

지상 ATP와 연동장치 통합형 무선통신 기반 열차제어시스템

오세찬*, 김영주
한국철도기술연구원 열차제어통신연구실

Communication-Based Train Control System with Integrated Wayside ATP and Interlocking

Seh-Chan Oh*, Young-Ju Kim
Department of Train Control and Communications Research, Korea Railroad Research Institute

요약 현재 무선통신 기반 열차제어시스템은 각 관할영역마다 간격제어를 위한 지상 ATP와 분기제어를 위한 EI가 존재하며 이들 지상 제어시스템에 의존하여 열차를 제어한다. 그러나 지상 ATP와 EI가 별도로 존재함으로써 인해 복잡한 제어흐름을 발생시킨다. 더욱이 EI는 고정폐색 기반의 연동로직을 이용하고 있어 이동폐색 기반의 ATP의 제어성능을 저하시킨다. 이러한 문제를 개선하기 위해 본 연구는 지상 ATP와 EI를 기능적으로 통합하는 새로운 지역제어기 구조와 제어원리를 제안한다. 제안된 통합 지역제어기는 기존 EI 기능 중 ATP와 중복된 기능을 제외하여 단순화된 연동 로직을 사용한다. 시스템 통합에 따른 국내 표준규격을 기준으로 변경된 인터페이스 구조를 제시한다. 제안된 시스템 제어원리를 이용한 운영시나리오를 제시하며 단순화된 시스템 구조와 흐름을 토대로 기존 무선통신 기반 열차제어시스템과 제어성능을 비교 분석한다. 시뮬레이션 결과 제안된 시스템은 기존 대비 선행 열차 추적성이 약 50% 향상되고 최소안전거리 및 최소운전시각은 약 10% 단축된다. 기존 제안된 통합 지역제어기는 향후 한국형 무선통신 기반 열차제어시스템에 반영되어 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract The current communication-based train control system relies on wayside ATP for distance control and EI for switching control in each jurisdictional area. However, the separate existence of ground ATP and EI leads to complex control flows. Moreover, EI utilizes a fixed-block-based interlocking logic, which degrades the control performance of the moving-block-based ATP. To address these issues, this study proposes a new regional controller structure and control principle that functionally integrates ground ATP and EI. The proposed integrated zone controller simplifies the interlocking logic by excluding redundant functions from EI, allowing for a more streamlined control process. This paper also presents changes to the interface structure based on domestic standard specifications following system integration. Operational scenarios using the proposed control principles are introduced, and a comparative analysis of control performance is conducted against the existing communication-based train control system, emphasizing the simplified system structure and workflow. In the simulation results, the proposed system shows approximately a 50% improvement in predecessor train trackability compared to the existing system, along with around a 10% reduction in minimum safety distance and minimum headway time. The proposed integrated zone controller is expected to be applied and utilized in future Korean radio-based train control systems.

Keywords : ATP, Control Performance, EI, Integrated Zone Controller, Operational Scenarios, Simplified Interlocking

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업(열차자율주행제어 핵심기술개발, PK2301B1)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

*Corresponding Author : Seh-Chan Oh(Korea Railroad Research Institute)

email: soh@krri.re.kr

Received September 25, 2023

Revised October 23, 2023

Accepted November 3, 2023

Published November 30, 2023

1. 서론

가장 진보된 무선통신 기반 열차제어시스템(CBTC: Communication-Based Train Control, 이하 CBTC)은 2004년 샌프란시스코 공항철도 첫 적용 이후 현재 가장 널리 확산되고 있다[1,2]. 지난 2010년 이후 국내 11개 도시철도 노선 중 9개 노선이 CBTC 방식을 채택하였다[3]. 현재의 CBTC는 Fig. 1과 같이 노선을 하나 이상의 관할영역으로 나눈 후에 각 관할영역마다 지상의 간격제어를 위한 자동열차방호장치(ATP: Automatic Train Protection, 이하 ATP)와 선로 분기제어를 위한 연동장치(EI: Electronic Interlocking, 이하 EI)에 의존하여 열차를 제어한다[2]. ATP는 EI 위에 추가된 계층이다. 그러나 EI는 과거부터 현재까지 고정폐색 기반의 연동로직을 이용하고 있기 때문에 복잡한 제어로직을 가진다[1,4]. 또한 지상에 ATP와 EI가 복잡한 인터페이스를 통해 연결되어 있어 복잡한 시스템 구조와 제어흐름을 가져온다. 이는 결과적으로 노선의 변경이나 연장시 시스템 유연성과 제어성능을 저하시킨다.

최근 CBTC 시스템의 구조를 단순화하기 위해 여러 사례가 존재한다[6-10]. 참고문헌 [5]는 전통적인 CBTC의 지상 ATP와 EI를 통합한 열차제어에 대한 개념을 제시하고 있으며, 참고문헌 [6,7]은 기존 CBTC의 차상 및 지상의 기능을 열차의 기능으로 통합하는 새로운 열차중심 열차제어시스템을 제안하였는데, 열차가 제어의 중심이 되어 ATP 기능과 EI 기능을 모두 열차에서 수행한다. 기존 연구에서는 ATP와 EI의 기능적 통합으로 인한 ATP 측면에서 간격제어 개념을 제시하였으나, 기능적 통합의 효과를 극대화하기 위한 EI 측면에서 단순화된 연동로직 및 진로의 구성과 그 진로에 기반한 제어원리에 대해서는 제시하고 있지 않다. 한편 국내의 경우 참고문헌 [1]의 국산화를 위한 한국형 도시철도용 무선통신기반 열차제어시스템(KRTCS: Korean Radio-based Train Control System, 이하 KRTCS)을 개발하였고 현재 신림선에 적용하였다[11].

본 논문은 KRTCS의 시스템 및 제어흐름의 단순화를 위해 관할영역마다 존재하는 ATP와 EI를 기능적으로 통합하는 시스템 구조와 제어원리를 제안한다. 이를 위해 기존 EI의 기능을 분해하여 ATP와 중복된 기능을 제외한 나머지 기능을 지상 ATP의 일부 기능으로 통합한다. 시스템 통합에 따른 국내 표준규격에서 제시한 시스템 규격을 토대로 변경된 인터페이스 구조를 제시한다[11]. 제안된 지상 ATP와 EI 통합 지역제어기 기반

CBTC(이하 통합지역제어기 기반 CBTC)의 제어원리를 이용한 운영시나리오를 제시하며 단순화된 시스템 구조와 흐름을 이용하여 제어성능을 비교분석 한다.

2. 연구방법

2.1 기존 무선통신기반 열차시스템

기존 CBTC 구조는 Fig. 1과 같이 관계 ATS (Automatic Train Supervision, 이하 ATS), 관할영역 (zone)마다 존재하는 지상 ATP와 EI, 그리고 차상 ATP로 구성된다. 관계 ATS는 열차의 운영 스케줄을 EI와 지상 ATP에 제공한다. EI는 ATS로부터 수신된 열차 스케줄과 지상 ATP로부터 수신한 열차위치를 토대로 관할영역내 열차 진로를 구성하고 구성된 진로의 한계를 지상 ATP에 제공한다. 지상 ATP는 EI로부터 열차의 진로를 수신하기 위해 관할영역내 열차의 차상 ATP로부터 수신된 열차의 위치를 EI로 전송한다. 결국 지상 ATP는 진로의 한계 선행 열차의 위치를 토대로 관할영역내 열차에 이동권한(MA: Movement Authority, 이하 MA)을 제공한다. 차상 ATP는 지상 ATP로부터 수신된 MA를 넘지 않도록 열차의 추진 및 제동장치에 가감속 명령을 내린다.

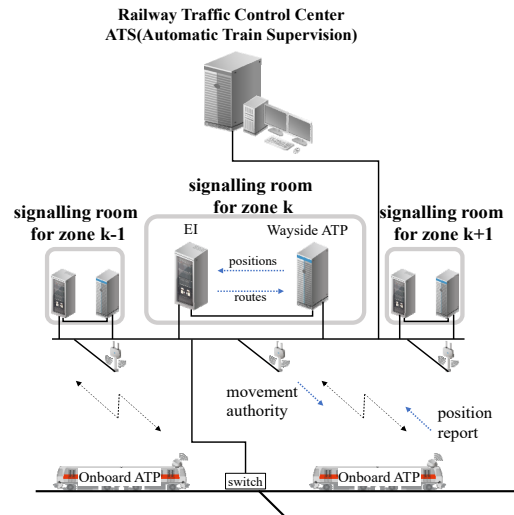


Fig. 1. System Architecture of Existing Communication-Based Train Control system

2.1.1 EI 제어 원리

EI는 자신의 관할영역 선로선행을 기반으로 사전에 검증된 진로 리스트를 가지고 있다. 특정 열차에 대한 ATS

스케줄을 수신하면 저장된 진로 리스트 중에서 스케줄내에 포함된 진로 구성정보와 부합하는 진로를 선택한다. 진로란 EI가 해당 열차에 부여하는 상호 배타적으로 확보되는 선로자원 리스트이며 점유해야 할 하나 이상의 궤도구간, 선로전환기 및 선로전환기 방향을 포함한다. Fig. 2와 같이 진로 A는 호남선 계통역 진로 리스트 중 장내 신호와 관련된 B3051T에서 2T까지의 진로를 보여 준다. 진로 A는 (1)과 같이 구성된다.

$$\langle B3051T \rightarrow 2T \rangle = [21 \text{ ㉔ } 25 \ 55 \text{ ㉑ } XT \ 21BT \ 23T \ 25T \ 2T \ 55T] \quad (1)$$

여기서 선로전환기 번호 21, 25, 55는 정위(normal) 방향, 23 및 51는 반위(reverse) 방향으로 전환함을 의미한다. 궤도구간 XT, 21BT, 23T, 25T, 2T, 55T는 함께 배타적으로 점유가 필요한 궤도구간을 의미한다.

EI는 열차의 주행속도를 비롯한 주행상태를 실시간으로 알 수 없다. 따라서 열차의 과주를 고려하여 Fig. 2에 점선으로 표기된 선로전환기 번호 55, 51과 궤도구간 55T는 진로범위(B3051T→2T) 밖에 존재함에도 불구하고 함께 점유 및 제어한다. 이 같은 오버랩 설정(overlap locking)은 선로선형과 노선 운영환경에 따라 결정되며 철도신호 전문가에 의해 수작업으로 설계된다.

EI는 진로 구성을 위해 진로를 구성하는 선로자원을 타 열차의 진로와 중첩이 발생하지 않도록 배타적으로 잠금한다. 진로 구성이 완료되면 해당 진로의 범위를 지상 ATP에 전송한다.

2.1.2 구조적 한계 분석

기존의 고정폐색(fixed-block) 기반 연동로직을 가지는 EI가 열차의 진로를 구성하기 위해서는 아래와 같은

조건을 만족하여야 한다[12,13].

- i) 열차의 진로는 서로 중복되어서는 안 된다.
- ii) 새로이 구성되는 열차의 진로 내에 열차가 존재해 서는 안 된다.
- iii) 진로 내에 선로전환기는 안전하고 정확하게 전환 되어야 한다.

하지만 CBTC와 같은 이동폐색(moving-block) 방식의 경우 i), ii)의 기능은 열차의 간격제어의 개념으로 ATP의 기능과 중복으로 볼 수 있다. 결국 ATP와 EI 모두 중복된 기능을 수행하고 있으며, EI의 경우 열차의 위치 정보만을 토대로 선로전환을 수행하여야 하므로 불필요하게 선로자원을 잠금하는 연동로직을 가진다. 또한 진로의 중복과 진로내 열차의 존재를 차단함으로써 분기 구간에서의 제어성능을 제한한다.

2.2 지상 ATP 및 EI 통합 지역제어기

2.2.1 통합 지역제어 원리 및 구조

제안된 통합지역제어기 기반 CBTC 구조는 Fig. 3과 같이 관계 ATS, 통합 지역제어기(Zone Controller) 그리고 차상 ATP로 구성된다. 통합 지역제어기는 EI와 지상 ATP의 기능이 통합된 장치로 관할영역내 모든 열차를 대상으로 ATS로부터 수신된 열차 운영 스케줄에 따라 열차의 진로를 구성하고 선행 열차와의 간격을 제어 하기 위한 MA를 제공하는 기능을 수행한다.

Fig. 4는 통합 지역제어기의 기능블록을 보여준다. 그림에서 점선은 지역제어기의 외부 장치를 의미한다. 통합 지역제어기 내에 음영처리된 기능 블록은 EI 기능이며 나머지 기능 블록은 지상 ATP 기능이다. ATS의 스케줄 명령을 수신하게 되면 통합 지역제어기 EI 기능이 스케줄에 해당하는 진로를 찾고 진로를 구성하는 선로전환기와 전환 방향대로 진로를 구성한다. 전로전환 방향이 완료되면 ATP 기능은 선행 열차의 위치를 토대로 주행

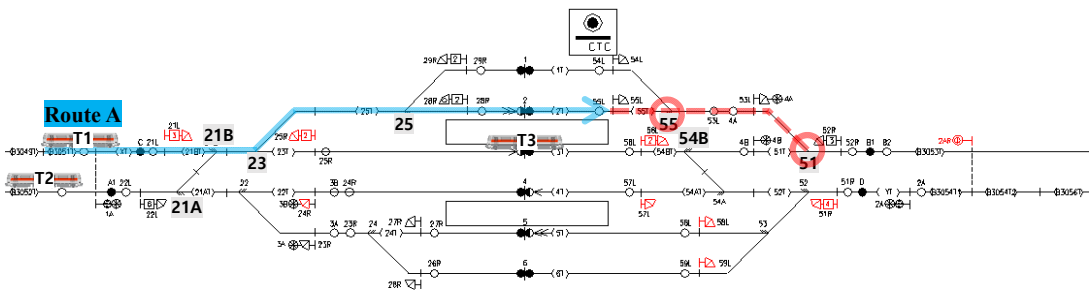


Fig. 2. Gyeryong Station Track Layout and interlocking logic of existing EI

가능한 거리의 한계인 MA를 결정한다. 최종적으로 MA까지의 선로가 가지는 속도프로파일을 생성하여 MA와 함께 열차에 제공한다.

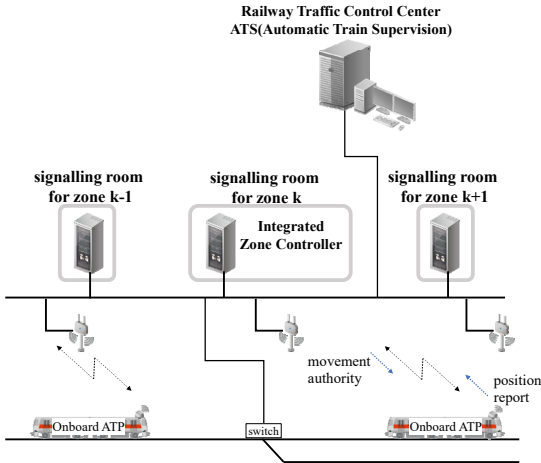


Fig. 3. Proposed System Architecture

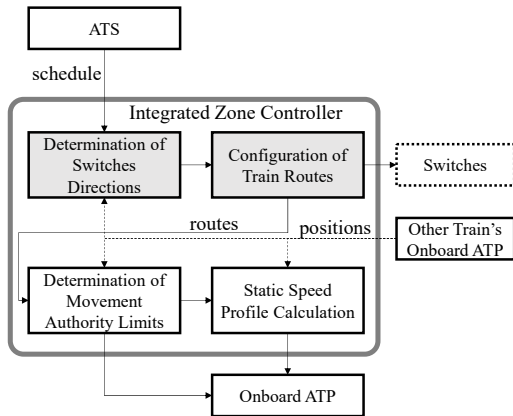


Fig. 4. Functional Block Diagram of the Integrated Zone Controller

통합 지역제어기는 ATS로부터 운영 스케줄을 수신하게 되면 스케줄에 포함된 이동경로에 부합하는 선로전환기 리스트 및 방향을 선택한다. 이후 진로를 구성하기 위해 선로전환기 방향을 전환한다. 선로전환기 방향 전환이 완료되면 ATP 기능에 전달한다. ATP는 해당 진로를 직선구간으로 간주하고 선행 열차의 위치를 토대로 MA를 설정한다. 이후 정적 속도프로파일을 생성하여 해당 열차의 차상 ATP에 전송한다[1,2].

통합 지역제어기는 관할영역의 모든 진로에 대한 안전하고 정확한 선로전환기 방향을 저장한다. 이동폐색 방

식의 통합 지역제어기는 ATP의 기능과의 중복을 고려하여 (1)의 진로 A를 (2)와 같이 진로범위 내에 존재하는 선로 전환기와 선로전환 방향 리스트로 단순화할 수 있다.

$$\langle B3051T \rightarrow 2T \rangle = [21 \text{ } \textcircled{23} \text{ } 25] \quad (2)$$

(1)의 진로범위 밖에 존재하는 선로전환기 55, 51와 궤도구간 55T는 ATP의 MA와 속도프로파일로 실시간 방호할 수 있기 때문에 삭제할 수 있다. 아울러 ATP가 MA로 선로구간을 배타적으로 잠금/해제를 수행하기 때문에 EI의 진로에 배타적으로 잠금이 필요한 궤도구간 리스트를 포함하지 않는다.

통합 지역제어기 EI 기능은 ATS의 스케줄에 부합하는 진로를 선택하여 선로전환기를 전환한다. 전환이 완료되면 ATP 기능으로 (3)과 같이 열차의 진로범위를 제공한다.

$$[\text{Tag_ID} + \text{start_offset}, \text{Tag ID} + \text{end_offset}] \quad (3)$$

여기서 Tag-ID는 열차에서 위치보고에 사용한 Tag_ID를 의미하며 start_offset과 end_offset은 각각 Tag_ID로부터 진로 시작 궤도구간 시점까지의 거리, 진로 끝 궤도구간 종점까지의 거리를 의미한다.

통합 지역제어기 ATP는 수신된 진로범위를 토대로 열차의 MA를 결정한다. (2)에 따라 선로전환기 방향이 변경되지 않는 상태로 진로 내에 다른 열차가 존재할 수 있으며 타 열차의 진로와 중첩이 가능하다. 그러나 ATP의 MA는 중복되어 설정될 수 없으므로 열차의 충돌은 발생하지 않는다.

통합 지역제어기 ATP는 수신된 진로범위를 토대로 열차의 MA를 결정한다. (2)에 따라 선로전환기 방향이 변경되지 않는 상태로 진로 내에 다른 열차가 존재할 수 있으며 타 열차의 진로와 중첩이 가능하다. 그러나 ATP의 MA는 중복되어 설정될 수 없으므로 열차의 충돌은 발생하지 않는다.

Table 1에 기존 이동폐색시스템과 제안된 통합지역제어기 기반 CBTC를 비교하였다. 기존 이동폐색시스템의 각 zone은 지상 ATP와 EI로 구성된 반면 제안된 시스템은 통합형 지역제어기가 존재한다. 진로의 구성요소도 선로와 선로전환기 및 방향으로 구성되는 반면 제안된 시스템은 선로전환기와 그 방향으로만 구성된다. 이러한 진로의 구성요소는 열차 간 상호배타적 자원으로 이어진다. 제안된 진로는 선로선형 및 운영 상황을 반영

한 오버랩 채정이 필요 없으므로 생성로직이 비교적 단순하다. 시스템 통합에 따라 제어흐름이 단순화됨으로써 제어성능 향상이 가능하다.

Table 1. Comparison between the Existing Moving Block System and the Proposed System

Comparison	Existing Moving Block System	Proposed System
Wayside System for Each Zone	Wayside ATP, EI	Integrated Zone Controller
Components within the Route	Plain Track, Switch, Switch Direction	Switch, Switch Direction
Mutex Resources of the Route	Plain Track, Switch	Switch
Complexity of the Route Generation	Complex Routing Logic (overlap locking needed depending on track geometry and operational conditions)	Simple Routing Logic (no overlap locking needed)
Control Flow for each Zone	Complex Control Flow (preceding train→wayside ATP→EI→ wayside ATP→ following train)	Simple Control Flow (preceding train→integrated zone controller→ following train)

Table 2. Train Route Configuration Information

Values	Length (bit)	Description
NID_TRAIN	16	Identity number of the train
NID_LRTG	14	Identity number of the last relevant tag group
Q_SCALE	2	Qualifier for the distance scale
NID_STATION	14	Station ID
NID_ROUTE	14	Route ID
Q_ROUTE	2	Qualifier for route set status for logical block
Q_DIRROUTE	2	Direction of route in relation to the transponder group orientation
D_ROUTE	15	Distance between the transponder and start point of route.
L_ROUTE	15	Length between start and end of ROUTES
N_ITER	6	Number of iteration
NID_SWITCH	14	Switch ID
D_SWITCH	15	Distance between the transponder and switch
L_SWITCH	15	Length between start of switch and end of switch
Q_SWITCH	2	Qualifier for switch direction status
Q_SWITCHSTATUS	2	Qualifier for switch status
Q_SWITCHLOCK	2	Qualifier for switch lock status
Q_SWITCHROUTELOCK	2	Qualifier for route lock status

참고문헌 [11]은 KRTCS의 지상 ATP와 EI에 대한 메시지구조를 정의하였으나 ATP와 EI의 통합에 따라 지상 ATP와 EIGAN 프로토콜 대신 내부 프로세스 간 통신으로 변경하면서 송수신 정보의 변경이 필요하다. 차상 ATP로부터 수신하는 위치보고는 차상과 지상간 ATP 프로토콜의 ATP Onboard Message(메시지 ID No. 22)로 대체할 수 있다. EI 기능에서 진로정보를 ATP의 MA 결정 기능으로 제공하기 위한 진로 정보는 참고문헌 [11]의 패킷 101을 토대로 Table 2와 같이 구성할 수 있다.

2.2.2 통합 지역제어 기반 운영시나리오

본 절에서는 통합 지역제어 원리를 기반으로 열차의 간격 및 분기제어 시나리오를 제시한다.

Fig. 5에서 열차 T1은 스케줄에 의해 진로 A로 진행하고자 한다. 통합 지역제어기는 저장된 진로 중 진로 A에 해당하는 선로전환기 방향 리스트를 탐색한다. 진로를 구성하기 위해 통합 지역제어기는 선로전환기 21B과 25는 정위, 23은 반위로 전환하고 제어 결과를 수신한다. 한편 열차 T2는 스케줄에 의해 진로 B로 진행하여야 하며 통합 지역제어기는 선로전환기 방향 리스트를 탐색하여 21A, 21B를 반위로 23을 정위로 전환하고자 한다. 그러나 21B는 이미 T1에 의해 배타적으로 점유되어 있기 때문에 진로 B는 T1이 25T 지점까지 이동하여 21B를 해제할 때까지 진로 구성이 이루어질 수 없다.

T1은 진로 A를 따라 MA를 생성하여 궤도구간을 배타적으로 점유하여 주행한다. Fig. 6과 같이 T1이 25T 지점까지 이동하게 되면 통합 지역제어기는 25T 궤도구간 이전 선로전환기 및 궤도구간을 비롯한 선로자원에 대한 점유가 해제된 상태가 된다. 통합 지역제어기는 T2의 진로 B를 구성하기 위한 선로전환기를 점유하고 21A, 21B를 반위, 23을 정위로 제어한다. 진로 B 내에 열차 T3가 존재하고 T3의 진로 C와 중복이 발생하게 된다. 그러나 선로전환기의 중복이 아니므로 진로 B와 진로 C는 동시에 설정할 수 있다. T2는 진로 B를 따라서 필요한 궤도 구간을 배타적으로 점유한다. 따라서 T3가 이미 점유하고 있는 열차의 위치와의 충돌이 발생하지 않는다. 마찬가지로 통합 지역제어기는 T3의 진로 C를 구성하기 위해 필요한 선로전환기를 점유와 방향을 전환하고 MA를 통해 배타적으로 궤도 구간을 점유하면서 주행한다.

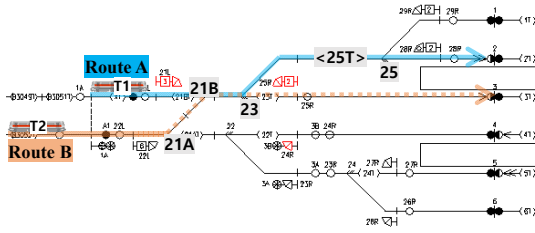


Fig. 5. Operation Scenario: configuration of route A and route B

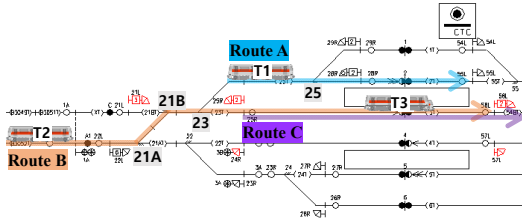


Fig. 6. Operation Scenario: configuration of route B according to partial unlocking of route A

3. 결과 및 고찰

3.1 실험 및 결과

본 절에서는 시스템 통합에 따른 열차간격제어 성능을 최소안전거리와 최소운전시격을 토대로 비교 분석한다 [14]. 시뮬레이션은 Matlab을 이용하여 수행한다. 최소 안전거리는 선 후행 열차가 제동개입 직전까지 접근한 상태에서 두 열차가 가지는 거리상의 차이를 의미한다. 이때 열차의 안전거리는 열차의 안전제동 모델에 의하여 계산된다. 최소운전시격은 선 후행 열차의 시간 차이이다. 즉, 어느 한 지점을 기준으로 선행 열차의 전두부가 통과한 후 후행 열차의 전두부가 해당 지점을 통과할 때까지 시간을 의미한다. 이러한 최소안전거리와 최소운전시격은 제어시스템의 간격제어 성능지표 중 하나이다. 시뮬레이션에 사용된 파라미터는 Table 3에 제시한다. 열차 성능은 한국형 표준전동차 사양[15]을 적용한다. 한편 열차제어시스템 및 통신지연은 일반적 CBTC 파라미터를 적용한다[1]. 통합 지역제어기의 경우 지상 ATP와 EI 통합으로 인해 시간 t_P , t_R , t_{EI} 은 0으로 간주할 수 있다.

열차의 이동거리는 Eq. (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$D(v_0, t, a) = |(v_0 + at)^2 - v_0^2| / 2a \quad (4)$$

여기서 v_0 는 열차의 초기속도, a 는 가속속도, t 는 이동시간을 의미한다.

Table 3. Simulation Parameters

Parameters	Values
Maximum Line Speed (V_L)	80 km/h
Train Length (D_{TL})	200 m
Position Uncertainty (D_{PU})	± 10 m
Speed Error (V_{ERR})	± 2 km/h
Full Service Braking (FSB) Rate (A_{FSB})	3.5 km/h/s
Emergency Braking (EB) Rate (A_{EB})	4.5 km/h/s
Braking Efficiency Factor (K)	60 %
Guaranteed Emergency Braking Rate ($A_{GEBR} = K \times A_{EB}$)	2.7 km/h/s
Maximum acceleration rate (A_{ACC})	3.0 km/h/s
Communication Delay between Wayside ATP and Onboard Systems	
- Wayside ATP \rightarrow Onboard ATP (t_{MA})	0.5 s
- Onboard ATP \rightarrow Wayside ATP (t_{PR})	0.5 s
Communication Delay between Wayside ATP and EI	
- Wayside ATP \rightarrow EI (t_P)	0.5 s
- EI \rightarrow Wayside ATP (t_R)	0.5 s
Wayside ATP System Response Time (t_{WATP})	1.0 s
EI System Response Time (t_{EI})	1.0 s
Onboard ATP System Response Time (t_{OATP})	0.75 s
Train Braking Response Time (t_B)	1.5 s

Eq. (5)은 참고문헌 [1]의 안전제동 모델에 의한 열차의 제동거리를 의미한다. 안전제동 모델은 열차가 가지는 최악의 제동시나리오를 가정한다. 열차가 신호 및 차량의 제동시스템, 통신지연시간 동안 최대가속하며 이후 제동장치로부터 보증비상제동률(GEBR)이 출력되면서 감속하게 된다.

$$BD = D(v_0, t_d, A_{ACC}) + D(v_0 + A_{ACC} t_d, t_z, A_{GEBR}) \quad (5)$$

여기서 t_d 는 신호 및 차량의 제동시스템 지연 시간으로 Eq. (6)과 같이 표현되며, t_z 는 정지시까지 제동시간으로 Eq. (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$t_d = t_{OATP} + t_B \quad (6)$$

$$t_z = (v_0 + A_{ACC} t_d) / A_{GEBR} \quad (7)$$

한편 기존 CBTC와 제안된 통합 지역제어기 기반 CBTC에서 선행 열차가 위치보고 이후 후행 열차가 MA 갱신전까지 선행 열차의 이동거리는 각각 Eq. (8), Eq. (9)와 같다.

$$MD_{CBTC} = V_L t_{MA_{CBTC}} \quad (8)$$

$$MD_{IZC} = V_L t_{MA_{IZC}} \quad (9)$$

여기서 $t_{MA_{CBTC}}$ 와 $t_{MA_{IZC}}$ 는 각각 Eq. (10) 및 Eq. (11)로 표현할 수 있다.

$$t_{MA_{CBTC}} = t_{PR} + 2t_{WATP} + t_P + t_{EI} + t_R + t_{MA} + t_{OATP} \quad (10)$$

$$t_{MA_{IZC}} = t_{PR} + t_{WATP} + t_{MA} + t_{OATP} \quad (11)$$

선행 열차가 위치보고 이후 후행 열차가 새로운 MA 갱신전까지 선행 열차의 위치변화는 간격제어에 활용할 수 없는 구간이다. 따라서 선행 열차의 추적성은 제어성능에 있어서 중요한 요소중 하나이다. Eq. (8)과 Eq. (9)의 선행 열차 추적성을 시뮬레이션한 결과는 Fig. 7과 같다. Fig. 7의 X축은 열차의 주행속도이며 Y축은 선행 열차 위치보고 이후 후행 열차가 수신하기까지 주행한 거리를 의미한다. 기존 CBTC의 경우 지상 ATP와 EI가 분리되어 있어 제어흐름이 복잡하므로 선행 열차의 실제 위치가 후행 열차의 MA에 반영되어 수신하기까지 상당한 이격거리가 발생하게 된다. 반면 통합 지역제어기 기반 CBTC의 경우 거리는 50% 이하로 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 두 열차 간 최소안전거리를 보여준다. X축은 열차의 주행속도이며 Y축은 선행 열차와 후행 열차간 최소안전거리를 의미한다. 최소안전거리는 선로의 제한속도에서 선행 열차와의 간격을 제동 없이 최소한으로 좁힌 상태에서 선행 열차와의 거리를 의미한다. 제안된 통합지역제어기 기반 CBTC는 기존 CBTC 대비 약 10% 이상 최소안전거리를 단축할 수 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 9는 열차의 길이를 40m, 120m, 200m로 변화시키면서 기존 CBTC 방식과 제안된 통합제어기 기반 CBTC의 두 열차 간 최소운전시각을 보여준다. 두 열차의 주행속도가 변화할 때 두 열차 간 최소운전시각은 최소안전거리에 열차의 길이를 더하고 이를 다시 주행속도로 나눈 값이 된다.

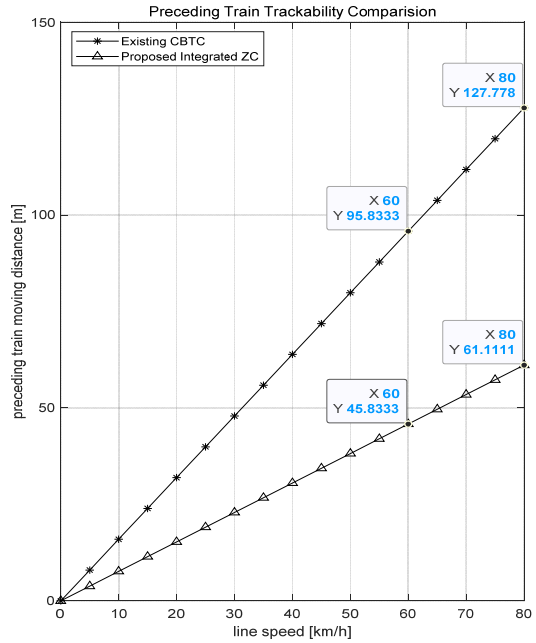


Fig. 7. Comparison of Preceding Train Trackability between Integrated Zone Controller-based CBTC and Existing CBTC

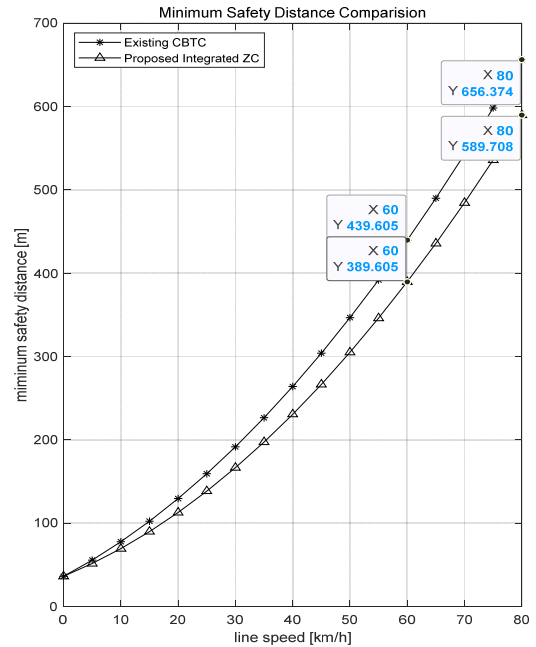


Fig. 8. Comparison of Minimum Safety Distance between Integrated zone Controller based CBTC and Existing CBTC

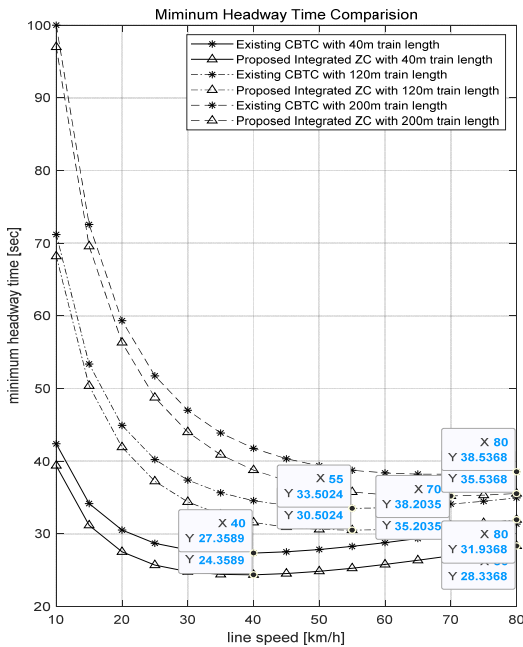


Fig. 9. Comparison of Minimum Headway Time between Integrated zone Controller based CBTC and Existing CBTC as Train Length Varies

시뮬레이션 결과에서 확인할 수 있듯이 열차의 길이가 40m인 경우 시속 40km/h에서 최소운전시격을 가지며 시속 80km/h 일 때 기존 CBTC에 비해 약 3.6초 시간이 단축됨을 확인할 수 있다. 한편 열차 길이가 120m인 경우 시속 55km/h에서 최소운전시격을 가지며 열차 길이가 200m 인 경우 시속 70km/h에서 최소운전시격을 가지고 80km/h 최고속도에서 약 3초 정도 시간이 단축됨을 확인할 수 있다. 열차의 길이와 속도를 감안할 때 약간의 차이는 발생할 수 있지만 기존 CBTC에 비해 약 10% 선로용량 증대를 기대할 수 있다.

3.2 이론적 고찰

제안된 통합지역제어기 기반 CBTC는 기존 CBTC의 지상 ATP와 EI간 높은 수준의 시스템 통합에 따라 복잡한 연동로직이 불필요하고 시스템이 단순화되는 장점을 진다. 특히 단순화된 연동로직은 선로전환기와 선로전환기 방향으로만 진로를 생성할 수 있다. 즉, 기존 CBTC의 EI가 구성하는 진로는 철도신호 전문가의 엔지니어링 결과로 생성되는 복잡한 연동도표를 토대로 진로를 구성한다. 반면 제안된 통합제어기 기반 CBTC의 진로는 선로전환기 방향의 유효성만을 확인하기 때문에 진로의 생

성과 수정이 용이하다는 장점을 가진다. 또한 단순화된 시스템 구조는 제어흐름의 단순화로 귀결될 수 있으며 이에 따라 기존 CBTC 대비 10% 제어성능 향상을 기대할 수 있다.

4. 결론

본 논문은 한국형 도시철도용 무선통신 기반 열차제어 시스템(KRTCS)의 성능 개선을 위해 관할영역마다 존재하는 지상 ATP와 EI를 기능적으로 통합하는 통합형 지역제어기의 시스템 구조와 제어원리를 제안하였다.

제안된 통합 지역제어기 기반 CBTC는 EI 연동로직에 포함된 ATP와의 중복된 기능을 제거함으로써 진로의 구성을 선로전환기 및 선로전환 방향으로 단순화하였다. 역내 분기구간에서 제안된 시스템 제어원리를 이용한 운영시나리오를 제시하였고 기존 CBTC 대비 선로자원을 효율적으로 활용할 수 있음을 제시하였다. KRTCS 표준 규격을 기준으로 시스템 통합으로 인해 변경된 인터페이스 사양을 제시하였다. 시스템 및 제어흐름 단순화를 통해 향상된 열차제어 성능을 시뮬레이션하였다. 시뮬레이션 결과 기존 CBTC 대비 선형 열차 추적성이 약 50% 향상되고 최소안전거리 및 최소운전시격은 약 10% 단축됨을 확인하였다.

본 연구에서는 연동도표 작성기준(KRS-SG06030)에서 제공하는 국내에서 가장 복잡한 역사 중 하나를 기준으로 영업구간을 대상으로 분석하였다[16]. 그러나 향후 기지 내 입환 등의 자동화를 위해서 복잡한 선로선형에서 분석을 위한 추가적인 연구를 수행할 계획이다. 통합 지역제어기는 기존 시스템 대비 설비 단순화 측면에서 신규 노선의 구축을 비롯하여 노선의 연장 및 역 추가 등의 변경시 큰 이점을 기대할 수 있다. 제시된 시스템 구조 및 제어원리는 향후 한국형 무선통신 기반 열차제어 시스템 표준사양 개정 시 새로운 표준으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

References

[1] IEEE Vehicular Technology Society, IEEE Standard for Communication Based Train Control (CBTC) Performance and Functional Requirements, IEEE Standards 1474.1, 2004.
 [2] IEEE Vehicular Technology Society, IEEE Recom-

mended Practice for Communication-Based Train Control (CBTC) System Design and Functional Allocations, IEEE Standards 1474.3, 2008.

[3] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Project Planning of Train-to-Train Collaboration based Intelligent Autonomous Train Control Technology Development, 2020.

[4] J. Farooq, & J. Soler, "Radio communication for communications-based train control (CBTC): A tutorial and survey." IEEE Communications Surveys & Tutorials, 19(3), 1377-1402, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2661384>

[5] N. Ali, "CBTC 2.0", Available From: <https://webinfo.uk/webdocssl/irse-kbase/ref-viewer.aspx?refno=1555109418&document=10%20naeem%20al%20-%20vehicle%20centric%20architecture%20and%20train%20to%20train%20communication.pdf> (accessed Nov. 4, 2023)

[6] S. Oh, Y. Cho, "Shared Resource Allocation Scheme and Interval Control Algorithm for the T2T-Based Autonomous Train Control System," The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences, 42(9), 1781-1791, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.7840/kics.2017.42.9.1781>

[7] H. Song, H. Liu, & E. Schnieder, "A train-centric communication-based new movement authority proposal for ETCS-2." IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 20(6), 2328-2338, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TITS.2018.2868179>

[8] J. Doppelbauer, "Command and Control 4.0". IRSE News, 246, 2018. Available From: <https://www.era.europa.eu/system/files/2022-10/Command%20and%20Control%204.0.pdf> (accessed Nov. 4, 2023)

[9] T. Chen, H. Wang, B. Ning, Y. Zhang, T. Tang, & K. Li, "Architecture design of a novel train-centric CBTC system." 2018 International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT) (pp. 1-5). IEEE, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1109/ICIRT.2018.8641603>

[10] T. Shen & H. Song, "A new movement authority based on vehicle-centric communication." Wireless Communications and Mobile Computing, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/7451361>

[11] KRS-SG-0069: Korean Radio Based Train Control System for Urban Rapid Transit. Available From: https://www.kric.go.kr/servlet/ContentDownloadServlet?type=pdf&object_id=0900271a80178407 (accessed Nov. 4, 2023)

[12] D. Wang, X. Chen, H. Huang, "A graph theory-based approach to route location in railway interlocking." Computers & Industrial Engineering, 66.4: 791-799, 2013.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2013.09.019>

[13] S. Busard, et al. "Verification of railway interlocking systems." arXiv preprint arXiv:1506.03554, 2015.

[14] T. Parkinson, I. Fisher, "Rail transit capacity (Vol. 13)". Transportation Research Board, 1996.

[15] S. Han, S. Lee, and W. Kim. "Development of onboard train automatic control system for Korean standard EMU." ISIE 2001. 2001 IEEE International Symposium on Industrial Electronics Proceedings (Cat. No. 01TH8570). Vol. 2. IEEE, 2001.
DOI: <https://10.1109/ISIE.2001.931660>

[16] KRS-06030 2001: Standards of Generating Interlocking Logic Diagram. Available From: <https://www.kr.or.kr/boardCnts/fileDown.do?fileSeq=b14d2597c6b54b6cfc29cc78ff8022b> (accessed Nov. 4, 2023)

오 세 찬(Sehchan Oh)

[정회원]



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

<관심분야>

열차제어, DTO/UTO 설계

김 영 주(Youngju Kim)

[정회원]



- 2004년 2월 : 연세대학교 대학원 전자공학과 (석사)
- 2010년 8월 : 연세대학교 대학원 전자공학과 (박사)
- 2010년 9월 ~ 2015년 3월 : 삼성 전자 책임연구원
- 2015년 3월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>

철도통신, 6G