상대제동 모델 기반 이동폐색 열차제어시스템

오세찬^{*}, 김영주 한국철도기술연구원 열차제어통신연구실

Relative Braking Model based Moving Block Train Control System

Seh-Chan Oh^{*}, Young-Ju Kim

Department of Train Control and Communications Research, Korea Railroad Research Institute

요 약 현재 가장 진보된 열차제어시스템인 이동폐색 열차제어시스템은 차·지상 간 무선통신을 이용하여 실시간 위치 추적이 가능하며 높은 수송효율을 가진다. 그러나 현재의 이동폐색 열차제어시스템은 열차의 위치정보만을 이용한 절대 제동모델을 이용하기 때문에 수송력 향상에 한계가 존재한다. 본 논문은 이동폐색 열차제어시스템의 간격제어 성능 향상 을 위해 상대제동 모델과 새로운 이동권한 구조를 제시한다. 제안된 상대제동 모델은 선행 열차의 속도정보를 후행 열차 가 자신의 제동거리 계산에 이용함으로써 간격을 단축할 수 있다. 새로운 이동권한은 거리와 속도정보로 구성되며 열차 가 생성한다. 상대제동이 가능하도록 이동폐색 열차제어시스템의 국내 표준규격(KRS SG 0069)의 위치보고 및 이동권 한 패킷구조를 새롭게 제시한다. 상대제동 모델의 성능 분석을 위해 제안된 상대제동 모델 기반 이동폐색 열차제어시스 템의 간격제어 성능과 기존 절대 제동모델 기반 이동폐색 열차제어시스템의 간격제어 성능을 비교한다. 시뮬레이션 결과 를 통해, 열차제어시스템의 성능을 나타내는 최소 안전 제동거리가 도시철도 기준으로 최대 30% 향상됨을 확인할 수 있다. 본 논문에서 제안된 상대제동 모델은 향후 이동폐색 열차제어시스템 및 표준에 반영하여 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract Currently, the most advanced train control system, the moving block train control system, uses communication between onboard and wayside to track the train position and has high transport efficiency. However, it uses an absolute braking model with only the train location information, so there is a limit to improving the transport capacity. This paper proposes a relative braking model and a new movement authority structure to improve the interval control performance. The proposed model can shorten the interval by using the speed information of the preceding train to calculate the braking distance of the following train. The new movement authority consists of distance and speed information and is generated by the train. To enable relative braking, the position report and movement authority packet structure of the domestic standard (KRS SG 0069) is proposed for the movement-obstructed train control system. The simulation results show that the minimum safe braking distance is improved by up to 30% based on an urban railway. It is expected that the proposed model will be utilized in the moving block train control system and standards in the future.

Keywords: Interval Control, Movement Authority, Moving Block, Relative Braking, Standard, Train Control

1. 서론

열차제어시스템의 궁극적인 목표는 노선에 가능한 많 은 열차를 투입함으로써 수송효율을 높이는 데 있다.

현재 가장 진보된 열차제어시스템인 이동폐색 열차제 어시스템[1-4]은 차상과 지상 간 무선통신을 이용하여 실시간 위치 추적이 가능하여 높은 수송효율[4]을 가진 다. 그러나 현재의 도시철도용[1,2], 일반/고속철도용 [3,4] 이동폐색 열차제어시스템은 주행 중인 열차가 항상 정지해 있다는 가정하에 위치정보만을 이용한다. 따라서 수송력 향상을 위해 더 이상의 간격을 단축하는 데는 구 조상 한계[5-7]가 존재한다. 최근 선행 열차의 속도를 이 용하는 상대 제동에 대한 연구[7-9]가 있다. [5,7]은 기 존 이동폐색 열차제어시스템의 제어패러다임을 완전한 열차중심으로 변경함으로써 제어 흐름을 단순화하면서 상대제동을 이용한 간격제어를 제안하였다. [8-10]은 기 존 ETCS L3[3,4]를 기반으로 상대제동을 이용하여 물리 적 연결기 없이 주행 중 두 편성 이상의 열차를 결합하여 절대 제동거리 이하로 유지하는 연구를 진행 중이다.

본 논문은 기존 이동폐색 열차제어시스템의 간격제어 성능 향상을 위해 상대제동 모델과 새로운 이동권한 구 조를 제안한다. 제안된 열차의 상대제동 모델은 선행열 차의 속도를 자신의 제동거리 계산에 반영함으로써 절대 적인 제동거리 이하로 간격을 단축한다. 새로운 이동권 한은 상대제동을 통해 이동권한의 거리와 속도로 구성되 며 지상에서 제공되는 이동권한을 토대로 열차에서 생성 한다. 상대제동이 가능하도록 이동폐색 열차제어시스템 의 국내 표준규격(KRS SG 0069)[11]의 위치보고 및 이 동권한 패킷구조를 새롭게 제시한다.

제안된 상대제동 기반 이동폐색 열차제어시스템 (RBD-based MBS)의 성능 분석을 위해 기존 절대제동 기반 열차제어시스템(ABD-based MBS)과 간격제어시 스템과 비교한다. 최고속도 150 km/h인 도시철도 환경 의 열차 성능과 노선 환경을 토대로 시뮬레이션한 결과, 제안된 RBD-based MBS의 최소 안전제동거리는 기존 ABD-based MBS 대비 최대 약 30%, 운전시격은 최대 약 26% 단축할 수 있다. 제안된 RBD-based MBS는 기 존의 ABD-based MBS의 시스템 구조의 근본적인 변경 없이 간격 제어 성능 향상이 가능하다.

2. 이동폐색 열차제어시스템

이동폐색 열차제어시스템은 지상의 (Zone Controller (ZC)와 Electronic Interlocking(EI)에 의존하여 열차 를 제어한다. Fig. 1은 대표적인 이동폐색 열차제어시스 템인 CBTC[1,2]의 제어 원리를 보여준다. 선행열차 T_p 의 위치정보는 관할영역을 담당하는 ZC에 보고된다. ZC는 진로정보(route)를 수신하기 위해 EI에 T_p 의 위치정 보를 전송한다. EI는 진로정보를 ZC에 제공하고 ZC는 다시 T_f 에 이동권한과 제한속도, Most Restricted Speed Profile(MRSP)[1,3]를 제공한다.

 T_p 의 상태정보는 Eq. (1)의 제어흐름에 따른 경유시 간(t_{TT})를 거쳐 T_f 에 전달된다.

$$t_{TT} = t_{PR} + 2t_{ZC} + t_P + t_{EI} + t_R + t_{MA}$$
(1)

Where, t_{PR} , t_{MA} are the train position report and movement authority communication times, respectively, t_{ZC} , t_{EI} are the response times of ZC and EI, respectively, and t_P , t_R are the communication times between ZC and EI, respectively.



Fig. 1. Interval Control Principle of Absolute Braking Distance based Moving Block Train Control System

 T_f 는 수신된 이동권한과 MRSP를 토대로 이동권한을 초과하지 않도록 절대 제동 모델[1]에 의해 Automatic Train Protection(ATP) 프로파일을 생성한다. 열차의 절대제동 모델은 열차의 장치가 반응하는 시간(t_A)동안 최대가속 구간(A), 열차가 추진을 끊고 열차의 비상제동, Emergency Braking(EB)을 체결하는데까지 지연시간 (t_B) 동안 최대가속 구간(B), 보증비상제동률, Guaranteed Emergency Braking Rate(GEBR)이 출력되는 시간(t_c) 동안 최대가속 구간(C), 보증비상제동률로 열차가 정지 시(t_D)까지 감속구간으로 구성된다. 따라서 절대제동 모 델에 의한 열차의 제동거리는 T_p 의 속도와 관계없이 정 차시까지의 제동거리를 의미하며 Eq. (2)와 같다.

$$D_{abd} = D(V_{T_f}, 0) = \int_{0}^{t_A + t_B + t_C} Acel_{T_f} t + V_{T_f}^* dt + \int_{0}^{t_D} GEBR_{T_f} t dt + 2D_{pu}$$
(2)

Where, $Acel_{T_f}$ denotes the maximum acceleration of T_f , $GEBR_{T_f}$ denotes the GEBR of T_f , D_{pu} means the position uncertainty of the train, and $V_{T_f}^*$ is the correction speed of T_f , as in Eq. (3).

$$V_{T_{f}}^{*} = V_{T_{f}} + V_{E} + V_{A}$$
(3)

Where, V_{T_f} means speed of T_f , V_E denotes speed error, V_A is overspeed allowance of ATP

3. 상대제동 기반 이동폐색 열차제어시스템

3.1 상대제동 모델

 T_p 의 주행 속도를 항상 zero로 가정하는 절대제동 모 델과 달리 상대제동 모델은 T_p 의 주행속도 V_{T_p} 를 참조 한다. Fig. 2와 같이 지상 ZC에서 생성하는 이동권한 (MA_{ZC}) 를 기반으로 T_f 는 새로운 이동권한 (MA_{OC}) 을 정의한다.

상대제동 모델에 의한 열차의 제동거리는 T_p 의 속도 V_{T_p} 에 의존하며 Eq. (4)와 같다.

$$D_{rbd} = D(V_{T_f}, V_{T_p})$$
(4)
= $D(V_{T_f}, 0) - V_{T_p}^{\wedge^2}/2EB_{T_p}$

Where, $V_{T_p}^{\wedge}$ is the compensated speed of T_p recognized by T_f , EB_{T_p} means EB rate of T_p

$$T_f$$
가 수신하는 T_p 의 속도정보는 t_{TT} 의 시간동안 지

상 ZC와 EI를 경유하여 도달된다. 따라서 T_f 의 안전측 제동거리는 T_p 가 상태정보를 전송하는 즉시 t_{TT} 시간 동안 최대 감속한다는 가정으로 계산한다. 즉, T_p 의 다 음 상태보고 전까지 상태를 알 수 없으므로 T_p 의 보정속 도 $V_{T_p}^{^{\alpha}}$ 는 Eq. (5)와 같다.

$$V_{T_{p}}^{\wedge} = V_{T_{p}} - V_{E} - V_{A} - EB_{T_{p}} t_{TT}$$
(5)



Fig. 2. Interval Control Principle of Relative Braking based Moving Block Train Control System

3.2 이동권한 구조

본 절에서는 CBTC의 국내 표준인 한국형 도시철도 용 무선통신기반 열차제어시스템(KRTCS)의 한국철도표 준규격(KRS SG 0069)[11]을 기반으로 상대제동이 가능 하도록 이동권한 구조를 새롭게 정의한다.

일반적으로 ABD-based MBS에서 이동권한 (MA_{ZC}) 은 단순히 거리의 한계이며 ZC에서 생성한다. 반면 RBD-based MBS의 이동권한 (MA_{OC}) 은 각 열차에서 생성하며 이동권한의 거리 (D_{MA}) , 이동권한의 속도 (V_{MA}) 로 구성된다. Fig. 2와 같이 T_f 가 생성하는 이동 권한 한계 값은 Eq. (6)과 같이 구성된다.

$$MA_{OC} = \{ D_{MA}, V_{MA} \} = \{ D_{rbd}, V_{T_{\ell}}^{\wedge} \}$$
(6)

Fig. 3은 차상에서 MA_{OC} 를 계산하기 위해 수정된 기 능 블록도를 보여준다. ZC가 생성하는 MA_{ZC} 는 관할영 역 내 속한 열차의 위치와 EI로부터 수신한 각 열차가 가 지는 진로의 한계, 선로에 내려진 방호구간을 토대로 결 정된다. 열차는 [11]의 ATP onboard message (Message ID 42)를 통해 관할영역 ZC에 자신의 위치를 보고한다. 이때 열차는 MA_{OC} 생성을 위해서 ATP onboard message에 포함된 열차의 Position Report (Packet No. 42)에 열차의 속도정보와 함께 보정속도 $V_{T_s}^{\alpha}$ 를 계산하기 위한 열차 성능정보를 함께 반영한다.



Fig. 3. Modified Block Diagram for Limit of Movement Authority Determination

수정된 Position Report 패킷은 Table 1에 제시한 다. 열차의 Position Report(Packet No. 42)를 통해 관할영역 내 모든 열차는 ZC에 자신의 위치와 함께 상대 제동에 필요한 열차 상태정보를 전송한다. ZC는 관할영 역내 모든 열차로부터 수신받은 상태정보를 토대로 MA_{ZC} 와 MRSP를 계산하여 열차에 ATP wayside message (Message ID 21)을 통해 전송한다. 열차가 MA_{OC} 계산에 필요한 선행열차의 상태정보는 ATP

Table 1. Modified Packet(Packet No. 42) for Position Report

| Values | Description | Note | |
|------------|--------------------------------------|-------------|--|
| NID_PACKET | Packet ID | | |
| L_PACKET | Packet length | | |
| (skipped) | | | |
| V_TRAIN | Traveling speed of the train | newly added | |
| V_ERROR | Speed error of the train | newly added | |
| V_ALLOW | ATP overspeed allowance | newly added | |
| A_EB | Emergency Rate of train | newly added | |
| T_PR | Time interval of the position report | newly added | |
| M_DRVMODE | Train operation mode | | |
| M_DEGRADE | Performance degradation | | |

wayside message 내에 limit of movement protection(Packet No. 21)에 포함된다.

수정된 limit of movement protection (Packet No. 21)은 Table 2에 제시한다. 새롭게 추가된 정보는 MA_{OC} 계산에 필요한 선행열차의 상태 및 열차 성능정 보와 함께 ZC와 차상장치간 정보 전송주기, ZC와 EI간 정보 전송주기와 시스템 응답시간이다.

Table 2. Modified Packet(Packet No. 21) for Limit of Movement Protection

| Values | Description | Note | |
|------------|---|-------------|--|
| NID_PACKET | Packet ID | | |
| Q_DIR | Validity direction of transmitted data. | | |
| (skipped) | | | |
| D_LOM | Distance from LRTG tag 0 to the limit of MA | | |
| V_TRAIN | Traveling speed of the preceding train | newly added | |
| V_ERROR | Speed error of the preceding train | newly added | |
| V_ALLOW | ATP overspeed allowance | newly added | |
| A_EB | Emergency Rate of the preceding train | newly added | |
| T_PR | Time interval of the position report | newly added | |
| T_MA | Time interval of MA transmission from ZC | newly added | |
| T_R | Transmission interval from EI to ZC | newly added | |
| T_P | Transmission interval from ZC to EI | newly added | |
| T_ZC | System response time of ZC | newly added | |
| T_EI | System response time of EI | newly added | |

4. 시뮬레이션 및 분석

본 장에서는 ABD-based MBS과 RBD-based MBS 의 최소안전제동거리 및 최소운전시격 시뮬레이션을 통 해 성능을 비교한다.

4.1 시뮬레이션 환경

시뮬레이션은 Matlab을 이용하여 수행한다. 시뮬레 이션 파라미터는 Table 3에 제시한다. 열차제어시스템 및 통신지연은 일반적인 CBTC 파라미터[1]를 적용하였 고, 열차 성능은 일반적으로 적용되고 있는 도시철도 환 경의 전동차 사양[12,13]을 적용한다.

| Parameters | Values |
|---|------------|
| Maximum Train Speed | 150 km/h |
| Train Length (D_{TL}) | 200 m |
| Position Uncertainty | ±10 m |
| Speed Error | ±2 km/h |
| Full Service Braking (FSB) Rate | 3.5 km/h/s |
| Emergency Braking (EB) Rate | 4.5 km/h/s |
| Braking Efficiency Factor (K) | 60 % |
| Guaranteed Emergency Braking Rate $(GEBR = K \times EB)$ | 2.7 km/h/s |
| Maximum acceleration rate | 3.0 km/h/s |
| Communication Delay between Wayside ZC and Onboard Systems ($t_{M\!A},\ t_{P\!R})$ | 0.5 s |
| Communication Delay between Wayside ZC and EI ($t_{P}\!$ | 0.5 s |
| Wayside System Response Time (t_{ZC} , t_{EI}) | 1.0 s |
| Onboard System Response Time (t_A) | 0.75 s |
| Train Braking Response Time $(t_B + t_C)$ | 1.5 s |

Table 3. Simulation Parameters

4.2 성능 분석 및 비교

최소 안전제동거리는 두 열차가 노선 속도(line speed)로 주행하면서 감속없이 최대한 가까이 근접하여 주행할 때의 최소 안전간격을 의미한다.

Fig. 4는 ABD-based MBS와 RBD-based MBS의 최소 안전제동거리 D_{abd} 와 D_{rbd} 를 비교한 결과이다. 국 내 광역도시철도 환경을 감안하여 노선의 속도[11]를 최 대 150 km/h까지 증가하면서 두 시스템의 최소 안전제 동거리를 비교하였다. 노선속도가 80 km/h, 100 km/h, 120 km/h, 150 km/h로 변화할 때 ABD-based MBS 의 최소 안전제동거리는 528.6 m, 754.6m, 1021.7 m, 1499.6 m인 반면 RBD-based MBS의 최소 안전제동거 리는 449.9 m, 601.2 m, 768.9 m, 1051.4 m로 단축 된다. 노선속도가 80 km/h일 때 RBD-based MBS의 안전제동거리는 ABD-based MBS의 최소 안전제동거리 대비 약 15% 단축되는 반면 노선속도가 150 km/h일 때 약 30% 까지 단축됨을 확인할 수 있다. 즉, 노선속도 가 증가할수록 두 시스템 간 최소 안전거리 차이는 더 크 게 발생함을 확인할 수 있다.

최소운전시격은 선행열차의 특정 위치를 기준으로 후 행열차가 같은 위치에 도달할 때까지 소요되는 시간을 의미한다. ABD-based MBS와 RBD-based MBS의 최 소 운전시격은 각각 Eq. (7), Eq. (8)과 같이 정의할 수 있다.

$$HW_{abd} = \left(D_{abd} + D_{TL}\right) / V_{LS} \tag{7}$$

$$HW_{rbd} = \left(D_{rbd} + D_{TL}\right) / V_{LS} \tag{8}$$

where, D_{TL} means train length, V_{LS} denots line speed.

Fig. 5는 노선 속도 변화에 따른 ABD-based MBS와 RBD-based MBS의 최소 운전시격 시뮬레이션 결과이 다. ABD-based MBS의 경우 최소운전시격[14]은 노선 속도 69 km/h에서 약 32.4초이며, RBD-based MBS 의 경우는 노선속도 102 km/h에서 약 28.8초이다. 최 소안전제동거리와 마찬가지로 동일한 노선 속도에서 비 교하면 속도가 증가할수록 두 시스템의 최소운전시격 차 이는 더 크게 발생한다. 두 열차의 최소운전시격은 최소 안전간격에 열차의 길이를 노선 속도로 나눈 값이다. Fig. 5와 같이 노선속도가 80km/h, 100 km/h 120 km/h, 150 km/h인 경우 운전시격은 약 11%, 16%, 21%, 26%로 단축됨을 확인할 수 있다.



Fig. 4. Minimum safe braking distance comparison between ABD-based MBS and RBD-based MBS



Fig. 5. Minimum headway comparison between ABD-based MBS and RBD-based MBS

Fig. 6은 RBD-based MBS를 대상으로 차상 및 지상 시스템의 응답시간 변화에 따른 최소 안전제동거리의 변 화를 보여준다. [1]의 일반적인 CBTC 파라미터에 설정 된 CBTC 장치의 반응시간 범위를 참조하여 차상장치, ZC, EI의 시스템 응답시간 t_A , t_{ZC} , t_{ET} 가 최소 0.07초에 서 최대 1초까지 변화될 때 최소 안전제동거리의 변화를 시뮬레이션하였다.

노선속도가 80 km/h, 100 km/h, 120 km/h, 150 km/h인 경우 시스템 응답시간이 0.07초일 때 최소 안전 제동거리는 368.9 m, 496.7 m, 640.9 m, 888.3 m로 증가하는 반면 응답시간이 1초인 경우 463.7 m, 617.9 m, 788.6 m, 1,075.5 m로 증가하게 된다. Fig. 4의 일 반적인 시스템 응답시간[1]을 가지는 경우(1초)와 비교할 때 노선속도에 따라 얻어지는 최소 안전제동거리 개선 값은 속도 80 km/h일 때 약 18.0%에 해당하는 81 m, 150 km/h 일 때 15.5%에 약 163.1 m임을 확인할 수 있다.

RBD-based MBS의 시스템 통신주기의 단축이 최소 안전제동거리에 미치는 영향을 분석한다. [1]의 일반적인 CBTC 파라미터에 설정된 CBTC 장치의 통신주기를 참 조하여 Table 3의 파라미터 중 차상시스템과 지상간시 스템간 통신주기(t_{MA} , t_{PR})와 지상시스템과 지상시스템 간 통신주기(t_{zc} , t_{zr})를 0.1초부터 최대 2초까지 변화를 주면서 최소 안전제동거리를 시뮬레이션하였다(Fig. 7).

Fig. 7과 같이 노선속도가 80 km/h, 100 km/h 120 km/h, 150 km/h일 때 통신주기가 0.1초인 경우 최소 안전제동거리는 425.8 m, 568.2 m, 727.1 m, 996.2 m이며 통신주기가 2초인 경우 511.6 m, 696.1 m 897.3 m, 1.229.7 m로 증가하게 된다. 마참가지로 Fig. 4의 일반적인 시스템 통신주기를 가지는 경우(0.5초)와 비교할 때 통신주기를 0.1초로 단축하는 경우 개선 값은 속도 80 km/h 일 때 약 5.3%에 해당하는 24.1 m, 150 km/h 일 때 약 5.2%에 해당하는 55.2 m임을 확인할 수 있다.



Fig. 6. Minimum safe braking distance change versus system response time

차량의 제동효율은 열차가 가지는 최대 제동편차, 비 상제동률(Emergency Braking Rate)과 보증비상제동 률(GEBR)의 비율로 정의한다. 열차제어에 사용하는 비 상제동률은 GEBR을 의미하며 제동시스템이 가지는 성 능과 시스템 요구 신뢰도에 따라 K 값이 결정된다[13]. Table 3에서 정의한 K 값은 [13]에 의거 일반적인 열차 의 제동효율인 60%로 정의하였다.

Fig. 8은 차량의 제동효율을 나타내는 K 값을 50%에 서 최대 90%까지 변화시킬 때 최소 안전제동거리의 변 화에 대한 시뮬레이션 결과이다. 노선속도가 80 km/h, 100 km/h, 120 km/h, 150 km/h인 경우 K 값이 50% 인 최소 안전제동거리는 각각 540.3 m, 734.3 m, 953.0 m, 1,327.3 m인 반면 K 값이 90%인 최소 안전 제동거리는 각각 299.2 m, 379.3 m, 462.2 m, 591.6 m로 단축됨을 알 수 있다. Fig. 4의 일반적인 제동효율 (60%)와 비교할 때 최소 안전제동거리의 개선 값은 속도 80 km/h 일 때 약 33%에 해당하는 150.7 m, 150 km/h 일 때 43.7%에 해당하는 약 459.8 m임을 확인 할 수 있다.

시뮬레이션 결과를 통해 선행열차의 제동거리를 이용 하는 RBD-based MBS의 경우 열차의 높은 제동효율이 결국 시스템 성능향상에 가장 크게 영향을 미침을 확인 할 수 있다.







Fig. 8. Minimum safe braking distance change versus braking efficiency factor K

5. 결론

본 논문은 한국형 도시철도용 무선통신기반 열차제어 시스템(KRTCS)의 성능 개선을 위해 상대제동 모델 기반 의 간격제어와 이를 지원하는 새로운 이동권한 구조를 제안하였다. 상대제동 모델은 선행열차의 속도를 후행열 차의 제동거리에 활용한다. 상대제동이 가능하도록 이동 폐색 열차제어시스템의 국내 표준규격(KRS SG 0069)의 위치보고 및 이동권한 패킷구조를 새롭게 제시하였다.

시뮬레이션을 통해 제안된 RBD-based MBS는 ABD-based MBS 대비 최대 30% 최소 안전거리를 단축 할 수 있음을 확인하였다. 아울러 다양한 시뮬레이션을 통해서 열차제어장치의 응답시간과 통신주기 개선보다는 열차의 제동효율이 시스템 성능에 가장 크게 영향을 미 침을 확인하였다.

제안된 RBD-based MBS는 기존의 ABD-based MBS의 시스템 구조의 근본적인 변경 없이 간격 제어 성

능 향상이 가능하다. 따라서 향후 한국형 도시철도용 무 선통신기반 열차제어시스템 및 국내 표준규격의 개정 시 반영하여 활용할 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] Farooq, J., & Soler, J., "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
- [3] ERA, UNISIG, EEIG ERTMS Users Group. ERTMS/ETCS System Requirements Specification (SUBSET-026), 3.6.0, 2016. [Online]. Available: https://www.era.europa.eu/sites/default/files/filesyste m/ertms/ccs_tsi_annex_a_- mandatory_specifications /set_of_specifications_3_etcs_b3_r2_gsm-r_b1/index0 04 - subset-026 v360.zip
- [4] Biagi, M., Carnevali, L., Paolieri, M., & Vicario, E., "Performability evaluation of the ERTMS/ETCS-Level 3." Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 82, 314-336, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.07.002
- [5] Naeem Ali, CBTC 2.0, Available From: http://www.CBTCSolutions.ca
- [6] Song, H., Liu, H., & Schnieder, E., "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
- [7] 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
- [8] Quaglietta, E., Wang, M., & Goverde, R. M., "A multi-state train-following model for the analysis of virtual coupling railway operations." Journal of Rail Transport Planning & Management, 15, 100195, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2020.100195
- [9] Flammini, Francesco, et al., "Towards railway virtual coupling." 2018 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC). IEEE, 2018. DOI: https://doi.org/10.1109/ESARS-ITEC.2018.8607523
- [10] Park, J., Lee, B. H., & Eun, Y., "Virtual coupling of

railway vehicles: gap reference for merge and separation, robust control, and position measurement." IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2018.

DOI: https://doi.org/10.1109/TITS.2020.3019979

- [11] KRS-SG-0069: Korean Radio Based Train Control System for Urban Rapid Transit. Available From: https://www.kric.go.kr/servlet/ContentDownloadServl et?type=pdf&object_id=0900271a80178407
- [12] H. Park, and C. Lee, "The analysis on the characteristics of acceleration/deceleration of urban and wide-area railway vehicles." Journal of the Korean Society for Railway, 7.3 (2019): 353-360. DOI: https://doi.org/10.24284/JKOSUR.2019.9.7.3.353
- [13] ERRI B 126 RP 30, Existing and future train control and command systems on the European railways -Models for deceleration curves, April 2001.
- [14] Parkinson, T., & Fisher, I., Rail transit capacity (Vol. 13). Transportation Research Board, 1996.

오 세 찬(Seh-Chan Oh)

[정회원]



- 2004년 8월 : 광주과학기술원 정 보통신공학과 석사
- 2013년 3월 ~ 현재 : 아주대학교 컴퓨터 공학 박사과정
- 2004년 11월 ~ 현재 : 한국철도기 술연구원 책임연구원

전자공학과 (석사)

전자공학과 (박사)

전자 책임연구원

술연구원 선임연구원

2015년 3월 ~ 현재 : 한국철도기

〈관심분야〉 열차제어, DTO/UTO 설계

김 영 주(Young-Ju Kim)

[정회원]



〈관심분야〉 철도통신, 6G