

열차간 통신 기반 열차자율주행시스템을 위한 공유자원 분배방안과 간격제어 알고리즘

오 세 찬*, 조 영 중*

Shared Resource Allocation Scheme and Interval Control Algorithm for the T2T-Based Autonomous Train Control System

Sehchan Oh*, Young-Jong Cho*

요 약

본 논문은 열차간 통신기반 열차자율주행시스템을 위한 공유자원 분배방안과 선행열차의 상태를 이용한 간격제어 알고리즘을 제안한다. 열차간 통신기반 열차자율주행 환경에서 세마포어로 접근제어 되는 공유자원을 효율적으로 분배하기 위해 자원관리자(RM)를 정의하였고 이를 이용한 자원분배방안을 제시하였다. 열차간 직접적인 통신을 사용한 간격제어를 위해 선행열차의 best-case 제동거리에 기반한 worst-case 제동모델을 제안하였으며 이러한 제동모델에 기반한 최소안전간격과 최소운전시격을 제시하였다. 시뮬레이션을 통해 제안된 알고리즘의 성능을 기존 무선통신기반 열차제어(CBTC: Communication Based Train Control)와 비교함으로써 향상된 간격제어가 가능함을 확인하였으며 다양한 속도환경에서 통신지연과 제동시스템 지연에 따른 영향을 분석하였다. 본 논문에서 제시한 열차자율주행을 위한 공유자원 분배방안과 간격제어 알고리즘은 높은 간격제어효율과 기존의 지상설비들을 축소함으로써 구축비용 절감효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

Key Words : Autonomous train, interval control, train-to-train, shared resource allocation, best-case braking, worst-case braking, headway.

ABSTRACT

In this paper, we propose a shared resource allocation scheme and an interval control algorithm using the state of the preceding train for train-to-train communication-based autonomous system. For this, by defining a resource manager (RM) to efficiently distribute a shared resource with semaphore access control, we propose a resource allocation scheme using the RM in autonomous train environments. To control train interval using direct communications between two consecutive trains, a worst-case braking model based on the best-case braking distance of the preceding train is proposed, and minimum safe interval distance and minimum headway are derived using the braking model. Simulation results show that compared with the conventional CBTC, the proposed algorithm performs better, and the effects of communication delay and braking system delay are analyzed in various speed environments. The proposed shared resource allocation scheme and interval control algorithm in the autonomous train environment can be expected to provide high interval control efficiency and to reduce the construction cost by eliminating the existing many ground equipments.

※ 본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

• First Author : Korea Railroad Research Institute, Train control & Communication Research Team, soh@krii.re.kr, 정회원

* Ajou University, Computer Communications Lab. yjcho@ajou.ac.kr, 종신회원

논문번호 : KICS2017-08-215, Received August 9, 2017; Revised August 23, 2017; Accepted August 24, 2017

I. 서 론

열차제어시스템은 열차의 추돌과 충돌 그리고 탈선을 방지하기 위해 열차의 간격제어와 분기 및 진로제어를 수행하는 철도의 대표적인 안전설비이다. 궁극적으로 열차제어시스템의 목표는 안전을 확보하면서도 정해진 노선에 가능한 많은 수의 열차를 투입함으로써 승객의 수송량을 증대시키는 데 있다.

컴퓨터 및 통신기술의 발전과 함께 열차제어시스템은 지상/전기/하드웨어 중심에서 차상/통신/소프트웨어 중심으로 변화되고 있다.

현재 가장 진보된 열차제어시스템인 무선통신기반 열차제어시스템인 CBTC는 IEEE 표준으로 정의되어 있으며 지상의 Zone Controller(ZC)와 열차간 양방향 무선통신을 통해 높은 수송량을 제공한다⁵⁻⁸⁾. CBTC는 중앙의 ZC가 관할영역에 대한 선로자원을 분배하고 중앙의 EI (Electronic Interlocking)가 관할영역에 대한 선로전환기 자원을 분배한다. ZC는 관할영역 내 모든 열차의 위치와 EI로부터의 선로전환기 상태를 포함한 진로정보를 토대로 이동권한을 열차에 제공한다. 열차는 주기적으로 ZC에 자신의 위치를 보고하고, 수신한 이동권한 내에서 운행하도록 열차를 제어한다¹¹⁻¹⁴⁾.

하지만 CBTC는 ZC와 열차간 순환형태의 정보전송으로 인해 간격제어에 여전히 한계를 가지고 있다. 그림 1과 같이 선행열차 T1이 ZC에 자신의 현재위치 (a)를 전송(①)하고 후행열차 T2는 T1의 위치를 반영한 이동권한(②)을 ZC로부터 수신하며 다시 이동권한을 토대로 속도프로파일(③)을 계산하고 허용속도 내에서 열차를 제어한다. 하지만 T2가 T1의 위치를 수신한 시점에서 이동권한에 반영된 T1의 위치(a)는 T1의 현재위치(b)를 고려할 때 이미 과거의 위치이다. CBTC는 이러한 순환형태의 제어구조로 인해 사용된 자원을 즉시 반환할 수 없기 때문에 자원을 효율적으로 이용하는데 있어서 한계가 있다. 더욱이 선행열차의 속도와 관계없이 위치만을 고려하기 때문에 간격제어에 있어서 비효율적인 간격이 발생한다^{13,4, 11,12)}.

본 논문은 ZC와 같은 중앙의 제어시스템 없이 열차간 직접통신을 통해 안전한 간격을 제어하는 열차 자율주행시스템 (ATCS: Autonomous Train Control System)과 열차자율주행 환경에서 선로와 선로전환기와 같은 다수의 열차가 공유하게 되는 자원의 효율적인 분배방안을 제안한다. 또한 ATCS를 위한 위치와 속도기반의 향상된 간격제어 알고리즘을 제안한다. 제

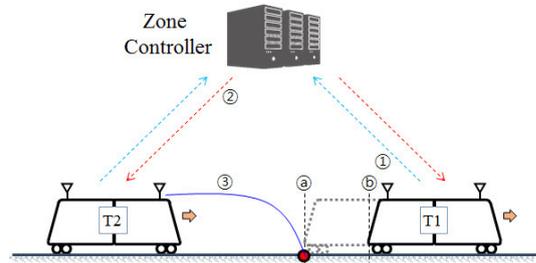


그림 1. CBTC의 간격제어 한계
Fig. 1. Interval control limits of the CBTC

안된 위치와 속도기반의 간격제어 알고리즘은 선행열차의 best-case 제동거리에 기반한 worst-case 제동거리를 추정하여 계산한다. 이를 위해 선행열차 및 후행열차의 제동모델을 설계한다. 시뮬레이션을 통해 제안된 간격제어 알고리즘과 기존의 CBTC 간격제어 알고리즘과 비교하여 최소운전시각 성능을 분석한다.

II. T2T 기반 열차자율주행시스템

본 절에서는 ATCS의 시스템 구성과 공유자원 분배방안을 기술한다.

2.1 시스템 구성

그림 2와 같이 ATCS는 크게 차상시스템과 지상시스템으로 구분된다. 차상시스템은 LTE-R^{19,10)}을 비롯하여 T2T를 지원하는 무선통신장치와 Autonomous Train Operation (ATO), Autonomous Train Protection (ATP), 이동거리와 속도 측정을 위한

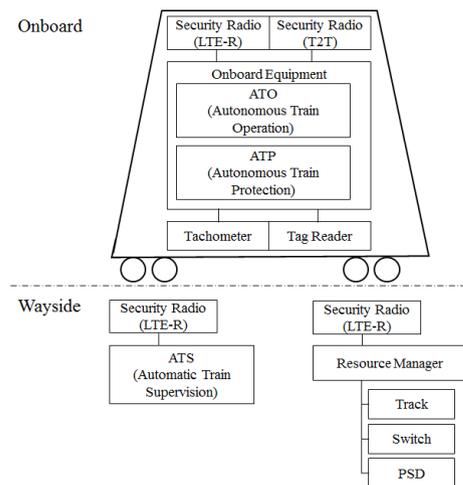


그림 2. T2T 기반 ATCS 시스템 구성
Fig. 2. System configuration of the T2T-based ATCS

Tachometer와 위치보정을 위한 Tag Reader로 구성된다. 지상시스템은 관제 Automatic Train Supervision (ATS)과 노선의 모든 공유자원을 관리하는 Resource Manager (RM)으로 구성된다.

ATCS는 기존의 CBTC의 ZC에서 수행하던 이동권한의 생성과 EI에서 수행하던 선로전환기의 제어와 진로 생성 기능을 차상시스템 ATP에서 수행하게 된다. 선행열차와 직접적인 통신으로 위치와 속도 정보를 수신하고 RM으로부터 자원 점유현황을 참조하여 계산된 속도프로파일을 기반으로 열차의 이동권한을 결정하고 선행열차와의 안전한 간격을 제어한다. 이 밖에도 RM을 통해 자신의 이동경로에 맞게 선로전환기를 제어하고 승강장 PSD (Platform Screen Door)를 제어하는 기능을 수행한다.

2.2 공유자원 분배방안

열차제어에 있어서 선로구간과 선로전환기는 대표적인 공유자원이며 동시에 두 대 이상의 열차가 점유하지 않도록 방호해야하는 세마포어 영역이다. 세마포어 영역은 공유자원에 대한 접근을 상호 배타적으로 허용하는 영역을 의미한다. 열차의 추돌과 충돌이 일어나지 않도록 하기 위해서는 반드시 이러한 공유자원이 하나의 소유주체에 할당되어야 한다. 한편 자원을 효율적으로 활용하기 위해서는 사용된 자원을 즉시 반납하여야 한다.

표 1과 같이 ATCS는 자원의 소유와 제어를 구분하여 정의한다. ATCS에서 소유주체는 자신이 소유한 자원에 한하여 제어할 수 있다. 선로구간에 대한 제어는 방호구간과 임시제한속도 설정과 해제이며 선로전환기에 대한 제어는 정위 또는 반위방향으로의 전환, 그리고 PSD 제어의 경우 열림 또는 닫힘이다.

ATCS에서 자원의 소유주체는 열차 또는 ATS 관제가 될 수 있다. RM은 노선의 모든 자원에 대한 DB를 가지고 있으며 점유정보와 자원 상태정보를 기록한다. 그림 3과 같이 두 대의 열차가 주행 중인 경우 RM을 이용하여 세마포어 영역으로 접근제어 되는 공

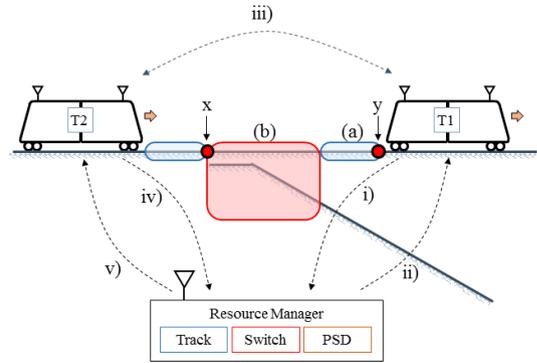


그림. 3. ATCS를 위한 공유자원 분배방안
Fig. 3. Shared resource allocation scheme for the ATCS

유자원을 관리하기 위한 분배방안은 다음과 같다.

- i. T1 열차는 사용된 선로구간에 대한 자원 (a)를 RM에 반납한다.
- ii. RM은 선로자원 (a)의 소유자가 T1임을 확인한 후 반납이 정상적으로 이루어졌음을 알린다.
- iii. T2 열차는 T1열차와의 통신과 RM의 자원현황을 토대로 현재 이동권한 x에서 자신의 다음 이동권한 y를 계산한다.
- iv. T2 열차는 RM에 이동권한 y로 갱신하기 위해 필요한 자원인 선로구간 (a)와 선로전환기를 포함한 제어영역 (b)를 요청한다.
- v. RM은 요청된 자원이 타 소유주체에 의해 점유되지 않았음을 확인한 후 T2에게 해당 자원에 대한 권한을 제공한다.

ATCS에서 RM은 점유된 자원에 대한 요청을 거절하며 점유되지 않은 자원에 대한 요청은 거절하지 않는다. 만약 RM으로 동시에 같은 자원에 대해 요청이 있는 경우 하나의 요청에 대해서만 자원 제어 권한을 부여한다. RM은 자원 소유자를 기록하며 자원 반환의 경우 소유자로부터의 반환만을 허용한다.

III. T2T 기반 열차간격제어

본 절에서는 T2T 기반 열차간격제어를 위한 열차제동 모델과 위치와 속도기반 간격제어 알고리즘을 기술한다.

3.1 열차제동 모델

ATCS는 선행열차의 상태를 이용한 간격제어를 수행하기 때문에 best-case와 worst-case 제동모델을 모두 사용한다. 그림 4는 ATCS의 제동모델을 보여준다.

표 1. ATCS의 자원과 제어
Table 1. ATCS Resources and control

resources	possession	control
track	lock/release	set/reset of protection zone and temporary speed restriction
switch	lock/release	normal/reverse
PSD	lock/release	open/close

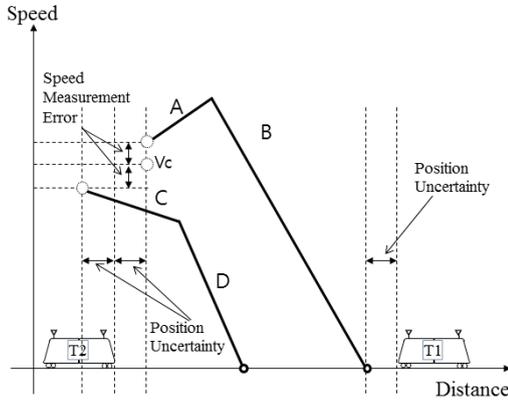


그림 4. ATCS의 제동모델: (A-B) worst-case, (C-D) best-case 제동모델
 Fig. 4. Braking models of the ATCS: (A-B) worst-case, (C-D) best-case braking models

열차 T2는 현재 속도 V_c 로 이동하고 있을 때 T2의 worst-case 제동모델은 그래프 A와 B 구간에 해당된다. A 구간은 V_c 에 속도오차를 더한 시점에서 열차제어시스템 반응시간, 열차의 추진을 차단하는 시간, 제동시스템 반응시간 그리고 worst-case에 해당하는 GEBR (Guaranteed Emergency Braking Rate)이 출력되기 전까지 모든 지연시간 동안 열차는 최대 가속을 하고 있다는 가정을 한다. B 구간은 열차가 정지할 때까지 GEBR로 정차한다고 가정한다. 반면 열차 T2의 best-case의 제동모델은 그래프 C와 D 구간에 해당된다. C 구간은 거리상으로는 위치오차 만큼 열차가 덜 이동하며 V_c 에 속도오차를 뺀 시점에서 best-case에 해당하는 GEBR이 출력되기 전까지 모든 시간동안 열차는 최대 감속을 하고 있다는 가정을 한다. D 구간은 열차가 정지할 때까지 GEBR로 정차한다고 가정한다.

열차 제동시스템이 GEBR을 출력하기까지 지연시간은 그림 5와 같이 모델링하여 정의한다. 실제 제동력 투입커브는 (a)와 같은 형태를 가지며 제동명령지연시간(T_d)와 제동요구가 시작될 때부터 요구제동감속도의 10%에 도달 될 때까지의 제동지연시간(T_d), 제동요구가 시작될 때부터 요구제동감속도의 90%에 도달 될 때까지의 제동반응시간(T_r), 요구제동감속도의 10%에 도달하는 시간부터 90%에 도달될 때까지의 제동구축시간(T_b)으로 제동시스템 특성을 표현할 수 있다.

실제 제동력 투입커브를 이용하여 worst-case에 기반 한 열차의 안전제동거리를 구하는 것은 불가능하다. 따라서 등가제동지연시간(T_e)를 이용한다. T_e 는

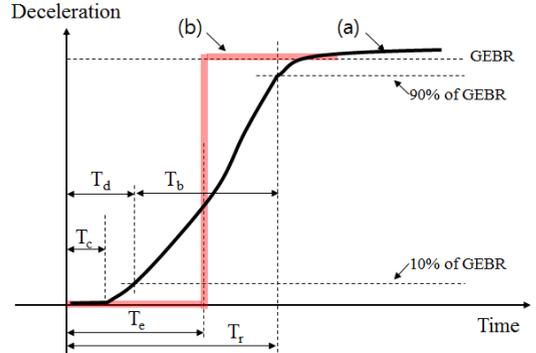


그림 5. 제동시스템의 GEBR 지연시간과 제동거리계산을 위한 등가제동지연시간
 Fig. 5. GEBR response time of braking system and equivalent response time to calculate braking distance

다음 식 (1)과 같이 계산할 수 있다.

$$T_e = T_d + (T_r - T_d)/2 \quad (1)$$

열차제어를 위한 제동력 커브는 (b)와 같이 모델링이 가능하다.

3.2 위치와 속도기반 간격제어

ATCS는 간격제어의 효율을 높이기 위해 선행열차의 위치와 속도를 함께 이용한다. 선행열차의 속도를 후행열차가 가공하여 이용하는 방법은 속도의 오차와 통신지연 그리고 주행하는 구간에서의 구배의 상이함으로 인해 worst-case를 입증하기 어렵다^{11,12}. 따라서 본 연구에서는 선행열차의 best-case에 해당하는 제동거리를 기반으로 후행열차가 자신의 worst-case에 반영한다.

그림 6(a)는 CBTC의 간격제어 원리를 보여준다. 후행열차 T2는 선행열차 T1의 속도와 관계없이 위치만을 이용하여 이동권한을 생성하고 절대로 넘지 않도록 worst-case 제동거리를 기반으로 속도프로파일을 생성하여 제어한다. 반면 그림 6(b)는 ATCS의 간격제어 원리를 보여준다. 선행열차 T1은 자신의 위치와 함께 현재속도에 기반으로 best-case 제동거리를 계산하여 후행열차 T2에 제공한다. T2의 이동권한은 수신된 T1의 best-case 제동거리만큼 앞으로 이동할 수 있다.

이때 T2의 이동권한 MA1은 T1의 점유구간으로 이동하게 되므로 앞서 기술한 공유자원 분배방법에 어긋나게 된다. 왜냐하면 T1 역시 해당 구간을 사용중이므로 아직 RM에 반납하지 않은 상태이다. 따라서 T2의 이동권한은 거리와 속도를 가지는 이동권한

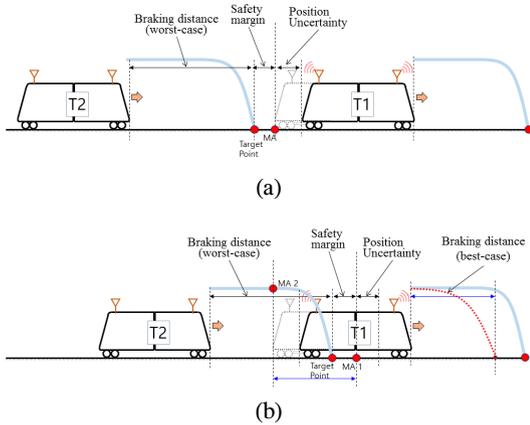


그림 6. CBTC와 ATCS의 간격제어방법, (a) CBTC의 간격 제어, (b) ATCS의 간격제어
 Fig. 6. Interval control schemes of the CBTC and ATCS, (a) Interval control of the CBTC, (b) Interval control of the ATCS

MA2로 표현한다.

열차제어시스템의 성능은 최소운전시격으로 표현할 수 있다^[1,5-8]. 최소운전시격은 후행열차가 감속 없이 최대한 선행열차와 근접한 시점에서 선행열차와 후행열차 사이 거리를 시간으로 표현한다.

그림 6(b)에서 선행열차의 best-case에 해당하는 제동거리는 식 (2)와 같이 계산할 수 있다.

$$BD_{PBC} = D_{PC} + D_{PD} - D_{PPUA} \quad (2)$$

여기서 D_{PC} 는 선행열차의 GEBR 출력 전까지 열차의 이동거리, D_{PD} 는 선행열차의 GEBR 출력 이후 정차 시까지 이동거리, D_{PPUA} 는 선행열차의 전두부 위치불확실성 값을 의미한다.

D_{PC} 와 D_{PD} 는 식 (3) 및 식 (4)와 같이 표현이 가능하다.

$$D_{PC} = \frac{(V_P - V_{Perr})^2}{2(d_{PFBS} + R_{PG})} - \frac{(V_P - V_{Perr} - d_{PFBS}(T_{cPFBS} + T_{MinTD}))^2}{2(d_{PFBS} + R_{PG})} \quad (3)$$

$$D_{PD} = \frac{(V_P - V_{Perr} - d_{PFBS}(T_{cGEBR} + T_{MinTD}))^2}{2(d_{PGEBRbest} + R_{PG})} \quad (4)$$

여기서 V_P 는 선행열차 속도, V_{Perr} 는 선행열차 속도오차, T_{MinTD} 는 선행열차의 열차제어시스템 최소지연시간, T_{cPFBS} 는 선행열차의 최대상용제동에 대한 등

가제동지연시간, d_{PFBS} 는 선행열차의 최대상용제동 감속도, R_{PG} 는 구배저항, T_{cPGEBR} 은 선행열차의 GEBR에 대한 등가제동지연시간, $d_{PGEBRbest}$ 는 선행열차의 best-case에 해당하는 GEBR을 의미한다.

후행열차의 worst-case에 해당하는 제동거리는 식 (5)와 같이 표현이 가능하다.

$$BD_{FWC} = D_{FA} + D_{FB} + D_{FPUA} \quad (5)$$

여기서 D_{FA} 는 후행열차의 GEBR 출력 전까지 열차의 이동거리, D_{FB} 는 후행열차의 GEBR 출력 이후 정차 시까지 이동거리, D_{FPUA} 는 후행열차의 전두부 위치불확실성 값을 의미한다.

D_{FA} 와 D_{FB} 는 다시 식 (6) 및 식 (7)과 같이 표현이 가능하다.

$$D_{FA} = \frac{(V_F + V_{Ferr} + a_{FFA}(T_{cFFSB} + T_{MaxTD}))^2}{2(a_{FFA} - R_{FG})} - \frac{(V_F + V_{Ferr})^2}{2(a_{FFA} - R_{FG})} \quad (6)$$

$$D_{FB} = \frac{(V_F + V_{Ferr} + a_{FFA}(T_{cFGEBR} + T_{MaxTD}))^2}{2(d_{FGEBRworst} - R_{FG})} \quad (7)$$

여기서 V_F 는 후행열차 속도, V_{Ferr} 는 후행열차 속도오차, T_{MaxTD} 는 후행열차의 열차제어시스템 최대지연시간, a_{FFA} 는 후행열차의 최대가속도, S_{PG} 는 선행열차가 주행하는 선로의 구배 값, α_p 는 선행열차의 관성계수, δ_p 는 선행열차의 가속도 단위환산계수, T_{cFFSB} 는 후행열차의 최대상용제동에 대한 등가제동지연시간, d_{FFSB} 는 후행열차의 최대상용제동 감속도, T_{cFGEBR} 은 후행열차의 GEBR에 대한 등가제동지연시간, $d_{FGEBRworst}$ 는 후행열차의 worst-case에 해당하는 GEBR을 의미한다.

선행열차의 구배저항 R_{PG} (후행열차의 구배저항 R_{FG})는 해당 선로의 구배 값으로 표현이 가능하며 식 (8)과 같다.

$$R_{PG} = \frac{S_{PG}}{\delta_p(1 + \alpha_p)} \quad (8)$$

여기서 $S_{PG}(S_{FG})$ 는 선행열차(후행열차)가 주행하는 선로의 구배 값, $\alpha_p(\alpha_F)$ 는 선행열차(후행열차)의 관성계수, $\delta_p(\delta_F)$ 는 선행열차(후행열차)의 가속도 단위환

산계수이다.

따라서 후행열차와 선행열차의 최소 격은 후행열차의 worst-case 제동거리에 선행열차의 best-case 제동거리 만큼을 제외한 값이며 식 (9)와 같이 정리할 수 있다.

$$BD_{ITV} = BD_{FWC} - BD_{PBC} \quad (9)$$

하지만 실제로 선행열차가 자신의 best-case에 해당하는 제동거리를 후행열차에게 전송할 때 안전 측으로 전송지연 만큼 제동을 수행중인 것으로 간주해야 한다. 또한 열차의 슬립/슬라이드를 고려하여 제동거리에 추가적인 거리를 반영하여야 한다. 열차간 통신 지연 시간과 슬립/슬라이드를 고려한 최소간격은 식 (10)과 같다.

$$BD_{ITV} = \frac{(V_p + V_{Ferr} + a_{FFA}(T_{eFFSB} + T_{MaxTD}))^2}{2(a_{FFA} - \frac{S_{FG}}{\delta_p(1+\alpha_p)})} - \frac{(V_p + V_{Ferr})^2}{2(a_{FFA} - \frac{S_{FG}}{\delta_p(1+\alpha_p)})} - \frac{(V_p - V_{Ferr})^2}{2(Kd_{PFSB} + \frac{S_{FG}}{\delta_p(1+\alpha_p)})} + \frac{(V_p + V_{Ferr} - a_{FFA}(T_{eFFSB} + T_{MaxTD}))^2}{2(d_{FGEBBworst} + \frac{S_{FG}}{\delta_p(1+\alpha_p)})} + \frac{(V_p - V_{Ferr} - Kd_{PFSB}T_{CD} - Kd_{PFSB}(T_{ePFSB} + T_{MinTD}))^2}{2(d_{PFSB}K + \frac{S_{FG}}{\delta_p(1+\alpha_p)})} - (V_p - V_{Ferr} - Kd_{PFSB}T_{CD} - Kd_{PFSB}(T_{ePFSB} + T_{MinTD})) \quad (10)$$

여기서 K 는 제동효율 값, T_{CD} 는 통신지연시간을 의미한다.

노선에 주행 중인 두 열차의 역간 운전시격은 후행열차가 선행열차로 인한 감속 없이 최대한 근접한 상태에서 선행열차의 전두부 위치에서 시작하여 후행열차의 전두부가 해당위치에 도달할 때까지의 시간을 의미한다.

후행열차와 선행열차 간 최소간격을 이용하여 노선에 주행 중인 두 열차의 최소 역간 운전시격은 식 (11)과 같이 계산할 수 있다.

$$T_{MLH} = \frac{D_{TL} + BD_{ITV} + D_{PPUB}}{V_L} \quad (11)$$

여기서 D_{TL} 은 열차의 길이, D_{PPUB} 는 선행열차 후미부 위치불확실성 값, V_L 은 노선의 속도를 의미한다.

한편 일반적으로 최소 역 운전시격은 정차 중인 선

행열차가 역 출발을 하는 시점에 후행열차가 감속 없이 최대한 접근한 상태에서 선행열차가 역 플랫폼을 완전히 비우는데 걸리는 시간과 후행열차가 역에 정차하여 승객의 승하차를 마치고 역을 출발하기 전까지의 시간을 의미한다.

선행열차가 역 플랫폼을 비우는데 걸리는 시간은 식 (12)와 같다.

$$T_{CP} = \sqrt{\frac{2(D_{TL} + D_{FTD})}{\alpha_p}} \quad (12)$$

여기서 D_{FTD} 는 역에 정차중인 열차의 전두부로부터 역 플랫폼 구간 블록의 중점까지의 거리를 의미한다.

하지만 선행열차가 역 플랫폼을 완전히 비우는데 걸리는 시간은 기존 CBTC의 역 구내의 선로전환기 제어방식의 한계로 인한 것으로써 제한된 공유자원 분배 방식을 사용하는 ATCS에서는 고려하지 않는다^[13-15]. 따라서 제안하는 최소 역 운전시격은 선행열차의 역 출발과 동시에 후행열차는 역에 정차 점에 정차하기 위해 주행할 때의 시간 차이로 정의한다. 최소 역 운전시격은 열차의 속도가 0이 될 때까지 변화하는 속도에 대한 주행시간이며 식 (13)과 같이 계산할 수 있다.

$$T_{MSH} = \frac{D_{TL} + BD_{ITV} + D_{PPUB}}{V_{AP}} + T_{DWELL} \quad (13)$$

여기서 $\overrightarrow{V_{AP}}$ 는 열차가 역 진입에 따라 감속하는 역 진입속도 벡터, T_{DWELL} 은 역 정차시간을 의미한다.

IV. 실험 및 분석

본 절에서는 제안된 간격제어 알고리즘의 성능을 기존의 CBTC와 비교분석을 위해 Matlab을 이용하여 시뮬레이션 한다.

4.1 실험 환경

표 2는 시뮬레이션에서 사용된 파라미터이다. 본 실험에 사용된 열차의 가감속 성능은 도시철도 표준 전동차에 준하여 정의한다^[6]. 또한 열차제어시스템의 일반적인 반응시간과 주행거리계 오차로 인한 위치불확실성 값, 속도계 오차 값은 CBTC 표준에서 제시한 값을 적용한다^[2]. 열차간 직접적인 통신지연시간은 100ms로 가정한다. 하지만 시뮬레이션 상에서는 통신

표 2. 시뮬레이션 파라미터
Table 2. Simulation Parameters

Term	Value	Unit
train length (D_{TL})	200	m
maximum line speed(V_L)	80	km/h
maximum train speed(V_F, V_P)	100	km/h
maximum station approach speed(V_{AP})	80	km/h
coefficient of inertia (α_F, α_P)	0.09	-
acceleration unit conversion value (δ)	28.35	-
gradient(S)	0	%
acceleration rate (a_{FFA})	3.0	km/h/s
service brake deceleration rate (d_{PFSD}, d_{FFSB})	3.5	km/h/s
GEBC for best-case ($d_{FGEBC_{best}}, d_{PGEBC_{best}}$)	5.0	km/h/s
GEBC for worst-case ($d_{FGEBC_{worst}}$)	4.5	km/h/s
equivalent braking response time for service brake (T_{cFFSB})	1.5	sec
equivalent braking response time for emergency brake (T_{cFGEBC})	1.3	sec
minimum TCS delay ($T_{MinTcsDelay}$)	0.2	sec
maximum TCS delay ($T_{MaxTcsDelay}$)	0.75	sec
T2T communication delay ($T_{ComDelay}$)	0.1	sec
cyclic communication delay	2.5	sec
position uncertainty (D_{PPUA}, D_{FPUA})	± 6.25	m
distance from the front of train to end of station platform block (D_{FID})	10	m
speed sensor error (V_{Ferr}, V_{Ferr})	± 2	km/h
braking efficiency(κ)	75	%
station dwell time (T_{DWELL})	30	sec

두절시 비상제동 체결기준을 연속 3회 미수신시로 가정하여 정의한다. 시뮬레이션은 두 열차 모두 평탄한 선로를 주행하고 있다는 가정 하에 수행한다.

4.2 실험 결과

제안하는 열차 간격제어 알고리즘의 성능을 기존의 방안과 비교한다.

그림 7은 후행열차의 주행속도와 선행열차의 운행 속도 변화에 따른 두 열차 사이의 최소안전간격을 CBTC와 비교한 결과 이다. 선행열차의 속도를 최소 10km/h인 경우부터 최대 80km/h인 경우에 대해 후행 열차의 주행속도에 따른 최소 안전간격을 시뮬레이션 한다.

CBTC의 경우 최소 안전간격이 주행속도 80km/h에서는 약 440m까지 늘어나는 반면 ATCS는 주행속

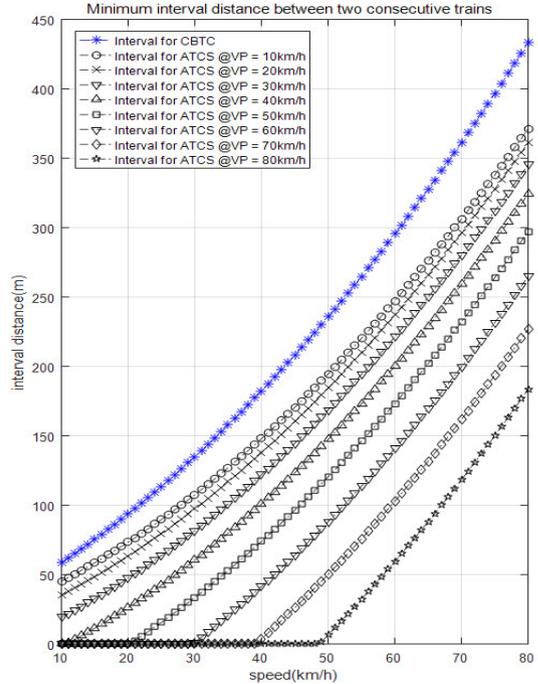


그림 7. 두 열차의 최소 안전간격
Fig. 7. Minimum safe interval distance between two consecutive trains

도 80km/h에서 선행열차의 속도에 따라 약 180m 정도로 간격을 가짐을 확인할 수 있다. ATCS의 경우 선행열차의 속도에 영향을 받게 되므로 선행열차의 속도가 높을수록 최소 안전간격이 줄어들고 있음을 확인할 수 있다.

그림 8은 그림 7의 최소안전간격을 이용한 최소 역간 운전시격을 CBTC와 비교한 결과 이다. 최소 역간 운전시격은 CBTC의 경우 약 28.5초이며 ATCS의 경우 선행열차의 속도에 따라 최소 약 15초부터 최대 약 26초까지 변화됨을 확인할 수 있다. ATCS의 최소 역간 운전시격은 선행열차의 속도정보를 이용하기 때문에 선행열차의 속도가 높을수록 높은 효율을 가짐을 확인할 수 있다.

제시한 알고리즘은 선행열차의 속도를 간격제어에 활용하기 때문에 고속의 환경에서 더욱더 높은 효율을 얻을 수 있다.

그림 9는 열차의 속도를 300km/h까지 증속했을 경우 필요한 안전간격의 변화를 나타낸다. 기존의 CBTC의 경우 열차의 속도가 300km/h인 경우 약 3.3km인데 반해 제안된 알고리즘은 선행열차의 속도에 따라 최소 600m 정도까지 단축할 수 있음을 보여 준다.

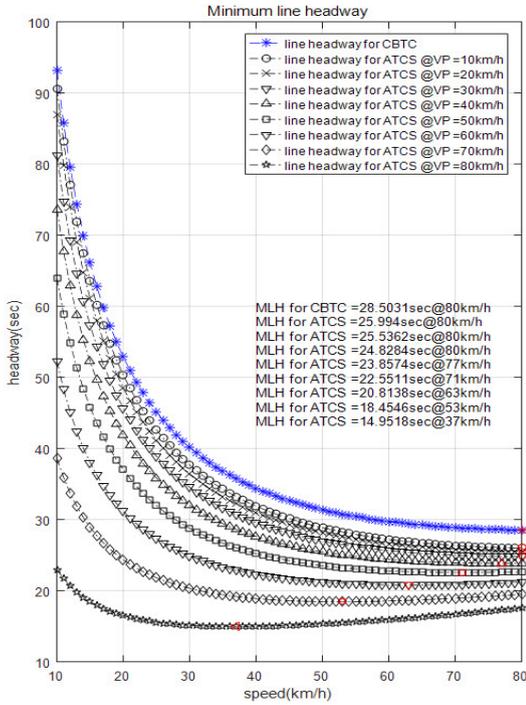


그림 8. 두 열차의 최소 역간 운전시격
 Fig. 8. Minimum line headway between two consecutive trains

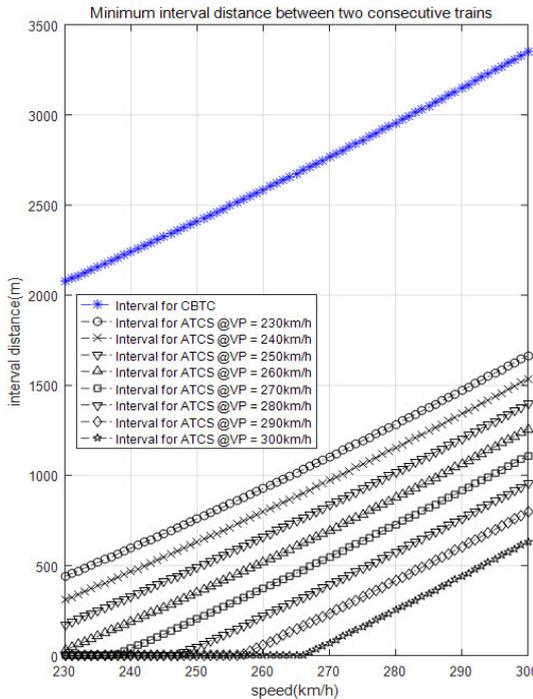


그림 9. 고속 환경에서의 두 열차의 최소 안전간격
 Fig. 9. Minimum safe interval distance between two consecutive trains in a high-speed environment

그림 10은 최소 역 운전시격에 대한 시뮬레이션 결과이다. CBTC의 경우 선행열차가 역을 비우는데 가지 소요되는 시간이 약 22초임을 감안할 때 최소 역 운전시격이 역 진입속도 52km/h에서 약 93초임을 확인할 수 있다. 반면 ATCS의 경우 선행열차의 역 진출과 후행열차의 진입이 동시에 이루어지므로 선행열차의 속도정보를 이용한 역 접근이 가능하다.

선행열차의 역 출발 속도를 최소 15km/h에서 최대 65km/h까지 단계적으로 변화시키면서 최소 역 운전시격을 시뮬레이션 한 결과 선행열차의 속도가 15km/h 인 경우 후행열차의 역 진입속도 52km/h에서 최소 약 68초이며 선행열차의 속도가 65km/h인 경우 후행열차의 역 진입속도 35km/h에서 최대 약 58초까지 변화됨을 확인할 수 있다.

ATCS의 열차 투입 스케줄을 설계할 때 최소 역 운전시격을 고려하여 후행열차의 역 진입시점을 선행열차가 충분한 속도로 역을 빠져나오는 순간에 맞춰서 열차의 투입시점을 결정하게 된다면 더 높은 수송량 증대 효과를 기대할 수 있다.

ATCS는 열차간 직접적인 통신기반으로 간격제어가 이루어지며 통신지연시간(T_{cd})에 따라 간격제어 성능에 영향을 받게 된다. 이러한 영향력 분석을 위해

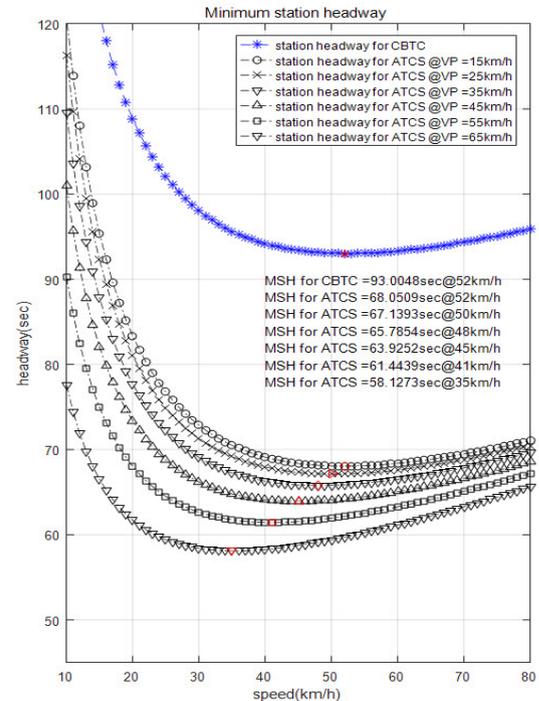


그림 10. 두 열차의 최소 역 운전시격
 Fig. 10. Minimum station headway between two consecutive trains

통신지연시간의 변화에 따라 최소안전간격과 운전시각의 변화를 시뮬레이션 한다.

그림 11과 그림 12는 선행열차와 후행열차가 같은 속도로 주행하고 있을 경우 열차간 통신지연시간을 0초에서 최대 5초까지 단계적으로 변화시킬 때 최소안전간격의 변화와 최소 역간 운전시각의 변화를 시뮬레이션 한 결과이다.

선행열차와 후행열차 모두 20km/h와 80km/h로 주행하는 시뮬레이션 결과를 비교해 보면 통신지연이 없는 경우 최소 안전간격은 약 60m와 180m이며 최소 역간 운전시각은 약 48초와 17초인 반면, 통신지연이 5초가 발생된 경우 최소 안전간격은 약 80m와 320m이며 최소 역 운전시각은 약 52초와 27초까지 증가하게 됨을 볼 수 있다.

결과적으로 열차의 속도가 저속에서 보다는 고속에서 통신지연에 대한 영향이 크다는 것을 확인 할 수 있다.

그림 13과 그림 14는 선행열차와 후행열차가 같은 속도로 주행하고 있을 경우 열차의 제동시스템 지연에 의한 최소안전간격의 변화와 최소 역간 운전시각의 변화를 보여준다.

등가제동지연시간 (T_{cFFSB} , T_{cPGEBR})을 0.5초에서 5초

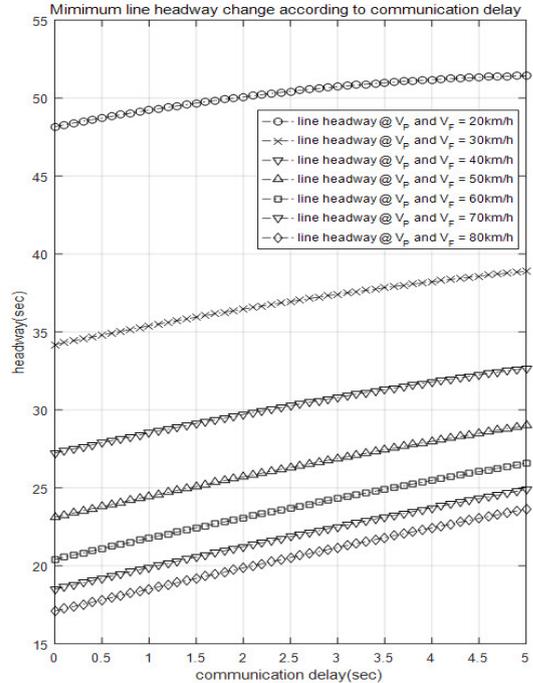


그림 12. 열차간 통신지연에 따른 ATCS의 역간 운전시각 변화
Fig. 12. ATCS line headway change versus train-to-train communication delay

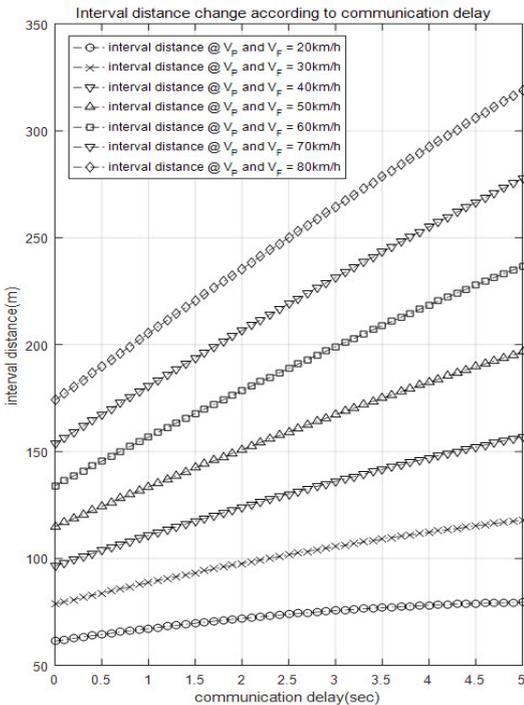


그림 11. 열차간 통신지연에 따른 ATCS의 안전간격 변화
Fig. 11. ATCS safe interval distance change versus train-to-train communication delay

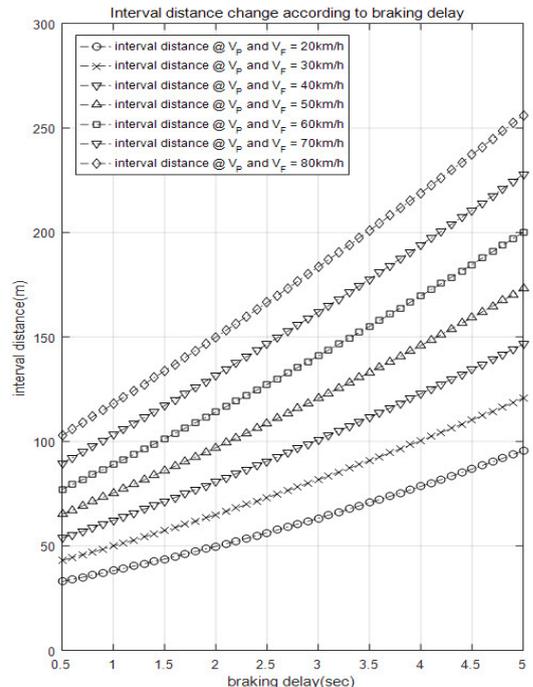


그림 13. 제동지연에 따른 ATCS의 안전간격 변화
Fig. 13. ATCS safe interval distance change versus braking delay

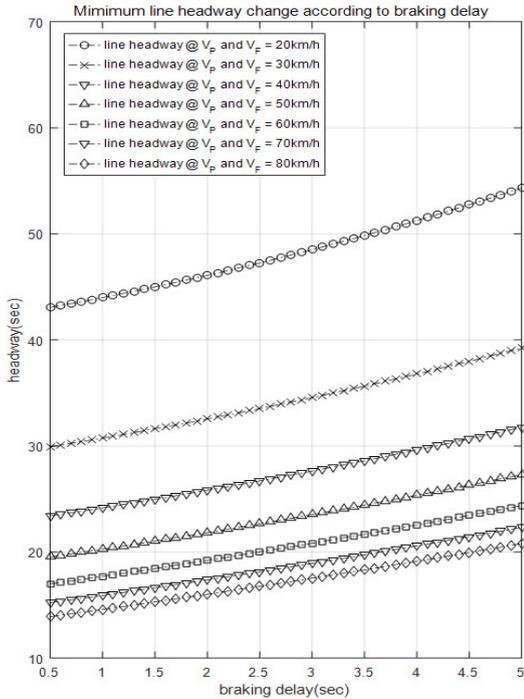


그림 14. 제동지연에 따른 ATCS 역간 운전시각의 변화
 Fig. 14. ATCS line headway change versus braking delay

까지 단계적으로 변화시키면서 간격제어 성능에 미치는 영향을 시뮬레이션 한 결과 통신지연에 대한 시뮬레이션과 마찬가지로 열차의 속도가 저속에서 보다는 고속에서 제동시스템 지연에 대한 영향이 크다는 것을 확인할 수 있다.

선행열차와 후행열차 모두 20km/h와 80km/h로 주행하는 시뮬레이션 결과를 비교해 보면 제동시스템 등가제동지연이 0.5초인 경우 최소 안전간격은 약 30m와 100m이며 최소 역간운전시각은 약 14초와 43초인 반면, 제동시스템 등가제동지연이 5초인 경우 최소 안전간격은 약 90m와 260m이며 최소 역간 운전시각은 약 20초와 55초까지 증가하게 됨을 볼 수 있다. 열차가 저속인 경우 제동시스템의 지연에 따라 약 6초정도의 시각의 차이가 발생하지만 고속인 경우 약 12초까지 시각의 차이가 발생된다.

V. 결론

본 논문에서는 열차간 통신기반 열차자율주행시스템을 위한 공유자원 분배방안과 선행열차의 상태를 이용한 간격제어 알고리즘을 제안하였다.

열차간 통신기반의 열차자율주행 환경에서 세마포

어로 접근제어되는 공유자원을 효율적으로 분배하기 위해 RM을 새롭게 정의하였으며 RM을 통한 자원분배방안을 제시하였다. 열차간 직접적인 통신을 기반으로 선행열차의 위치와 속도를 이용하기 위해 선행열차의 best-case 제동모델에 기반한 worst-case 제동모델을 새롭게 정의하였으며 이러한 제동모델을 적용하여 최소안전간격과 운전시각을 제시하였다. 제안된 알고리즘의 성능을 분석하기 위해 기존 CBTC와 비교하였다. 시뮬레이션을 통해 제안된 간격제어 방법은 기존의 CBTC와 비교하여 우수한 성능을 보여주고 있음을 확인하였으며 다양한 속도환경에서 통신지연과 제동시스템 지연에 따른 영향을 확인하였다.

향후 시스템 설계 활동을 수행하면서 현재는 존재하지 않는 장치인 RM과 열차간 직접적인 통신체계에 대한 상세설계와 함께 여러 분기상황을 반영한 간격제어 알고리즘에 대한 추가적인 연구를 진행할 계획이다.

References

- [1] T. Parkinson and I. Fisher, *Rail transit capacity*, vol. 13, Transportation Research Board, 1996.
- [2] IEEE Std. 1474.1, *IEEE Standard for Communication-Based Train Control (CBTC) Performance and Functional Requirements*, 2004.
- [3] IEEE Std. 1474.3, *IEEE Recommended Practice for Communication-Based Train Control (CBTC) System Design and Functional Allocations*, 2008.
- [4] S. Oh, Y. Yoon, M. Kim, and Y. Kim, "ATP functional allocation for Korean radio based train control system," *IEEE ICCAS*, pp. 1157-1160, 2012.
- [5] R. W. Chen and J. Guo, "Development of the new CBTC system simulation and performance analysis," *WIT Trans. The Built Environ.*, vol. 114, pp. 497-507, 2010.
- [6] R. Chen, C. Zhu, and L. Liu, "Calculation and optimization of train headway in CBTC system," *J. Southwest Jiaotong University*, Apr. 2011.
- [7] L. Dongsheng and X. Yi, "Analysis of train minimum headway and realization of

simulation algorithm under CBTC train control mode,” *Modern Urban Transit*, Apr. 2011.

- [8] C. He and T. Yang, “Comparison of headways in moving block and fallback modes for CBTC system,” *J. Southwest Jiaotong University*, Mar. 2012.
- [9] S. H. Cho, et al., “Establishing the methodology of economic analysis to take into account opportunistic valuation for a radio communication & train control system,” *J. Korean Soc. for Railway*, vol. 19, no. 3, 2016.
- [10] D. K. Park, S. Y. Lee, B. Yoon, and Y. K. Kim, “Proposal of wireless communication method and candidate frequency band for constructing the integrated radio networks for railroads,” *J. Korean Soc. for Railway*, vol. 16, no. 6, 2013.
- [11] S. Oh, K. Kim, S. H. Lee, J. Y. Kim, and Z. H. Quan, “Headway calculation and train control algorithm for performance improvement in radio based train control system,” *J. Korea Academia-Industrial Cooperation Soc.*, vol. 16, no. 10, 2015.
- [12] S. Oh, K. Kim, and H. Choi, “Train interval control and train-centric distributed interlocking algorithm for autonomous train driving control system,” *J. Korea Academia-Industrial Cooperation Soc.*, vol. 17, no. 11, 2016.
- [13] S. Ryou, Y. Lho, S. Oh, S. Lee, and D. Park, “A study on interface between switch machine and axle counter and switch locking for operation of driverless train safety protection in shinbundang line,” *Conf. Korean Soc. for Railway*, 2013.
- [14] H. H. Kim, C. S. Yang, and Y. G. Cho, “A study on the mixed usage of logical block and moving block in CBTC system,” *Conf. Korean Soc. for Railway*, pp. 2726-2730, 2011.
- [15] S. H. Chang, K. S. Yoo, C. W. Han, and Y. S. Lee, “Automation program for drawing and examination of locking sheet,” *Conf. Korean Soc. for Railway*, pp. 1285-1293, 2008.
- [16] *Urban Rail Vehicle Standard Specification*,

Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2013.

오 세 찬 (Sehchan Oh)



2004년 8월 : 광주과학기술원
정보통신공학과 석사
2013년 3월~현재 : 아주대학교
컴퓨터 공학 박사과정
2004년 11월~현재 : 한국철도기
술연구원 선임연구원
<관심분야> 무선통신기반 열차
제어, UTO/DTO 설계, 시스템 모듈화 설계

조 영 종 (Young-Jong Cho)



1985년 2월 : KAIST 석사
1990년 2월 : KAIST 박사
1996년 3월~현재 : 아주대학교
교수
<관심분야> 기계학습 활용, 무
선 네트워크, 트래픽 모델링,
네트워크 코딩