

가속도한계 및 저크한계를 고려한 열차자동운전장치의 위치기반 속도프로파일의 계산 및 적용

Calculation and application of the location-based speed profile of ATO considering the speed limitation and the jerk limitation

윤영환† 엄정규* 한재문* 조용기**
Young-hwan Yoon Jung-kyou Um Jae-mun Han Yong-gee Cho

ABSTRACT

This paper describes the calculation and application of the speed profile for the train speed control when the train is operated by ATO(Automatic Train Operation). We propose a speed profile calculation method considering the speed limitation and the jerk limitation, in order to maintain the quality of the train automatic operation. In previous works, ATO calculates a desired speed profile along the time, and controls the train to follow the profile. In this case, it may be hard to follow the restrictive speed along the location or to stop the train with a low location error, because of the difference between the desired location at each time and the real location of the train due to the control error. In the proposed method in this paper, we calculate a desired speed profile along the time considering the speed and jerk limitation first, and derive a speed profile along the location using it. If the restrictive speed profile is changed or the train speed strayed from the speed profile, ATO system calculates new speed profile and applies it immediately. Because ATO system controls the train speed based on the train location, the accuracy of the train location control can be improved. A simulation system for the test of the automatic train operation using this method is designed

1. 서론

열차자동운전(ATO, Automatic Train Operation)장치는 운전자가 수행하는 역할의 일부 또는 전부를 자동화하기 위한 장치로, 지상 신호설비의 관리 하에 열차를 자동으로 운행시키고 플랫폼에 정차시키며, 출입문을 제어하는 등의 기능을 수행한다. 열차를 운행시킬 때 승객들의 승차감을 위해 가속도 및 저크(가속도)에 한계치를 두고 있으며, 자동운전의 운행 성능을 높이기 위해서는 열차자동운전장치가 역간 운행이 스케줄에 따라 최적으로 이루어지면서 동시에 가속도한계 및 저크한계가 지켜질 수 있도록 열차의 속도를 제어해야 한다.

본 논문에서는 열차자동운전으로 열차를 운행할 때 속도제어를 위해 사용하는 속도프로파일을 계산하고 적용하는 방식으로서 열차자동운전에 의한 운행 성능을 유지하기 위해 가속도한계 및 저크한계를 고려하여 속도추정제어를 위한 속도프로파일을 계산하는 방식을 제안한다. 기존의 방식은 시간에 따른 이상적인 주행속도를 계산하는 방식으로 속도프로파일을 계산하고 이를 추종하는 방식을 취하고 있다. 이 경우 제어에 오차가 발생하고 이것이 누적되는 경우 각 시간에서 프로파일에 의한 목표 위치와 열차의 실제 위치 사이에 차이가 발생할 수 있다. 그러면 위치에 따른 제한속도를 준수하기 어렵거나 정차 오

† LS산전 선형기술연구소 주임연구원
E-mail : yhyoon1@lsls.biz
TEL : (031) 450-7270 FAX : (031) 450-7599
* LS산전 선형기술연구소 선임연구원
** LS산전 선형기술연구소 수석연구원

차가 크게 발생하는 경우가 있다. 기존 방식에서는 외란에 강인한 제어를 사용하여 외란에 의한 오차를 줄일 수 있는 방법을 제안하였으나, 시간 기준으로 프로파일을 적용하므로 거리 오차 누적에 의해 정차 등에서 오차를 낮게 유지하기 어려울 수 있다.

본 연구에서 제시하는 방식에서는 먼저 가속도한계 및 저크한계를 고려하여 시간에 따른 이상적인 주행속도를 계산하고, 이를 이용하여 위치에 따른 속도프로파일을 도출한다. 각 순간에서 열차자동운전장치가 열차의 속도를 제어하기 위한 프로파일 주행속도로는 거리에 따른 속도프로파일에서 열차의 현재 위치에 대한 속도 값을 사용한다. 즉 열차자동운전장치는 열차의 위치에 따른 속도가 거리에 따른 속도프로파일을 추종하도록 열차의 추진 및 제동입력을 조정한다. 만일 외란이나 비정상적인 제어 오차로 인해 열차의 현재 속도가 거리에 따른 속도프로파일을 크게 벗어나거나, 열차의 제한속도 프로파일이 변경되는 등 속도프로파일이 변경되어야 하는 경우에는 속도프로파일을 다시 계산하는 방식을 취한다.

본문에서는 시간 기반의 속도프로파일의 계산과 이를 이용한 위치 기반 속도프로파일의 계산, 그리고 위치 기반 속도프로파일을 이용한 열차의 속도 제어를 차례로 다룬다. 마지막으로 열차의 자동행이 이루어지는 것을 확인하기 위해 본 연구에서 사용한 열차의 운동을 소프트웨어 상에서 구현한 시뮬레이터에 대해 설명한다. 본 연구에서와 같이 거리 기반의 속도프로파일을 이용하여 열차자동운전을 적용하게 되면 위치에 따라 열차의 속도를 제어하게 되므로 열차 위치 제어의 정확도를 높일 수 있을 것으로 기대된다.

2. 본론

2.1 시간 기반의 속도프로파일 계산

열차자동운전을 이용한 속도제어에 대한 기존의 연구에서 시간에 따른 속도프로파일을 계산하는 기본적인 방법을 제시한 바 있다. 여기서는 임의의 제한속도 프로파일에 대한 속도프로파일을 계산하기 위해 기존의 방법을 확장하여 일반적인 조건에서의 몇 가지 프로파일 패턴을 계산하는 방식을 살펴본다.

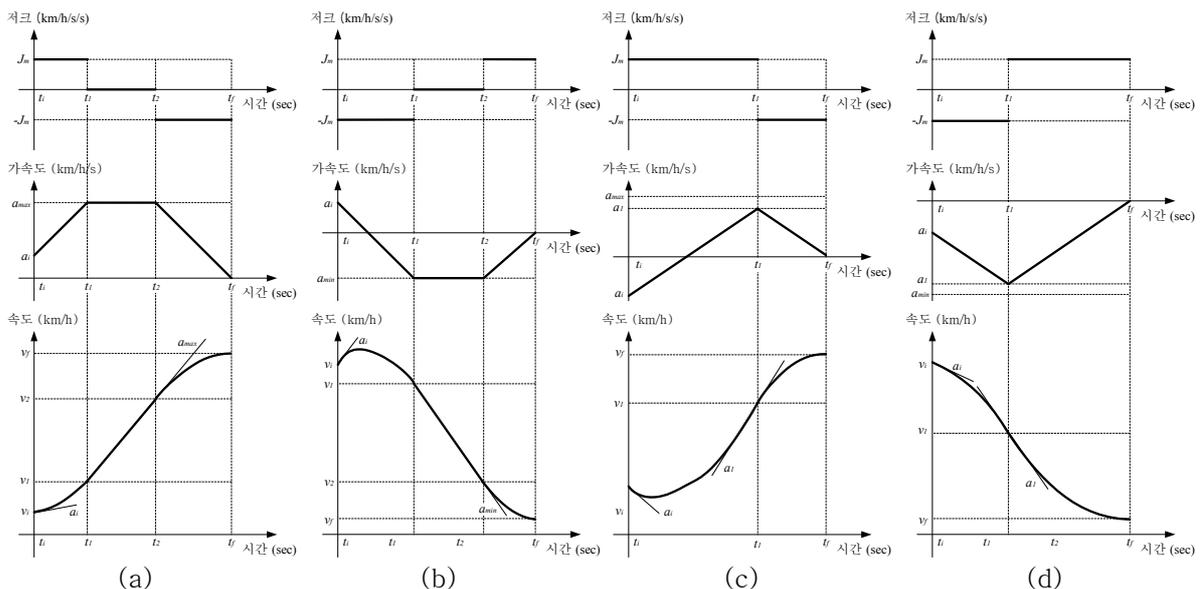


그림1. 저크한계 및 가속도 한계를 고려하여 계산한 시간에 따른 속도프로파일 패턴의 예;

(a) 가속도한계에 도달하면서 가속하는 경우, (b) 가속도한계에 도달하면서 감속하는 경우,

(c) 가속도한계에 도달하지 않고 가속하는 경우, (d) 가속도한계에 도달하지 않고 감속하는 경우

(그림 1)은 제한속도 프로파일이 주어졌을 때 열차를 가속 또는 감속시키기 위한 시간 기반의 속도프로파일 패턴이다. 가장 아래에 있는 시간기반 속도프로파일 패턴의 식을 결정하기 위해서는 경계 시간

t_1, t_2, t_f 의 값을 구해야 한다. 위에서 두 번째의 가속도프로파일은 가장 위의 저크프로파일을 적분하여, 가장 아래의 속도프로파일은 가속도프로파일을 적분하여 구할 수 있다. 이 때 저크프로파일에는 저크한계를 적용하며, 가속도프로파일에는 가속도한계를 적용한다.

시간 t_i 일 때의 초기상태가 위치 $l(t_i)=l_i$, 속도 $v(t_i)=v_i$, 가속도 $a(t_i)=a_i$ 으로 주어지고 프로파일 패턴이 종료하는 목표상태가 속도 $v(t_f)=v_f$ 인 경우를 살펴본다. 목표상태의 속도 v_f 는 일반적으로 제한속도 프로파일로부터 도출될 수 있으며, 속도 v_f 에 도달했을 때의 가속도는 $a(t_f)=0$ 이 되도록 한다. 초기시간을 $t_i=0$ 라고 하고 가속도한계 및 저크한계를 각각 a_{max}, J_m 로 설정하면, 가속하는 경우에 해당하는 (a), (b)의 경우에 가속도프로파일 및 속도프로파일 식을 각각 아래의 수식 (1)과 (2)와 같이 차례로 도출할 수 있다.

$$a(t) = \begin{cases} a_i + J_m t, & \text{where } 0 \leq t \leq t_1 \\ a_{max}, & \text{where } t_1 < t \leq t_2 \\ -J_m(t - t_f), & \text{where } t_2 < t \leq t_f \end{cases} \quad (1)$$

$$v(t) = \begin{cases} v_i + a_i t + 0.5 \cdot J_m t^2, & \text{where } 0 \leq t \leq t_1 \\ v(t_1) + a_{max} t, & \text{where } t_1 < t \leq t_2 \\ v(t_2) + J_m t_f t - 0.5 \cdot J_m t^2, & \text{where } t_2 < t \leq t_f \end{cases} \quad (2)$$

위의 수식 (1)과 (2)에서 시간 t 가 각각 t_1, t_2, t_f 이 될 때의 경계조건을 이용하면 경계시간 t_1, t_2, t_f 의 값을 계산할 수 있다. 이 때 $t_1 < t_2$ 인 경우에는 (a)와 같이 등가속도 구간이 존재하게 되며, 그렇지 않은 경우에는 (b)처럼 등가속도 구간 없이 가속도 증가와 감소로 패턴이 이루어진다. 감속하는 경우인 (c)와 (d)도 마찬가지로 방법으로 가속도프로파일 및 속도프로파일의 식을 구할 수 있다. 위치에 따른 제한속도 프로파일이 주어지면, 열차자동운전장치는 위의 속도프로파일 패턴들로 구성된 시간 기반의 속도프로파일을 계산한다.

2.2 위치 기반의 속도프로파일 계산

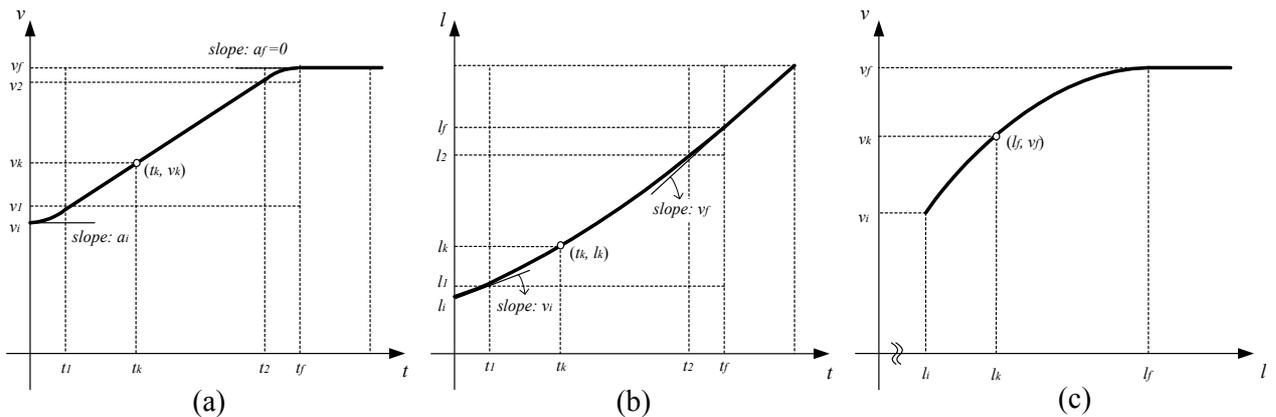


그림2. 위치프로파일 및 위치 기반 속도프로파일의 계산;

(a) 시간 기반 속도프로파일, (b) 위치프로파일, (c) 위치 기반 속도프로파일

위와 같이 계산한 그림2의 (a)와 같은 시간 기반의 속도프로파일을 시간에 따라 적분하여 각 시간에서의 열차 위치를 구하면 그림2의 (b)와 같이 시간에 따른 위치프로파일을 구할 수 있다.

$$l(t) = \begin{cases} l_0 + v_i t + 0.5 \cdot a_i t^2 + 1/6 \cdot J_m t^3, & \text{where } 0 \leq t \leq t_1 \\ l_1 + v_1 t + 0.5 \cdot a_{max} t^2, & \text{where } t_1 < t \leq t_2 \\ l_2 + v_2 t + 0.5 \cdot J_m t_f t^2 - 1/6 \cdot J_m t^3, & \text{where } t_2 < t \leq t_f \end{cases} \quad (3)$$

시간 기반의 속도프로파일과 위치프로파일이 구해지면, 시간 t_k 일 때의 프로파일 속도 v_k 와 프로파일

위치 l_k 을 알 수 있고, 이를 토대로 그림2의 (c)와 같이 기존 속도프로파일을 시간 $t_k \in [t_i, t_f]$ 에서 위치가 l_k 일 때 속도가 v_k 가 되도록 하는 위치 기반의 속도프로파일로 변환할 수 있다.

표 1에서는 열차를 제한속도 프로파일에서의 다음 목표속도로 가속시키는 경우에 위치에 따른 속도프로파일을 일정 시간간격의 점증적인 계산으로 구하기 위한 방법의 예를 보인다. 그림3에서는 제한속도 프로파일을 수신했을 때 전체 제한속도 구간에 대하여 위치에 따른 속도프로파일을 구한 예이다.

도표 1. 위치에 따른 속도프로파일의 계산 예 (가속시)

입력: 저크 프로파일 $J(t)$ 및 초기상태 l_i, v_i, a_i , 제한속도 프로파일에 의해 주어지는 다음 목표상태 $l_{tgt}, v_{tgt}, a_{tgt}$ (단, $a_{tgt} = 0$)		
1	$k \leftarrow 0$	▷ 인덱스
2	$(t_k, a_k, v_k, l_k) \leftarrow (0, 0, v_i, l_i)$	▷ 변수 초기화
3	while $l_k < l_{tgt}$ do	
4	$t_k \leftarrow t_k + \Delta t$	▷ 일정 시간간격 점증
5	if $v_k = v_{tgt}$ then $(a_{k+1}, v_{k+1}, l_{k+1}) \leftarrow (0, v_{tgt}, l_k + v_{tgt} \Delta t)$	▷ 목표속도 도달시 (등속)
6	else	▷ 목표속도 미도달시 (가속)
7	$a_{k+1} \leftarrow a_k + J(t_k) \Delta t$	
8	$v_{k+1} \leftarrow v_k + a_k \Delta t + 0.5 \cdot J(t_k) (\Delta t)^2$	
9	$l_{k+1} \leftarrow l_k + 0.5 \cdot (v_k + v_{k+1}) \Delta t$	
10	$k \leftarrow k + 1$	

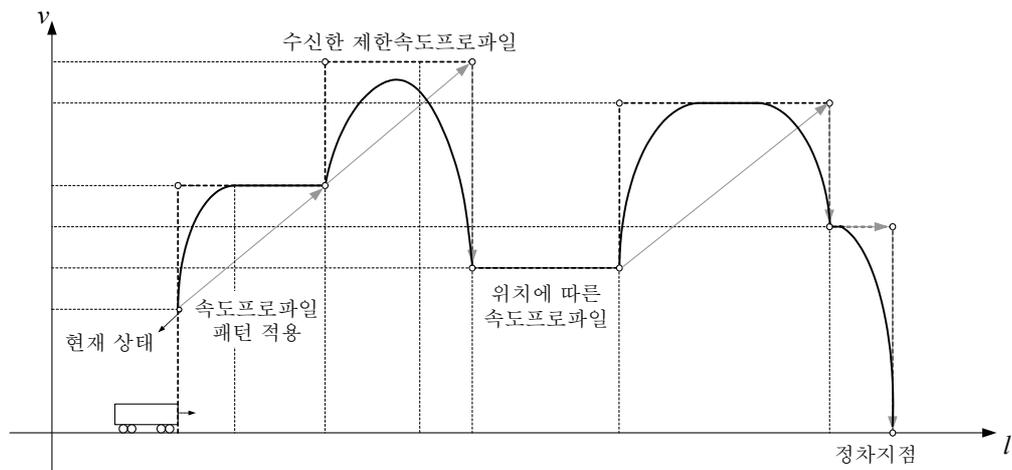


그림3. 수신한 제한속도 프로파일에 대해 계산한 위치에 따른 속도프로파일

2.3 위치 기반 속도프로파일을 이용한 열차 속도의 제어

열차자동운전장치는 위치에 따른 제한속도 프로파일을 수신하면 이에 대해 최적의 위치 기반 속도프로파일을 계산한다. 열차자동운전장치는 열차의 속도가 이 프로파일을 추종하도록 열차의 속도를 제어하며, 제어기로는 널리 사용되고 있는 PID 제어기 등 다양한 제어기를 적용할 수 있다. 열차의 속도가 최적의 속도프로파일을 최대한 정확하게 추종하여야 열차의 주행 성능이 유지될 수 있으므로, 제어기의 열차 속도 제어 성능이 우수해야 한다. 제어 오차가 있는 경우 가속도한계 및 저크한계 등에 오차를 감안한 여유를 두는 등 주행 성능을 유지하기 위한 추가적인 방법을 사용하여야 한다.

열차 속도를 제어하기 위한 제어목표 속도는 열차의 현재 위치에서 프로파일의 속도 값이다. 앞의 방

식과 같이 위치 기반의 속도프로파일을 구하게 되면, 속도프로파일은 위치-속도 값의 배열 등의 형태로 저장될 수 있다. 열차의 현재 위치가 주어지면, 열차자동운전장치는 이진탐색 등을 이용하여 해당 위치에서의 프로파일 속도값을 산출한다. 열차 속도 제어가 거리를 기준으로 이루어지기 때문에, 열차자동운전장치에는 열차의 위치를 검지하기 위한 장치가 필요하다.

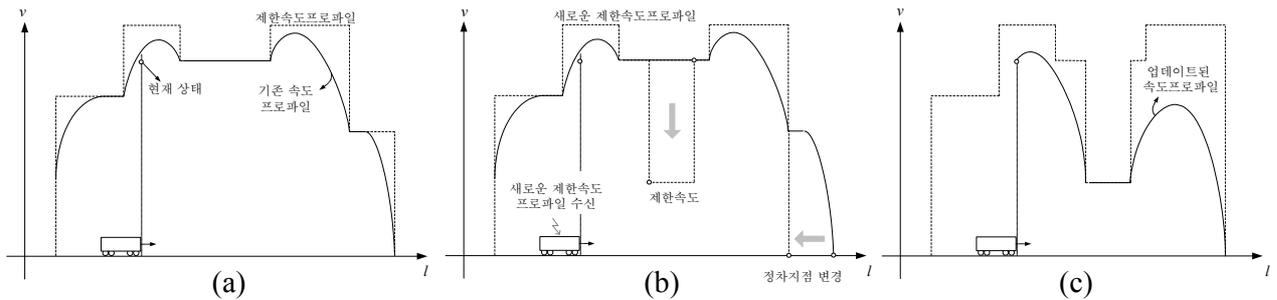


그림4. 위치 기반 속도프로파일의 업데이트;
(a) 업데이트 전, (b) 제한속도 프로파일의 변경, (c) 업데이트 후

열차가 주행 중일 때 열차가 이동할 수 있는 영역이 확장 또는 축소되거나 속도제한 구간이 할당되는 등 제한속도 프로파일이 변경되는 경우가 발생하면, 자동운전장치에서는 변경된 제한속도 정보에 맞추어 속도프로파일을 재계산하여 업데이트해야 한다. 이러한 재계산은 상당히 많은 계산량을 수반하나, 최근에는 연산장치의 계산력이 크게 증대되었으므로 자동운전장치에서는 주행 중에 속도프로파일을 실시간으로 업데이트하면서 열차를 운행할 수 있다. 이외에도 제어에 일시적인 문제가 발생하거나 외란이 발생하는 등 제어 오차로 인해 열차의 속도가 해당 위치에서의 제어목표 속도를 크게 벗어나는 경우에도 현재 상태를 기준으로 속도프로파일을 재계산하여 제어 성능이 급격하게 나빠지는 것을 방지할 수 있다. 그림4는 속도제한 구간이 할당되고 열차의 정차지점이 변경되는 변화가 발생했을 때 위치에 따른 속도프로파일을 다시 계산한 결과를 간략하게 보인다.

2.4 위치 기반 속도프로파일을 적용한 열차자동주행 시뮬레이션

열차자동주행장치를 시험하기 위해 열차의 동특성을 적용한 가상열차를 소프트웨어로 구현하고 이를 이용하여 열차자동주행 시뮬레이션을 수행하였다.



그림5. 주행 중인 열차에 작용하는 힘 및 각종 저항

주행 중인 열차에는 그림5에서와 같이 주행저항, 구배저항, 커브저항 등 여러 종류의 저항력이 작용한다. 본 연구에 사용한 가상열차에서는 직선 선로를 가정하고 주행저항과 구배저항을 적용하였다. 주행저항 R_V 는 마찰과 공기저항 등에 의해 발생하며, 일반적으로 속도 $v[m/s]$ 에 대한 2차함수 형태를 사용한다. 2차함수의 계수는 열차의 형태와 특성, 선로 상태 및 환경에 따라 결정된다.

$$R_V(v) = a + bv + cv^2 \quad (4)$$

경사저항 R_G 는 경사 방향으로 작용하는 열차의 하중 성분으로 구할 수 있다. 열차에 작용하는 힘은

추진장치 및 제동장치에 의한 추진력 또는 제동력과 주행저항 및 구배저항을 합성한 힘이 된다. 본 연구에서 적용한 열차의 동특성 방정식은 아래와 같다.

$$m\dot{v} = F_V - R_V(v) - R_G(\theta) \quad (5)$$

여기서 m 은 열차의 질량[kg], F_V 는 열차에 작용하는 추진력 또는 제동력[N]이다.

열차자동운전장치의 제어기는 속도계를 이용하여 열차의 속도를 검지하고, 이에 따라 제어명령을 내보내 F_V 를 조정한다. 또한 열차자동운전장치는 속도값을 이용하여 열차의 이동거리를 계산하고 이를 바탕으로 열차의 위치를 결정한다. 이 때 속도계에서는 가우시안을 따르는 오차가 발생하는 것을 가정하였다. 이로 인해 열차자동운전장치에서 파악하는 열차의 속도와 위치에 오차가 발생한다. 누적되는 위치 오차를 보정하기 위해 시뮬레이터의 선로 상에 가상의 지상자를 설치하였으며, 열차자동운전장치가 이를 검지하여 위치를 보정하도록 하였다. 이상과 같은 시뮬레이터를 이용하여 자동운전을 위한 위치 기반 속도프로파일을 계산하고, 위치에 따른 속도 제어 및 정위치 정차를 수행하도록 하였다.

3. 결론

본 논문에서는 가속도한계 및 저크한계를 고려하여 시간 기반의 속도프로파일을 설계하고 이를 이용하여 위치 기반의 속도프로파일을 도출하는 방법을 보였다. 그리고 열차가 주행 중일 때 위치 기반의 속도프로파일을 적용하여 속도를 제어하기 위한 기법 전반에 대해 설명하였다.

본 논문에서 제시한 위치에 따른 속도프로파일을 적용하면 가속도한계 및 저크한계를 고려한 열차속도 프로파일을 계산하여 승차감 및 자동운행의 성능을 유지하면서 최적의 운행계획을 수립할 수 있다. 또한 위치를 기준으로 열차의 속도를 제어하게 되므로 열차가 위치에 따른 제한속도를 준수하도록 하며 열차를 정확한 위치에 정차시킬 수 있다. 본 방식은 새로운 프로파일을 계산할 때 많은 계산량을 요하지만 최근 연산장치의 계산력이 크게 증대되어 프로파일의 업데이트를 실시간으로 수행할 수 있으며, 주행 중에 제한속도 프로파일이 변경되는 경우에도 프로파일의 재계산을 통해 능동적으로 대응할 수 있다. 특히 임의의 제한속도 프로파일에 대응하여 유연하게 자동운전 주행계획을 수립하고 수정할 수 있기 때문에 본 방식을 이용한 열차자동운전장치를 복잡한 제한속도 프로파일을 가지는 신호시스템이나 차량이 밀집되어 운행되거나 열차운행 여건의 변경이 많은 복잡도 높은 환경에도 어렵지 않게 적용할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. 변윤섭, 한성호, 김길동, 백광선, 한영재, “미지의 주행저항을 고려한 도시철도차량 ATO의 속도추종 및 정밀정차 제어,” 한국철도학회 추계학술대회 논문집, pp.280-287, 1999.
2. 변윤섭, 장동욱, 김길동, 한영재, 이재관, “자동운전 전동차의 속도제어기법에 관한 연구,” 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템학회 춘계학술대회 논문집, pp. 372-374, 2001.
3. 신한순, 원충연, “승차감 향상을 위한 자동열차운전시의 제어패턴에 관한 연구,” 조명전기설비학회논문지, 15권, 2호, pp.49-56, 2001.