

무선통신기반 열차제어시스템에서의 운전시각 계산과 간격제어 성능개선을 위한 열차간격제어 알고리즘

오세찬^{*}, 김경희¹, 이성훈², 김자영², 전중화²
¹한국철도기술연구원 광역도시철도시스템 연구실, ²포스코 ICT R&D 센터

Headway Calculation and Train Control Algorithm for Performance Improvement in Radio based Train Control System

Sehchan Oh^{*}, Kyunghee Kim¹, Sung-Hoon Lee², Ja-Young Kim², Zhong-Hua Quan²

¹Metropolitan Transit System Research Division, Korea Railroad Research Institute

²Posco ICT R&D Center

요약 무선통신기반 열차제어시스템은 관할영역 내에 운행 중인 열차의 위치정보를 지상시스템에서 실시간으로 수신하고 다시 각각의 열차의 차상시스템에 새로운 이동권한을 제공함으로써 안전한 간격제어를 수행한다. 열차제어시스템의 성능은 최소 운전시각으로 평가되며 그것은 열차제어시스템의 간격제어 성능뿐만 아니라 운영특성 그리고 열차의 특성을 반영하여 계산된다. 본 논문은 무선통신기반 열차제어시스템의 운전시각 계산과 운전시각을 개선하기 위한 새로운 열차간격제어 알고리즘을 제안한다. 제안된 운전시각 계산 방법은 열차제어시스템 간격제어 성능을 반영한 안전마진 추정을 통해 각각 역간 운전시각과 역 운전시각을 정의한다. 또한 제안된 열차간격제어 개선 알고리즘은 간격제어 개선을 위해 거리와 속도를 포함하는 이동권한을 새롭게 정의하며 선형열차에서 필연적으로 발생하는 제동거리를 이용함으로써 열차의 운전시각을 향상시킬 수 있다. 제안된 운전시각 계산방법을 한국형 무선통신기반 열차제어시스템의 간격제어 성능을 대상으로 시뮬레이션을 수행하며 개선된 열차간격제어 알고리즘과 비교분석 한다. 시뮬레이션 결과에 따르면 제안된 운전시각 계산방법은 향후 무선통신기반 열차제어시스템의 성능 지표로 활용이 가능하며 제안된 간격제어 알고리즘은 기존의 무선통신기반 열차제어시스템의 역 운전시각과 역간 운전시각을 개선할 수 있음을 확인한다.

Abstract Radio based train control system performs train safe interval control by receiving in realtime the position information of trains driving in the control area of the wayside system and providing onboard system in each train with updated movement authority. The performance of the train control system is evaluated to calculate the minimum operation headway, which reflects the operation characteristics and the characteristics of the train as well as the interval control performance of the train control system. In this paper, we propose the operation headway calculation for radio based train control system and a new train interval control algorithm to improve the operation headway. The proposed headway calculation defines line headway and station headway by the estimation of the safety margin distance reflecting the performance of the train control system. Furthermore the proposed Enhanced Train Interval Control(ETIC) algorithm defines a new movement authority including both distance and speed, and improves the train operation headway by using braking distance occurring inevitably in the preceding train. The proposed operation headway calculation is simulated with Korean Radio-based Train Control System(KRTCS) and the simulated result is compared to improved train interval control algorithm. According to the simulated results, the proposed operation headway calculation can be used as performance indicator for radio based train control system, and the improved train control algorithm can improve the line and station headway of the conventional radio based train control system.

Keywords : Enhanced train interval control, Headway calculation, Line headway, Station headway, Radio-based train control

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

*Corresponding Author : Sehchan Oh(Korea Railroad Research Institute)

Tel: +82-31-460-5745 email: soh@krti.re.kr

Received September 21, 2015

Revised October 6, 2015

Accepted October 8, 2015

Published October 31, 2015

1. 서론

최근 무선통신 및 제어기술이 발전함에 따라 열차제어시스템의 제어기술이 기존의 궤도회로 기반에서 무선통신 기반으로 발전하고 있다[1-6]. 무선통신기반 열차제어시스템은 관할영역 내에 운행 중인 열차의 위치정보를 실시간으로 지상시스템에서 수신하고 이를 기반으로 각각의 열차의 차상시스템에 이동권한(MA: Movement Authority)을 제공함으로써 안전한 간격제어를 수행한다. 따라서 실시간 열차추적을 통해 고밀도 열차간격제어가 가능하다.

일반적으로 열차제어시스템의 성능은 최소 운전시격으로 평가되며 그것은 열차제어시스템의 간격제어 성능뿐만 아니라 운영특성 그리고 열차의 특성을 반영하여 계산된다. 운전시격에 대한 연구는 기존의 궤도회로를 이용한 고정폐색 기반의 열차제어시스템에 대해서는 잘 알려져 있으며 관련 문헌도 쉽게 접할 수 있다[7-11]. 하지만 열차제어시스템의 간격제어 성능에 따라 운전시격의 계산이 달라지는 이동폐색의 경우 현재까지 무선통신기반 열차제어시스템의 운전시격과 관련하여 보고된 연구가 극히 적을 뿐만 아니라 구체적인 계산 방법에 대해서는 알려지지 않고 있다[11-15]. 따라서 무선통신기반 열차제어시스템의 운전시격에 대한 계산이 해당 열차제어시스템의 성능을 반영하여 새롭게 정의되어야 한다.

본 논문은 무선통신기반 열차제어시스템의 성능평가를 위해 운전시격 계산방법과 운전시격의 개선을 위해 새로운 열차간격제어 알고리즘을 제안한다. 제안된 운전시격 계산방법은 한국형 무선통신기반 열차제어시스템(KRTCS: Korean Radio-based Train Control System)[4-5]을 기반으로 열차간격제어 성능을 반영한 안전 마진(safety margin) 추정을 통해 각각 역간 운전시격(line headway)과 역 운전시격(station headway)을 정의하였다. 또한 본 논문에서 제안한 개선된 열차간격제어(ETIC: Enhanced Train Interval Control) 알고리즘은 최적의 운전시격을 확보하기 위해 열차의 MA에 거리뿐만 아니라 속도를 함께 부여하였다. 즉, MA의 한계에서 후행열차는 0이 아닌 속도로 접근이 가능하다. 이는 선형열차에서 필연적으로 발생하는 제동거리를 후행열차의 간격제어에 활용함으로써 열차의 운전시격을 개선할 수 있다는 것을 의미한다. 동일한 열차와 운영 및 노선환경을 대상으로 제안된 ETIC의 간격제어 성능을 KRTCS

의 간격제어 성능과 비교하여 시뮬레이션 하였다. 제안된 운전시격 계산 방법은 향후 무선통신기반 열차제어시스템의 성능지표로 활용될 수 있으며 제안된 ETIC 알고리즘은 기존의 무선통신기반 열차제어시스템의 간격제어 성능을 높일 수 있음을 확인하였다.

2. 한국형 무선통신기반 열차제어시스템

KRTCS의 구성은 Fig. 1과 같이 크게 지상과 차상시스템으로 구성된다. 지상시스템은 노선상에 운행하는 모든 열차의 스케줄의 생성과 감시를 수행하는 ATS(Automatic Train Supervision), 열차의 진로생성과 분기제어를 수행하는 EI(Electronic Interlocking), 관할영역 내에 운행하는 모든 열차의 MA를 생성하고 선로의 속도제한 및 구배정보를 제공하는 wayside ATP(Automatic Train Protection), 지상과 차상의 무선데이터 통신을 위한 DCN(Data Communication Network) Radio, 정위치 정차확인을 위한 PSM(Precision Stop Marker), 위치보정 및 정위치 정차를 위한 transponder TAG로 구성된다. 차상시스템은 열차의 위치를 wayside ATP로 전송하고 wayside ATP로부터 받은 MA와 선로정보를 기반으로 열차를 제어하는 onboard ATP와 onboard ATP의 감시 하에 열차의 자동운행을 수행하는 ATO(Automatic Train Operation), PSM을 확인하기 위한 PSM Sensor와 Transponder TAG의 정보를 수신하기 위한 tag reader로 구성된다.

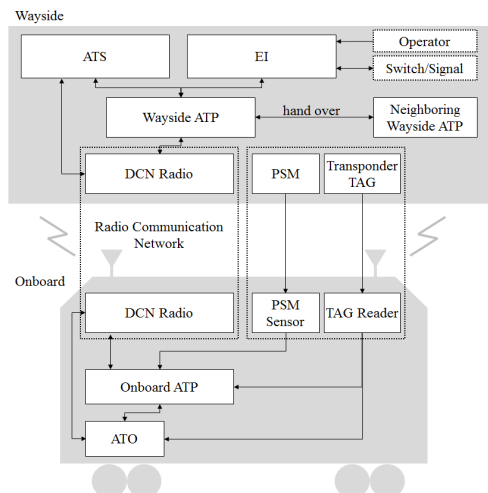


Fig. 1. System configuration of KRTCS

하나의 wayside ATP 관할영역 내에 운행하는 열차는 onboard ATP에서 주기적으로 위치를 계산하여 wayside ATP에 보고한다. Wayside ATP는 열차의 위치와 EI에서 제공하는 진로정보를 이용하여 각각의 열차에 허용된 이동거리 정보인 MA와 가장 최근에 위치보고에 사용한 Tag 그룹(LRTG: Last Relevant Tag Group)부터 MA까지 가장 제한적인 속도프로파일(MRSP: Most Restrictive Speed Profile)과 구배 등 선로정보를 제공한다. Fig. 2와 같이 KRTCS는 MA를 열차가 반드시 넘어서는 안 되는 barrier로 정의한다. MA는 선행열차의 정보 중 위치정보만 이용되며 선행열차의 현재속도와는 상관없이 항상 MA의 속도는 0의 값을 갖는다. Onboard ATP는 wayside ATP로부터 수신한 MA와 선로정보를 토대로 안전마진을 고려하여 목표점(target point)을 계산하고 ATP 속도프로파일을 그린다. ATP 속도프로파일은 거리와 속도의 그래프이며 onboard ATP는 열차가 허용속도를 초과하지 않도록 감시하고 제어한다.

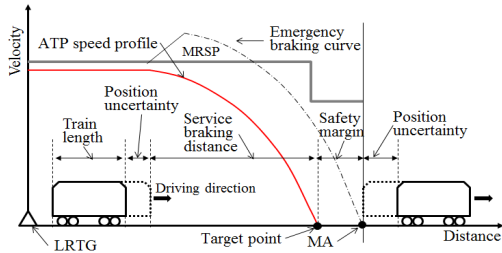


Fig. 2. Train interval control of KRTCS with zero speed MA

3. 운전시각 계산방법

3.1 Minimum line headway

최소 역간 운전시각은 Fig. 3과 같이 주행 중인 선행 열차를 후행열차가 감속 없이 최대한 접근한 상태에서 두 열차의 시간차이를 의미한다.

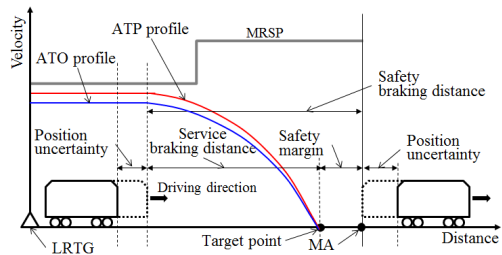


Fig. 3. Minimum line headway for KRTCS

최소 역간 운전시각은 식 (1)과 같이 표현이 가능하다.

$$MLH = \frac{D_{TL} + D_{SBD} + 2D_{PU}}{V_{LS}} \quad (1)$$

여기서 D_{TL} 은 열차의 길이, D_{SBD} 는 안전제동거리, D_{PU} 는 열차의 위치불확실성, V_{LS} 는 선로속도를 의미한다.

안전제동거리는 속도감지 오차를 포함한 허용속도 초과에 따른 제동거리를 의미하며 식 (2)와 같이 표현이 가능하다.

$$\begin{aligned} D_{SBD} &= \frac{100}{K} D_{SB} + D_{SM} \\ &= \frac{100}{K} D_{SB} + D_{BR} + D_{OS} \\ &= \frac{100}{K} \frac{V_{LS}^2}{2(\beta + R_g)} + V_{LS} T_{BR} + V_{LS} T_{OS} + \frac{\alpha T_{OS}^2}{2} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 K 는 제동안전인자로서 요구제동력을 100이라 했을 때 실제 열차가 출력하는 제동력을 의미하며, D_{SB} 는 상용제동거리를, D_{SM} 은 안전 마진, D_{BR} 과 T_{BR} 은 각각 제동인가 및 제동반응시간 동안 이동거리와 시간, D_{OS} 와 T_{OS} 는 각각 허용속도 초과에 따른 이동거리와 시간을 나타내며, α 와 β 는 각각 속도 V_{LS} 에서의 가속도와 상용 감가속도를 의미하고 R_g 는 구배저항을 의미한다.

α 는 식 (3)과 같이 초기 가속도 a_s 로 표현이 가능하다 [11].

$$\alpha \approx a_s \left(1 - \frac{V_{LS}}{V_{MAX}}\right) \quad (3)$$

여기서 a_s 는 초기 가속도, V_{MAX} 는 열차의 최대속도를 의미한다.

역간 운전시각은 식 (2)와 식 (3)을 식 (1)에 적용함으로써 식 (4)과 같은 계산식을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} MLH &= \frac{D_{TL} + 2D_{PU}}{V_{LS}} + \frac{100}{K} \frac{V_{LS}}{2(\beta + R_g)} \\ &\quad + T_{BR} + T_{OS} + \frac{\alpha s T_{OS}^2}{2V_{LS}} \left(1 - \frac{V_{LS}}{V_{MAX}}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

3.2 Minimum station headway

최소 역 운전시각은 Fig. 4와 같이 선행열차가 역 플랫폼을 출발할 때 후행열차가 감속 없이 최대한 역 플랫폼에 접근한 상태에서 두 열차의 시간차이를 의미한다. 따라서 최소 역 운전시각은 선행열차가 역 플랫폼을 비우는데 걸리는 시간과 후행열차의 역 정차를 위한 제동 시간, 정차시간으로 계산하며 식 (5)와 같이 표현이 가능

하다.

$$MSH = T_{OUT} + \frac{D_{TL} + D_{SDD} + 2D_{PU}}{V_{AP}} + T_{DWELL} \quad (5)$$

여기서 T_{OUT} 은 선행열차가 역 플랫폼을 빠져나오는데 걸리는 시간, V_{AP} 는 역 진입속도를, T_{DWELL} 은 역 정차시간을 의미한다.

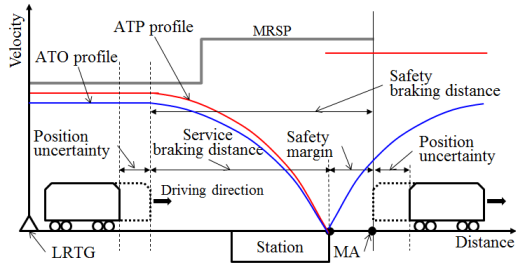


Fig. 4. Minimum station headway for KRTCS

하지만 무선통신기반 열차제어시스템은 실시간 열차 위치 추적이 가능하기 때문에 선행열차가 역 플랫폼을 완전히 비우기까지 대기하지 않아도 된다. 즉 선행열차가 역 플랫폼에서 진출을 시작하면서 매 순간 이동한 거리를 후행열차가 이용할 수 있기 때문에 T_{OUT} 은 삭제할 수 있다.

따라서 무선통신기반 열차제어시스템에 대한 최소 역 운전시격은 식 (5)에 안전제동거리를 반영함으로써 식 (6)과 같이 계산할 수 있다.

$$MSH = \frac{D_{TL} + 2D_{PU}}{V_{AP}} + \frac{100}{K} \frac{V_{AP}}{2(\beta + R_g)} + T_{BR} + T_{OS} + \frac{\alpha s T_{OS}^2}{2V_{AP}} \left(1 - \frac{V_{AP}}{V_{MAX}}\right) + T_{DWELL} \quad (6)$$

4. 운전시격 최적화를 위한 간격제어방법

본 연구에서 제안한 ETIC 알고리즘은 Fig. 5와 같이 지상 ATP에서 열차의 이동권한을 속도한계와 거리한계로 정의하며 차상 ATP에 주기적으로 제공한다. MA의 거리 한계지점에서 MA의 속도가 0이 아니므로 후행열차는 미리 감속을 하지 않는다. 즉, 선행열차의 제동거리를 후행열차 제동거리에 활용하게 되므로 선행열차와의 간격을 줄일 수 있다.

열차 운행 중 열차제어시스템과는 무관하게 열차탈선 또는 열차 충돌 상황이 발생한 경우 선행열차의 제동거리를 이용하는 것은 후행열차에 위험요소로 작용할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 상황의 경우 사전에 예방이 가능하다는 것을 전제로 한다.

MA의 거리한계는 일반적으로 다음 식 (7)과 같이 계산된다.

$$D_{MA} = \min \{ D_{EOR}, D_{SIPA}, D_{EPT} \} \quad (7)$$

여기서 D_{MA} 는 MA의 거리한계, D_{EOR} 은 EI에서 제공하는 진로의 종점, D_{SIPA} 는 ATS에서 설정한 방호구간의 시점, D_{EPT} 은 선행열차의 위치불확실성을 반영한 후미부 중에서 최솟값을 의미한다.

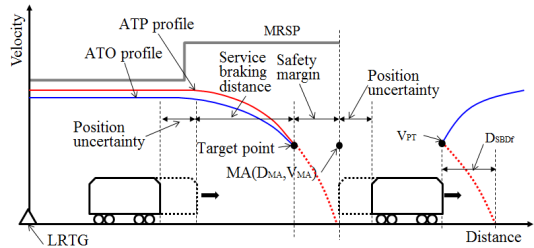


Fig. 5. Enhanced train interval control algorithm

MA의 속도한계는 식 (8)과 같이 계산이 가능하다. 즉, 만약 MA의 거리한계가 D_{EOR} 또는 D_{SIPA} 에 의해서 결정된 경우 MA의 속도한계는 0이다. 하지만 D_{EPT} 에 의해 결정된 경우 MA의 속도한계는 V_{RfPT} 가 된다.

$$V_{MA} = \begin{cases} 0, & \text{if } D_{MA} = D_{EOR} \text{ or } D_{MA} = D_{SIPA} \\ V_{RfPT}, & \text{if } D_{MA} = D_{EPT} \end{cases} \quad (8)$$

여기서 V_{MA} 는 MA의 속도한계, V_{RfPT} 는 선행열차의 주행속도를 기반으로 한 속도계산오차, 통신지연, 노선 및 제동특성을 반영하여 계산된 속도를 의미한다.

V_{RfPT} 는 선행열차의 안전속도를 기반으로 선행열차의 안전제동거리를 계산하고 후행열차의 주행선로와 열차특성을 반영하여 선행열차의 제동거리에 해당하는 후행열차 안전속도를 역으로 계산함으로써 얻어진다.

선행열차의 속도를 기준으로 속도계산오차와 통신지연을 반영한 선행열차의 안전속도를 V_{RcPT} 라 할 때 식 (9)와 같이 계산한다.

$$V_{RcPT} = V_{PT} - V_{ERR} - T_{delay}\beta_f \quad (9)$$

여기서 V_{PT} 는 선행열차가 지상 ATP에 보고한 자신의 현재속도이며 V_{ERR} 는 최대속도오차 오류값, T_{delay} 는 통신 지연시간, β_f 는 최대 감가속도를 의미한다.

만약 통신지연이 계속 발생하게 되면 V_{RecPT} 는 결국 0의 값을 가지게 된다.

선행열차의 열차특성과 운행 중인 노선 구간의 특성을 반영하기 위해 V_{RecPT} 에서의 선행열차 안전제동거리와 D_{SDDf} 와 선행열차의 안전제동거리에 대한 후행열차의 안전속도 V_{RfPT} 를 각각 식 (10)과 식 (11)에 제시하였다.

$$D_{SDDf} = \frac{V_{RecPT}^2}{2(\beta_f + R_{gf})} \quad (10)$$

$$V_{RfPT} = V_{RecPT} \sqrt{\frac{(\beta_r + R_{gr})}{(\beta_f + R_{gf})}} \quad (11)$$

여기서 β_f 는 선행열차의 최대 감속도, R_{gf} 는 선행열차 주행구간의 구배저항, β_r 는 후행열차의 최대 감속도, R_{gr} 은 후행열차 주행구간의 구배저항을 의미한다.

결과적으로 MA의 거리한계가 선행열차에 의해 정해지는 경우 MA의 속도한계는 선행열차의 안전속도를 참조한 후행열차의 안전속도로 결정된다.

MA의 속도한계를 반영한 역간 운전시각과 역 운전시각은 각각 식 (12)와 식 (13)에 제시하였다.

$$MLH = \frac{D_{TL} + 2D_{PU}}{V_{LS}} + \frac{100}{K} \left\{ \frac{V_{LS}}{2(\beta_r + R_{gr})} - \frac{V_{RecPT}^2}{2V_{LS}(\beta_f + R_{gf})} \right\} + T_{BR} + T_{OS} + \frac{\alpha S T_{OS}^2}{2V_{LS}} \left(1 - \frac{V_{LS}}{V_{MAX}} \right) \quad (12)$$

$$MSH = \frac{D_{TL} + 2D_{PU}}{V_{AP}} + \frac{100}{K} \left\{ \frac{V_{AP}}{2(\beta_r + R_{gr})} - \frac{V_{RecPT}^2}{2V_{AP}(\beta_f + R_{gf})} \right\} + T_{BR} + T_{OS} + \frac{\alpha S T_{OS}^2}{2V_{AP}} \left(1 - \frac{V_{AP}}{V_{MAX}} \right) + T_{DWELL} \quad (13)$$

5. 실험 및 분석

제안된 역 운전 및 역간 운전시각 계산식과 간격제어 알고리즘의 성능을 matlab을 이용하여 시뮬레이션 하였다. 운전시각 시뮬레이션을 위한 열차사양과 열차제어시스템 및 열차운영과 관련된 입력 데이터는 Table 1과 같다. 열차의 사양은 한국형 표준전동차 사양을 토대로 열차의 최대속도와 감가속도를 정의하였다. 열차의 길이는 200m, 제동시스템의 반응시간은 1.5초로 가정하였으며 제동율은 약 75%로 가정하였다[11]. 열차제어시스템과

관련하여 속도센서는 $\pm 2\text{km/h}$ 의 정확도를 가지며 열차의 위치 불확실성은 $\pm 6.25\text{m}$ 로 정의하였다[2]. ATP가 속도감시에 반응하는 시간은 1초로 가정하였으며 차상과 지상 간 통신시간의 최대 지연은 1초로 가정하였다.

자동운전을 위한 제어시스템의 속도감시 및 제어의 여유분을 고려하여 ATO 제한속도는 ATP 제한속도에 비해 5km/h 낮은 값으로 정의하였고 ATO 감가속도는 ATP 감가속도의 80% 수준으로 제한한다고 가정하였다. 즉, ATO의 경우 시스템의 제어한계보다 낮은 레벨로 제어를 수행하고 ATO의 제어 한계를 벗어나는 경우 ATP가 개입하도록 한다.

Table 1. Simulation data values

	Terms	Value	Unit
Train specification	Length	200	m
	Maximum speed	100	km/h
	Service acceleration rate	3.0	km/h/sec
	Service deceleration rate	3.5	km/h/sec
	Emergency deceleration rate	4.5	km/h/sec
	Braking system reaction time	1.5	sec
Train control system	Braking system safety factor	75	%
	Speed sensor accuracy	± 2	km/h
	Position uncertainty	± 6.25	m
	ATP reaction and disable propulsion time	1	sec
Operation parameter	Maximum communication delay	1	sec
	Station dwell time	30	sec
	Maximum line speed	80	km/h
	Maximum station approach speed	80	km/h

KRTCS의 ATP와 ATO 제한속도를 고려한 역간 운전시각과 역 운전시각에 대한 시뮬레이션 결과를 Fig. 6과 Fig. 7에 제시하였다. 열차의 운행속도와 역 진입속도를 10km/h부터 최대 80km/h까지 증가시키면서 운전시각을 계산하였다. 단순히 열차의 운행속도를 증가시킨다고 해서 최소 운전시각이 지속적으로 개선되지 않음을 확인할 수 있다. 열차의 운행속도와 역 진입속도의 경우 일정 속도가상이면 오히려 속도에 비례하는 안전제동거리의 증가로 인해 역 운전시각이 증가되고 있음을 확인할 수 있다.

시뮬레이션 결과를 통해 제안된 ETIC의 최소 역간 운전시각은 ATP의 경우 운행속도 63km/h일 때 약 26.7초, ATO의 경우 운행속도 62km/h일 때 약 29.5초임을 알 수 있다. 또한 최소 역 운전시각은 ATP의 경우 역 진입속도가 63km/h일 때 약 56.7초이며 ATO의 경우 역 진입속도가 62km/h일 때 약 59.5초임을 알 수 있다.

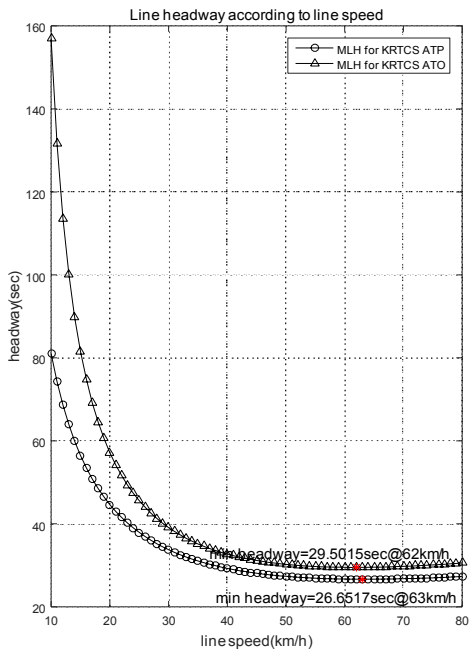


Fig. 6. Line headway for KRTCS

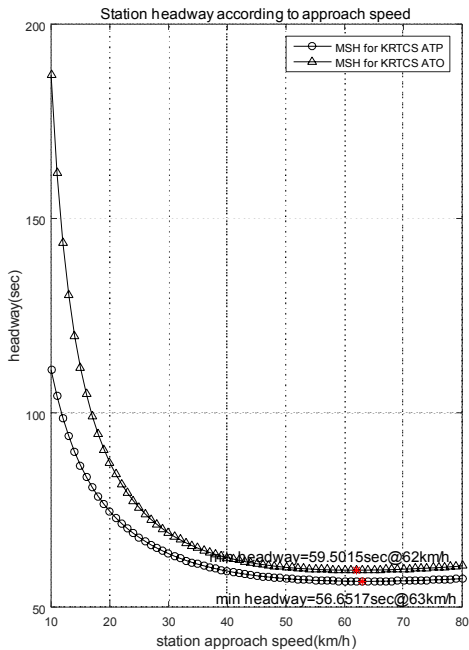


Fig. 7. Station headway for KRTCS

Fig. 8과 Fig. 9는 제안된 ETIC 알고리즘을 이용한 역 운전시격과 역간 운전시격을 KRTCS와 비교한 시뮬레이션 결과를 보여준다. 제안된 ETIC 알고리즘의 성능은

선행열차의 운행속도에 의존한다. 도시철도 역 정차시간을 제외한 운행 평균속도가 약 55km/h임을 감안하여 ETIC에서 참조하는 선행열차의 운행속도를 15km/h부터 55km/h까지 증속한다고 가정하였다.

ETIC의 경우 ATP 최소 역간 운전시격은 운행속도 77km/h일 때 약 21.5초이며 ATO 최소 역간 운전시격은 운행속도 74km/h일 때 약 23.2초로 개선되었음을 확인할 수 있다. 또한 최소 역 운전시격의 경우 제안된 ETIC 알고리즘의 경우 ATP 최소 역간 운전시격은 역 진입속도가 77km/h일 때 약 51.5초, ATO의 경우 역 진입속도가 74km/h일 때 약 52.7초로 개선되었음을 확인할 수 있다.

Fig. 10과 Fig. 11은 ETIC에서 참조하는 선행열차의 운행속도를 변화에 따른 역간 운전시격과 역 운전시격을 시뮬레이션 한 결과이다. 선행열차의 운행속도를 5km/h ~45km/h, 15km/h~55km/h, 25km/h~65km/h로 각각 변화시키면서 동시에 열차의 속도를 10km/h부터 최대 80km/h까지 증속하면서 ATP 최소 운전시격을 계산하였다. 최소 운전시격은 선행열차속도가 높을수록 그리고 열차의 운행속도가 높을수록 개선되고 있음을 확인할 수 있다.

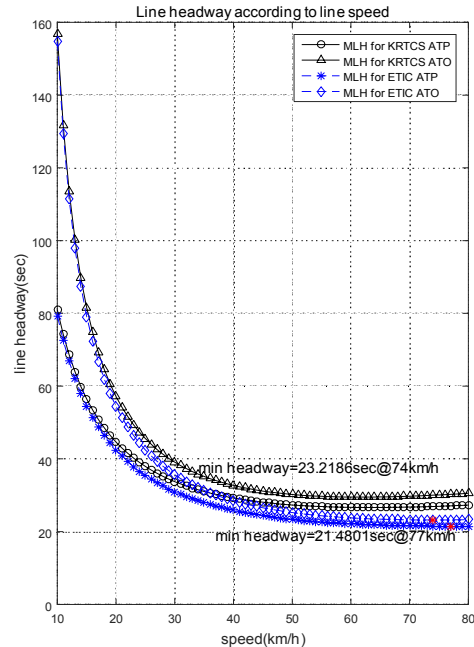


Fig. 8. Line headway comparison between KRTCS and ETIC

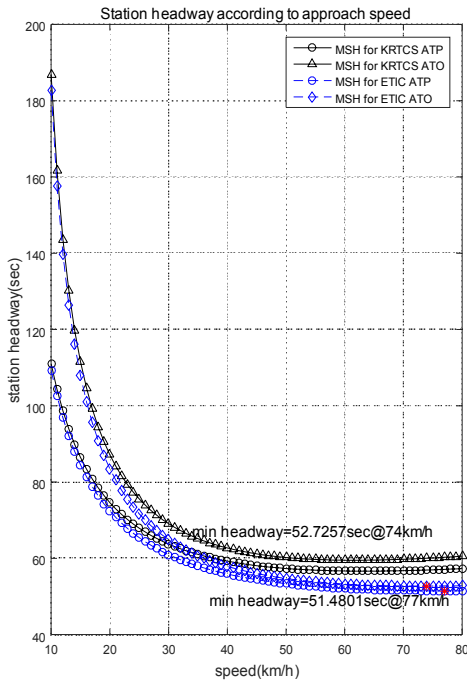


Fig. 9. Station headway comparison between KRTCS and ETIC

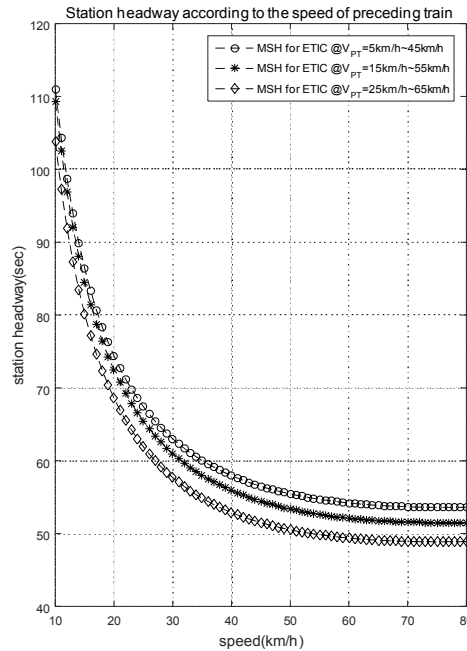


Fig. 11. Station headway changes for ETIC according to the speed of preceding train

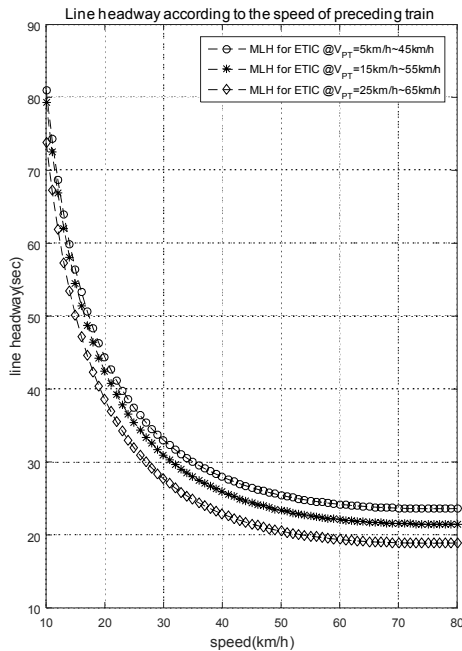


Fig. 10. Line headway changes for ETIC according to the speed of preceding train

Fig. 12와 Fig. 13은 각각 KRTCS와 ETIC의 ATP 속도제한을 기반으로 열차의 길이 변화에 따른 역 운전시각을 시뮬레이션 한 결과이다. 열차의 길이를 80m(4량 1편성), 120m(6량 1편성), 160m(8량 1편성), 200m(10량 1편성)으로 변화시키면서 동시에 열차의 역 진입속도를 10km/h부터 최대 80km/h까지 증가시키면서 역 운전시각을 계산하였다. 또한 ETIC에서 참조하는 선행열차의 운행속도를 15km/h부터 55km/h까지 증속한다고 가정하였다. 시뮬레이션 결과를 통해 열차의 길이가 짧을수록 역 운전시각이 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 14와 Fig. 15는 각각 KRTCS와 ETIC의 ATP 속도제한을 기반으로 제동시스템의 제동율의 변화에 따른 운전시각을 시뮬레이션 한 결과이다. 제동율 K 를 각각 50%, 75%, 100%로 변화시키면서 동시에 열차의 역 진입속도를 10km/h부터 최대 80km/h까지 증가시키면서 역 운전시각을 시뮬레이션 하였다. 마찬가지로 ETIC에서 참조하는 선행열차의 운행속도를 15km/h부터 55km/h까지 증속한다고 가정하였다. 시뮬레이션 결과를 통해 제동시스템의 제동 안전율이 높을수록 역 운전시각이 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

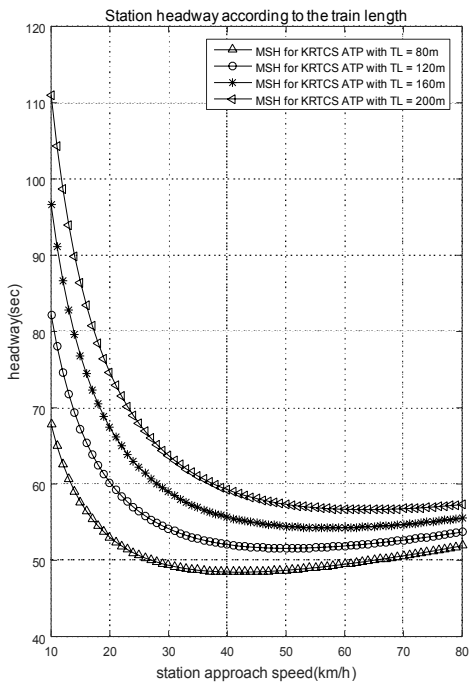


Fig. 12. Station headway changes for KRTCS according to the train length

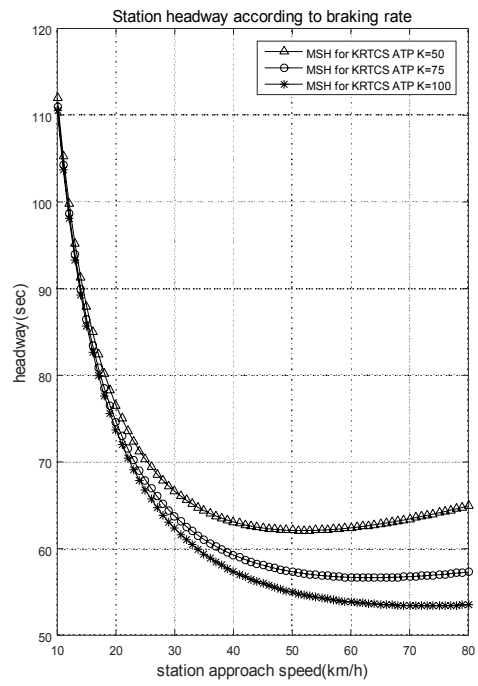


Fig. 14. Station headway changes for KRTCS with the braking rate

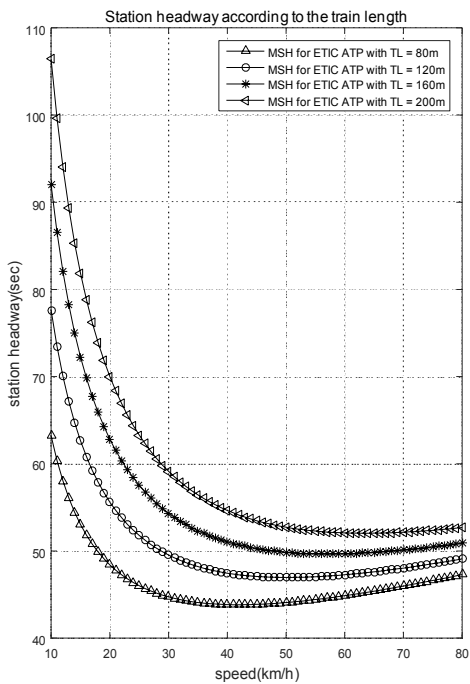


Fig. 13. Station headway changes for ETIC according to the train length

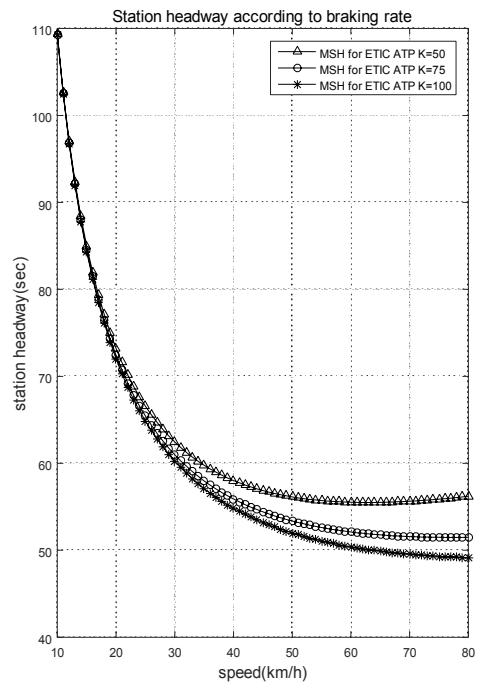


Fig. 15. Station headway changes for ETIC with the braking rate

6. 결론 및 추후연구

본 논문은 무선통신기반 열차제어시스템의 성능평가를 위해 운전시격 계산방법과 현재 무선통신기반 열차간격제어를 개선한 ETIC 알고리즘을 제안하였다. 제안된 운전시격 계산방법은 KRTCS 간격제어 성능을 토대로 안전마진을 운전시격 계산에 반영하여 각각 역간 운전시격과 역 운전시격 계산방법을 제시하였다. 또한 제안된 ETIC 알고리즘은 MA에 거리제한뿐만 아니라 속도제한을 추가적으로 도입하여 선행열차의 운행 속도를 안전제동거리에 활용함으로써 운전시격을 개선할 수 있었다. 제안된 운전시격 계산방법과 ETIC 알고리즘의 성능확인을 위해 국내 도시철도 열차성능 및 운영환경, KRTCS와 ETIC의 시스템 성능을 반영하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과를 통해 제안된 운전시격 계산 방법은 향후 무선통신기반 열차제어시스템의 성능지표로 활용이 가능하며 제안된 ETIC는 기존의 무선통신기반 열차제어시스템의 간격제어 성능을 높일 수 있음을 확인하였다. 제안된 ETIC 알고리즘은 간격 무선통신기반 열차제어시스템 운영 시 기본 간격제어 알고리즘으로 활용될 수 있을 뿐만 아니라 열차운영스케줄링에 필요한 운영지연에 대비한 운영 마진(operation margin) 확보를 위한 특화된 기능으로서 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

향후 실제 노선을 대상으로 활용하기 위해서는 다양한 회차(turn-back) 및 분기(junction)상황을 고려한 무선통신기반 열차제어시스템의 운전시격 계산방법에 대한 연구가 추가적으로 필요할 것으로 예상된다.

References

- [1] Zhu, Li, et al. "Train-ground communication in CBTC based on 802.11 b: Design and performance research." Communications and Mobile Computing, 2009. CMC'09. WRI International Conference on. Vol. 2. IEEE, 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/CMC.2009.93>
- [2] IEEE 1474.1 IEEE Standard for Communication -Based Train Control(CBTC) Performance and Functional Requirements.
- [3] Kaixia, Dong, Liu Xiaojuan, and Zhu Yunyan. "Simulation Study of ATP Subsystem of CBTC System in Urban Mass Transit [J]." Railway Signalling & Communication 4 (2011): 004.
- [4] Sehchan Oh, et al. "Design of ATP functions and communication interface specifications for Korean Radio-based Train Control System." Control, Automation and Systems (ICCAS), 2013 13th International Conference on. IEEE, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/iccas.2013.6704161>
- [5] Oh, Sehchan, et al. "ATP functional allocation for Korean radio based train control system." Control, Automation and Systems (ICCAS), 2012 12th International Conference on. IEEE, 2012.
- [6] Oh, Sehchan, Yongki Yoon, and Jonghyen Baek. "Development of Wireless Communication based Train Separation Control Simulator." Conference of Korean Society for Railway. 2011.
- [7] Kim, Ickhee, et al. "A Study on Railroad Track Capacity According to Transit Railway Demand." Journal of the Korean Operations Research and Management Science Society 38.3 (2013): 23-35. DOI: <http://dx.doi.org/10.7737/JKORMS.2013.38.3.023>
- [8] Baek, Jong-Hyen, and Chang-Goo Lee. "The Study on Train Separation Control Technology using Balise for Conventional Line Speed Up." Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society 10.2 (2009): 256-263. DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2009.10.2.256>
- [9] Yk Kim, Yh Lee, and Ck Ryu. "Headway comparison between ATS and ERTMS/ETCS systems." ICCAS 2003 (2003): 1333-1337.
- [10] Jw Lee, Ej Joung, Jg Hwang, Cb Jung, "A Study on Minimum Headway Calculation," Spring Conference of Korean Society for Railway. 2000.
- [11] Parkinson, Tom, and Ian Fisher. Rail transit capacity. Vol. 13. Transportation Research Board, 1996.
- [12] Chen, Rong-wu, and Jin Guo. "Development of the new CBTC system simulation and performance analysis." 12th International Conference on Computer System Design and Operation in Railways and Other Transit Systems. 2010.
- [13] HE, Chengcai, and Tao YANG. "Comparison of Headways in Moving Block andFallback Modes for CBTC System." Journal of Southwest Jiaotong University 3 (2012): 014.
- [14] CHEN, Rongwu, Changqian ZHU, and Li LIU. "Calculation and optimization of train headway in CBTC system." Journal of Southwest Jiaotong University 4 (2011): 010.
- [15] Dongsheng, Liang, and Xu Yi. "Analysis of Train Minimum Headway and Realization of Simulation Algorithm under CBTC Train Control Mode [J]." Modern Urban Transit 4 (2011): 002.

오 세 찬(Sehchan Oh)

[정회원]



- 2004년 8월 : 광주과학기술원 정보통신공학과 석사
- 2013년 3월 ~ 현재 : 아주대학교 컴퓨터 공학 박사과정
- 2004년 11월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>

Modular TCS, DTO/UTO 설계

김 자 영(Ja-Young Kim)

[정회원]



- 2004년 2월 : 한동대학교 전산전자공학부 (학사)
- 2007년 6월 ~ 현재 : 포스코ICT R&D센터 선임연구원

<관심분야>

철도신호, RAMS

김 경 희(Kyunghee Kim)

[정회원]



- 1999년 8월 : 전북대학교 공과대학원 산업공학과 (산업공학석사)
- 2006년 2월 : 전북대학교 공과대학원 산업공학과 (산업공학박사)
- 2006년 2월 ~ 2007년 8월 : 동부 CNI RFID파트 과장
- 2007년 8월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>

최적화, 정보통신

전 종 화(Zhong-Hua Quan)

[정회원]



- 2002년 7월 : 중국과학기술대학교 자동제어학부 (석사)
- 2007년 2월 : 서울대학교 전기컴퓨터 공학부 (박사)
- 2007년 4월 ~ 현재 : 포스코ICT R&D센터 책임연구원

<관심분야>

철도신호제어, RAMS

이 성 훈(Sung-Hoon Lee)

[정회원]



- 2011년 2월 : 인하대학교 공학대학원 컴퓨터공학과 (석사)
- 2011년 3월 ~ 현재 : 포스코ICT R&D센터 선임연구원

<관심분야>

철도신호, 통신