

칼만 필터를 이용한 도시철도 열차 정위치 정차에 관한 연구

김정태*, 이재호, 김무선, 박철홍
한국철도기술연구원 광역도시교통본부

A Study on the Accurate Stopping Control of a Train for the Urban Rail Transit Using Kalman Filter

Jungtai Kim*, Jaeho Lee, Moo Sun Kim, Chul Hong Park

Metropolitan Transportation Research Center, Korea Railroad Research Institute

요약 역사에 스크린도어의 설치가 보편화 되면서 도시철도에서 열차가 정차지점에 정확히 정차하도록 하는 기술의 중요성이 더욱 커지게 되었다. 이를 위한 기술로써 이론적으로는 여러 가지 제어 방안이 제안되었으나 실제 구현 상의 어려움으로 인하여 국내 열차에서는 대부분 PID 제어와 같은 고전 제어기법을 사용한다. PID 제어는 비교적 간단하게 정확한 제어를 수행할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 열차 시스템에서는 제어 주기가 비교적 길고 제동기의 지연 시간이 있으며 위치 및 속도 감지 과정에서 오차 등으로 인하여 PID 제어로는 만족할 만한 결과를 얻지 못하는 경우가 있으며 또한 적절한 계수를 찾는 데 많은 시간이 필요하다. 본 논문에서는 상태나 신호 추정에 사용되는 칼만 필터를 활용하여 제어를 수행하는 방안을 제안한다. 칼만 필터를 통해 제동기가 동작할 시점의 상태를 예측하고 이에 맞는 제동 입력을 구하여 제어를 수행한다. 제동기 특성 및 제어 주기를 반영하여 열차 모델링과 정위치 정차제어 시뮬레이션을 수행하였으며 정차 오차 분석을 통해 제안하는 방안의 우수성을 보인다.

Abstract Accurate stopping control is important for trains, especially now that many train stations are equipped with platform screen doors. Various algorithms have been proposed for accurate stopping control. However, most metro trains in South Korea use classic control algorithms such as PID control because other algorithms are too complex to realize. PID control has merits of simple structure and operation. However, PID control sometimes fails, and much time is needed to find the proper coefficients due to the long control period and the brake delay. We propose a control algorithm that uses a Kalman filter. The Kalman filter estimates the states at the time when braking starts. Then, a suitable control input is derived for proper control. System modeling and a computer simulation were performed with consideration of the brake properties and the period of the control system. The superiority of the proposed control algorithm is shown by analyzing stop errors.

Keywords : Accurate Stopping Control, Stop Accuracy, PID Control, Kalman Filter, Modeling and Simulation

1. 서론

도시철도에서 자동운전을 적용하는 노선이 많아짐에 따라 열차를 역의 정차지점에 정확히 정지시키는 기술에 대한 관심이 높아지게 되었다. 특히 승객 안전 등의 이유로 스크린도어의 설치가 보편화되면서 정차 정확도는 더

욱 중요하게 되었는데 이는 열차의 정차 오차가 일정 수준($\pm 35\text{cm} \sim \pm 55\text{cm}$) 이상이 되면 열차 출입문과 스크린도어 사이에 간섭이 발생하게 되어 열차 운행에 지장을 주기 때문이다. 이러한 배경으로 열차의 정차 정확성 향상을 위해 많은 연구가 수행되었다. 우선 대표적인 고전 제어 기법인 PID (Proportional Integral Derivative) 제

본 논문은 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었음.

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

Tel: +82-31-460-5722 email: jtkim@krri.re.kr

Received October 5, 2016

Accepted November 10, 2016

Revised (1st October 24, 2016, 2nd November 1, 2016)

Published November 30, 2016

어가 적용되었으며 현재까지도 실제 열차제어시스템에 널리 사용되고 있다[1]. 이외에도 적응제어 및 최적제어 기법의 적용과 성능을 분석한 연구가 있고[2], 모델추종 제어[3], 백스테핑(backstepping)제어[4], 퍼지 시스템을 활용한 제어[5] 등도 연구되었다. 그러나 차상에 장착되는 열차제어시스템의 계산 성능 혹은 학습 데이터가 이와 같은 알고리즘을 적용하기에 충분하지 못하여 국내 열차시스템에 실제로 적용되지는 못하고 있다.

PID 제어를 이용하면 비례, 적분, 미분항의 적절한 계수 설정을 통해 만족스러운 제어 성능을 얻을 수 있다. 그러나 열차 시스템에서는 제어 주기가 100ms로 비교적 길고[6] 제동 명령 발행 후 제동력이 실제로 발생되기까지의 지연 시간이 있어서[2] PID 제어로는 만족할 만한 결과를 얻지 못하거나 역별, 열차 별 적절한 PID 계수를 찾는 데 많은 시간과 노력이 필요하다.

본 논문에서는 칼만 필터를 활용하여 제어를 수행하는 방안을 제안한다. 칼만 필터는 과거의 측정데이터와 새로운 측정데이터를 사용하여 오차 및 외부 잡음의 크기 수준을 고려하여 상대나 신호를 추정하는 알고리즘이며 일반적으로 선형 시스템에 대하여 적용된다[7-8]. 여기에서는 칼만 필터를 이용하여 제동기가 동작할 시점의 상태를 예측하고 이 상태가 원하는 상태가 되도록 하는 제어입력을 구하여 정차제어를 수행하는 방안을 제안한다. 시스템 단순화를 통해 계산량 또한 절감하였다. 지연 및 오차 요소를 고려하여 제동기와 열차 시스템을 모델링하고 제어 주기를 반영하여 제어기의 동작에 대한 시뮬레이션을 수행한다. 몬테카를로 방법으로 정차 오차에 대한 누적 데이터를 수집하고 이를 분석, 비교함으로써 기존 제어 기법 대비 제안하는 방안의 우수성을 보인다.

이를 위한 본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2장에서는 시스템 모델링 과정에 대하여 기술한다. 열차의 각 주요 구성품과 기존 제어기에 대하여 설명한다. 3장에서는 제안하는 제어기에 대하여 설명하며 이해를 위해 기존의 칼만 필터에 대하여 간략히 기술한다. 4장에서는 시뮬레이션 수행과 결과에 대하여 기술하며 5장에서 결론을 도출한다.

2. 시스템 모델링

본 논문에서는 서울도시철도 5~7호선에서 운행 중인 전동차를 대상으로 한다. 한 편성 당 총 8량의 열차가 연

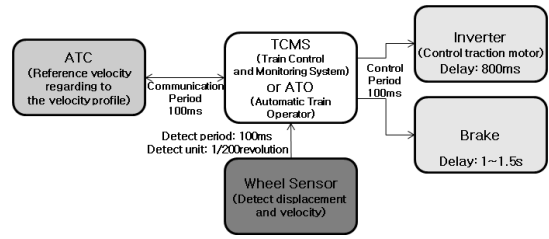


Fig. 1. Components and their operations, errors regarding to the accurate stopping control

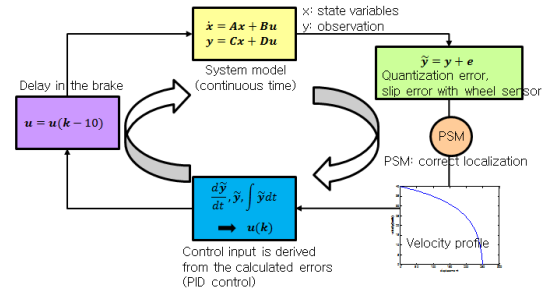


Fig. 2. Operation of the simulator for the accurate stopping control with conventional algorithm

결되어 운행되고 있다. 본 시스템 모델링 단계에서는 열차제어시스템과 제동시스템에 중점을 두어서 모델링을 수행한다. 전자는 제어주기로 인하여, 후자는 지연시간으로 인하여 정위치 정차제어가 어렵게 된다. Fig. 1은 정위치 정차제어를 위한 각 구성요소 및 동작, 오차 요인에 대하여 정리한 것이며 Fig. 2는 이들을 고려한 정위치 정차제어 시뮬레이터의 구성과 동작을 나타낸 것이다. 다음 각 절에서는 이들을 포함한 전체 시스템 모델링 구성요소에 대하여 자세히 기술한다.

2.1 열차 차량 모델 및 시스템 전이식

열차 차량 모델은 [2]에서 제시한 선형모델을 참조로 하였다. 이 선형 모델은 상태 공간 방정식으로 기술되어 있는데 A, B, C, D 4개의 행렬로서 현재 상태에서 다음 상태로 전이되는 조건과 관측 조건을 기술한 것이며 그 도출과정은 다음과 같다.

먼저 열차를 점질량으로 가정하고 상태 변수를 위치 x_1 , 속도 x_2 로 놓는다($x = [x_1 \ x_2]^T$). 그러면 뉴턴의 가속도 법칙에 의해 다음의 식이 성립된다.

$$M\ddot{x}_2 = -bx_2 + u(t) \quad (1)$$

여기서 M 은 열차 총 중량(kg)이고 b 는 주행저항계수 중 열차 속도에 비례한 항을 나타낸 것이다. 원래 주행 저항은 마찰력 및 공기저항 등에 의해 발생하며 주행저항계수에 관한 수식은 Davis에 의해 다음과 같이 정리되어 있다[9].

$$R_C = 1.82 + 0.0359 V + 0.000745 V^2 \quad (2)$$

여기서 V 는 열차 속도로 km/h로 표기된 값이며 R_C 는 중량에 대한 저항계수이다. 전체 주행저항은 열차 중량(ton)을 곱하여 얻을 수 있다(단위: kgf). 식 (2)에서 V^2 항의 경우 계수 자체의 크기가 작을 뿐만 아니라 정위치 정차제어의 경우 저속에서 제어를 수행하는 것이므로 시스템 선형화를 위해 생략한다. 상수항(1.82)은 A 안에 넣기에는 적합하지 않으므로 $u(t)$ 를 계산할 때 반영하는 것으로 한다. 따라서 A_{22} 를 계산하면

$$\begin{aligned} A_{22} &= -\frac{b}{M} \\ &= -0.0359 \times 9.8 \times 3.6 \div 1000 \\ &\cong -0.00126655 \end{aligned} \quad (3)$$

가 된다. 이 때 9.8은 kgf 단위를 N(Newton)단위로 변경하기 위한 값이고 3.6은 m/s로 표현된 속도(x_2)를 km/s 단위로 변환하기 위한 값이다. 마지막으로 M 은 kg으로 표현된 값이므로, R_C 의 정의에 따라 ton으로 표현된 중량을 곱하고 M 으로 나누면 1,000을 나누는 것과 같다. 이렇게 단위 변환에 맞는 수를 곱하거나 나눔으로써 알맞은 계수를 얻을 수 있다. 따라서 시스템 전이에 대한 행렬 A, B 를 구하면 다음과 같이 된다.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -0.00127 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ -1/M \end{bmatrix} \quad (4)$$

2.2 관찰 관계식 및 보정

선형시스템 모델에서 관찰되는 출력은 관찰 관계식

$$y = Cx + D \quad (5)$$

를 통해 얻게 된다. 본 논문에서는 $C = [10; 0.1]$, $D = 0$ 으로 대입하였는데 이는 오차 없이 위치와 속도

출력을 검지할 수 있음을 의미한다. 이 후 검지가 연속적으로 이루어지지 않는다는 점과 양자화 오차를 반영하도록 하였다. 즉 차속 1회전 당 200 pulse인 엔코더를 통해 속도와 위치를 검지하므로 양자화 오차가 발생하며 100ms의 주기로 검지되므로 샘플링에 의한 오차도 발생한다. 이 밖에 차륜의 마모 및 슬립 등에 의한 오차가 있는데 이는 가우시안 분포를 따른다고 가정하였다. 실제 시스템과 같이 오차가 발생하는 과정을 유사하게 모의하기 위해 매 100ms 씩 시스템을 시뮬레이션 한 후 추가적으로 오차 성분을 출력에 반영하였다. 즉, 오차가 비선형이므로 (5)의 시스템 식에 반영하지 않고 별도로 모델링을 하여 반영토록 한 것이다. 이에 대한 것은 Fig. 2의 \tilde{y} 를 계산하여 반영하는 부분에 나타내었다.

이러한 오차를 보정하기 위해 일반적으로 4개의 PSM(precision stop marker)를 역의 정차지점 앞에 설치한다. 따라서 열차가 PSM을 지날 때 신호를 읽어서 정확한 위치를 검지할 수 있다. PSM의 위치는 노선별로 다르며 여기에서는 각각 정차지점으로부터 PSM3은 108.5m, PSM2는 21m, PSM1은 3.5m 앞에 위치하는 경우를 선정하였다(서울도시철도 노선). PSM4는 546m 앞에 위치하나 PSM4는 정위치정차제어 알고리즘 구동 전에 정차지점이 있다는 것을 통보하는 역할이므로 본 시스템 모델링 및 시뮬레이션에서는 사용되지 않는다.

2.3 속도 프로파일

속도 프로파일은 정차 지점까지의 거리에 따라 지켜야 할 열차의 속도를 나타낸 것이며 열차 종류와 궤도의 구배 등 감속에 영향을 주는 요소에 따라 다른 값을 갖는다. 본 시뮬레이션에서는 기본적인 선형 평탄한 구간을 대상으로 서울도시철도 전동차(최대 감속 3.5km/h/s)에 대한 속도프로파일을 구하여 적용하였다. 속도 프로파일은 진입 속도와 잔여 거리에 따라 각각 다르게 나타나며 실제 열차에서는 여러 가지의 속도 프로파일 중 해당되는 것을 선택하여 적용하게 된다. 본 논문에서는 이중 진입속도 40km/h, 잔여거리 250m에 해당되는 속도 프로파일을 선정하여 적용하였다. Fig. 3은 본 시뮬레이션에서 사용한 속도 프로파일을 보인 것이다.

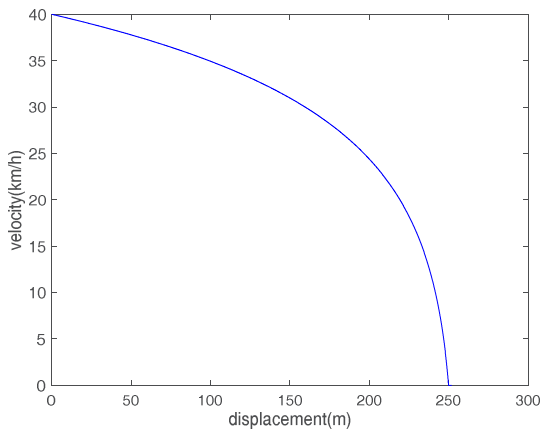


Fig. 3. A typical velocity profile used in this simulation

2.4 제어기

검지된 위치와 속도에 대하여 속도 프로파일의 해당 지점을 기준 상태로 하였을 때의 오차를 구하고 이를 가지고 적합한 제어 입력 (제동 입력)을 구하게 된다. 먼저 본 연구에서는 기존 제어 알고리즘으로써 PID를 구현하여 시뮬레이션 한다. PID는 각각 비례(proportional), 적분(integral), 미분(differential) 항을 의미하며 변위, 속도, 가속도 물리량을 나타낸다. 실제 시스템의 검지 과정과 마찬가지로 이들 물리량은 연속적으로 검지되는 것이 아니라 매 주기(100ms)마다 먼저 변위를 검지하고 이의 변화율을 측정하여 속도, 가속도 값을 획득하게 된다. 이를 바탕으로 적절한 계수를 구하여 제동기에 들어갈 제어 입력(제동 출력)을 구하게 된다.

2.5 제동기

제어기에서 계산된 제동 출력이 제동기에 가지지면 일정 시간 지연이 된 후 나타난다. 제동기 종류에 따라 지연 시간은 다르지만 본 시뮬레이터에서는 1s의 지연 시간 뒤에 제동압이 가해지는 제동기를 대상으로 하였다. 따라서 Fig. 2에서 제어기에서 도출결정한 제동압은 지연 블록에 의해 1 초 뒤 (루프를 10회 반복 한 후)에 시스템 모델에 가해지게 된다.

3. 제어기 제안

여기에서는 앞에서 기술한 정위치 정차제어의 동작

절차와 문제점을 고려하여 적합한 제어기를 제안한다. 본 논문에서는 이산 시간에서 검지 및 제어가 이루어진다는 점, 제동기 동작에 지연시간이 있으므로 다음 상태에 대한 예측이 필요하다는 점을 고려하여 칼만 필터를 이용한 제어기를 제안하였다. 이는 위치 및 속도 검지 단계에서 발생하는 양자화 오차 등 오차 수준에 따라 상태 예측을 수행하고 이에 적합한 제어 입력을 가할 수 있다는 장점이 있다. 각 절 별로 칼만 필터의 개요와 제어기 구성 과정에 대하여 기술한다.

3.1 칼만 필터 개요[7-8]

칼만 필터는 R. Kalman이 1960년대 초 개발한 필터로 컴퓨터 비전, 로봇, 로켓, 위성, 레이더 등에 많이 이용되는 알고리즘이다. 여기서 필터는 입력에서 필요 없는 것을 걸러내는 역할을 수행한다는 것을 의미하며, 신호 처리 분야에서는 측정 데이터에 포함된 노이즈 등을 걸러 내고 원하는 신호나 정보를 추출하는데 적용된다.

칼만 필터에서는 과거의 측정데이터와 새로운 측정데이터를 사용하며 데이터에 포함된 노이즈를 필터링하여 새로운 결과를 추정하는 알고리즘으로 일반적으로 선형 시스템에 대하여 적용되며 재귀적 방법으로 동작한다. 즉, 이를 구현 관점에서 살펴보면 다음과 같이 2단계로 나눌 수 있고 이 단계가 번갈아 가면서 재귀적으로 동작하는 것이다.

- 1) 예측(Predict) 단계: 현재의 상태변수 추정치 및 공분산 값으로부터 다음 측정시간에서의 상태변수 추정치 및 공분산을 계산하는 단계이며 수치적으로는 시간적분에 해당한다. 다음의 두 과정으로 진행된다.

* 상태 진행: 이전 상태와 제어 입력을 가지고 시스템 행렬에 적용하여 앞으로의 상태를 예측한다.

$$\hat{x}_k^- = A\hat{x}_{k-1} + Bu_{k-1} \quad (6)$$

* 오차 공분산 계산: 현재 추정된 상태변수 자체의 변동 폭과 상태 변수 간의 상관관계를 나타내는 지표로써 현재 추정된 상태 변수의 신뢰도를 나타낸다. 다음 식으로 구하며, 여기서 Q 는 각 상태변수에 인가되는 오차를 나타내는 행렬이다.

$$P_k^- = AP_{k-1}A^T + Q \quad (7)$$

2) 보정(Correct) 단계: 예측 단계에서 추정된 상태변수 추정치에 새로운 측정치 정보를 혼합하여 상태변수 추정치를 알맞게 수정하는 단계. 이 단계에서 칼만 이득 K 를 추적추정 이론에 따라 계산하며 다음의 세 과정으로 진행된다.

* 칼만 이득 계산: 다음 식으로 칼만 이득을 계산한다. R 은 Q 와 마찬가지로 각 상태변수에 인가되는 오차를 나타내는 행렬이다.

$$K_k = P_k^- C^T (C P_k^- C^T + R)^{-1} \quad (8)$$

칼만 이득은 이전 상태 추정치에 대하여 현재 측정된 상태의 신뢰 수준을 나타내는 지표이다.

* 상태 예측치 보정: 측정치 y_k 에 따라 상태 예측치 보정하며 그 식은 다음과 같다.

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (y_k - C \hat{x}_k^-) \quad (9)$$

* 오차 공분산 보정: 다음 식과 같이 오차 공분산도 보정한다.

$$P_k = (I - K_k C) P_k^- \quad (10)$$

칼만 필터의 각 단계에 따른 연산과정은 Fig. 4에 나타내었다[10].

3.2 칼만 필터를 이용한 제어

칼만 필터는 본래 신호 추정의 목적으로 개발된 것이므로 본 연구와 같이 제어 목적으로 사용하기 위해서는 동작에 변경이 필요하다. [11]에서는 제어를 위해 부가해야 할 입력을 상태 변수로 설정하고 이를 칼만 필터를 통해 추정함으로써 제어 입력을 구하는 방법을 제안하였다. 그런데 본 연구에서 대상 시스템에서는 상태 변수가 위치 및 속도이며 이는 하나의 상태변수가 다른 상태변수의 미분 값이 되므로 비교적 간단한 선형 시스템이다. 그러나 상태 변수를 제어 입력으로 설정하게 되면 시스템이 복잡해지게 된다. 따라서 여기에서는 상태 변수는 그대로 위치와 속도로 설정하고 제어 입력(제동력)을 구하는 방법을 제안한다. 먼저 보정 단계에서 관측데이터로 상태를 추정 한 후 예측 단계에서 다음 상태를 예측하고 이 때 예측한 상태가 원하는 상태가 되도록 하는 제어입력을 구하도록 하였다. Fig. 5에 칼만 필터 제어에 대한 프로세스를 간략히 나타내었다.

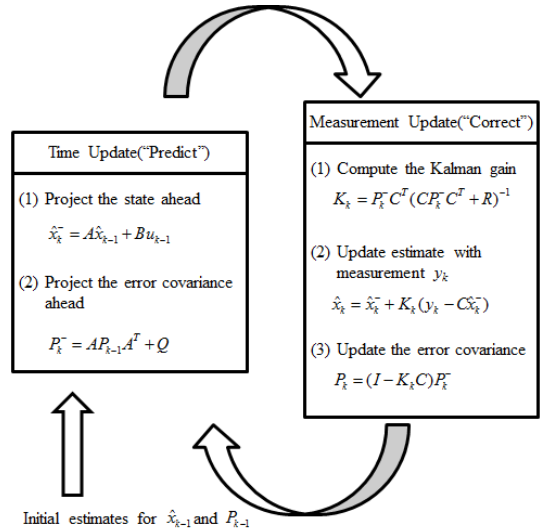


Fig. 4. Kalman filter processes and their equations[10]

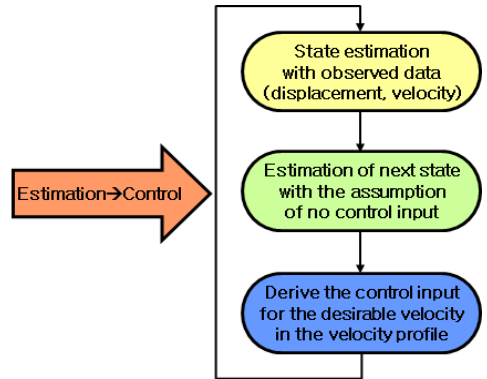


Fig. 5. Process of the proposed Kalman filter control

칼만 필터를 사용하기 위해서는 식 (4)와 (5)에 정의된 연속 시간에서의 시스템을 이산 시간에서의 시스템으로 변환하여야 한다. 즉 k 번째 시퀀스에서의 상태인 위치와 속도를 상태 변수로 설정하고 (4), (5)에 정의된 식을 이용하여 $k+1$ 번째 시퀀스에서의 상태를 구하는 식을 도출한다. 이를 통해 다음과 같은 이산시간에서의 시스템 행렬을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} A_d &= \begin{bmatrix} 1 & t_s \\ 0 & 1 - 0.00127t_s \end{bmatrix} \\ B_d &= \begin{bmatrix} 0 \\ -t_s/M \end{bmatrix} \\ C_d &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ D_d &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (11)$$

식 (6)에서 t_s 는 제어 및 검지가 일어나는 주기이며 본 시스템에서는 100ms이다. 원하는 상태가 되도록 하는 제어 입력은 뉴턴의 가속도 법칙에 의해 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\hat{u}_k = \frac{\hat{x}_k^-(2) - v_d(\hat{x}_k^-(1))}{t_s} * M \quad (12)$$

2차 시스템으로 단순화하였으므로 (6)-(12)에 기술한 바와 같이 칼만 필터 제어를 수행하는데 필요한 계산량이 크지 않아 실 시스템에 탑재 가능하다.

4. 시뮬레이션 및 분석

앞에서 구현한 제어기를 사용하여 MATLAB으로 시뮬레이션을 수행하였다. 먼저 (4)와 (5)로 기술된 선형 열차 시스템을 구현한 후 일정 단위(100ms)로 시간대별 상태의 변화와 출력을 구하였다. 이 단위는 앞에서 기술한 제어와 검지의 시간 단위이다. 이 때, 위치 및 속도 검지 과정에서 발생하는 오차를 모델링하여 반영하였다. 먼저 차륜의 슬립이나 차륜 직경 정보 오차에서 발생하는 검지 오차는 가우시안 분포를 따르며 매 검지 단위 별로(100ms) 평균은 0, 표준편차는 각각 0.5cm, 1cm/s으로 발생한다고 가정하였다. 이 외에도 엔코더 단계 (200 pulse/resolution)에 의한 양자화 오차도 반영하였다. 이 후 기존의 PID 제어기와 칼만 필터 제어기를 각각 MAT-LAB으로 구현하고 제어 단위 별로 제어입력을 계산하여 시스템의 부가하였다. 여러 번의 시뮬레이션을 수행한 후 정차 오차의 분포를 살펴보는 몬테카를로 방식을 사용하였는데 시뮬레이션 회수는 10,000회로 선정하였다. 각 제어기 별 실행 결과는 해당 절에서 기술한다.

4.1 PID 제어기

기존에 적용되는 제어 방식인 PID 제어 방식을 적용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 이 때 각 P, I, D 항의 계수는 시행착오를 통하여 구하였으며 구한 값은 각각 1, 1.6, 0.001이다. 여기에 열차 총 중량 M을 구한 값이 제동 입력으로 산출하게 된다. 실제 시스템과 마찬가지로 승차감에 영향을 주는 저크에 제한을 두었다.

Fig. 6은 PID 제어를 이용한 정위치 정차제어 수행 시 속도 프로파일 추종 결과를 나타낸 것이다. 10,000

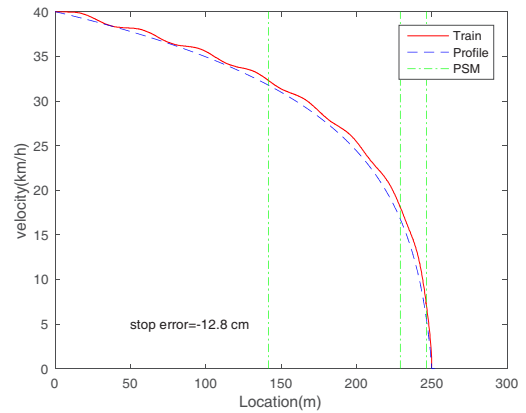


Fig. 6. Velocity profile follow-up using PID control

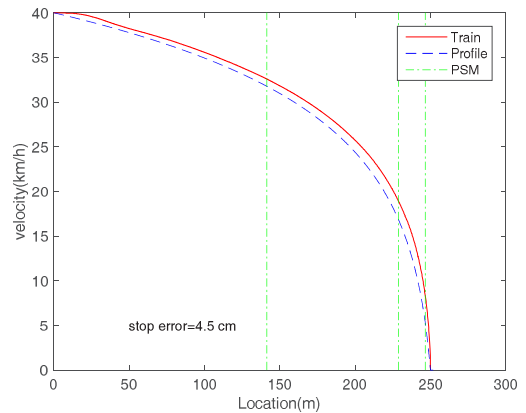


Fig. 7. Velocity profile follow-up using Kalman filter control

회의 시뮬레이션 중 평균에 가까운 오차를 나타내는 케이스를 선정하였다. 오차 통계 및 제안한 방식을 사용한 경우와의 비교 내용은 뒤에서 기술한다.

4.2 칼만 필터 제어기

Fig. 7은 칼만 필터 제어기를 이용하여 정위치 정차제어를 수행 시 속도 프로파일 추종 결과를 나타낸 것이다. Fig. 4와 Fig. 5에서 기술한 바에 따라 동작하게 되며 목표 속도와 예상 속도로부터 얻게 되는 필요 가속도와 열차 중량에 비례하여 제동압을 가하게 된다. Fig. 7에 보인 바와 같이 PID제어에 비하여 작은 오차를 나타내며 전 통계 수치에서도 우수한 결과를 나타낸다. 이에 대해서는 다음 절에서 기술한다.

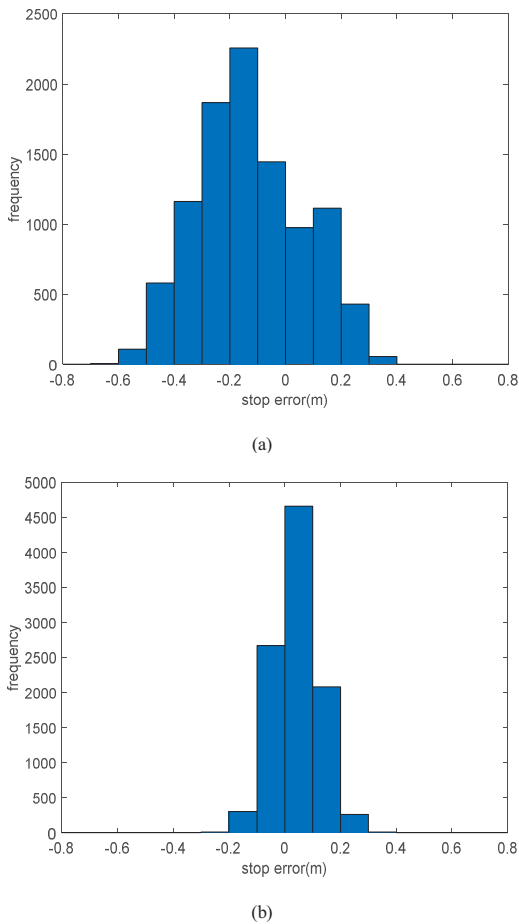


Fig. 8. Histogram of stop error ((a): PID control, (b): Kalman filter control)

Table 1. Statistical analysis of stop errors (cm)

Control Method	Mean	Max	Min	Std Dev
PID Control	-12.67	40.18	-67.28	18.96
Kalman Filter Control	4.35	35.18	-28.75	7.95

4.3 오차 분석 및 비교

총 10,000회의 몬테카를로 시뮬레이션에 대한 오차 통계를 비교함으로써 제안하는 칼만 필터 제어 방식의 우수성을 보인다. Fig. 8의 (a)와 (b)는 각각 PID 제어와 칼만 필터 제어를 적용하였을 때의 오차 분포를 히스토그램으로 나타낸 것이다. 전반적인 오차의 크기 및 분포가 칼만 필터 제어를 적용하였을 때 우수한 것을 확인할 수 있다. Table 1은 각 제어 방식을 적용한 오차의 통계적 분포를 나타낸 것이다. PID 제어의 경우 각 계수의

조절을 통해 평균을 0에 가깝게 맞출 수는 있지만 10,000회의 시행횟수 중 약 12%는 정위치 정차 기준을 만족하지 못하고 있다. 이에 비하여 칼만 필터 제어의 경우 평균, 최대, 최소, 표준 편차의 모든 통계 지표의 경우에 있어서 PID 제어보다 우수한 결과를 나타낸다.

5. 결론

도시철도 열차의 정위치 정차제어는 안전성과 효율성 면에서 중요하지만 검지 및 제어 명령 전달 주기와 제동 명령 지연 등으로 인하여 정확한 제어가 어렵다. 본 논문에서는 이러한 시스템의 특성을 모델링에 반영하고 기존의 PID 제어 및 제안하는 칼만 필터 제어를 적용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 제동기가 동작할 시점의 상태를 예측하여 이에 맞게 제어 입력을 가하는 칼만 필터 방식의 제어를 제안하였으며 시뮬레이션을 통하여 검증하였다. 10,000회의 몬테카를로 시뮬레이션 결과 제안하는 방식의 오차 평균 절대값이 기존 방식 대비 1/3로 감소하였다. 표준편차의 경우는 1/2로 감소하였다. 본 연구에서는 시스템을 2차 시스템으로 단순화하여 모델링하였으므로 필터 및 제어 수치 계산 시 계산량이 많지 않다. 따라서 실제 열차제어장치에서도 적용이 가능하다. 그러나 시스템을 상세히 모델링하였을 때에도 칼만 필터 제어가 적합한 결과를 내는 지 확인하고 또한 실제 시스템에 탑재할 수 있을 만큼의 계산량으로 구현 가능한 지 연구하는 것은 계속 진행해야할 과제이다.

References

- [1] ATC/ATO Training Team, *Training Report*, Daegu Metropolitan Transit Cooperation, November, 1998.
- [2] S. C. Seo, "A Study on the Controls of Precise Position Stop in Rapid Transit Trains", *Ph. D. Thesis*, Seoul National University of Science and Technology, 2009.
- [3] H. A. Ahmad, "Dynamic Braking Control for Accurate Train Braking Distance Estimation under Different Operating Conditions", Virginia Polytechnic Institute and State University, 2013.
- [4] Q. Song, Y. Song, and W. Cai, "Adaptive Backstepping Control of Train Systems with Traction/Braking Dynamics and Uncertain Resistive Forces", *Vehicle System Dynamics*, vol. 49, no. 9, pp. 1441-1454, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/00423114.2010.520084>
- [5] D. Chen and C. Gao, "Soft Computing Methods Applied

to Train Station Parking in Urban Rail Transit”, *Applied Soft Computing*, vol. 12, pp. 759-767, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.asoc.2011.10.016>

- [6] Korea Railroad Research Institute, *Research Report of the Metropolitan Railroad Standardization Research*, Ministry of Infrastructure and Transport, 2001.
- [7] R. E. Kalman, “A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems”, *Trans. of the ASME - Journal of Basic Engineering*, vol. 82 (Series D), pp. 35-45, 1960.
- [8] G. Welch and G. Bishop, “An Introduction to the Kalman Filter”, *UNC-Chapel Hill*, TR 95-041, pp. 29-45, July 2006.
- [9] J. Kim, M. S. Kim, K. J. Ko, and 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>
- [10] Adrian Boeing Blog, accessed May2016, <http://adrianboeing.blogspot.kr/2010/05/kalman-filters.html>.
- [11] M. Ghanai and K. Chafaa, “Kalman filter in Control and Modeling”, *INTECH Open Access Publisher*, 2009.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/6801>

김 정 태(Jungtae 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 선임연구원

<관심분야>

열차제어, 신호처리, 임베디드시스템

이 재 호(Jaeho Lee)

[정회원]



- 1989년 8월 : 광운대학교 공과대학원 전자공학과 (공학석사)
- 2005년 2월 : 고려대학교 공과대학원 메카트로닉스공학과 (공학박사)
- 1989년 8월 ~ 1995년 1월 : 단암전자통신(주) 선임연구원
- 1995년 2월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 책임연구원

<관심분야>

열차신호, 하드웨어

김 무 선(Moo Sun Kim)

[정회원]



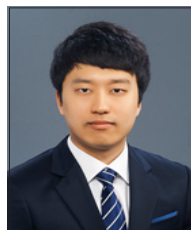
- 2002년 2월 : 서울대학교 공과대학 기계공학과 (공학석사)
- 2008년 2월 : 서울대학교 공과대학 기계공학과 (공학박사)
- 2008년 7월 ~ 2012년 8월 : 현대자동차 남양연구소 책임연구원
- 2012년 8월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>

복합제, 재료구조, 최적화

박 철 흥(Chul Hong Park)

[정회원]



- 2012년 2월 : 서울과학기술대학교 전기공학과(공학사)
- 2012년 6월 ~ 2014년 2월 : 한국철도기술연구원 위촉연구원
- 2014년 3월 ~ 2016년 2월 : 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과(공학석사)
- 2016년 3월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 석사후연수연구원

<관심분야>

전기공학, 제어공학, 최적제어기술