

열차자율주행제어시스템을 위한 간격제어와 차상중심 분산형 연동 알고리즘

오세찬*, 김경희, 최현영
한국철도기술연구원 지능형신호통신연구팀

Train interval control and train-centric distributed interlocking algorithm for autonomous train driving control system

Sehchan Oh*, Kyunghee Kim, Hyeonyeong Choi

Signalling & Communication Research Team, Korea Railroad Research Institute

요약 열차제어시스템은 지상·전기 중심에서 차상·통신 중심으로 변화하고 있다. 최신의 열차제어시스템인 CBTC 시스템은 차상과 지상시스템 간 양방향 무선통신을 기반으로 높은 간격제어 효율을 가진다. 하지만 지상이 제어의 중심이 되고 있기 때문에 하나의 지상시스템이 허용할 수 있는 열차 투입 대수가 제한되고 차상과 지상제어시스템 간 cyclic-path 제어흐름으로 인해 운전시각 단축에 한계를 가진다. 본 논문은 열차자율주행제어시스템을 위한 간격제어와 차상중심 분산형 연동 알고리즘을 제안한다. 열차자율주행제어시스템은 차상에서 간격제어와 함께 분기제어를 수행하므로 선로와 분기기는 공유자원인 동시에 세마포어 요소이다. 제안된 열차자율주행기반 간격제어는 지상 제어시스템의 제어명령에 의존하지 않고 열차와 열차 또는 선로변 설비와의 직접적인 무선통신을 통해 열차 간격제어를 수행한다. 제안된 연동 알고리즘은 공유자원인 선로전환기가 동시에 두 대 이상의 열차가 점유하지 못하도록 선로전환기 고유 key를 이용한 세마포어 기법을 새롭게 정의한다. 시뮬레이션을 통해 제안된 열차자율주행제어시스템의 향상된 간격제어 성능을 확인하며, 차상중심 분산형 연동알고리즘과 기존의 연동장치에서 수행하던 여러 연동논리를 비교함으로써 단순화된 연동알고리즘으로 안전한 열차제어가 가능함을 확인한다.

Abstract Train control systems have changed from wayside electricity-centric to onboard communications-centric. The latest train control system, the CBTC system, has high efficiency for interval control based on two-way radio communications between the onboard and wayside systems. However, since the wayside system is the center of control, the number of input trains to allow a wayside system is limited, and due to the cyclic-path control flows between onboard and wayside systems, headway improvement is limited. In this paper, we propose a train interval-control and train-centric distributed interlocking algorithm for an autonomous train-driving control system. Because an autonomous train-driving control system performs interval and branch control onboard, both tracks and switches are shared resources as well as semaphore elements. The proposed autonomous train-driving control performs train interval control via direct communication between trains or between trains and track-side apparatus, instead of relying on control commands from ground control systems. The proposed interlocking algorithm newly defines the semaphore scheme using a unique key for the shared resource, and a switch that is not accessed at the same time by the interlocking system within each train. The simulated results show the proposed autonomous train-driving control system improves interval control performance, and safe train control is possible with a simplified interlocking algorithm by comparing the proposed train-centric distributed interlocking algorithm and various types of interlock logic performed in existing interlocking systems.

Keywords : Train-centric, Autonomous train driving control, Improved interval control, Distributed interlocking, Shared resource, Semaphore

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

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

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

Received September 30, 2016

Revised October 20, 2016

Accepted November 10, 2016

Published November 30, 2016

1. 서론

열차제어시스템은 정시성을 보장하는 운영시스템이면서 동시에 승객의 안전을 보장하는 안전시스템으로서 선행열차와 후행열차 간 안전한 간격을 제어하는 것이 기술의 핵심이다.

최근 제어 및 통신기술의 발전에 힘입어 열차제어 시스템은 점차 지상-전기 중심에서 차상-통신 중심으로 변화되고 있다. 가장 최신의 열차제어시스템인 CBTC (Communication Based Train Control) 시스템은 차상과 지상제어시스템 간 양방향 무선통신을 기반으로 높은 간격제어 효율을 가진다[1-5]. 하지만 지상제어시스템이 제어의 중심이 되고 있기 때문에 하나의 지상제어시스템에서 허용 가능한 투입 열차 수가 제한되고 차상과 지상제어시스템 간의 cyclic-path 제어흐름으로 인해 설비의 절감 및 운전시각 단축에 한계가 발생된다[1]. Fig. 1에서 후행열차 T2가 지상 ATP(Automatic Train Protection)를 거쳐 수신된 T1의 정보는 이미 과거의 정보이다. EI(Electric Interlocking)는 열차의 위치정보를 이용하여 선로전환기(PM: Point Machine)와 인접 선로구간을 분배한다. 하지만 ATP와 달리 제한적인 정보를 이용하여 PM과 인접한 선로구간을 배분하기 때문에 복잡한 연동논리가 요구된다.

본 논문은 열차자율주행제어시스템(ATDCS: Autonomous Train Driving Control System)을 위한 간격제어와 차상 중심 분산형 연동 알고리즘을 제안한다. 제안된 ATDCS는 지상 제어시스템의 제어명령에 의존하지 않고 열차와 열차 또는 선로변 설비와의 직접적인 무선통신을 통해 열차간 간격제어를 수행한다.

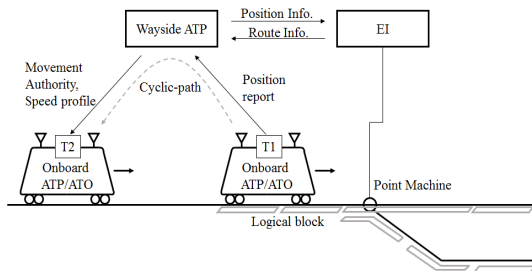


Fig. 1. Train Control in Existing CBTC System.

ATDCS는 차상중심의 간격제어와 함께 PM 제어를 수행하므로 선로구간과 PM은 공유자원인 동시에 세마

포어 요소이다. 제안된 연동 알고리즘은 PM에 한하여 공유자원을 분배한다. 공유자원인 PM이 동시에 두 대 이상의 열차에 의해 점유되지 않도록 PM의 고유 key를 이용한 세마포어 기법을 새롭게 정의한다. 또한 제안된 연동 알고리즘을 이용한 열차의 안전한 진로 확보 방법을 제시한다.

시뮬레이션을 통해 제안된 ATDCS의 향상된 간격제어 성능을 확인하며, 차상중심 분산형 연동알고리즘과 기존의 연동장치에서 수행하던 여러 연동논리를 비교함으로써 단순화된 연동알고리즘으로 안전한 열차제어가 가능함을 확인한다.

2. 열차자율주행제어시스템

2.1 시스템 구성

ATDCS의 구성은 Fig. 2와 같이 지상의 관제 ATS (Automatic Train Supervision), OC(Object Controller), PM, DCN(Data Communication Network) Radio, PSM (Precision Stop Marker) Sensor, TAG와 차상의 ATP, ATO(Automatic Train Operation), EI, DCN Radio, PSM, TAG Reader로 구성된다.

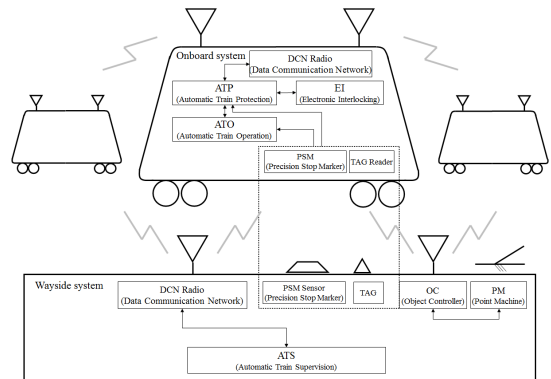


Fig. 2. System Configuration of Autonomous Train Driving Control System.

관제 ATS는 전체 노선의 열차운행을 감시하고 열차의 스케줄을 제공한다. ATP는 안전한 간격제어를 위해 PM의 분기영역을 제외한 모든 선로구간에 대한 자원 분배를 담당한다. EI는 PM에 대한 자원분배를 담당하고 OC를 통해 제어한다. OC는 차상 EI로부터 PM을 제어하기 위한 명령을 수신하고 제어한다. PSM은 선로변

PSM sensor를 읽음으로써 정위치 정착확인 정보를 제공한다. TAG Reader는 ATP의 위치보정용 TAG와 ATO의 정위치정차용 TAG ID를 확인하여 ATP와 ATO에 제공한다.

노선을 관할하는 지상의 ATP 및 EI와 같은 중앙의 제어시스템이 더 이상 존재하지 않으므로 열차의 투입량에 제한이 없으며 열차간 직접통신 기반의 제어경로를 통해 간격제어 효율을 높일 수 있다.

2.2 간격제어 알고리즘

ATDCS의 ATP는 PM과 PM의 분기영역을 제외한 모든 선로구간을 배분하며 이를 위한 간격제어에 대한 기능블록은 Fig. 3에 제시되어 있다. 열차의 위치는 열차의 주행거리계(odometer)를 기준으로 계산하며 선로변의 TAG ID를 확인함으로써 위치를 보정한다. 계산된 위치를 노선의 다른 열차에게 보고하면서 동시에 다른 열차의 위치를 수신한다. ATS 관제의 스케줄 정보를 기반으로 PM을 확보하고 제어함으로써 안전한 진로의 한계를 계산한다. ATS 관제는 운영상 필요시 열차의 진입을 방지하는 방호구간을 설정할 수 있다. 선행열차의 위치정보와 안전한 진로의 한계 그리고 방호구간의 정보는 열차의 이동권한(MA: Movement Authority) 계산에 반영된다. MA의 한계는 이 중 가장 제한적인 값을 택하게 된다[6]. MA를 기준으로 선로의 구배와 제한속도, 열차의 추진 및 제동성능을 고려한 속도 프로파일을 계산한다. 속도프로파일은 가장최근에 열차가 위치보고에 사

용된 TAG ID를 기준으로 MA의 거리에 대한 허용속도 함수를 의미한다. 속도프로파일은 열차가 현재위치에서의 허용속도를 결정할 때 사용되며 실제열차속도와 비교하여 초과 시 제동을 체결한다.

열차제어시스템의 간격제어 성능은 운전시격으로 평가될 수 있다[12-14]. Fig. 4는 T1과 T2 열차 간 안전간격을 나타낸다. 열차의 안전간격은 위치의 불확실성, 제동거리 및 안전마진(safety margin)으로 구성된다. 열차의 최소 운전시격은 주행 중인 후행열차 T2가 선행열차 T1에 감속직전 최대한 접근한 상태에서 두 열차 간 안전간격을 주행시간으로 변환한 값을 의미하며 식 (1)과 같이 표현된다[6-7].

$$T_{MH} = \frac{2D_{PU} + D_{BD} + D_{SM} + D_{TL}}{V_L} \quad (1)$$

여기서 T_{MH} 는 최소 운전시격을, D_{BD} 는 열차의 제동거리, D_{SM} 은 안전마진거리, D_{TL} 은 열차의 길이, V_L 은 해당 노선의 속도를 의미한다.

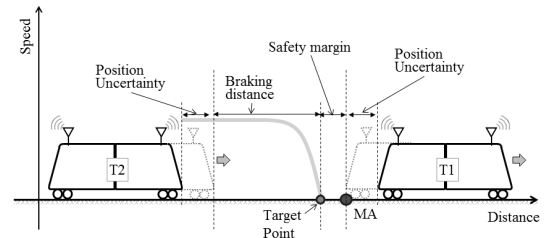


Fig. 4. Safe Interval between T1 and T2 Trains in Existing CBTC

D_{BD} 와 D_{SM} 를 포함한 안전제동거리 반영한 최소운전시격은 식(2)와 같다[1, 6-7].

$$T_{MH} = \frac{D_{TL} + 2D_{PU}}{V_L} + \frac{100}{K} \frac{V_L}{2(\beta_{FT} + g_{FT})} + \frac{\alpha_s T_{OS}^e}{2V_L} \left(1 - \frac{V_L}{V_{MAX}}\right) + T_{OS} + T_{JL} + T_{BR} \quad (2)$$

여기서 K 는 안전제동인자, β_{FT} 는 후행열차의 감속도, g_{FT} 는 후행열차가 주행 중인 선로의 구배저항, α_s 는 초기 가속도, T_{os} 는 속도초과를 인지하는 시간, V_{MAX} 는 열차의 최고운행속도, T_{JL} 는 제동저크한계에 손실되는 시간, T_{BR} 은 제동반응시간을 의미한다.

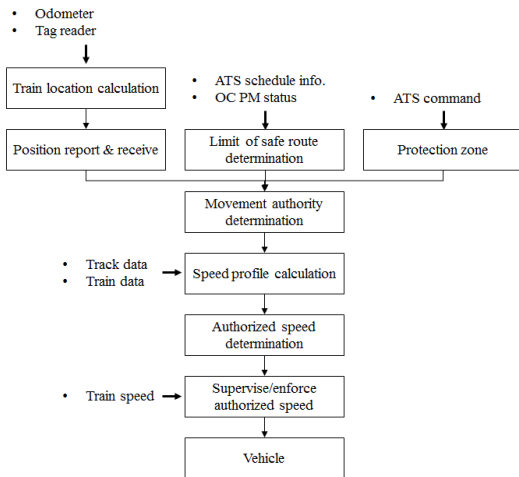


Fig. 3. Train Interval Controls of ATDCS

ATDCS는 선행열차와 후행열차 간 직접통신을 통해 선행열차의 프로파일을 이용하여 안전간격을 줄일 수 있다. Fig. 5와 같이 후행열차 T2는 선행열차의 T1의 제동 거리를 이용하여 자신의 안전간격에 반영한다.

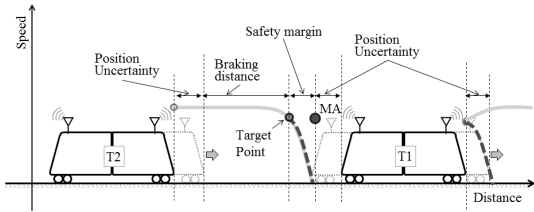


Fig. 5. Safe Interval between T1 and T2 Trains in ATDCS

선행열차가 후행열차로 전환한 현재속도 V_{PT} 를 기준으로 후행열차가 자신의 안전간격에 반영할 수 있는 속도 V_{FT} 는 식 (3)과 같다[6]. 하지만 직접통신에 대한 통신지연시간은 열차가 저크한계를 반영한 제동변화 시간에 비해 매우 작으므로 무시할 수 있다. 따라서 V_{FT} 는 식 (4)와 같이 표현이 가능하다.

$$V_{FT} = V_{PT} - V_{Err} - T_{Delay} \times \beta_{PT} \quad (3)$$

$$V_{FT} = V_{PT} - V_{Err} \quad (4)$$

여기서 V_{Err} 은 선행열차의 속도측정 오차를, T_{Delay} 와 β_{PT} 는 각각 통신지연시간과 선행열차의 최대 감속도를 의미한다.

식 (4)에서 후행열차가 수신한 선행열차 현재 속도를 제동시간으로 변환하여 식 (2)에 반영하면 식 (5)와 같다.

$$T_{MH} = \frac{D_{TL} + 2D_{PU}}{V_L} \quad (5)$$

$$+ \frac{100}{K} \left\{ \frac{V_L}{2(\beta_{FT} + g_{FT})} - \frac{(V_{PT} - V_{Err})^2}{2V_L(\beta_{PT} + g_{PT})} \right\}$$

$$+ \frac{\alpha_s T_{OS}^2}{2V_L} \left(1 - \frac{V_L}{V_{MAX}} \right) + T_{OS} + T_{JL} + T_{BR}$$

여기서 β_{PT} 는 선행열차의 감속도, g_{PT} 는 선행열차가 주행 중인 선로의 구배저항을 의미한다. 선행열차가 제동에 걸리는 시간은 선행열차의 주행특성과 주행환경에 따라 달라지므로 이를 반영한다.

식 (5)에서와 같이 ATDCS의 최소운전시각은 기존의 지상중심의 CBTC와 달리 선행열차의 제동시간을 cyclic-path로 인한 손실 없이 활용이 가능하다.

3. 차상중심 분산형 연동알고리즘

3.1 PM과 분기영역

ATDCS의 EI는 PM과 각 PM이 가지는 분기영역에 대한 자원 분배를 담당한다. PM의 분기영역은 열차가 인접선로를 운행하는 열차와의 접촉이 발생하는 구간을 의미한다. 따라서 PM의 분기영역은 세마포어 영역으로 한 대의 열차에 의해서만 점유되도록 관리되어야 한다.

Fig. 6은 PM의 종류와 해당하는 분기영역을 보여준다. Fig. 6(a)에서 PM의 전환상태가 A-P-B인 경우 nominal이며 A-P-C는 reverse이다. Fig. 6(b)는 두 대의 PM으로 구성된 쌍동 PM이다. PM의 전환상태가 B-P1-A, D-P2-E인 경우 nominal이며 B-P1-C, D-P2-C는 reverse이다. 쌍동 PM의 경우 P1과 P2는 동일한 상태를 유지한다. 만약 P1이 nominal인 경우 P2 역시 nominal 상태를 가지며, 반대로 P1이 reverse인 경우 P2는 reverse 상태가 된다. 쌍동 PM의 분기영역은 P1과 P2가 reverse 상태인 경우에 한하여 적용된다. EI는 노선의 모든 PM과 해당 PM의 분기영역을 가지고 있다.

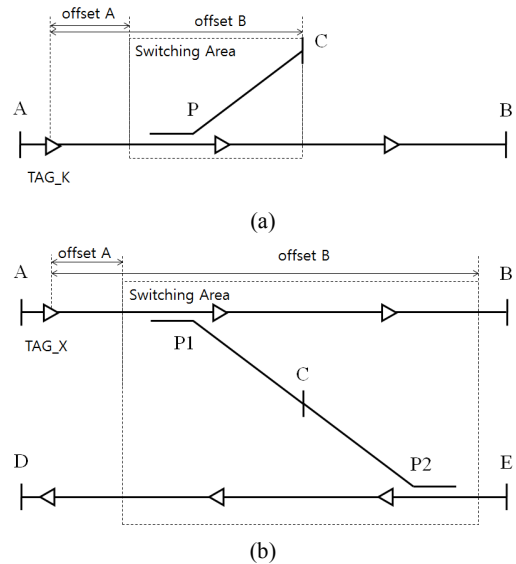


Fig. 6. Type of PM, (a) Single PM, (b) Twin PM

세마포어 요소인 PM은 다음과 같이 5개의 항목으로 표현된다.

[PM_ID, start point of switching area, end point of switching area, PM state(nominal/reverse), lock/unlock, Twin PM_ID]

Fig. 6(a)의 PM P의 상태가 nominal이고 해정상태인 경우 [P, TAG_K+Offset A, TAG_K+Offset B, nominal, unlock, NULL]와 같이 표현된다. PM P는 단일 PM으로 쌍둥 PM ID는 NULL 값을 가진다. Fig. 6(b)의 PM P1의 상태가 reverse이고 쇄정상태인 경우 [P1, TAG_X + offset A, TAG_X + offset B, reverse, lock, P2]와 같이 표현된다.

3.2 분산형 연동알고리즘

ATDCS의 EI는 OC의 주기적인 상태보고를 통해 노선의 모든 PM의 상태를 수신할 수 있고 필요시 점유할 수 있다. 하지만 PM은 공유자원인면서 한 번에 한 대의 열차만 점유 되어야 하는 세마포어 요소이다. EI가 PM을 자신의 리소스로 확보하기 위한 쇄정과 해제 알고리즘은 다음과 같다.

- i. 열차 T1의 EI는 OC로부터 수신된 PM의 상태가 해정상태임을 확인하고 Fig. 7(a)와 같이 OC에 key를 요청을 전송한다.
- ii. OC는 해당 PM의 상태를 쇄정으로 변경 후 자신의 고유 key를 새롭게 생성하여 차상 EI에 전송한다.
- iii. EI는 key 값을 이용하여 OC에 PM의 전환 명령을 전송한다.
- iv. EI는 OC의 주기적인 상태보고를 통해 해당 PM이 쇄정되었고 정상적으로 전환이 이루어졌음을 확인한다.
- v. EI는 Fig. 7(b)와 같이 ATP로부터 열차의 위치를 수신하여 열차 T1이 PM의 분기영역을 완전히 빠져나오면 OC에 key 값을 이용하여 해제 명령을 전송한다.
- vi. EI는 OC의 주기적인 상태보고를 통해 해당 PM이 정상적으로 해제되었음을 확인한다.

OC가 생성하는 key 값은 PM이 해제 상태이며 EI로부터 쇄정 요청이 있을 때마다 새롭게 생성되며 서로 다른 OC가 중복된 key 값을 생성하지 못하도록 충분히 긴 값으로 생성한다. 만약 특정 PM이 두 대 이상의 열차의 EI로부터 쇄정요청을 받았을 경우 OC는 그 중 하나에게만 key 값을 제공하므로 동시에 두 대 이상의 열차로부터의 점유를 허용하지 않는다.

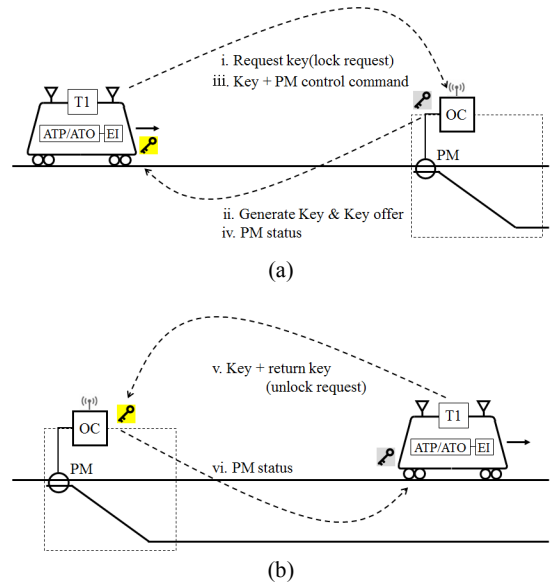


Fig. 7. PM Control Algorithm, (a) Lock Control, (b) Unlock Control

ATS 관제는 주기적으로 열차의 진로정보를 제공하며 진로정보에는 진로에 속한 PM의 리스트와 해당 PM의 제어 방향이 포함된다. EI는 OC를 통해 수신된 진로정보에 포함된 PM을 확보한다. Fig. 8은 호남선 계통역의 분기구조를 이용하여 제안된 EI를 적용한 시스템 구성을 보여준다. OC는 하나 이상의 PM을 관리하도록 구성할 수 있다. 열차 T1은 현재 PM 21A와 21B의 분기영역 시점인 X 지점까지 MA를 확보한 상태이다. 열차 T1의 갱신된 MA가 X지점을 닿을 시점에 ATS는 Y 지점까지 열차 T1을 위한 새로운 진로정보를 제공한다고 가정한다. ATS가 제공하는 진로정보에 포함된 PM리스트와 PM의 전환방향 정보는 <PM 21B-정위, PM 23-반위, PM 25-정위>이다. 이때 EI가 진로를 구성하기 위한 쇄정과 해제 알고리즘은 다음과 같다.

- i. EI는 OC_21B, OC_23, OC_25의 주기적인 상태 보고를 통해 각 PM이 해정상태임을 확인하고 제어 key를 확보함으로써 쇄정상태로 만든다.
- ii. EI는 key를 이용하여 선로전환기 동작시간을 감안하여 열차 T1으로부터 지리적으로 먼 곳에 위치한 PM 순으로 <PM 25-정위, PM 23-반위, PM 21B-정위>과 같은 전환 명령을 전송한다.
- iii. EI는 OC의 주기적인 상태보고를 통해 해당 PM

- 이 설정되었고 정상적으로 전환되었음을 확인한다.
- iv. EI는 ATP로 Y지점까지 진로의 한계정보를 제공하며 ATP는 이동권한을 Y지점까지 연장하여 수행한다.
 - v. EI는 ATP로부터 열차위치정보를 수신하여 열차 T1이 PM의 분기영역을 빠져나왔음을 확인한다. 열차의 후미부가 각 분기영역을 빠져 나올 때마다 해당 PM에 해당명령을 전송한다.
 - vi. EI는 OC의 주기적인 상태보고를 통해 해당 PM이 정상적으로 설정되었음을 확인한다.

설정된 경우 모든 PM리스트를 한 번에 설정상태로 변경하고 제어를 수행하지만 설정된 경우 열차가 PM의 분기영역을 빠져나올 때마다 하나씩 설정을 수행한다. 이는 공유자원을 부분적으로 확보했을 경우에 발생하는 deadlock를 방지하기 위함이다.

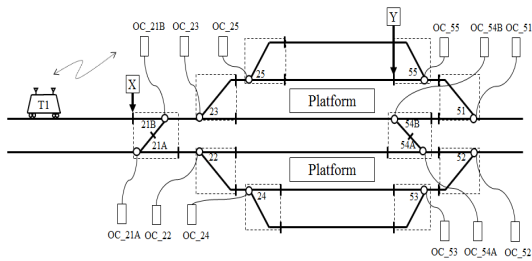


Fig. 8. Route Configuration with Layout of Gyeryong Station in Honam Line

4. 알고리즘 분석

4.1 간격제어 성능분석

제한된 ATDCS의 간격제어 알고리즘 성능을 기존의 CBCT와 비교하기 위해 MATLAB을 이용하여 시뮬레이션 하였다. Table 1은 시뮬레이션에 사용되는 파라미터를 나타낸다. 열차의 성능은 한국형 표준전동차 사양을 토대로 정의하였다. 제동 안전인자는 75% 수준으로 책정하였으며, 제동시스템 반응 시간은 1.5초, 저크한계로 인해 손실시간은 0.5초로 정의하였다[7]. 열차의 위치 불확실성은 $\pm 6.25m$, 속도센서의 오차는 $\pm 2km/h$ 로 정의하였다[1].

Table 1. Simulation Parameters

Term	Value	Unit
Train Length(D_{TL})	200	m
Train Maximum speed(V_{MAX})	100	km/h
Initial acceleration rate	3.0	km/h/sec
Service deceleration rate(β_{FT}, β_{PT})	3.5	km/h/sec
Braking safety factor(K)	75	%
Braking system reaction time(T_{BR})	1.5	sec
Overspeed governor time(T_{OS})	3	sec
Jerk limitation time(T_{JL})	0.5	sec
Speed sensor error(V_{Err})	± 2	km/h
Position uncertainty(D_{PU})	± 6.25	m
Maximum line speed(V_L)	80	km/h

Fig. 9는 ATDCS의 간격제어 성능을 기존의 CBCT 방식인 한국형 무선통신기반 열차제어시스템(KRTCS: Korean Radio-based Train Control System)[3, 8]과 ETIC(Enhanced Train Interval Control)알고리즘[6]과 비교한 시뮬레이션 결과를 보여준다. 선로운행속도를 10km/h에서 최대 80km/h로 변화시키면서 운전시격을 계산하였다. ETIC와 ATDCS에서 참조하는 선행열차의 속도는 10km/h에서 65km/h까지 증속한다고 가정하였다. ETIC의 경우 차상-지상-차상 간 cyclic-path의 제어 경로를 가지므로 해당 지연시간은 무선통신지연시간과 지상제어시스템의 프로세싱 시간을 고려하여 2초로 정의하였다. 시뮬레이션 결과에서 볼 수 있듯이 KRTCS는 64km/h의 속도에서 약 29.2초, ETIC는 80km/h의 운행속도에서 약 22.5초, ATDCS는 80km/h의 운행속도에서 약 20.5초의 최소운전시격을 가진다. 따라서 ATDCS는 열차 간 직접통신을 통해 가장 높은 간격제어 성능을 가짐을 확인할 수 있다.

ATDCS는 선행열차의 운행속도를 참조하여 향상된 간격제어를 수행한다. Fig. 10은 선행열차의 운행속도를 5m/h~45km/h, 15km/h~55km/h, 25km/h~65km/h로 단계적으로 변화시키면서 ATDCS의 운전시격을 시뮬레이션 한 결과이다. ATDCS의 운전시격은 선행열차의 운행속도가 높을수록, 열차의 운행속도가 높을수록 개선되고 있음을 확인할 수 있다.

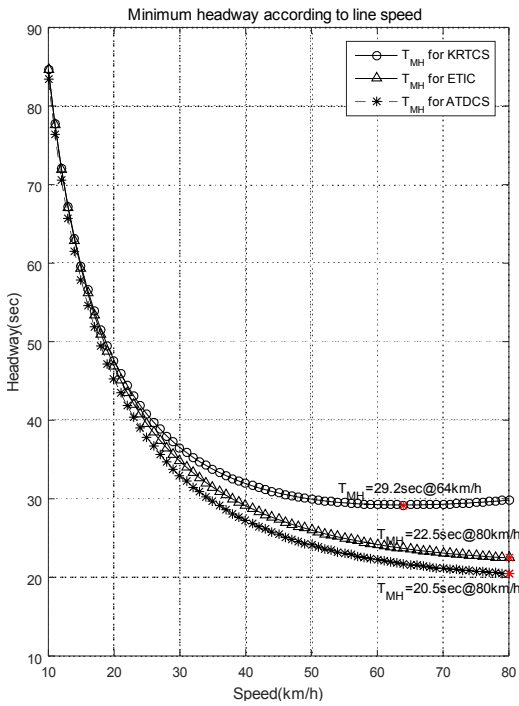


Fig. 9. Minimum Headway Comparison with KRTCS, ETIC and ATDCS

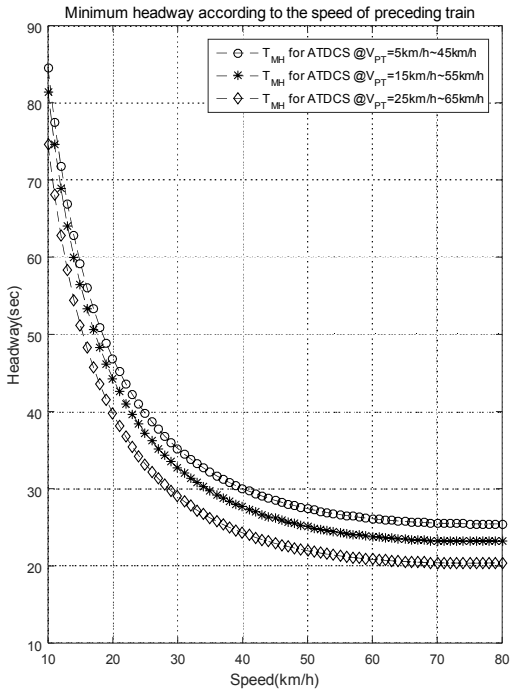


Fig. 10. Minimum Headway according to the Speed of Preceding Train

4.2 분산형 연동알고리즘 분석

제안된 ATDCS의 분산형 연동알고리즘과 기존의 연동장치에 수행하던 연동논리를 비교분석 한다.

철사쇄정은 PM의 분기영역에 열차가 존재하는 경우 해당 PM을 임의로 전환하지 못하도록 방호하는 것을 의미한다[9]. 제안된 분산형 연동알고리즘에서 열차가 PM의 분기영역 내에 존재하기 위해서는 반드시 제어 key를 획득하여야 하며 해당 열차에 의해서만 해정이 가능하므로 타 열차 또는 운영자에 의한 임의의 전환이 불가능하다.

진로쇄정은 열차가 진로를 구성하는 시작과 종료의 PM이 열차가 통과하면서 해정요청하기 전까지 해정되지 않아야 함을 의미한다[10-11]. 분산형 연동알고리즘에서 차상의 ATP로부터 수신된 열차의 위치정보를 통해 EI는 열차의 후미부가 PM을 완전히 통과할 때마다 해정을 수행한다. 따라서 열차가 PM을 통과하는 도중에 타 열차 또는 운영자에 의한 임의의 전환이 불가능하다.

과주여유거리의 확보(overlap 쇄정)의 경우 확보된 진로의 종단 이후에 PM이 존재하는 경우 열차의 과주로 인한 탈선을 방지하기 위해 진로 종단 이후 PM을 함께 쇄정하는 것을 의미한다[10]. 하지만 제안된 분산형 연동알고리즘에서 차상EI는 ATP로 구성된 진로정보를 제공하고 ATP는 진로의 종단을 절대로 넘어서지 못하도록 MA와 속도프로파일을 생성하여 방호하기 때문에 기존 EI에서 수행하던 과주여유거리의 확보는 불필요하다.

접근쇄정은 열차가 분기영역에 접근하는 경우 해당 분기영역의 PM을 임의로 전환하지 못하도록 방호하는 것을 의미한다[10-11]. EI는 차상 ATP로부터 열차의 실시간 위치 및 점유정보, MA, 현재 속도에 대한 제동거리를 수신할 수 있다. 확보하지 못한 PM의 경우 분기영역 전까지 MA가 생성되어있기 때문에 ATP의 MA에 의해 방호된다. 만약 PM의 제어 key를 확보한 경우라면 해당 열차를 제외한 타 열차 또는 운영자에 의한 임의의 전환이 불가능하다.

접근쇄정의 경우 이미 확보된 PM의 분기영역에 열차가 접근하는 경우 운영자가 강제해정을 취급하는 상황을 분석한다. Fig. 11(a)는 ATP로부터 수신한 열차 T1의 현재속도에 대한 제동거리가 분기영역을 침범하지 않는 경우를 보여준다. 차상 EI는 PM의 분기영역 정보를 가지고 있으므로 운영자의 강제해정요청을 수락하더라도 분기영역을 침범하지 않음을 판단할 수 있다. EI는 제어 key를 이용하여 PM을 해정하며 ATP로 진로취소 정보

를 제공한다. ATP는 Fig. 11(b)와 같이 취소된 진로만큼 MA를 단축한다. 중앙 또는 로컬 관제의 운영자는 해당 PM의 제어 key를 획득하여 전환 명령을 수행할 수 있다. 하지만 열차의 진입속도가 높아 운영자의 해제요청을 수락할 수 없는 경우가 존재한다. Fig. 11(c)는 ATP로부터 수신한 현재 열차의 제동거리가 분기영역을 침범하는 경우이다. 이 경우 운영자가 PM의 제어를 취급하게 되면 탈선사고로 이어지기 때문에 차상 EI는 운영자의 해제요청을 거절한다.

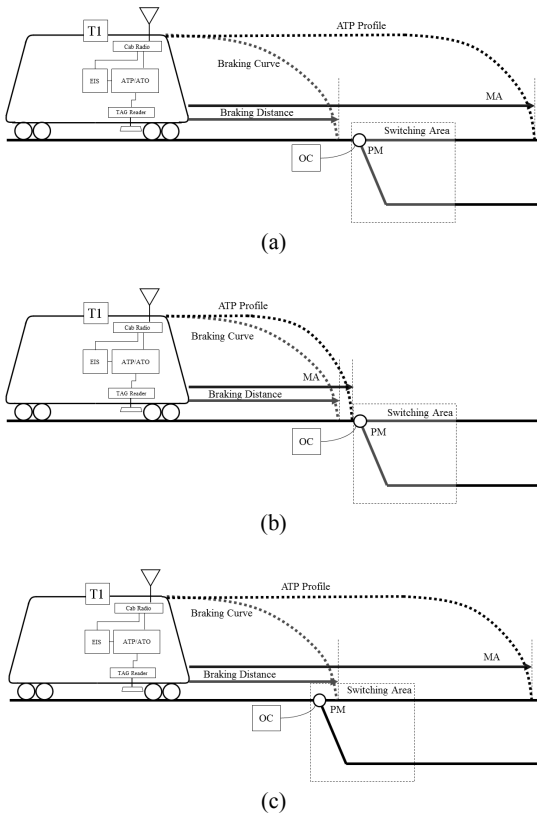


Fig. 11. PM Unlock Control Command by Operator, (a) Case of Possible Unlock Control, (b) Reduced MA after Unlock Control, (c) Case of Impossible Unlock Control

기존의 EI는 단순히 열차의 점유정보라는 제한적인 정보를 기준으로 PM과 인접 선로구간을 분배하기 때문에 복잡하고 정교한 연동논리가 요구된다. 하지만 제안된 차상중심 분산형 연동알고리즘은 PM에 대한 분배를 담당하며 선로구간에 대한 분배는 ATP가 담당한다. 또

한 추가적으로 ATP의 방호기능을 활용함으로써 단순히 PM을 확보하는 과정으로 기존의 복잡한 연동논리를 대신할 수 있다.

5. 결론

본 논문은 ATDCS를 위한 간격제어와 차상중심 분산형 연동알고리즘을 제안하였다. 제안된 ATDCS는 열차 간 직접통신을 통해 선행열차의 제동거리를 지연에 따른 손실 없이 활용함으로써 기존의 간격제어 알고리즘보다 향상된 성능을 가질 수 있다. 시뮬레이션을 통해 제안된 ATDCS의 간격제어 성능은 기존 KRTCS 및 ETIC에서 제시한 간격제어 알고리즘보다 운전시각을 개선할 수 있음을 확인하였다. 제안된 차상중심 분산형 연동알고리즘은 기존의 지상서버와 같은 형태의 EI와 달리 노선의 모든 열차가 개별 EI 기능을 갖도록 설계하였다. 공유자원인 PM이 동시에 두 대 이상의 열차에 의해 점유되지 않도록 PM의 고유 key를 이용한 세마포어 기법을 제시하였다. 제시된 세마포어 기법을 이용하여 분산형 연동알고리즘을 제시하였으며 기존의 EI가 수행하던 여러 연동논리와 비교함으로써 제안된 분산형 연동알고리즘이 기존의 복잡한 연동논리를 대신할 수 있음을 확인하였다. 향후 OC에서 고유 key를 생성하는 알고리즘과 효율적인 OC의 구성방법에 대한 추가적인 연구를 진행할 계획이다.

제안된 ATDCS와 분산형 연동알고리즘은 기존의 CBTC 방식의 열차제어시스템 보다 높은 간격제어 효율을 가지는 반면 지상 ATP와 EI와 같은 지상제어설비를 축소함으로써 구축비용 절감을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

References

- [1] IEEE Std. 1474.1, IEEE Standard for Communication-Based Train Control(CBTC) Performance and Functional Requirements, 2004.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/IEEESTD.1999.90611>
- [2] IEEE Std. 1474.3, IEEE Recommended Practice for Communication-Based Train Control(CBTC) System Design and Functional Allocations, 2008.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/IEEESTD.2008.4618623>
- [3] Oh, Sehchan, 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>

- [4] Oh, Sehchan, Kyunghee Kim, and Minsoo Kim. "Preprocessing-based speed profile calculation algorithm for radio-based train control," Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, vol. 16, no. 9, pp. 6274-6281, 2015.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.9.6274>
- [5] Oh, Sehchan, Yongki Yoon, and Jonghyen Baek. "Development of Wireless Communication based Train Separation Control Simulator," Conference of Korean Society for Railway, 2011.
- [6] Oh, Sehchan, et al. "Headway Calculation and Train Control Algorithm for Performance Improvement in Radio based Train Control System," Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, vol. 16, no. 10, pp. 6949-6958, 2015.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.10.6949>
- [7] Parkinson, Tom, and Ian Fisher. Rail transit capacity. Vol. 13, Transportation Research Board, 1996.
- [8] 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.
- [9] Ryou, Sungkyun, et al. "A Study on Interface between Switch Machine and Axle Counter and Switch Locking for Operation of Driverless Train Safety Protection in Shinbundang Line," Conference of Korean Society for Railway, 2013.
- [10] Seungho Chang, et al., "Automation Program for Drawing and Examination of Locking Sheet," Conference of Korean Society for Railway, 2008.
- [11] Kim Hyunghoon, Yang Chanseok, Cho Yonggee, "A Study on the Mixed Usage of Logical Block and Moving Block in CBTC System," Conference of Korean Society for Railway, 2011.
- [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 and Fallback Modes for CBTC System," Journal of Southwest Jiaotong University 3, 014, 2012.
- [14] 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, 002, 2011.

오 세 찬(Sehchan Oh)

[정회원]



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

<관심분야>
열차제어, DTO/UTO 설계

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

최 현 영(Hyeon Yeong Choi)

[정회원]



- 2005년 8월 : KAIST 전기 및 전자공학과 (공학석사)
- 2010년 2월 : KAIST 전기 및 전자공학과 (공학박사)
- 2011년 3월 ~ 2013년 4월 : KDDI R&D Labs 연구원
- 2013년 5월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>
철도신호통신, 정보통신