consumption simultaneously. In this paper, the real-time notch optimization plan is suggested using a genetic algorithm that optimizes the notches for the remaining route in real time when the event occurs that track information or regulation velocity profile of the remaining route changes during train operation as well as a normal operation situation. An energy saving effect and the convergence behavior of the optimal solution obtained was analyzed in a genetic algorithm.

Keywords : Energy consumption, Genetic algorithm, Notch, Realtime optimization, Velocity profile

1. 서론

오늘날 열차 운영사 관점에서 주요관심사는 지정시간

에 맞추어 열차 운행을 완료하는 것뿐만 아니라, 운행 중에 소비되는 에너지를 최소화 할 수 있도록 가감속과 관성주행의 적절한 조합으로 열차를 운영하는 것이다. 이

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었음

*Corresponding Author : Moosun Kim(Korea Railroad Research Institute)

Tel: +82-31-460-5546 email: mskim@krii.re.kr

Received July 15, 2016

Revised August 3, 2016

Accepted August 11, 2016

Published August 31, 2016

는 전 세계적으로 에너지 관련한 문제점이 부각되고 있는 상황에서, 운영사 측면에서 운영비를 줄일 수 있는 직접적인 방안이 될 수 있기 때문이다. 따라서 운행 중에 발생하는 에너지 소모를 줄이기 위한 열차 운영방안에 관한 연구가 활발히 진행 중에 있다.

운영방안에 관한 연구 중 하나로, 열차 속도를 조절하여 지정 운영시간과 에너지 최소화의 목적을 동시에 달성할 수 있는 방안에 대한 연구가 중점적으로 이루어지고 있다. 일반적으로 열차는 운행하는 노선의 특성과 주변 환경의 영향으로 역 사이에 여러 구간으로 구분하여 구간별 운행제한속도가 주어지며, 열차는 주어진 제한속도를 넘지 않는 속도 조건에서 운행하게 된다. 열차운행을 위한 실제 속도는 가감속과 관성주행의 조합으로 결정되어지는데, 가속시 소요되는 에너지를 고려하여, 적절 구간에서 가속을 진행하고 나머지 구간에서 제동과 관성주행으로 운행하게 되면 에너지 최소화가 가능하다.

결론적으로 가감속 및 관성주행을 위한 구간 설정과 가감속도 크기를 정의하는 문제의 해법이 열차 운영에너지 최소화를 위한 문제 해법으로 귀결된다.

이에 관한 연구들은 대부분 메타휴리스틱 방법을 적용하여 속도 프로파일을 최적화하였다. 대표적인 연구로서 Lee[1]는 퍼지모델(Fuzzy model)에 기반한 운행패턴 최적화를 통해 최고속도 및 제동시작점을 정의하였다. Kim[2]은 시뮬레이티드 어닐링(Simulated annealing) 기법을 통하여 최적화를 진행하였다. 또한 Park[3]은 다이렉트 서치(Direct search) 기법을 통해 가감속을 위한 노치값 최적화를 수행하였다. 또한 이 경우 열차 운행 모델링을 위해 시간변수를 위치 변수로 변환하여 노치특성을 반영하였다. 이상으로 열거한 연구들은 트랙 조건 및 속도 제한 조건 등 열차 운행조건들이 확정되어 있는 상황에서 최적화 알고리즘을 통해 최적값을 구한 경우이다. 이 경우에는 최적화 해를 구하기 위한 계산시간은 중요하지 않다. 하지만 열차 운행 중 외부 환경에 의해 주행 경로나 제한속도 값들이 변하게 되는 경우, 미리 구한 최적화 값들의 적용은 무의미하며, 변화된 환경을 고려한 최적화 결과값을 다시 구해야 한다. 결국 운행 중에 운행 정보 변화라는 이벤트 발생시, 새로운 정보를 바탕으로 운행시간과 소요에너지 최소화를 위하여 운행 중에 속도 최적화를 이끌어낼 수 있는 실시간 최적화 알고리즘의 적용이 요구된다. 본 연구에서는 실시간으로 속도 최적화를 이끌어 낼 수 있는 최적화 알고리즘으로 유전알고

리즘을 적용하여 그 결과를 기술하였고, Park[3]이 제시한 최적화 방안과의 결과를 비교분석함으로써 실시간 최적화의 효과를 검증하였다.

2. 본론

2.1 열차 동적 모델링

열차 운행 거동을 모사하기 위하여 동적모델링의 정의가 우선 필요하다. 열차 운행 모델링 관련하여 Kim[4]은 전동차의 안정적인 운행을 위한 가속도 선정을 위해 견인력, 주행저항 및 점착력 등을 고려하였다. 이번 연구에서는 Park[3]이 제시한 동적 모델링 기법을 인용하였음을 알려둔다. 열차 특성데이터는 한국 철도기술연구원에서 개발 진행한 킬링열차를 대상으로 적용하였으며, 적용 노선은 호남선 연산역부터 논산역까지의 16.038km 구간을 고려하였다.

우선 열차의 동적모델은 가속도법칙을 적용하여 식 (1)과 같이 열차의 견인력(F_T), 제동력(F_B), 주행저항(F_R), 선로 구배저항(F_G) 및 선로 곡선저항(F_C)으로 구성할 수 있다.[3]

$$m\ddot{x} = F_T - F_B - F_R - F_G - F_C \quad (1)$$

이 때 m 과 x 는 열차의 중량 및 위치를 나타낸다.

열차의 운전모드는 역행, 타행 및 제동운전모드[5]로 구분되는데, 이는 노치제어에 의해 전환된다. 일반적으로 노치는 총 12단계로 구성되는데, 견인 4단계, 제동 7단계 및 타행 1단계로 구분된다. 견인모드시 각 노치 단계에 따른 견인력의 수학적 모델은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$F_{T1} = \begin{cases} 204 \cdot 0.25 & (0 \leq v \leq 20) \\ (4080/v) \cdot 0.25 & (v \geq 20) \end{cases} \quad (2)$$

$$F_{T2} = \begin{cases} 204 \cdot 0.5 & (0 \leq v \leq 40) \\ (8160/v) \cdot 0.5 & (v \geq 40) \end{cases} \quad (3)$$

$$F_{T3} = \begin{cases} 204 \cdot 0.75 & (0 \leq v \leq 60) \\ (12240/v) \cdot 0.75 & (v \geq 60) \end{cases} \quad (4)$$

$$F_{T4} = \begin{cases} 204 & (0 \leq v \leq 20) \\ 17340/v & (85 \leq v \leq 135) \\ 17340 \cdot 135/v^2 & (v \geq 135) \end{cases} \quad (5)$$

이때 v 는 열차의 속도이다.

다음으로 제동모드시 제동력의 수학적 모델을 나타내었다.

$$F_B = \begin{cases} 380 \cdot (BN/7) & (v \leq 110) \\ (600 - 2v) \cdot (BN/7) & (v \geq 110) \end{cases} \quad (6)$$

BN 은 제동노치 단계를 의미하는 값으로서 -1부터-7까지의 음의 정수값을 가진다. 너무 큰 제동단계에서는 승차감의 문제 등이 있으므로 초기 4단계만 사용된다고 가정한다.

제동 방식은 기계제동과 회생제동으로 나뉘는데, 회생제동은 발전기 모드로 전동기를 전환시켜서 제동으로 발생한 에너지를 재사용하게 된다. 따라서 열차 운행을 위한 총 필요에너지는 회생제동에 의해 발생한 에너지를 제외하고 정의된다. 회생제동력의 수식 모델링은 다음과 같다.

$$F_{EB} = \begin{cases} 0 & (v \leq 5) \\ 50v - 250 & (5 < v \leq 10) \\ 250 & (10 < v \leq 85) \\ 21250/v & (85 < v \leq 130) \end{cases} \quad (7)$$

$$F_{RG} = \min\{F_B, F_{EB}\} \quad (8)$$

F_{EB} 는 회생제동을 통해 얻어지는 최대 힘이며, 실제 회생제동을 통해 얻을 수 있는 힘 F_{RG} 는 노치에 따른 제동력과 회생제동에 의한 힘들 중의 작은 값으로 정의할 수 있다.

다음으로 주행저항에 의해 발생하는 힘은 Davis equation[6]으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_R = a_0 + a_1v + a_2v^2 \quad (9)$$

$$\begin{cases} a_0 = 2.9450 \times 10 \\ a_1 = 4.7222 \times 10^{-2} \\ a_2 = 7.7778 \times 10^{-4} \end{cases}$$

구배저항에 의해 발생하는 힘 F_G 는 노선의 기울기에 따라 가해지는 힘이며 다음과 같이 정의한다.

$$F_G = W \sin \theta \quad (10)$$

이 때 W 는 열차의 중량, θ 는 노선 구배의 라디언 값

이다. 곡선저항에 의한 힘은 다른 힘에 비해 작은 값이므로 영향이 거의 없다. 따라서 본 연구에서는 그 값을 반영하지 않았다.

일반적인 동적시스템은 시간에 따른 변화량으로 정의된다. 하지만 열차시스템에서는 속도정보와 구간정보가 거리에 따라 표현되므로, 열차의 동적시스템을 시간이 아닌 거리변수로 표현하여 문제를 쉽고 편리하게 다룰 수 있다. 본 연구에서도 거리변수가 고려된 동적시스템을 적용하였으며, 거리 변수로의 변환방식은 Park[3]의 연구논문을 참조하였다. 거리 변수로의 변환방식에 관한 자세한 과정은 Park[3]의 논문을 참조하기 바라며, 이를 바탕으로 에너지소비를 최소화하기 위한 속도 프로파일, 즉 구간별 최적의 노치 단계를 구하기 위한 최적화 문제의 최종 정의식을 식(11)에 나타내었다.

이 때 n 은 구간 개수를 의미하며, I_k 는 x_{k-1} 부터 x_k 까지의 각 구간을, 그리고 구간별 노치값은 N_k 로 표현하는데 이 중 제동을 나타내는 음의 값은 BN_k 의 값이 된다. v_0 는 초기 속도값이며, 제한속도 프로파일의 최저 및 최고 범위는 v_L 과 v_U 로 정의된다. F 는 열차에 작용하는 총 힘을 의미한다. v_{mid} 는 구간의 평균 속도값이며 T_{max} 는 허용된 최대 운행제한 시간이다. α 와 β 는 각각 전동기의 효율과 충전비율을 나타내는 값으로서 이번 연구에서는 1.1과 0.55를 적용하였다.

minimize

$$\sum_{k=1}^n (\alpha F_T(v_{k-1}, N_k) - \beta F_{RG}(v_{k-1}, BN_k)) \Delta x_k \quad (11)$$

subject to

$$\begin{aligned} k &= 1, \dots, n \\ N_k &\in \{-4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4\} \\ v_0 &= \text{prescribed} \\ v_k - v_{k-1} - \frac{F(x_{k-1}, v_{k-1}, N_k, BN_k) \Delta x_k}{mv_{k-1}} &= 0 \\ v_{L,k} \leq v_k \leq v_{U,k}, x \in I_k & \\ \sum_{k=1}^n \frac{\Delta x_k}{v_{k, mid}} \leq T_{max} & \end{aligned}$$

2.2 실시간 최적화 알고리즘

앞서 언급한 바와 같이 이번 연구의 최적화는 열차 운행 도중에 발생하는 임의의 환경변수에 의해 선로 정보 또는 제한속도 정보가 변경되는 경우 그 정보를 바탕으로

로 실시간으로 최적의 주행속도프로파일, 즉 구간별 최적 노치단계를 찾아서 소요에너지를 최소화하는 것이 목적이다. 이를 위해서는 실시간 최적화가 가능하도록 빠른 속도로 최적해를 계산할 수 있는 최적화 알고리즘을 적용하여야 한다.

본 연구에서는 이를 위해 유전알고리즘을 기본 최적화 알고리즘으로 적용하여 문제 특성에 맞게 목적함수를 정의하여 최적해를 찾는데 필요한 계산시간 및 계산된 최적해의 정확도를 분석하고자 한다.

유전알고리즘은 철도 운행 패턴최적화를 위한 방안으로 다양한 연구에서 적용되었다.[7,8]

유전알고리즘은 메타휴리스틱 방식의 최적화 기법으로서 지역최적해를 벗어나는 전역최적해를 찾는데 적합하다. 기본적으로 생태계의 세대에 걸친 진화단계를 모사한 기법이며, 세대를 걸치면서 우성 인자가 살아남는 확률이 높다는 특성을 활용하기 때문에 세대에 걸친 결과값이 최적해에 점차적으로 수렴하게 된다.

유전알고리즘을 적용하기 위해 기본적으로 임의의 해로 구성된 초기 해집단을 구성하게 된다. 이번 연구에서는 일정 노선 내에 규정속도가 구분되어 있는 각 구간별로 노치가 정의되므로 구간개수에 따라 설계변수의 개수가 정해진다. 이렇게 다중 설계변수를 가지는 경우 각 해당값이 이진수로 변환 연계된 후 하나의 개별해를 이루게 된다. 이 후 구성된 개별해에 대해 적합도 함수(목적

함수)값을 구하게 된다. 다음으로 적합도 함수 값을 기준으로, 해집단 내의 각 개별해끼리 진화를 위한 단계를 거친다. 먼저 선택확률로 해를 추출하는 선택(selection) 단계를 거치면서 상대적으로 우수한 적합도를 가지는 해들이 선별된다. 이렇게 선별된 해들 중, 부모해로 추출되어 교배(crossover) 과정을 거친다. 또한 이외에도, 미리 정해놓은 확률에 따라 돌연변이(mutation)과정을 적용할 수 있다. 이와 같은 과정을 걸쳐 다음 세대의 계산을 위한 새로운 모집단이 구성되고, 적합도 함수를 계산하는 절차를 반복하게 된다.

그 결과로 구해지는 최적해가 일정 범위내 수렴에 이르게 되면 알고리즘 진행을 멈춘다. Fig.1에 유전알고리즘을 적용하여 실시간으로 운행속도를 최적화하는 전체적인 계산 체계를 도시화하였다.

그림에서 설명된 바와 같이, 운행 중에 선로 정보 또는 제한속도 정보가 변경되는 이벤트가 발생하는 경우, 변경된 운행 잔여구간 정보가 최적화를 위한 조건으로 새로 입력되며, 이를 기초 자료로 활용하여 잔여구간 운행을 위한 에너지 소모를 최소화 하는 최적화 알고리즘을 수행하게 된다. 최적화 알고리즘에서 구해진 최적해는 잔여 구간의 최적 노치해로 변환된 후 열차운행 컨트롤 시스템에 새로 입력된다. 이와 같은 방안으로 실시간 열차 속도 최적화 컨트롤이 가능하다. 이 때 주의할 점은, 최적화 알고리즘을 운영하여 최적해를 구하는 과정

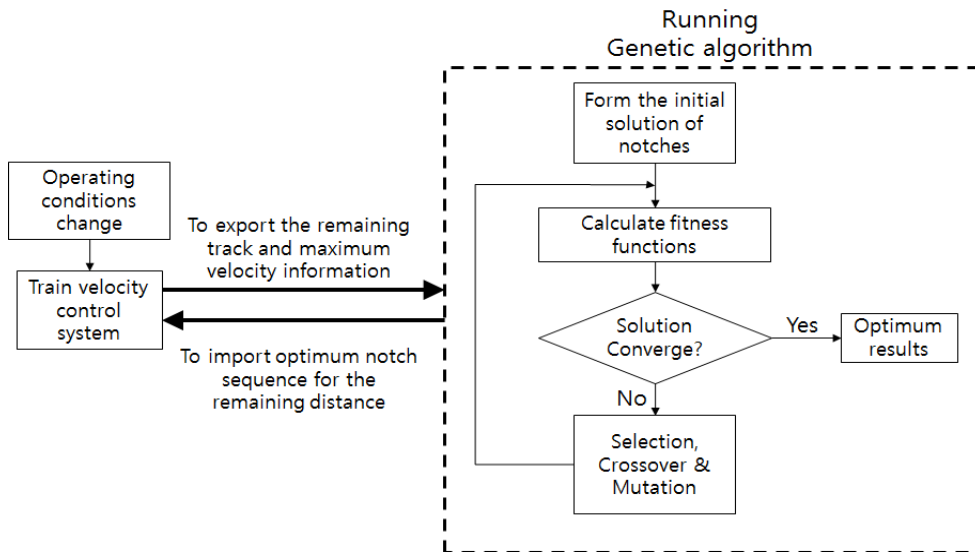


Fig. 1. Operating control system to apply a real-time velocity optimization

에 걸리는 계산 시간이 일반 알고리즘 대비 상대적으로 짧다 하더라도, 이 결과의 적용이 의미를 갖기 위해서는 최적화수행에 대해 입력되는 열차 초기 속도가 최적화해를 적용하는 시점의 속도와 일치하여야 한다. 따라서 최적화를 수행하기 위해 가정하는 초기 속도는 최적화 결과가 도출되어 적용되는 시점에서 예측되는 열차속도로 지정하여야 한다.

이를 위해서는 최적화에서 고려되는 첫 구간 바로 이전 구간의 종료속도를 초기 속도로 지정하여 정확도를 높이고, 그 다음 구간부터 정보가 변경된 잔여구간으로 정의하여 최적화를 진행하게 된다.

따라서 최적화 알고리즘의 계산 종료시점이 잔여구간의 시작시점보다 빨라야 한다. 이는 계산해야 하는 구간 개수에 따른 최적화 알고리즘의 수렴속도가 예측가능한 특성을 지녀야 함을 전제조건으로 한다.

이번 최적화 문제에서는 구속조건으로 구간별 열차 최저 및 최대속도 범위가 주어지며, 또한 총 운행 제한시간을 고려하여야 한다. 일반적으로 유전알고리즘에서 구속조건을 다루기 위한 방법으로, 벌칙함수를 적용하는 방안이 있다. 이는 최적화 목적함수에 구속조건을 벌칙함수로 포함하여, 구속조건을 벗어나는 경우 목적함수의 값에 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 벌칙함수를 목적함수에 포함하여 구속조건을 고려하였다. 최종 목적함수 정의는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} &\text{minimize} \\ & \text{Fitness } F_n = E + P \end{aligned} \quad (12)$$

이 때 E 는 식 (11)에서 정의된 에너지 함수이며 P 는 벌칙함수이다. 벌칙함수의 정의는 아래와 같다.

$$P = C_0 \cdot S_0 \cdot T_{run} / T_{max} + \sum_{i=1}^k C_i \cdot S_i \quad (13)$$

여기서 C_0 및 C_i 는 penalty constant이며, T_{run} 은 최적화된 노치단계 적용시 걸리는 잔여구간 운행시간을, S_0 와 S_i 는 각각 운행시간 구속조건 충족여부 및 i 번째 구간에서 속도 구속조건 충족여부를 결정하는 결정변수이다. 예를 들어 i 번째 구간에서 정의된 속도가 속도 구속조건 범위를 벗어나는 경우 S_i 는 1의 값을 갖게 되어 벌칙항이 생성되며, 구속조건을 만족하는 경우는 0의 값을

갖는다. S_0 도 운행시간 구속조건 충족여부에 따라 0 또는 1의 값을 가진다.

2.3 최적화 수행 및 결과 분석

본 연구에서 제안한 실시간 최적화 알고리즘의 효용성을 검증하기 위해, MATLAB을 사용하여 열차 동적모델링을 제작하였으며, MATLAB에서 제공하는 유전알고리즘 최적화 툴을 사용하여 계산을 수행하였다. 그리고 Park[3]의 연구에서 적용한 전역최적화 툴인 TOMLAB의 glcsolver 적용 최적화 결과와 비교분석하였다. 최적화를 위한 유전알고리즘 적용시 해석조건은 개별해 30개, 세대반복 100번으로 지정하였으며, 엘리티즘 적용하는 2개로 제한하였다. 그리고 교배율은 0.8로 지정하였다.

계산을 위하여 3.5GHz 중앙처리장치 속도와 32GB 메모리 사양을 보유한 컴퓨터 장비를 활용하였다.

먼저 분석 노선인 연산-논산간 19개의 속도정의 구간의 일반적인 운행패턴과 속도프로파일을 구성하는 노치 단계를 Fig. 2에 나타내었다.[3]

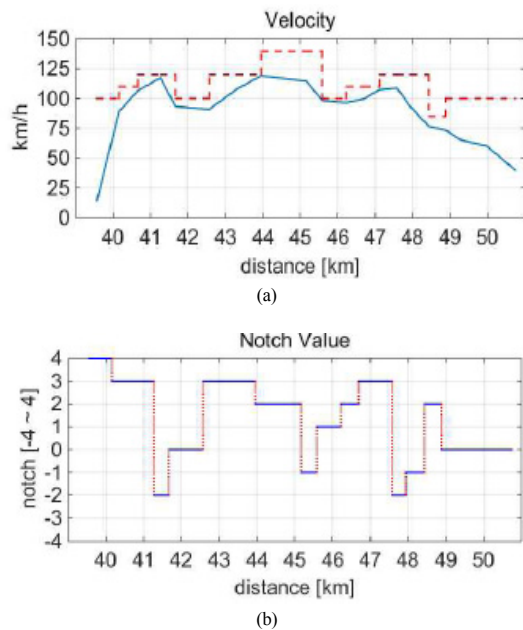


Fig. 2. (a) Conventional velocity profile (b) notch sequence

일반적인 패턴으로 운행시 총에너지는 507,030kJ과 469.03sec의 이동시간이 소요된다.

실시간 최적화를 위해서, 19개 속도 정의 구간 대상으로 1개 구간씩을 지날 때마다 잔여구간이 새롭게 정의된다는 가정하에 기존 패턴 운행시 및 유전알고리즘과 glcsolver 적용시 얻어진 최적해 결과에 대한 에너지 소모량을 Fig. 3에 나타내었다.

즉, 가로축에 나타낸 수치는 잔여구간의 트랙정보 및 제한속도정보가 변경되는 이벤트가 발생하는 구간 번호를 의미하며 총 19개 중 16번째 구간까지 이벤트가 발생하는 경우의 결과들을 순차적으로 비교하여 보여준다.

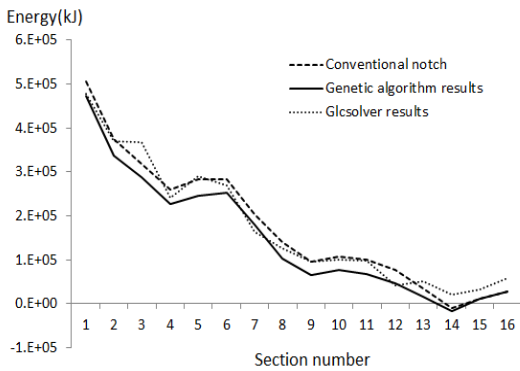


Fig. 3. Comparison of energy consumption

그림에서 알 수 있는 바와 같이, 유전알고리즘을 적용하여 얻은 최적화 결과가 대부분의 구간에서 비교 대상 알고리즘의 결과보다 더 절감된 소요에너지 결과를 보여주며 기존 운행패턴 대비해서는 전 구간에서 에너지 소모가 더 적었다. 이는 유전알고리즘으로부터 구해진 최적화 결과 값의 효율성을 보여준다고 할 수 있다. 주의할 점은 두 알고리즘 모두, 소요에너지량이 잔여구간의 수에 비례하지 않는다는 점이다. 이는 최적화를 수행하게 되는 각 구간에서 새롭게 정의되는 초기 속도 조건이 다르기 때문이다. 즉, 잔여 구간거리가 짧아져도 최적화 결과가 적용되는 시점의 초기속도 조건에 따라 최적 속도 프로파일 패턴이 모두 달라지므로 소요 에너지 량도 잔여 구간의 수에 비례하지 않게 된다. 또 다른 이유는 초기 구간이 제동이 걸리는 구간이면 회생제동에 의해 에너지가 축적되므로, 오히려 소요에너지가 더 적어지게 된다.

다음으로 각 알고리즘을 수행하여 최적해를 구하게 될 때 소요되는 계산 시간을 Fig. 4에 나타내었다.

전반적으로 유전알고리즘 사용시 계산에 소요되는 시

간이 상대적으로 짧다. 비교 대상 알고리즘의 경우 10번째 구간까지는 계산시간이 구간 순서와 관계없이 다양한 반면, 그 이후로는 구간순서에 비례하여 계산시간이 줄어드는 양상을 보인다. 그리고 3번째 구간에서 최적화를 수행하는 경우엔 오히려 유전알고리즘보다 짧은 시간 안에 계산결과를 도출하였다. 하지만 이 경우 소요에너지 값은 Fig.3에서 알 수 있는 바와 같이, 일반 운행 패턴 때보다 높다.

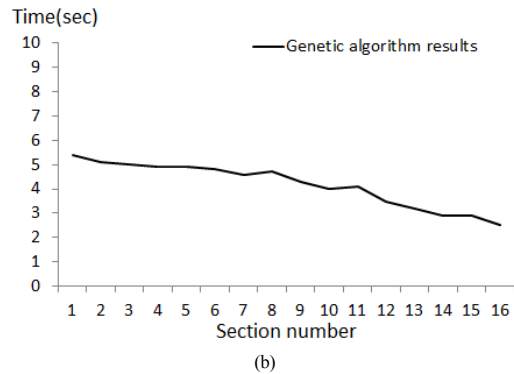
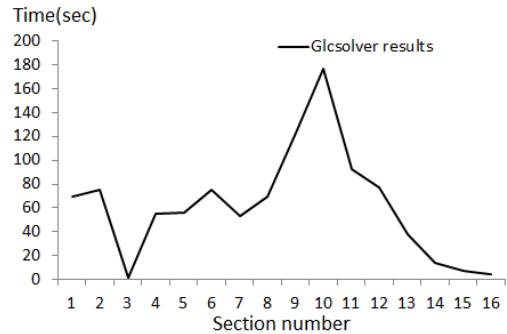


Fig. 4. Calculation time of (a) glcsolver and (b) genetic algorithm

이에 비해, 유전알고리즘의 계산시간은 잔여 구간수가 적어질수록 탐색 해의 범위가 작아지므로 최적해 수립시간도 점차적으로 짧아진다. 전체적으로는 계산시간을 대략적으로 예측할 수 있는 일정수준에서 유지됨을 알 수 있다.

이상으로 살펴본 바와 같이 이번 연구에서 제안한 유전알고리즘을 사용하여 속도 프로파일 최적화를 수행하는 경우, 최적해의 정확도와 계산소요 시간 관점에서, 짧은 시간 안에 정확한 최적해의 도출이 가능함을 확인하였다. 이는 실시간으로 적용하기 위해 최적화 수행시간

이 짧으면서도 일정수준으로 예측할 수 있어야 하며 동시에 해의 정확도가 높아야 하는 실시간 최적화에 적합한 알고리즘임을 알 수 있다.

3. 결론

열차 운영 중에 운행시간 준수와 동시에 운행에너지를 최소화 할 수 있는 속도 프로파일의 실시간 최적화 방안에 관하여 연구를 진행하였다. 일반적으로 속도 프로파일 최적화는 운행여부와 관계없이 미리 계산을 수행하여, 그 결과를 운행 시작 전에 열차의 속도 컨트롤 시스템에 입력하여 사용하게 된다. 하지만 예기치 못한 외부 환경 변화에 의해 선로정보나 제한속도 정보가 바뀌게 되면, 기존 최적화 결과를 사용할 수 없게 되며, 새로운 환경변수를 고려한 실시간 최적화를 수행하여야 한다. 이를 위해서는 빠른 시간 내에 최적화 결과를 도출할 수 있어야 하며, 그 결과에 대한 정확도가 보장되어야 한다.

이번 연구에서는 유전알고리즘을 사용한 최적화 방안을 제시하였고, 실시간 최적화 방안의 타당성을 예제를 활용하여 검증하였다. 실시간 최적화를 위한 유전알고리즘 구성을 위해 구속조건의 충족여부를 고려할 수 있도록 벌칙함수를 포함하는 목적함수로 정의하였다. 예제 문제로서 다양한 속도 정의구간으로 구성된 실제 노선을 대상으로, 기존 운행패턴 적용 및 기존 연구에서 제안된 glcsolver를 활용한 최적화 알고리즘 적용시의 결과와 비교분석하였다. 계산 결과로부터 대부분의 구간에서 유전알고리즘을 활용한 최적화 결과가 기존 연구의 최적화 알고리즘보다 더 우수한 에너지 절감 성능을 보임을 알 수 있었다. 그리고 실시간 최적화를 위한 계산시간에 있어서도, 유전알고리즘 적용방안이 짧은 계산시간과 일정 수렴 특성을 보여줌으로써, 실시간 최적화에 적합한 방안임을 확인할 수 있었다.

향후에는 노치 지정에 따른 속도 프로파일 구배의 연속성을 고려하기 위해 열차 동적 모델링을 상세화하여 최적화를 수행하는 연구를 진행할 예정이다.

References

[1] T.H.Lee, H.S.Hwang, "Optimal Economical Running Patterns Based on Fuzzy Model", Journal of The Korean

Institute of Intelligent Systems, vol. 16, no. 5, pp. 594-600, 2006.

DOI: <http://dx.doi.org/10.5391/jkiis.2006.16.5.594>

- [2] K. Kim, S.Chien, "Optimal Train Operation for Minimum Energy Consumption Considering Track Alignment, Speed Limit, and Schedule Adherence", Journal of Transportation Engineering, vol. 137, no. 9, pp. 665-674, 2011.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000246](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000246)
- [3] C.H.Park, J.Kim, J.H.Park, H.Y.Choi, D.E.Chang, "A Study on the Generation of an Efficient Speed Profile for a Train Considering the Train Features", Journal of Korean Institute of Information Technology, vol. 13, no. 11, pp. 119-126, 2015.
DOI: <http://dx.doi.org/10.14801/jkiit.2015.13.11.119>
- [4] J.Kim, M.S. Kim, K.Ko, D.U.Jang, "The Study on the Standardization of the Maximum Acceleration of the Electric Multiple Unit through the Analysis of the Traction and the Adhesion Characteristics", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, vol. 16, no. 11, pp. 7934-7940, 2015.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.11.7934>
- [5] Y.H.Kim, D.H.Kim, C.T.Kim, "A Study on the Selection of Train Operation Mode Minimizing the Running Energy Consumption", Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers, vol. 15, no. 1, pp. 38-48, 2007.
- [6] B.P.Rochard, F.Schmidig, "A review of methods to measure and calculate train resistances", Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers, vol. 214, Part F, pp. 185-199, 2000.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1243/0954409001531306>
- [7] M.Kang, M.Han, "A GA-Based Algorithm for Generating a Train Speed Profile Optimizing Energy Efficiency", Journal of the Korean Society for Railway, vol. 12, no. 6, pp. 878-886, 2009.
- [8] M.Kim, J.Kim, K.Ko, "Study on optimization for scheduling of local and express trains considering the application of high performance train", Journal of the Korean Society for Railway, vol. 19, no. 2, pp. 1-9, 2016.
DOI: <http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2016.19.2.234>

김 무 선(Moosun Kim)

[정회원]



- 2002년 2월 : 서울대학교 공과대학 기계항공공학부(공학석사)
- 2008년 2월 : 서울대학교 공과대학 기계항공공학부(공학박사)
- 2008년 7월 ~ 2012년 8월 : 현대자동차 남양연구소 책임연구원
- 2012년 8월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>

최적화, 복합제 해석

김 정 태(Jungtai Kim)

[정회원]



- 1999년 2월 : 서울대학교 공과대학 전기공학부(공학석사)
- 2011년 8월 : KAIST 공과대학 전기및전자공학과(공학박사)
- 1999년 2월 ~ 2012년 7월 : LIG 넥스원 수석연구원
- 2012년 8월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>

열차제어, 신호처리, 임베디드시스템

박 철 흥(Chul-Hong Park)

[정회원]



- 2012년 2월 : 서울과학기술대학교 전기공학과 (공학사)
- 2012년 6월 ~ 2014년 2월 : 한국철도기술연구원 위촉연구원
- 2014년 3월 ~ 현재 : 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 석사과정

<관심분야>

전기공학, 제어공학, 최적제어기술