

도시철도 열차 정위치 정차제어의 새로운 방안에 대한 연구 : 속도 오차가 큰 경우

김정태

한국철도기술연구원 스마트전기신호본부

Study on a New Method for Precise Stop Control of Metro Trains : In Case of Large Speed Error

Jungtai Kim

Smart Electrical and Signaling Division, Korea Railroad Research Institute

요약 도시철도 열차의 요구 사항 중 하나가 정위치 정차 성능이다. 이는 열차가 승강장의 지정된 위치에 정확히 정차할 수 있도록 하는 것이며 정위치 정차를 만족시키지 못할 경우 스크린도어와의 간섭이 발생하여 승객 불편 및 운행 지연을 초래한다. 자동운전 열차의 경우 열차의 현재 속도 정보를 가지고 현재의 위치를 파악한 후 이에 맞게 가감속 명령을 내려 제어를 수행하므로 속도 정보의 오차가 클 경우 정확한 제어가 불가능하게 된다. 도시철도에서는 위치 오차를 보정하기 위해 PSM(Precision Stop Marker)가 있어 특정 지점에서 위치 오차를 보정하여 정차제어의 오차를 줄이도록 한다. 그러나 PSM 자체는 위치정보만 가지고 있으므로 속도 오차에 대한 보정은 수행하지 않는다. 본 논문에서는 PSM 경과 정보를 가지고 속도를 추정하여 정위치 정차제어를 수행하는 방안에 대하여 제안한다. 등감속도로 열차를 운행하면 속도를 추정할 수 있고 이에 따라 목표 감속도를 구하여 정차제어를 수행할 수 있다. 수치적 시뮬레이션을 통해 제안한 방안의 실현 가능성과 우수성을 보인다.

Abstract One of the requirements of metro trains is to stop with precision to ensure that the train can stop precisely at the designated location on the platform. If this is not satisfied, interference with the screen door occurs, causing inconvenience to passengers and delays in operation. In the case of an automatic operated train, the current position is determined by the current speed information of the train, and control is performed by issuing an acceleration/deceleration command. Therefore, accurate control becomes impossible if the error of the speed information is large. In metro railroads, a Precision Stop Marker (PSM) is used to correct the position error, so that the error of stop control can be reduced by correcting the position error at a specific point. On the other hand, because the PSM itself has only position information, it does not compensate for the speed error. This paper proposes a method for performing in-place stop control by estimating the speed with the PSM progress information. The speed can be estimated when the train is operated at a constant deceleration speed, and the target deceleration can be obtained to perform stop control. The feasibility and excellence of the proposed method are shown through a numerical simulation.

Keywords : Automatic Train Operator, Precise Stop Control, Precision Stop Marker, Simulation, Stop Error

본 논문은 한국철도기술연구원 기본사업의 연구비 지원으로 수행되었음.

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

email: jtkim@krrri.re.kr

Received May 10, 2021

Accepted June 4, 2021

Revised June 3, 2021

Published June 30, 2021

1. 서론

정위치 정차제어는 열차가 승강장의 지정된 위치에 정확히 정차할 수 있도록 하는 것으로서 열차자동운행장치(ATO: Automatic Train Operator)의 주요 기능이다. 대부분의 도시철도 역사에는 스크린도어가 설치되어 있으므로 열차가 정확히 정차하지 못하면 간섭이 생겨서 승객의 승하차에 불편과 시간 지연이 발생하게 되며 결국 열차 운행에 지장을 초래하게 된다. 열차자동운행장치는 정차위치에 정차할 수 있도록 속도 프로파일을 수립하고 이를 추종하도록 제어함으로써 정차제어를 수행한다. 속도 프로파일은 열차 위치에 따른 속도를 규정한 것으로서 제한속도 하에서 열차를 이동하는 방법을 나타낸다. 따라서 열차의 현재 위치에 해당하는 속도가 되도록 제어하는 것이 필요하다. 이를 위해서는 현재의 위치와 속도를 정확히 검지하는 것이 중요하다. 일반적으로 도시철도 열차는 차륜에 부착된 타코미터를 이용하여 회전수를 측정하고 여기에 차륜경을 곱해서 속도를 계산한다. 그리고 속도를 누적하여 이동거리를 추정한다. 그런데 이 과정에서 다양한 오차가 발생한다. 차륜의 슬립에 의한 오차, 차륜경 정보의 부정확성에 의한 오차가 있으며 속도 정보가 계속되고 전달되는 과정에서의 지연에 의한 오차가 있다. 관측과정에서의 오차뿐만 아니라 제어과정에서의 부정확성과 지연 등에 의한 오차가 있으며 이는 정차 정확성을 해치는 요인이 된다.

이를 해결하기 위해 다양한 연구가 수행되었다 Seo[1]는 PID 제어, 적응제어, 최적제어를 사용하여 정위치정차제어를 수행하고 시뮬레이션으로 각각의 제어 방식의 한계를 보였다. Kim[2]은 제동 지연을 극복하고자 예측 방식으로 제동이 발현될 때의 열차의 상태를 예측하고 이에 맞게 제어를 수행하는 방식을 제안하였으며 시뮬레이션으로 검증하였다. Li[3]는 반복 학습 제어를 적용하여 공기 저항, 측정 오차 등 재현이 잘 안될 때의 제어를 수행하였다. 그런데 상기 방식은 속도 정보가 비교적 정확하게 오는 것을 가정하였고 이를 관측의 중요한 요소로 사용하여 제어를 수행하였다. 그런데 일부 열차의 경우 타코미터의 적은 분해능, 속도 측정 및 계산과 ATO로 전달과정에서의 지연 등에 의해 속도 오차가 크게 발생한다. 이 경우 속도 정보에 기초한 기존 제어 방식에서는 정차 오차가 크게 발생하게 된다.

본 연구에서는 PSM(Precision Stop Marker) 통과 정보를 이용하여 열차의 속도를 추정하고 이에 맞게 감속 명령을 내려 제어를 수행하는 방식을 제안한다. PSM

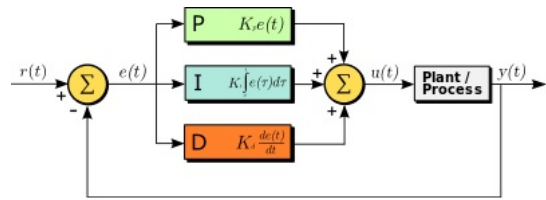


Fig. 1. Block diagram with PID control

은 앞에서 기술한 위치 측정 오차를 보정하기 위해 정차 지점으로부터 일정 거리 떨어진 지점의 선로 사이에 매설된 마커이다. 정차제어와 관련된 마커는 총 4개가 있다. 본 연구에서는 PSM 중 정차지점에 가까운 2개의 마커를 지날 때의 경과시간을 이용하여 속도를 추정하고 이에 따라 새로운 감속명령을 내려 정위치에 정차할 수 있도록 하는 방안을 제안한다. 제안하는 방안에서의 속도 추정 과정과 감속 명령 도출과정을 수식으로 보이고 시뮬레이션으로 성능을 확인한다. 속도 오차가 큰 경우 제안하는 방안의 정차 오차가 작음을 확인할 수 있으며 이는 제안 방안의 우수성을 나타낸다.

2. 본론

2.1 기존 연구

2.1.1 PID 제어

PID 제어는 시스템 출력과 목표값의 차이를 오차로 두고 오차의 비례값, 적분값, 미분값 각각에 계수를 곱한 값을 네가티브 피드백으로 주어 오차를 줄이도록 하는 제어 방식이다. 오차의 크기 자체에 비례하여 피드백을 주는 것이 비례(Proportional) 제어이며, 오차의 적분값에 비례하여 피드백을 주는 것이 적분(Integral) 제어로 정상 상태 오차를 줄이는 역할을 담당한다. 미분(Differential) 제어는 오차의 변화율에 비례하여 피드백을 주는 것으로 빠른 반응이 필요할 때 사용한다. PID 제어는 시스템의 모델링이 완벽하게 수행되지 않은 상태라도 출력 자체만으로 제어를 수행할 수 있다는 장점이 있다. 다만 P, I, D의 계수를 시행착오를 거쳐 구해야 한다는 점이 단점이다. Fig. 1은 PID 제어에 대한 블록도이다[4].

PID 제어는 정위치정차제어용으로도 널리 적용되었다. 열차는 비교적 복잡한 시스템이어서 정확한 모델링이 어려우므로 모델링 없이 제어가 가능한 PID 제어는 용이한 구현과 함께 어느 정도 성능을 보장한다는 점에서 적

합한 방식이다. Seo[1]는 PID 제어와 함께 적응제어, 최적제어를 정위치 정착제어에 적용하였을 때 정착 오차의 경향을 시뮬레이션으로 보였다.

그런데 정위치정착제어를 위해 PID 제어를 사용할 때의 기준 입력은 제동곡선(Braking Curve)이 된다. 제동곡선은 정착지점에 다가감에 따라 속도를 줄이면서 따라가도록 하는 기준선이며 속도 프로파일(Velocity Profile)이라고도 한다. 속도 프로파일은 출발부터 정착할 때까지 열차 위치에 대한 기준 속도를 나타낸 것이며 오차를 도출하기 위해서는 현재 추정된 위치와 수신된 속도를 가지고 속도 프로파일 상의 값과 비교하여야 한다. 그런데 속도 정보가 부정확할 경우 수신된 속도 및 위치 모두 오차를 포함하고 있으므로 속도 프로파일과 실제 열차의 상태의 차이를 정확히 알기 어렵게 된다. 이는 결국 제어의 정확성을 해치는 요인이 된다.

2.1.2 칼만 필터 제어

칼만 필터 제어는 Kim[2]이 제안한 방식으로 열차의 제동장치의 동작 지연을 극복하고자 제동장치가 동작할 시점의 열차의 상태를 칼만 필터를 통해 예측한 후 이 상태가 속도 프로파일 상의 바람직한 상태가 되도록 제동 명령을 계산한다. 열차의 제동장치는 회생제동 또는 기계제동(혹은 둘 다)을 사용하는데 모두 명령 발행 후 장치가 동작하여 제동력이 발휘될 때까지의 시간이 1초 이상 걸리는 경우가 있으며 이는 정착 정확성을 해치는 주요 요인이다. 칼만 필터는 선형시스템 모델에서 측정값을 가지고 현재 상태를 추정한 후 미래의 상태를 예측하는 신호처리 알고리즘이다. 현재 상태 추정과 미래 상태 예측은 번갈아 가면서 구동되며 각각 Measurement Update와 Time Update로 부른다. Fig. 2는 칼만 필터의 동작과 주요 수식을 나타낸 것이다[5].

Kim[2]에서는 칼만 필터의 Measurement Update 단계에서 측정데이터로 상태를 추정 한 후 Time Update 단계에서 다음 상태를 예측하고 이 때 예측한 상태가 원하는 상태가 되도록 하는 제어입력을 구하도록 하였다. Fig. 3에 칼만 필터 제어에 대한 프로세스를 간략히 나타내었다. 칼만 필터의 선형 모델에는 측정값에 노이즈가 추가되는 상황이 반영되어 있으며 공분산이 알려진 가우시안 노이즈일 경우 최선의 상태 예측이 가능하다. 그러나 본 연구에서 가정된 상황과 같이 큰 노이즈가 발생할 경우 측정값 대신 예측값에 가중치를 두고 상태를 추정하므로 모델의 오차에 취약하게 된다.

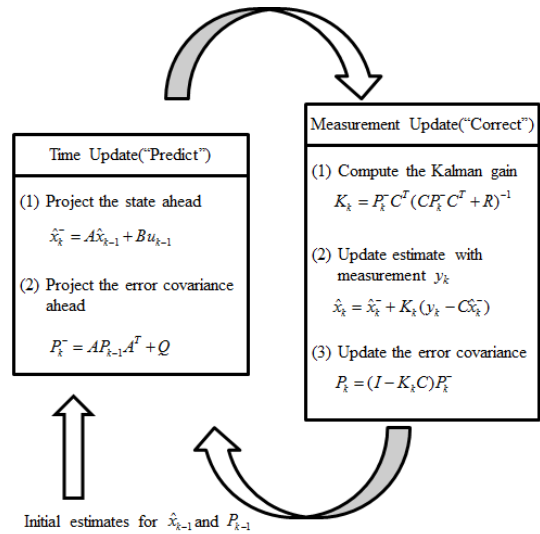


Fig. 2. Kalman filter processes and their equations[5]

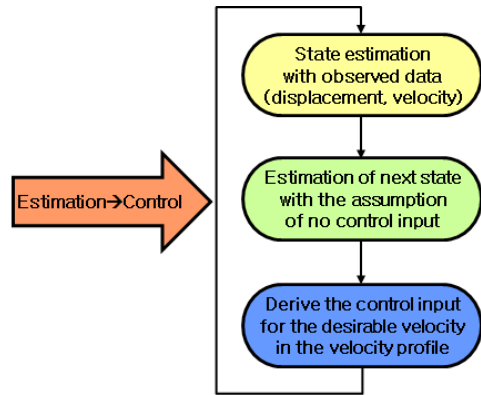


Fig. 3. Process of the proposed Kalman filter control[2]

2.2 제안 방안

2.1.1 동작 개요

본 연구에서는 열차위치 보정을 위해 정착지점으로부터 일정한 거리를 두고 선로 사이에 매설된 PSM 경과시점으로 속도와 가속도를 추정하여 제어를 수행한다. PSM은 앞에서 기술한 바와 같이 위치 추정 오차를 보정하기 위한 것으로 총 4개가 설치되며 Fig. 4와 같이 정착지점으로부터 각각 546m (PSM4), 108.5m (PSM3), 21m (PSM2), 3.5m (PSM1) 전에 설치되어 있다. 이중 특히 정위치 정착과 관계되는 것은 정착지점에 가까운 PSM 2와 PSM1이며 본 연구에서 제안하는 방식에서는 이 두 PSM을 지날 때의 경과시간으로 속도를 추정한다.

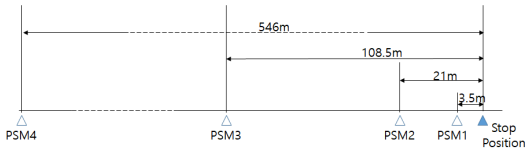


Fig. 4. Type and location of PSMs

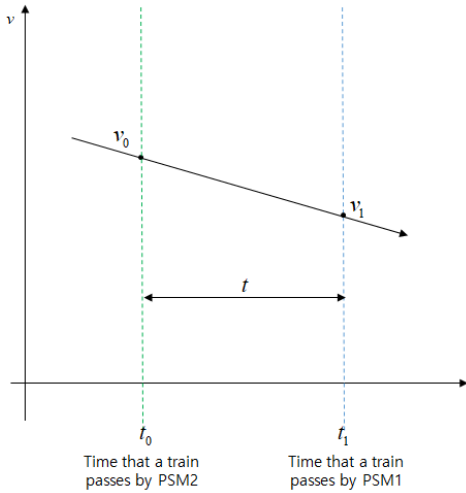


Fig. 5. Process of measuring constants in Eq. (1) and (2)

이를 위해 열차 제어장치는 그 전부터 PSM1을 지날 때까지 동일한 감속명령을 내어 열차가 등감속도로 운행하도록 한다.

그러면 열차는 등감속도 직선운동을 하게 되며, Fig. 5와 같이 PSM2를 지날 때의 속도를 v_0 , PSM1을 지날 때의 속도를 v_1 이라 하면 다음의 관계가 성립한다.

$$2a_0s = v_1^2 - v_0^2 \quad (1)$$

$$v_1 = v_0 + a_0t_{12} \quad (2)$$

여기서 a_0 는 현재 열차 운행하고 있는 상태에서의 감속도이며 제어가 발행한 가감속명령에서 열차 주행 저항, 구배 저항을 고려하여 추정할 수 있다. 감속도를 기준으로 하는 것이므로 $1m/s^2$ 으로 감속하는 것으로 추정되었다면 $a_0 = -1$ 이 된다. s 는 이동거리이며 여기에서는 PSM2와 PSM1의 간격인 17.5m가 된다. t 는 두 지점의 이동시간으로 PSM2와 PSM1 겹치 시간을 측정하고 이 둘의 차이를 구하여 알 수 있다. s 에 17.5를 대입하고 식 (2)를 식 (1)에 대입하면

$$35a_0 = v_1^2 - (v_1 - a_0t_{12})^2 \quad (3)$$

$$= 2a_0t_{12}v_1 - a_0^2t_{12}^2$$

가 되며 정리하면

$$v_1 = \frac{35a_0 + a_0^2t_{12}^2}{2a_0t_{12}} \quad (4)$$

가 된다. 즉 경과시간과 가감속명령을 가지고 v_1 을 알 수 있다. 또한 식 (2)에 대입하면 v_0 도 추정할 수 있다. v_1 이 추정되면 등가속도 직선운동 공식을 이용하여 목표감속도 a_t 를 구할 수 있다. PSM1을 지날 때의 속도가 v_1 이고 Fig. 4에 보인 바와 같이 남은 거리가 3.5m이므로

$$-v_1^2 = 2a_t s = 7a_t \quad (5)$$

가 되며, 따라서

$$a_t = -\frac{1}{7}v_1^2 \quad (6)$$

이 된다. 실제로는 현재 감속도 a_0 에서 a_t 로 변경하는데 시간이 소요되므로 아래 식과 같이 시간 소요를 보정한 목표감속도 \hat{a}_t 를 구한다.

$$\hat{a}_t = a_t + 0.1(a_t - a_0) \quad (7)$$

\hat{a}_t 는 그 자체로 감속명령을 내어 정차제어하는 데 사용할 수도 있지만 다음과 같이 최대저크 J 를 고려하여 감속도를 변경하였을 때 변경되는 속도와 이에 따른 이동거리를 계산하고 이 식의 해를 구하는 기준값으로 사용할 수도 있다. 먼저 현재 감속도가 a_0 이고 목표감속도가 a_t 일 경우 시간에 따른 가속도의 변화 $a(t)$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$a(t) = \begin{cases} a_0 + J \cdot t & \text{if } t \leq \frac{|a_0 - a_t|}{J} \\ a_t & \text{if } t > \frac{|a_0 - a_t|}{J} \end{cases} \quad (8)$$

여기서, J 는 jerk(가속도변화율)의 한도로 승객 승차감을 위하여 설정된 값이다. 도시철도 규격은 $0.8m/s^3$ 이 하나 노선별로 이보다 작은 값으로 설정하여 사용한다. 앞에서 얻은 v_1 과 식 (8)로부터 시간에 따른 속도의 변화 $v(t)$ 는 다음과 같이 구할 수 있다. 먼저 $a_t \geq a_0$ 일 때,

$$v(t) = \begin{cases} v_1 + a_0 t + \frac{1}{2} J \cdot t^2 & \text{if } t \leq \frac{|a_0 - a_t|}{J} \\ v_1 + \frac{a_0(a_t - a_0)}{J} + \frac{(a_t - a_0)^2}{2J} & + a_t \left(t - \frac{(a_t - a_0)}{J} \right) \\ & \text{if } t > \frac{|a_0 - a_t|}{J} \end{cases} \quad (9)$$

가 되며, 다음으로 $a_0 > a_t$ 일 때,

$$v(t) = \begin{cases} v_1 + a_0 t + \frac{1}{2} J \cdot t^2 & \text{if } t \leq \frac{|a_0 - a_t|}{J} \\ v_1 + \frac{a_0(a_0 - a_t)}{J} + \frac{(a_0 - a_t)^2}{2J} & + a_t \left(t - \frac{(a_0 - a_t)}{J} \right) \\ & \text{if } t > \frac{|a_0 - a_t|}{J} \end{cases} \quad (10)$$

가 된다. a_0 의 설정을 잘하여 $v(t) = 0$ 이 될 때의 t 인 t_e 가 $t_e > \frac{|a_t - a_0|}{J}$ 가 되도록 하면 $v(t_e) = 0$ 으로부터,

$$t_e = \frac{(a_t - a_0)}{J} - \frac{v_1}{a_t} - \frac{a_t^2 - a_0^2}{2Ja_t} \quad (a_t \geq a_0) \quad \text{or} \\ \frac{(a_0 - a_t)}{J} - \frac{v_1}{a_t} - \frac{a_0^2 - a_t^2}{2Ja_t} \quad (a_0 > a_t) \quad (11)$$

을 얻을 수 있다. $t = t_e$ 일 때의 이동거리 $s(t_e)$ 는

$$s(t_e) = \begin{cases} v_1 t_e + \frac{a_t^2 - a_0^2}{2J} t_e + \frac{1}{2} a_t \left(t_e - \frac{(a_t - a_0)}{J} \right)^2 & \text{if } a_t \geq a_0 \\ v_1 t_e + \frac{a_0^2 - a_t^2}{2J} t_e + \frac{1}{2} a_t \left(t_e - \frac{(a_0 - a_t)}{J} \right)^2 & \text{if } a_t < a_0 \end{cases} \quad (12)$$

가 되고 $s(t_e) = 3.5m$ 와 식 (11)을 식 (12)에 대입하면 다음을 얻을 수 있다.

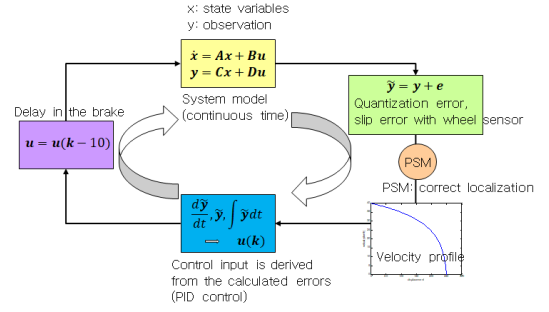


Fig. 6. Operation of the simulator for the accurate stopping control with conventional algorithm

$$\begin{cases} 3a_t^4 - 4a_0a_t^3 + (4Jv_1 - 2a_0^2)a_t^2 \\ + (-8Jv_1a_0 + 4a_0^3 - 28J^2)a_t - 4J^2v_1^2 \\ + 4Jv_1a_0^2 - a_0^4 = 0 & \text{if } a_t \geq a_0 \\ 3a_t^4 - 4a_0a_t^3 + (-4Jv_1 - 2a_0^2)a_t^2 \\ + (8Jv_1a_0 + 4a_0^3 - 28J^2)a_t - 4J^2v_1^2 \\ - 4Jv_1a_0^2 - a_0^4 = 0 & \text{if } a_t < a_0 \end{cases} \quad (13)$$

식 (13)은 a_t 의 4차 방정식이며 이를 풀면 $a_t \geq a_0$ 일 때와 $a_t < a_0$ 일 때의 방정식 모두 각각 해가 4개 나온다. 이 중 a_t 와 a_0 의 관계를 만족시키면서 \dot{a}_t 에 가장 가까운 실근을 해로 선정하면 되며 이 값으로 감속 제어 명령을 발행한다.

2.2.2 시뮬레이션을 통한 성능 검증

MATLAB 시뮬레이션을 통해 제안한 알고리즘의 성능을 확인하였다. 시뮬레이터는 Kim[2]에서 사용한 것과 동일한 것을 사용하였다. 열차 차량 모델, 속도 프로파일, 제동기 지연, 엔코더 단계(200 pulse/resolution)에서 발생하는 양자화 오차를 동일한 모델 또는 동일한 값을 사용하였다. 다만 타코미터에서 속도와 이동거리를 검지할 때 매 검지 단위(100ms)마다 발생하는 노이즈(가우시안)의 표준편차가 각각 3cm/s, 1.5cm로 증가되었다고 가정하였다. (Kim[2]에서는 속도와 이동거리 노이즈가 각각 1cm/s, 0.5cm의 표준편차로 발생한다고 가정하였다.) 시뮬레이터의 구성과 동작을 Fig. 6에 나타내었다. 구성요소 별로 간단히 설명하면 다음과 같다.

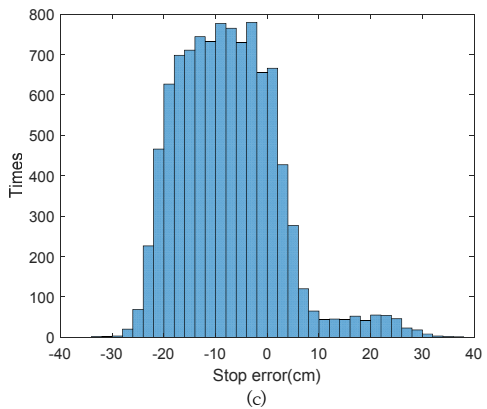
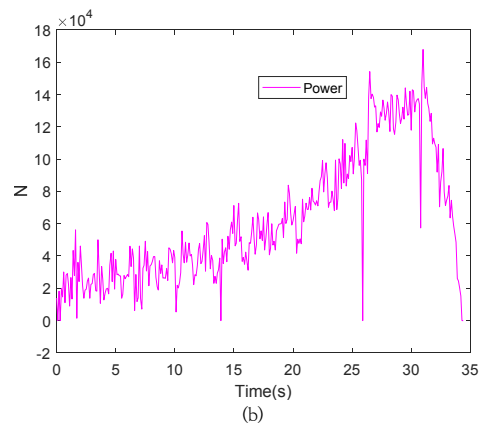
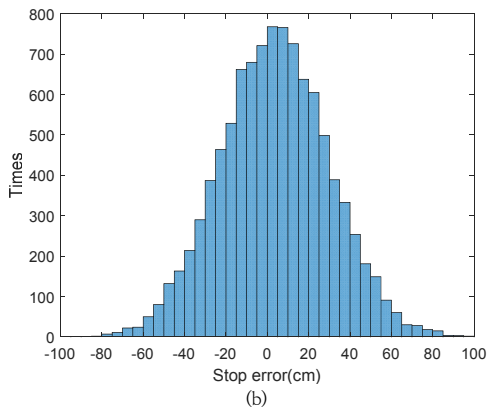
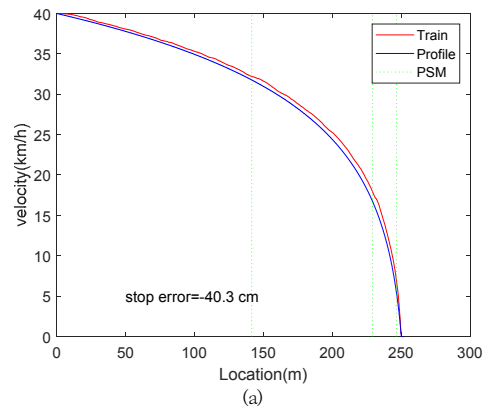
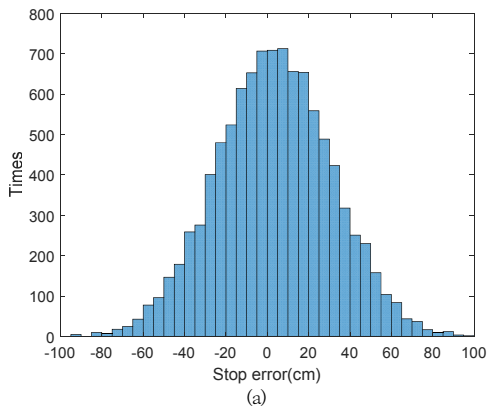


Fig. 7. Histogram of simulation trials with three types of control algorithm ((a) PID control, (b) Kalman filter control, (c) Proposed)

먼저 시스템 모델은 열차를 선형으로 모델링 한 것이며 한 제어주기(100ms)동안 MATLAB의 lsim 함수를 통해 동작을 시뮬레이션한다. 상태 변수는 열차의 위치와 속도로 두었으며 이 중 속도를 관측값으로 두되 양자

Fig. 8. Control process and result in a simulation with PID control (a) speed profile and result, (b) control input

화 오차와 차륜 슬립에 의한 오차를 반영하였다. 또한 PSM을 지날 때 열차의 위치를 보정하는 것도 구현하였다. 관측값은 속도 프로파일과 비교하여 상태(위치, 속도)의 오차를 구하고 이에 따라 제어입력(가감속명령)을 도출한다. 여기에서는 정차 과정을 시뮬레이션하므로 감속명령만 존재하며 이는 제동기의 지연에 의해 10 제어주기(1초) 이후 시스템에 반영되게 된다.

앞에서 기술한 시뮬레이터로 제어 방식 당 총 10,000 회의 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하였다. 제어 방식은 기존의 PID 제어, 칼만 필터 제어[2]와 본 연구에서 제안한 알고리즘의 제어 세 가지이다. 각각의 제어 방식에 대한 시뮬레이션 결과의 히스토그램을 Fig. 7에 나타내었다. Kim[2]에서는 PID 제어의 경우 전체 시행의 88%, 칼만 필터 제어의 경우 전 시행 모두 정차 규격($\pm 35\text{cm}$)을 만족하였다. 그러나 위치 측정 오차와 속도 측정 오차를 증가시키게 되면 규격 내 정차한 시행의 비율이 PID

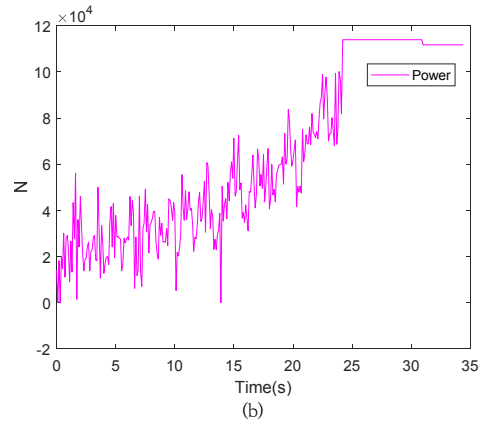
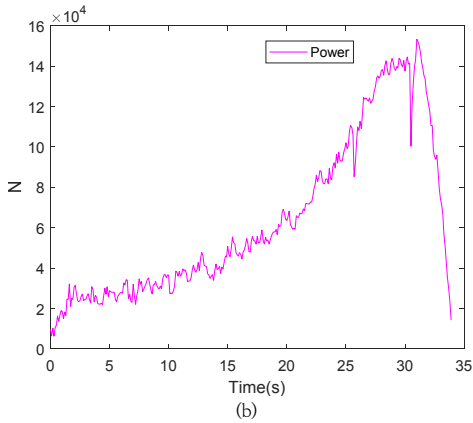
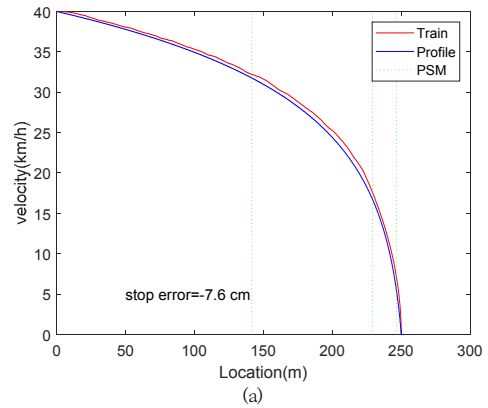
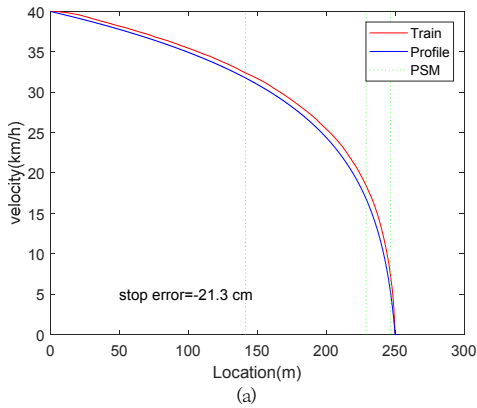


Fig. 9. Control process and result in a simulation with Kalman Filter control (a) speed profile and result, (b) control input

Fig. 10. Control process and result in a simulation with proposed control method (a) speed profile and result, (b) control input

제어의 경우 78.6%, 칼만필터 제어의 경우 81.2%로 줄어들게 된다. 이는 앞에서 기술한 바와 같이 위치와 속도의 오차 증가가 시스템 상태 관측을 어렵게 만들고 결국 제어의 기준이 흔들리게 되어 열차를 원하는 상태로 만들지 못하게 되기 때문이다.

제안 방식의 제어의 경우 PSM을 지날 때 정확한 열차의 위치를 파악하고 이를 바탕으로 속도를 추정하므로 타코미터에서 측정하는 속도의 오차에 의한 영향을 받지 않는다. 따라서 10,000회의 시뮬레이션 시행 중 99.9%의 시행이 규격 내 정차를 수행하였다. 정차오차의 표준편차도 27.94cm(PID), 26.29cm(칼만필터)에서 9.75cm로 줄어든다. Fig. 8~10은 각각 PID, 칼만 필터, 제안 방식의 제어로 수행한 시뮬레이션 중 하나의 시행에 대하여 속도 추종과정에서 나타낸 것이다. (a)는 거리별 속도를 나타낸 것으로 속도 프로파일에 대한 추종 상태를 나타내며 (b)는 시간에 따른 감속 명령을 나타낸다.

PSM2를 지나기 전에 감속명령을 일정한 값(시뮬레이션에서는 $-0.57m/s^2$)으로 유지하여 PSM1을 통과하고 이 때의 속도를 추정한 후 정위치 정차를 하도록 감속명령을 조정하여 정차를 수행한다. 따라서 속도 측정 및 정보 전달과정에서의 오차의 영향을 줄일 수 있다.

3. 결론

속도 정보에 오차가 많이 있는 경우 기존의 제어 방식으로는 정위치정차제어에 한계가 있다. 이러한 경우에 적용할 수 있는 방안으로써 PSM의 통과시간을 이용한 속도 추정 및 감속 제어 알고리즘을 제안하였다. 시뮬레이션을 통해 속도 오차가 큰 경우 기존의 제어 방식(PID 제어, 칼만필터 제어)에 비하여 제안 알고리즘의 우수함을 보였다. 시스템 설계 관점에서는 속도 측정의 정확성을

높여 정밀한 제어가 되도록 하는 것이 우선이지만 그렇지 못한 경우 대안으로써 본 알고리즘을 적용할 수 있다. 다만, 제안 알고리즘의 경우 평균값이 최대값, 최소값의 중간에 위치하지 않은 점, 일부 아웃라이어에 취약한 점은 보완이 필요하며 궁극적으로는 실제 열차 시험을 통해 검증을 수행하여야 한다. 이러한 보완과 검증은 본 연구가 나아가 할 방향이다.

References

- [1] S.-C. Seo, *A Study on the Controls of Precise Position Stop in Rapid Transit Trains*, Ph.D. Dissertation, Seoul National University of Technology, 2010.
- [2] J. Kim et al., "A study on the accurate stopping control of a train for the urban rail transit using Kalman filter," *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 17, No. 11, pp. 655-662, Nov. 2016.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.11.655>
- [3] Z. Li and Z. Hou, "Adaptive iterative learning control based high speed train operation tracking under iteration-varying parameter and measurement noise," *Asian Journal of Control*, Vol. 17, No. 5, pp. 1779-1788, Sep. 2015.
- [4] PID controller, Available From: https://en.wikipedia.org/wiki/PID_controller#cite_ref-2 (accessed May 10, 2021)
- [5] Adrian Boeing Blog, <http://adrianboeing.blogspot.kr/2010/05/kalman-filters.html> (accessed May 11, 2021)

김 정 태(Jungtai Kim)

[정회원]



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

<관심분야>

열차제어, 신호처리, 임베디드시스템