

외란을 고려한 열차간격 최적제어 알고리즘 연구

Study of an Optimal Control Algorithm for Train Interval Under Disturbance

김기웅 · 이종우 · 박민기*

Kiwoong Kim · Jongwoo Lee · Minkee Park

Abstract When a train is delayed because of a disturbance, the time interval between successive trains increases and high-frequency metro lines can become unstable. Time interval control is therefore necessary in preventing such instabilities. In this paper, we propose an optimal interval control algorithm that is easy-to-implement and that guarantees system stability. In the proposed method, the controlled trains are determined from the time interval deviations between successive trains; the control algorithm for staying time is designed by use of a discrete traffic model to ensure an optimal time interval between successive trains. The results of a computer simulation are also given to demonstrate the validity of the proposed algorithm.

Keywords : Train traffic control, Train interval control, Traffic model, Traffic regulation

초 록 도시철도 운행시스템에서 외란에 의해 지연이 발생하면 열차 사이에 간격편차가 발생하고 열차운행 상황이 불안정해진다. 따라서 이러한 불안정한 열차운행을 방지하기 위해서는 열차간격을 적절하게 제어하는 것이 필요하다. 본 논문에서는 상용 도시철도 운행시스템에서 외란에 의해 지연이 발생하는 경우에 안정한 운영을 위하여 간단하면서도 효과적으로 적용할 수 있는 열차간격 최적제어 알고리즘을 제안한다. 제안한 알고리즘은 실시간 열차간격 편차의 크기에 따라 제어 대상열차를 결정하고 이산 열차간격 모델을 이용하여 대상열차의 정차시간을 조절함으로써 모든 열차가 적정 운행간격을 유지하도록 제어한다. 또한 시뮬레이션을 통하여 제안한 방법의 유효성을 확인한다.

주요어 : 열차운행 제어, 열차간격 제어, 열차운행 모델, 열차운전 시격조정

1. 서 론

도시철도에서 열차운행은 시스템의 안전조건, 수송능력, 승객의 혼잡도 등을 고려하여 사전에 계획된 열차운행계획을 따라야 한다. 그러나 외란이 발생하여 계획과의 시간 편차가 발생하고 열차 사이의 간격이 길어지면, 대기 승객이 증가하여 편차가 더욱 커지게 되고 결국 다른 열차의 정상적인 운영을 방해한다. 따라서 열차의 간격을 적절하게 제어하는 방법은 노선 전체의 안정한 열차운행을 위해서 매우 중요하다. 이러한 목적으로 열차운행 간격을 제어하는 대표적인 방법으로 단순제어, 선형제어, 퍼지제어 등이 있다.

단순제어 방법은 미리 정해진 몇 가지 실행명령 규칙을 이용하여 열차의 지연시간의 크기에 따라 열차의 정차시간과 운행속도를 제어입력으로 결정하는 방법으로 제어규칙이 단순하고 추가비용이 적다는 장점이 있다[1]. 하지만 사전에 정해 놓은 단순한 명령만 따르기 때문에 제어성능이 좋지 못하고 지연이 제어범위를 넘는 경우에 전체 운행계획을 재조정해야 하기 때문에 시스템의 부담이 크게 증가한다.

선형제어 방법은 이산이벤트(discrete-event) 접근법으로 얻은 선형 열차모델을 이용한다[2-5]. Breusegem 등 [4]은 선형성에 관계되는 몇 가지 가정을 통해 시스템을 출발시간, 운행시간, 정차시간 및 승객의 증가율 등의 관계식을 이용하여 운행상태, 제어입력, 외란의 벡터로 이루어진 조건식을 세우고, 주어진 조건식 아래에서 열차가 운행계획에 맞추어 운행할 수 있도록 열차의 제어입력 벡터를 최적화하였다. 이 방법은 비교적 간단하고 시스템이 정상상태인 경우 최적화된 제어 성능을 보이는 장점이 있지만 제어 알고리즘이 대기 승객의 증가율에 따른 선형적인 모델이기 때문에 특정 열차의 지연이 큰 경우에 제어 성능이 크게 저하된다.

마지막으로 퍼지제어 방법들 [6-9]은 if-then 규칙을 사용하여 직관적으로 이해가 쉬우며, 선형제어 방법에 비해 비선형 모델의 제

*Corresponding author. Tel.: +82-2-970-6464, E-mail : mkpark@seoultech.ac.kr.

© 2015 The Korean Society for Railway. All rights reserved.

<http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2015.18.5.419>

어에 우수한 성능을 보인다. 퍼지제어를 이용한 열차제어 알고리즘 [6]은 열차들이 서로 균등한 거리를 유지하면서 운행할 수 있도록 제어하는 열차간격 퍼지제어기와 운행 중인 열차들이 미리 작성된 열차운행계획에 맞추어 운행할 수 있도록 제어하는 운행시간 퍼지제어기, 그리고 퍼지제어시스템의 운행상황을 반영하여 두 퍼지제어기의 출력을 적절하게 조절하여 제어하는 통합 퍼지제어기로 구성된다. 이 방법은 시스템의 선형성에 의존하지 않는 제어 성능을 얻을 수 있으며 여러 가지 제어 목표를 동시에 고려하는 방식이므로 선형제어 방법이 가지는 문제점을 해결하였지만, 제어 규칙을 작성하기가 어렵고 운행시스템의 상황을 효과적으로 반영한 통합제어기의 설계가 매우 복잡한 단점이 있다.

따라서 본 논문에서는 기존 방법들의 단점을 개선하고자 ATC(Automatic Train Control), ATO(Automatic Train Operation) 또는 거리연산제어(Distance To Go) 신호시스템을 갖춘 상용 도시철도 노선에서 고밀도로 운행하는 열차의 간격을 실시간으로 제어하기 위한 최적의 열차간격 제어 알고리즘을 제안한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 이산이벤트를 이용하여 열차의 운행간격을 모델링하고 실시간 열차간격 제어 알고리즘을 제안한다. 3장에서는 시뮬레이션을 통해서 제안한 알고리즘의 성능이 유효함을 보이고, 마지막 장에서는 연구결과에 대해 기술한다.

2. 열차간격 최적제어

도시철도 시스템에서 ATO 성능을 가진 차량의 역간 회복운전 성능이 우수하여 회복률이 대기승객 도착률을 초과하면 간격편차는 점점 줄어들겠지만 반대의 경우에는 간격편차가 점점 늘어나게 되며, 일반적으로 열차의 지연이 회복운전 성능을 초과하는 경우에는 원래 상태로의 회복이 거의 불가능하다. 따라서 실제 열차간격과 정규 열차간격과의 편차를 최소화 하는 것이 열차간격 제어에서 중요 요소가 된다.

2.1 열차간격 모델

노선에서 운행되는 모든 열차들의 운행상황은 관제센터로 집중되며 상용 도시철도 시스템에서는 TTC(Total Traffic Control) 또는 ATS(Automatic Train Supervision)에 의해서 사전에 입력된 열차운행계획과 노선을 운행하는 열차들의 위치를 추적함으로써 계획 도착시간, 계획 출발시간, 계획 정차시간, 계획 열차간격, 실제 도착시간, 실제 출발시간, 실제 정차시간, 실제 열차간격 등의 정보들을 실시간으로 수집할 수 있다[10,11]. 이러한 정보들 중에서 실제 출발시간을 이용하여 모든 열차들의 실제 열차간격을 얻을 수 있으며, 계획된 열차간격과 실제 열차간격의 차이를 열차간격 편차로서 다음 식과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} \Delta h_k^i &= h_k^i - H \\ h_k^i &= t_k^i - t_k^{i-1} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, Δh_k^i 는 k 역에서 i 열차의 열차간격 편차, h_k^i 는 k 역에서 i 열차의 실제 열차간격, H 는 계획된 운행간격이며, t_k^i 는 k 역에서 i 열차의 출발시간, t_{k-1}^{i-1} 는 $k-1$ 역에서 i 열차의 출발시간이다. r_{k-1}^i 를 $k-1$ 역과 k 역 사이에서 i 열차의 운행시간, s_k^i 를 k 역에서 i 열차의 정차시간이라 하면 t_k^i 는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다[4].

$$t_k^i = t_{k-1}^{i-1} + r_{k-1}^i + s_k^i \quad (2)$$

열차운행 모델에서 열차의 실제 운행간격 h_k^i 는 운행시간 r_{k-1}^i 또는 정차시간 s_k^i 를 조절하여 제어할 수 있다. 그러나 역간 운행시간이 짧은 도시철도의 경우에는 정차시간 s_k^i 를 조절하여 열차의 운행간격을 제어하는 것이 더 적합하다.

2.2 열차간격 최적제어 알고리즘

제어규칙을 세우기 위해 단순제어와 선형제어 방식의 장점을 이용하면 더욱 간단하고 효과적인 열차간격 제어가 가능하다. 단순 제어의 장점은 열차가 운행계획을 맞추기 위해 아주 간단한 제어 알고리즘을 이용해서 정해진 지연 크기에 따라 간단한 제어동작을 하는 것이고, 선형제어는 열차 간격에 따라 선형으로 변화하는 승객 증가율에 최적화된 제어입력을 구하는 알고리즘이다. 본 논문에서 제안한 알고리즘의 기본 개념은 외란에 의해 지연이 발생하면 열차간격 편차의 크기에 따라 제어대상 열차의 범위를 결정하고 열차의 정차시간을 선형으로 분산시켜 제어함으로써 열차의 추가지연을 방지하고 급격한 열차간격 편차가 발생하지 않도록

하는 것이다.

제어대상과 제어값을 결정하기 위해서 먼저 식 (1)을 이용하여 열차간격 편차 Δh_k^i 를 계산한다. 이 때 Δh_k^i 가 0보다 작을 경우는 열차간격이 계획보다 좁음을 의미하며 열차는 ATO에 의해서 자동으로 지연모드 운행과 추가정차를 설정하게 된다. 반대로 Δh_k^i 가 0보다 클 경우는 외란에 의해서 열차의 운행간격이 정상에서 벗어난 상태이므로 간격제어가 필요하다. 먼저 지연된 i 열차를 기준으로 앞과 뒤의 제어대상 열차 수 α 를 다음 식 (3)에 의해 결정한다.

$$\alpha = \left\lceil \frac{\Delta h_k^i}{K+1} \right\rceil \quad (3)$$

여기서 K 는 제어대상과 제어값의 범위를 결정하는 파라미터이며, 기호 $\lceil \cdot \rceil$ 는 가우스 기호로서 α 는 $(\Delta h_k^i)/(K+1)$ 를 넘지 않는 최대 정수가 된다. 따라서 제어대상 열차는 $i-\alpha, \dots, i-1, i, i+1, \dots, i+\alpha$ 가 되며, 열차간격 편차 Δh_k^i 의 크기에 비례하는 특성을 가진다.

K 값을 결정하기 위하여 다음 식과 같이 열차간격 편차의 제곱평균 제곱근(Root Mean Square)을 성능지표 J 로 정의한다.

$$J = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h^i - H)^2} \quad (4)$$

여기서 n 은 운행되는 열차의 수이다. 최적제어를 위한 K 값은 이 성능지표가 최소가 되도록 결정된다. 계획된 운행시간 간격과 실제 운행시간 간격이 같은 정상적인 운행의 경우에는 이 성능지표값은 0이 된다.

다음으로 제어값을 결정하기 위하여 제어조절량의 최대값 β 를 다음 식에 의해 결정한다.

$$\beta = \Delta h_k^i - K \quad (5)$$

여기서 식 (5)는 열차의 간격 편차가 K 값 이상일 경우에 앞과 뒤의 열차를 제어하는 것을 의미하며 Fig. 1에 보이고 있는 바와 같이 K 값에 의해 제어량의 크기가 조정된다. 즉, 성능지표를 최소화하도록 K 값이 결정되면 이 K 값에 따라 제어량이 조절되고 열차간격의 최적제어가 이루어진다.

지연된 i 열차를 기준으로 제어대상 열차들의 제어입력 U^i 는 다음 식과 같이 $(2\alpha+1)$ 개의 원소를 가진 벡터로 나타낼 수 있다.

$$U^i = s^i + \Delta s^i = (s^{i-\alpha}, \dots, s^{i-1}, s^i, s^{i+1}, \dots, s^{i+\alpha}) + (\beta - (\alpha-1)K, \dots, \beta - K, \beta, 0, \beta, \beta - K, \dots, \beta - (\alpha-1)K) \quad (6)$$

여기서 s^i 는 i 열차의 정차시간이며 Δs^i 는 정차시간 조절량이다. α 와 β 는 식 (3)과 식 (5)에 정의되어 있으며, 제어대상 열차 $i-\alpha, \dots, i-1, i, i+1, \dots, i+\alpha$ 의 실제 출발시간 T 와 운행시간 R 을 벡터로 나타내면 다음과 같다.

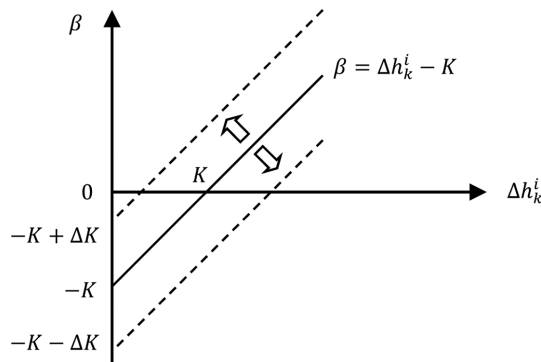


Fig. 1 Variation of β according to the change of K .

$$T = (t^{i-\alpha}, \dots, t^{i-1}, t^i, t^{i+1}, \dots, t^{i+\alpha})$$

$$R = (r^{i-\alpha}, \dots, r^{i-1}, r^i, r^{i+1}, \dots, r^{i+\alpha})$$
(7)

여기서 T 는 $(2\alpha+1)$ 개 열차의 각각의 출발시간을 원소로 하는 벡터이고 R 은 $(2\alpha+1)$ 개 열차의 각각의 운행시간을 원소로 하는 벡터이다. 따라서 본 논문에서 제안하는 열차간격 최적제어 모델식은 모든 제어대상 열차에 대하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_k^{i(new)} = T_{k-1}^i + R_{k-1}^i + U_k^i$$
(8)

여기서 $T_k^{i(new)}$ 는 제어대상 열차의 갱신된 출발시간, R_{k-1}^i 는 제어대상 열차의 전역에서 현재역까지 운행시간이며 U_k^i 는 제어대상 열차의 제어입력이다.

열차간격 최적제어 모델에서는 외란에 의한 지연이 발생하면, 먼저 성능지표가 최소가 되도록 K 값이 결정된다. 앞 열차와의 간격편차가 K 이상이면 식 (3)을 이용하여 간격편차에 비례하는 제어대상 열차를 선택하고, 간격편차가 발생한 열차를 기준으로 앞 열차와 뒤 열차의 출발시간을 선형적으로 분산시켜 조절된 제어입력 U_k^i 에 의해 제어한다. Fig. 2는 열차간격 최적제어 모델을 블록도로 나타낸 것이다.

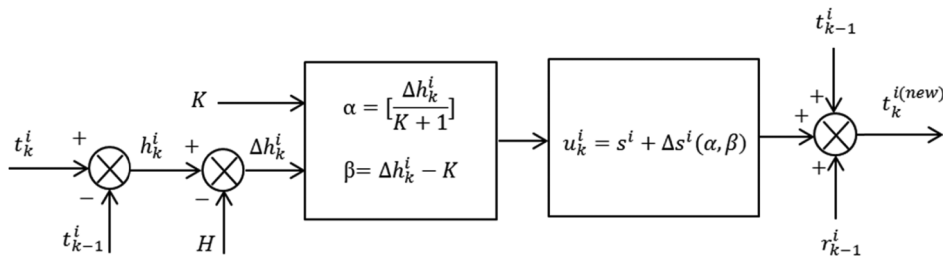


Fig. 2. Model of the optimal train interval controller.

예를 들어 계획된 운행간격 H 를 300초, k 역에서 i 열차의 실제 열차간격 h_k^i 를 540초, 성능지표가 최소가 되도록 결정된 K 값을 60이라 가정하면, k 역에서 i 열차의 실제 간격편차 Δh_k^i 는 240초가 되고 식 (3)과 식 (4)에 의해 $\alpha=3$, $\beta=180$ 으로 계산된다. 따라서 제어대상은 $i-3$, $i-2$, $i-1$, i , $i+1$, $i+2$, $i+3$ 열차로 결정되고 제안한 알고리즘에 의해 계산된 정차시간 조절량 Δs^i 는 Table 1과 같다. 제어값 U_k^i 는 계획된 정차시간과 제안한 알고리즘에 의해 계산된 정차시간 조절량 Δs^i 를 합하여 결정된다. Fig. 3은 제안한 알고리즘에 의해 계산된 제어 조절량을 나타내고 있다.

Table 1. Δs^i in case of $H = 300$ [sec] and $h_k^i=540$ [sec].

	$i+3$	$i+2$	$i+1$	i	$i-1$	$i-2$	$i-3$
Δs^i [sec]	60	120	180	0	180	120	60

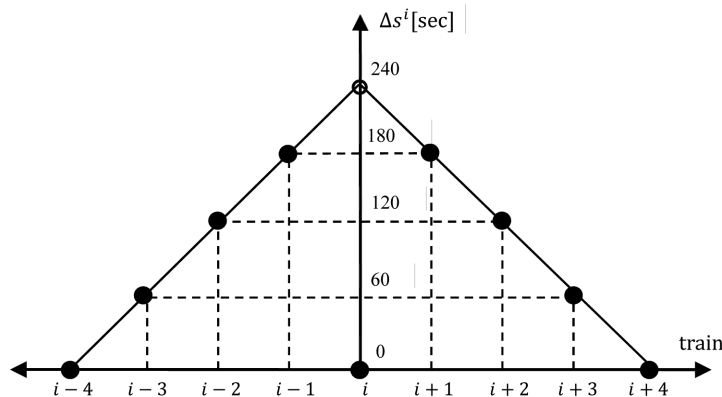


Fig. 3. Control input Δs^i for staying time in case of $H = 300$ [sec] and $h_k^i=540$ [sec].

3. 시뮬레이션

본 장에서는 제안한 알고리즘의 유효성을 확인하기 위하여 파라미터 K 값의 변화와 실제로 자주 발생하는 2가지 외란상황에 대하여 시뮬레이션을 행하고 결과를 분석하였다. 시뮬레이션을 위하여 서울지하철 9호선을 가상으로 구현한 테스트 프로그램을 이용하였으며, 역수 25개, 열차 수 20대, 전체 운행시간 60분, 계획 운행간격 5분, 최소 안전시격 30초, 정차시간 30초, 회복률 9%, 지연율 2%로 시뮬레이션 조건을 설정하였다.

최적제어를 위한 K 값을 결정하는 방법을 보이기 위해 9008열차가 910역에서 외란이 발생하여 열차의 운행이 각각 180초와 360초 지연된 두 경우에 대하여 성능지표를 시뮬레이션하였다. Fig. 4는 K 값의 변화에 따라 성능지표 J 를 시뮬레이션한 결과를 그래프로 나타내고 있다. 여기서, 성능지표는 열차간격 편차의 제곱평균 제곱근으로 계산된 값이다. 시뮬레이션 결과에서 180초의 외란이 발생한 경우, K 가 30일 때 성능지표가 28로 가장 작고, 360초 외란이 발생한 경우에는 K 가 60일 때와 90일 때 성능지표가 60으로 가장 작았다. 한편, 열차의 출발 지연시간은 K 값이 작아질수록 증가하는데 본 논문에서의 제어목적은 열차간격 최적제어이므로 열차의 출발 지연시간은 고려하지 않는다. 다만 열차의 출발 지연시간이 너무 클 경우에는 전체 열차운행이 불안정해질 수 있으므로 K 의 최소값은 30으로 제한을 둔다. 또한 성능지표를 최소로 하는 K 값이 여러 개 나올 경우에는 열차의 출발 지연시간이 작은 K 값을 선택한다. 따라서 180초의 외란이 발생한 경우, 최적제어를 위한 K 값은 30으로 선정되며, 360초 외란이 발생한 경우에는 K 값은 60으로 선정된다.

제안한 방법의 실제 적용 가능성을 확인하기 위하여 서울지하철 9호선을 가상으로 구현한 테스트 프로그램을 이용하여 다음 두 경우에 대한 시뮬레이션을 행하였다.

Case1: 9005열차가 917역에서 180초, 9009열차가 909역에서 240초 동시에 지연

Case2: 9009열차가 909역에서 240초 지연 후 9011열차가 913역에서 180초 지연

최적제어를 위한 K 는 60으로 선정되었으며, 시뮬레이션한 결과를 Fig. 5에 열차 다이어그램으로 나타내고 있다.

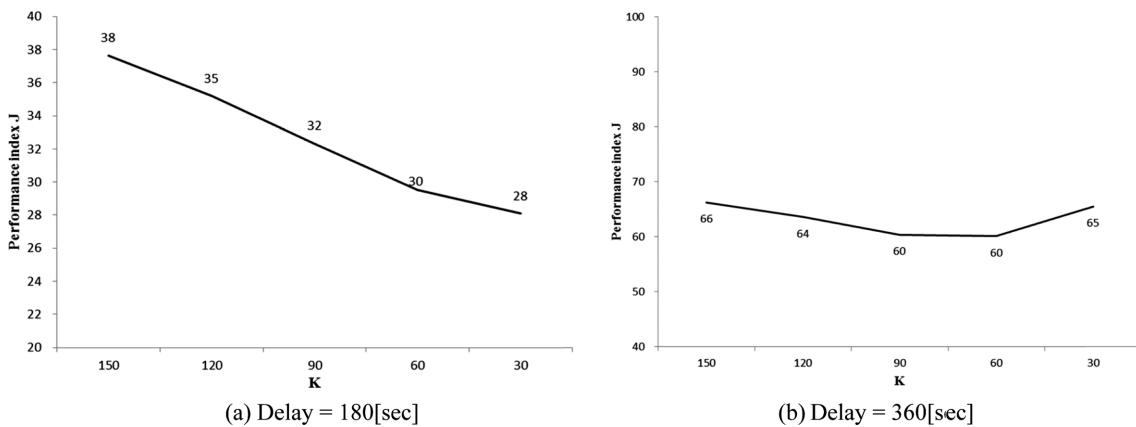


Fig. 4. Performance index J according to the change of K .

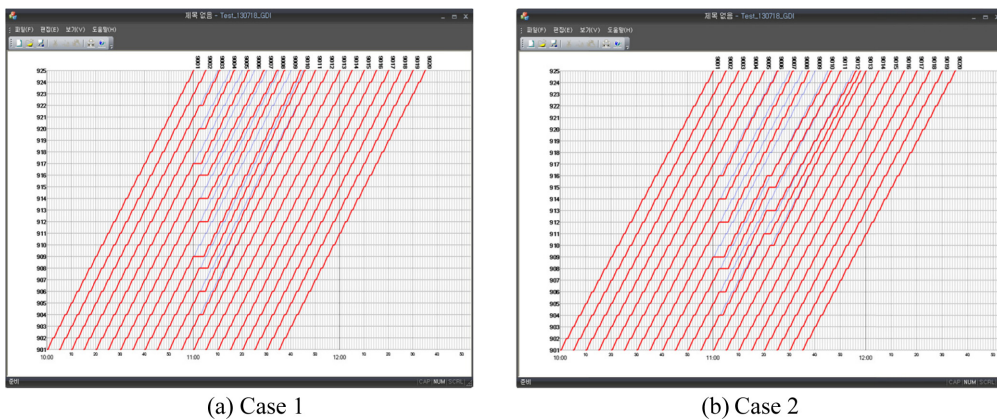


Fig. 5. Simulation results(gray line: operation schedule, red line: operation result).

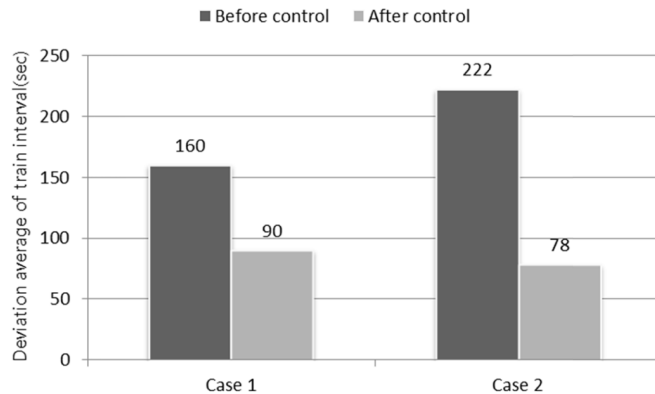


Fig. 6. Simulation analysis.

Fig. 6은 시뮬레이션 결과에 따른 열차간격의 분석 결과를 보이고 있다. Case 1의 경우, 제어 전과 비교하여 제어 후에 열차간격 편차평균이 160초에서 90초로 70초 감소하여 44% 감소시키는 효과를 보였다. Case 2의 경우에는 제어 후에 열차간격 편차평균이 222초에서 78초로 144초 감소하여 65% 감소시키는 효과를 보였다. 따라서 시뮬레이션 분석 결과, 동시외란(Case 1)과 순차외란(Case 2) 상황에서 제안한 알고리즘은 열차간격 편차평균을 모두 감소시키는 안정한 제어 성능을 보임을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 고정폐색방식 또는 거리연산제어(Distance To Go) 방식의 상용 도시철도 운행시스템에 적용 가능한 최적의 열차 운행간격 제어 알고리즘을 제안하고 시뮬레이션을 통해 제안한 방법의 유효성을 보였다. 제안한 알고리즘에서는 ATS 또는 TTC가 가진 열차운행계획과 실시간 수집되는 열차운행실적 정보를 바탕으로 외란의 크기에 따라 제어대상 열차를 선택하고, 열차의 운행간격이 현재 노선의 운행상황에 적합하도록 정차시간을 조절하여 열차간격을 제어하였다. 제안한 알고리즘을 동시외란과 순차외란 상황에 적용하여 시뮬레이션한 결과, 열차의 간격편차를 감소시킴으로써 열차가 점차 정상 운행간격으로 회복되어 안정된 노선운행을 유지할 수 있었다.

제안한 방법은 기존 도시철도 관제시스템인 ATS 또는 TTC 장치의 입출력 정보를 이용하여 간편하고 효과적으로 실시간 열차간격을 제어할 수 있으며, 열차의 정차시간을 조절하여 간격을 제어하기 때문에 기존 차량 시스템의 ATO 기능개선이 불필요하고 역간 운행시간이 짧은 상용 도시철도 노선에 적합하다. 또한 성능지표가 최소가 되도록 열차간격 제어 알고리즘의 파라미터 K 를 선정함으로써 대기 승객 증가율이나 계획된 운행간격 상황에 따른 최적제어가 가능하며, 실제 발생 가능한 복합외란 상황에서도 안정한 제어 성능을 보인다.

본 연구는 단일형태의 열차를 운영하는 상용 도시철도 시스템에서 열차간격을 제어하기 위한 관제사의 간격조정 업무를 자동화하는데 적용할 수 있으며, 향후 급행열차를 포함한 복수형태의 열차운행 시스템에서 간격을 제어하는 방법과 정차시간과 운행시간을 동시에 고려하여 간격을 제어하는 방법 등에 관한 연구가 진행될 예정이다.

후 기

본 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다.

References

[1] S.S. Lee (1998) A Study on the subway regulation based on fuzzy control, *Master's Thesis*, KAIST.
 [2] H.G. Park (2002) Train regulation by the advanced algorithm for subway, *Proceedings of the KIEE Conference*, Seoul, Korea, 2002(11), pp. 330-333.
 [3] H.G. Park (2003) Train interval regulation by the modified control algorithm for subway, *Master's Thesis*, Seoul National University of Science and Technology.

- [4] V. Van Breusegem, G. Campion, G. Bastin (1991) Traffic modeling and state feedback control for metro lines, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 36(7), pp. 770-784.
- [5] W.S. Sevine, M.S. Levino, M. Athans, (1996) On the optimal error regulation of a string of moving vehicles, *IEEE Transactions on Automatic Control*, AC-11, pp. 355-361.
- [6] G.G. Yu (1999) A study on the train regulation algorithm of the railway control, *Journal of KNRG*, 15, pp. 341-364.
- [7] E. Bailly, S. Hayat, D. Jolly, A.M. Desodt (1996) Subway line one of Lille simulation and regulation based on fuzzy logic, *Proceedings of the 12th International Conference on Systems Science*, Wroclaw, Poland, 3, pp. 331-338.
- [8] S. Yasunobu, S. Miyamoto, H. Ihara (1983) Fuzzy control for automatic train operation system, *4th IFAC International Conference on Transportation Systems*, Baden-Baden, Germany, pp. 33-39.
- [9] S. Yasunobu, S. Miyamoto (1985) Automatic train operation system by predictive fuzzy control, *Industrial Applications of Fuzzy Control*, North-Holland, pp. 1-18.
- [10] Korea Railroad Research Institute (2008) Technology for urban railway system, *Journal of KRRI*, 2, pp. 135-163.
- [11] G. Vernazza, R. Zunino (1990) A distributed intelligence methodology for railway traffic control, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, VT-39(3), pp. 265-270.

(Received 26 November 2014; Revised 15 April 2015; Accepted 13 July 2015)

Kiwoong Kim: kiwoong.kim@seoul9.co.kr

Department of Operation Control Center, Seoul Line9 Operation Co. Ltd, 388-1 Gaewha-Dong, Gangseo-Gu, Seoul, 157-230, Korea

Jongwoo Lee: saganlee@seoultech.ac.kr

Department of Railroad Electrical and Signaling Engineering, Graduate School of Railroad, Seoul National University of Science and Technology, 232 Gongneung-ro, Nowon-Gu, Seoul, 139-743, Korea

Minkee Park: mkpark@seoultech.ac.kr

Department of Electronic and IT Media Engineering, Seoul National University of Science and Technology, 232 Gongneung-ro, Nowon-Gu, Seoul, 139-743, Korea