

열차 간 통신기반 열차자율주행시스템에서 가상연결기를 위한 방호 알고리즘

오 세 찬[°], 최 현 영^{*}

Protection Algorithm for Virtual Coupler in T2T-Based Autonomous Train Control System

Sehchan Oh[°], Hyeon-Yeong Choi^{*}

요 약

본 논문은 열차 간 통신기반 열차자율주행제어시스템에서 가상연결기를 위한 방호 알고리즘을 제안한다. 주행 중 열차의 안전한 가상연결과 해제를 위해서 열차 간 배타적으로 공유해야하는 선로자원에 대한 새로운 분배방안을 제안한다. 제안된 공유자원 분배방안은 결합 전 상호 배타적으로 소유하는 선로자원을 결합 이후 하나의 열차에 의해 소유할 수 있도록 자원의 병합을 수행한다. 열차의 특성과 주행속도에 따라 가상 결합된 열차 간 확보해야하는 최소 안전거리를 제시하며 이를 위해 가상연결기를 위한 열차의 제동모델을 제안한다. 결합 전과 후 두 열차가 가지는 최소안전 거리의 변화를 시뮬레이션을 통해 제시하며 열차의 속도, 통신 및 제동시스템이 가지는 지연의 영향을 확인한다. 본 논문에서 제시된 열차 간 통신기반 가상연결기 방호알고리즘은 물리적 커플러를 사용하지 않음으로써 열차운영의 유연성 및 수송량 향상 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

Key Words : virtual coupler, protection algorithm, track resources, mutually exclusive, minimum safety distance

ABSTRACT

In this paper, we propose a protection algorithm for virtual coupler in train-to-train communication based autonomous train control system. For safe virtual connection and disconnection of moving trains, we propose a new allocation scheme for track resource that should be exclusively shared between the trains. The proposed shared resource allocation scheme merges so that a master train can own the track resources that are owned exclusively before virtual coupling. We propose the minimum safety distance between virtually coupled trains set which should be secured according to train characteristics and driving speeds, and propose a train braking model for virtual train coupling for this purpose. Simulation results show the changes of the minimum safety distance of the two trains before and after the coupling process, and the effect of train speed, communication, and delay of the braking system. Since the proposed protection algorithm in this paper for train-to-train communication based virtual train coupling does not use physical coupler, it can improve the flexibility of train operation and line capacity.

※ 본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

•[°] First and Corresponding Author : (ORCID:0000-0003-3436-9765)Korea Railroad Research Institute, Autonomous Vehicle Research Team, soh@krii.re.kr, 정희원

* (ORCID:0000-0001-8028-2957)Korea Railroad Research Institute, Autonomous Vehicle Research Team, hchoi@krii.re.kr
논문번호 : 201810-315-C-RU, Received October 10, 2018; Revised November 5, 2018; Accepted November 6, 2018

I. 서 론

열차는 물리적 연결기를 통해 결합과 분리가 가능하다. 두 열차를 결합하여 운행하는 것은 선로의 가용성을 높이기 위함이며 결합된 열차를 분리하여 운행하는 것은 본선과 지선의 운전시격을 향상시키기 위함이다¹⁻⁶. 하지만 열차의 안전을 보장하는 열차제어시스템의 경우 결합과 분리 상황을 열차의 충돌 상황과 같은 위험상황으로 인지한다. 따라서 열차의 결합을 위해 열차제어시스템이 정한 안전간격(safety interval)을 침범하게 되는 경우 열차제어시스템은 열차의 충돌을 방호(Protection)하기 위해서 비상제동을 체결하게 된다. 열차의 결합과 분리는 열차제어시스템을 종료한 상태에서 운영자 책임 하에 수동으로 이루어지기 때문에 시간 소요가 크며 인적오류에 의한 충돌 및 탈선의 사고의 위험이 있다. 이러한 이유로 운영 중 열차의 결합과 분리는 특수한 경우를 제외하고는 실현되기 어렵다. 따라서, 신속하고 안전한 결합과 분리를 위해서는 열차제어시스템의 방호 하에 열차가 자동으로 주행 중 분리와 결합이 가능한 가상연결기 기술이 필요하다.

최근 가상연결기와 관련하여 현재 활발한 연구가 진행되고 있다³⁻⁷. 하지만 가상연결에 대한 타당성 분석 연구³⁻⁶, 또는 단순히 열차 자동운전 측면에서 선형열차와의 간격제어기 개발에 대한 연구⁷가 있으나 가상연결시 열차 자동방호 측면에서의 연구는 제시된 바가 없다.

본 논문은 열차 간 통신기반 열차자율주행제어시스템(ATCS: Autonomous Train Control System)^{8,9} 환경에서 가상연결기를 위한 방호 알고리즘을 제안한다. 제안된 방호 알고리즘은 열차가 주행하는 선로자원을 배타적으로 소유하고 소유한 자원을 넘지 않도록 제어한다. 주행 중 열차의 가상연결과 해제를 위해 결합 전 상호 배타적으로 소유하는 선로자원을 결합 이후 하나의 열차에 의해 소유할 수 있도록 자원의 병합을 수행한다. 열차의 특성과 주행속도에 따라 가상 결합된 열차 간 확보해야하는 최소 안전거리를 제시하며 이를 위해 가상연결기를 위한 열차 제동모델을 제안한다.

제안된 방호알고리즘에 대한 성능 분석을 위해 두 열차의 결합 전과 후 열차의 최소 안전거리에 대한 시뮬레이션 결과를 비교하며 열차의 속도, 통신 및 제동시스템이 가지는 지연시간이 최소 안전거리에 미치는 영향을 확인한다.

II. 열차 간 통신기반 열차자율주행제어시스템

2.1 시스템 구성

ATCS는 그림 1과 같이 크게 차상시스템과 지상시스템으로 구성된다. 차상시스템은 열차 간 직접적인 통신(T2T)을 지원하는 무선통신장치, 자율열차방호(ATP: Autonomous Train Protection) 및 자율열차운전(ATO: Autonomous Train Operation) 기능을 지원하는 차상장치, 위치계산을 위한 타코미터, 위치보정을 위한 태그 리더로 구성된다. 지상시스템은 노선의 열차를 감시 통제하는 관제 ATS(Automatic Train Supervision)와 선로 자원의 배타적 공유를 위한 리소스 관리자(RM: Resource Manager), 리소스 제어명령을 수신하여 현장의 리소스를 제어하는 리소스 제어기로 구성된다.

ATCS에서 리소스는 열차 간에 배타적으로 소유해야 하는 선로구간, 분기기(Switch), 플랫폼 스크린도어(PSD: Platform Screen Door)를 의미한다.

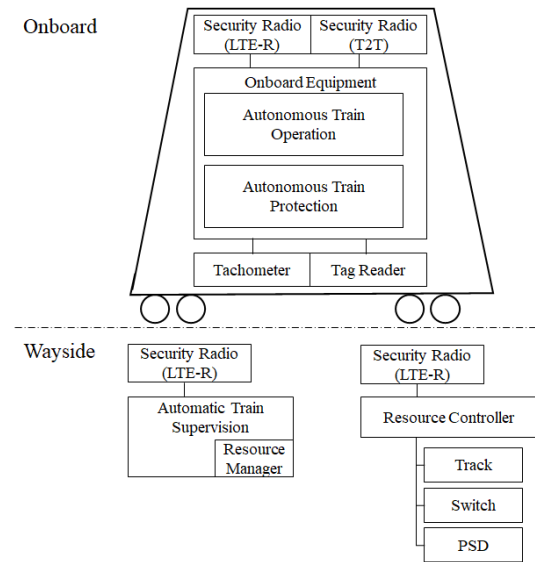


그림 1. ATCS 시스템 구성
Fig. 1. System configuration of ATCS

2.2 ATCS 간격제어

ATCS 열차는 자신의 주행에 필요한 선로자원을 타 열차가 침범하지 못하도록 상호 배타적으로 소유하며 소유한 자원의 한계를 넘지 않도록 열차를 제어한다. 그림 2와 같이 열차 T1과 T2가 주행 중인 경우 두 열차의 선로자원 배분과 간격제어 방안은 다음과 같다.

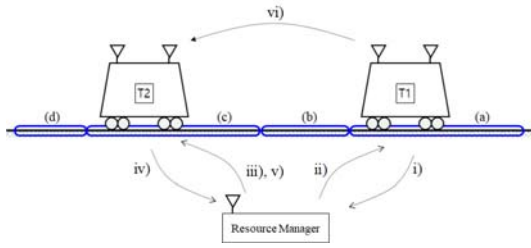


그림 2. ATS의 안전간격제어
Fig. 2. Safe interval control for ATCS

- i. 열차 T1은 선로자원 (a), (b)를 소유하고 있으며 사용된 자원 (b)에 대한 자원권한(RA: Resource Authority)를 RM에 전송함과 동시에 환원요청 한다.
- ii. RM은 T1의 요청이 유효한지 확인하기 위해 자원 (b)에 대한 RA를 확인 후 해당 자원을 비 점유 상태로 환원 후 갱신된 자원현황을 T1에 제공한다.
- iii. 열차 T2는 선로자원 (c), (d)를 소유하고 있으며 갱신을 위해 RM을 통해 노선의 자원 점유현황을 수신한다.
- iv. 열차 T2는 수신현황을 토대로 자신이 점유 가능한 자원의 한계를 계산하고 선로자원 (b)에 대한 RA를 RM에 요청함과 동시에 자원 (d)를 환원하기 위해 (d)에 대한 RA를 전송한다.
- v. RM은 열차 T2가 환원 요청한 자원 (d)가 T2 소유임을 RA를 통해 확인 후 자원을 비 점유 상태로 환원하고 새롭게 요청한 자원 (b)가 점유 가능한 상태인지 확인 후 T2에 자원 (b)에 대한 RA를 제공한다.
- vi. 열차 T2는 선로의 제한속도와 함께 자신의 선행열차 T1의 속도를 이용하여 자신이 확보한 선로자원 (c), (b)에서의 주행 가능한 속도프로파일을 계산한다.

III. 가상연결기를 위한 방호알고리즘

3.1 가상연결기를 위한 자원분배

가상연결기의 결합과 분리는 주행 중 독립된 두 대 이상의 열차가 하나의 열차로 결합하고 반대로 독립된 열차로 분리됨을 의미한다. 그림 3과 같이 열차 T1과 T2가 주행 중에 있으며 열차 T2는 관제 ATS의 스케줄에 의해 자신의 상태와 함께 열차 T1과 결합을 요청한다. 열차 T1은 열차 T2가 자신의 후행열차임과 열차 T1과 T2 모두 정상적으로 결합 가능한 상태임을 확인 후 열차 T2로 결합예고를 전송한다. 열차 T2는 T1과 직접적인 통신이 가능한 거리 이내로 근접하기 위해 선행열차의 best-case 제동거리를 이용한 간격을

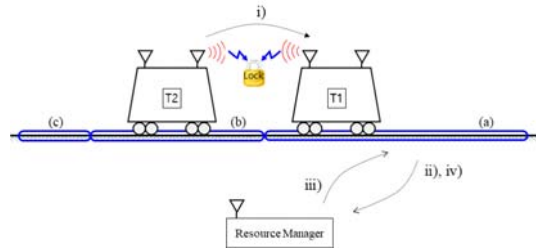


그림 3. 가상연결을 위한 리소스 할당
Fig. 3. Resource Allocation for Virtual Coupling

어를 수행한다^[8]. 결합 시 열차 T1은 T2의 최소 안전 후미부(Minimum Safe Rear End)까지 자신의 열차 길이에 포함한다. 열차 T1과 T2의 결합 시점에서 두 열차의 선로자원 분배방안은 다음과 같다.

- i. 열차 T2는 자신의 소유한 선로자원(b)와 (c)에 대한 RA를 열차 T1에 제공함과 동시에 가상결합 해제 전까지 더 이상 자신의 선로자원을 RM을 통해 확보하지 않는다.
- ii. 열차 T1은 선로자원 (a),(b),(c)를 모두 소유하고 있으며 자신의 후행열차 T2에 의해 사용된 선로자원 (c)를 환원하기 위해 T1으로부터 제공받은 RA를 이용하여 RM에 환원요청 한다.
- iii. RM은 T1이 제공한 RA를 통해 요청이 유효한지 확인 후 갱신된 자원현황을 T1에 제공한다.
- iv. T1은 결합이 유지되는 동안 RM을 통해 주행에 필요한 전방의 선로자원을 확보하여 T2와 공유하는 한편 T2의 후미부가 통과한 선로자원을 환원한다.

가상으로 연결된 열차는 관제 ATS의 스케줄에 의해 두 대의 독립된 열차로 분리된다. 그림 4와 같이 열차 T1은 후행열차 T2에 분리예고를 전송하고 T2는 분리시점에서 안전한 간격제어가 가능하도록 간격을 유지한다. 열차 T1과 T2의 분리 시점에서 두 열차의 선로자원 분배방안은 다음과 같다.

- i. 열차 T1은 선로자원 (a), (b)를 소유하고 있으며 소유한 선로자원의 일부인 (b)에 대한 RA를 후행열차 T2에 제공한다. 이때 선로자원 (b)의 한계는 T1의 후미부가 통과한 시점의 최대 자원으로 정의한다.
- ii. 열차 T2는 RM을 통해 주행에 필요한 선로자원을 요청하면서 동시에 사용된 자원을 반납한다.
- iii. RM은 T2의 요청에 따라 반납한 자원을 환원하고 요청한 자원에 대한 RA를 제공하며 갱신된 선로자원 현황을 T2에 제공한다.
- iv. 열차 T1은 더 이상 자신의 열차길이에 T2를 반영하지 않으며 RM을 통해 주행에 필요한 선로자원을

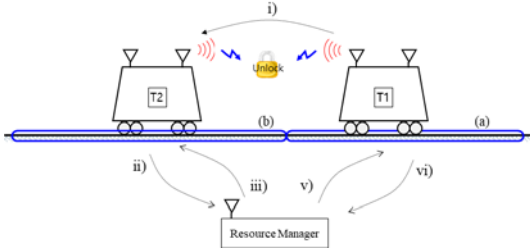


그림 4. 가상연결 해제를 위한 리소스 할당
Fig. 4. Resource Allocation for Virtual Decoupling

요청하면서 동시에 사용된 자원을 반납한다.

v. RM은 T1의 요청에 따라 반납한 자원을 환원하고 요청한 자원에 대한 새로운 RA를 제공하며 갱신된 선로자원 현황을 열차 T1에 제공한다.

3.2 가상연결기를 위한 제동모델

ATCS는 열차의 GEBR(Guaranteed Emergency Braking Rate)에 대한 범위를 제한한다. 가상연결기는 열차 간 직접통신기반 열차제어시스템에서 수행하는 선행열차의 best-case 제동거리를 이용하는 간격제어^[8]와는 달리 결합된 선행열차와 후행열차 간 서로 다른 GEBR 범위를 가진다. 가상연결시 선행열차와 후행열차가 가지는 GEBR 범위는 식 (1) 및 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{1}{(1 + \Delta T)} GEBR_{min} \leq GEBR_p < \frac{1}{2}(GEBR_{max} + GEBR_{min}) \quad (1)$$

$$\frac{1}{2}(GEBR_{max} + GEBR_{min}) \leq GEBR_f < \frac{1}{2}(3GEBR_{max} - GEBR_{min}) \quad (2)$$

여기서 $GEBR_{min}$ 과 $GEBR_{max}$ 는 각각 ATCS 열차가 보증하는 GEBR 최솟값과 최댓값이며, $GEBR_p$ 와 $GEBR_f$ 는 각각 가상연결된 열차의 선행열차와 후행열차의 GEBR, ΔT 는 선행열차가 GEBR 발생 전까지 추가적인 지연을 의미한다. ΔT 는 $GEBR_p$ 의 범위가 $GEBR_{max} - GEBR_{min}$ 과 동일한 범위를 갖도록 한다.

선행열차의 GEBR은 후행열차의 GEBR 보다 작은 값으로 가상 연결된 열차가 최악의 제동상황에서도 서로 충돌하지 않도록 방호할 수 있다.

그림 5는 가상연결기 제동모델을 보여준다. 안전 제동거리를 확보하기 위해 worst-case의 경우 비상제

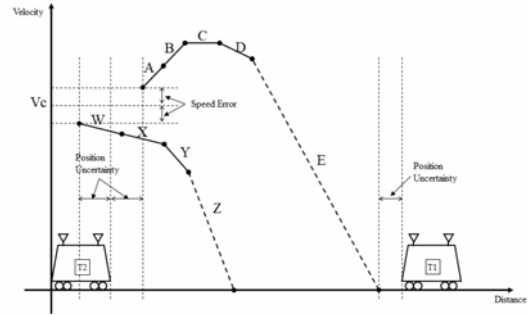


그림 5. 가상연결을 위한 제동모델, (A-B-C-D-E)worst case 제동모델, (W-X-Y-Z)best-case 제동모델
Fig. 5. Braking models for virtual coupler, (A-B-C-D-E)worst case braking model, (W-X-Y-Z)best-case braking model

동체결이 필요한 시점에 열차가 최대가속 중인 경우의 최악의 제동거리를 의미하며, 반대로 best-case의 경우 비상제동체결 시점에서 열차가 최대감속 중인 경우의 최상의 제동거리를 의미한다. 가상 결합된 각 열차는 worst-case 제동모델(A-B-C-D-E 구간)과 best-case 제동모델(W-X-Y-Z 구간)을 계산한다. 결합된 열차의 후행열차는 자신의 선행열차의 best-case 제동모델을 이용하여 worst-case 제동거리를 계산한다. A는 열차제어시스템 지연동안 최대가속구간, B는 제동시스템 지연동안 최대가속구간, C는 열차의 추진을 차단하여 등속주행구간, D는 $GEBR_{min}$ 출력 전까지 감속하는 구간, E는 $GEBR_{min}$ 이 출력되어 최대감속구간을 의미한다. 한편 W는 열차제어시스템 지연동안 최대감속구간, X는 제동시스템 지연동안 최대감속구간, Y는 $GEBR_{max}$ 출력 전까지 감속하는 구간, Z는 $GEBR_{max}$ 이 출력되어 최대 감속하는 구간을 의미한다.

3.3 가상연결기를 위한 최소안전거리

가상연결기는 $GEBR_p$ 와 $GEBR_f$ 이 독립된 출력 범위를 갖기 때문에 GEBR 출력 시점(t_c) 전까지 선행열차와의 거리를 최소 안전거리로 정의할 수 있다. 가상 연결된 선행열차와 후행열차 간의 최소안전거리는 식 (3)과 같다.

$$MSD = wBD_f - bBD_p + PUu_f - PUo_p + PUu_p \quad (3)$$

여기서 wBD_f 는 후행열차의 worst-case 제동거리, bBD_p 는 선행열차의 best-case 제동거리, PUu_f 는 후행열차 전방 위치오차, PUo_p 는 선행열차의 후방 위치

오차, PUu_p 는 선행열차의 후방 위치오차를 의미한다.

열차가 추진을 차단하는 시점부터 $GEBR_{min}$ 출력 전까지 감속하는 시간은 등가제동지연시간(t_c)로 표현되며 이동거리는 식 (4)와 같은 부등식이 성립된다.

$$\int_{t_c} V_c dt > \int_{t_c} V_c dt + \int_{t_d} (V_c - D_{FSB}t) dt \quad (4)$$

여기서 V_c 와 t_c 는 열차가 추진을 차단한 시점에서 의 속도와 경과시간, D_d 와 t_d 는 $GEBR_{min}$ 출력 전까지 열차의 감속도와 경과시간을 의미한다.

보수적인 선행열차의 best-case 제동거리 계산을 위해 $GEBR_{max}$ 값을 출력하는데 걸리는 최소시간을 무시한다. 가상 결합된 상황에서 후행열차가 가지는 worst-case 제동거리와 선행열차가 가지는 best-case 제동거리는 식 (5) 및 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$wBD_f = \int_{t_a+t_0} \{ V_f + V_{ferr} + A_{fFA}(t_{TCSDelayMax} + t_{ComDelayMax} + t) \} dt + \int_{t_c} V_c dt \quad (5)$$

$$bBD_p = \int_{t_a+t_0+t_c} \{ V_p - V_{perr} + D_{pFSB}(t_{TCSDelayMin} + t_{ComDelayMin} + t) \} dt \quad (6)$$

여기서 t_a 는 열차제어시스템 반응시간, V_f 와 V_{ferr} 은 선행열차의 속도와 속도오차, A_{fFA} 은 후행열차의 최대가속도, $t_{TCSDelayMax}$ 와 $t_{ComDelayMax}$ 는 최대 열차 제어시스템 지연시간과 통신지연시간, V_p 와 V_{perr} 은 선행열차의 속도와 속도오차, D_{pFSB} 는 선행열차의 상용최대감속도, $t_{TCSDelayMin}$ 과 $t_{ComDelayMin}$ 은 최소 열차제어시스템 지연시간과 통신지연시간을 의미한다.

가상 연결된 선행열차와 후행열차는 T2T 통신주기에 의해 제어정보를 수신하며 연속 3번 두절시 의도치 않게 연결의 무결성이 훼손된 것으로 간주하여 비상제동을 체결하게 된다.

IV. 실험 및 분석

본 절에서는 Matlab을 이용한 시뮬레이션을 통해 제안된 가상연결기 방호 알고리즘의 간격제어 성능을 기존의 CBTC 및 ATCS의 간격제어 성능과 비교분석한다. CBTC의 간격제어^[3,11-15]는 선행열차의 주행속도와 관계없이 후미부 위치에 기반하여 안전간격을 계산하며, ATCS의 간격제어^[8]는 선행열차의 0 km/h 속

도까지의 제동거리를 이용하여 안전간격을 계산한다.

4.1 시뮬레이션 환경

가상연결기 최소 안전거리를 CBTC 및 ATCS 간격제어 성능과 비교 시뮬레이션을 위한 파라미터는 표 1에 제시하였다. 열차의 최고속도 및 가감속 성능은 도시철도 표준전동차에 사양을 적용하였으며, 가상연결에 사용되는 통신은 열차 간 직접적인 통신(direct T2T)을 가정하였으며, 열차제어시스템의 반응시간과 위치오차 및 속도센서 오차는 IEEE 1474.1의 CBTC 파라미터^[14]를 적용하였다.

표 1. 시뮬레이션 파라미터
Table 1. 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
coefficient of inertia (α_f, α_p)	0.09	
acceleration rate (A_{FA})	3.0	km/h/s
maximum service brake deceleration rate (D_{pFSB}, D_{fFSB})	3.5	km/h/s
minimum $GEBR$ ($GEBR_{min}$)	4.5	km/h/s
maximum $GEBR$ ($GEBR_{max}$)	5.0	km/h/s
$GEBR$ delay time for preceding train (ΔT)	58.8	ms
$GEBR$ range, Rayleigh distribution ($GEBR_{max} - GEBR_{min}$)	0.5	km/h/s
braking response time after EB initiated (t_0)	0.3	s
equivalent braking response time for EB (t_c)	1.3	s
minimum TCS delay ($t_{TCSDelayMin}$)	0.2	s
maximum TCS delay ($t_{TCSDelayMax}$)	0.75	s
minimum T2T communication delay ($T_{ComDelayMin}$)	0.1	s
maximum T2T communication delay ($T_{ComDelayMax}$)	0.5	s
position uncertainty for preceding train (PUu_p, PUo_p)	±6.25	m
position uncertainty for following train (PUu_f, PUo_f)	±6.25	m
speed error (V_{perr}, V_{ferr})	±2	km/h

4.2 실험 결과

그림 6에서 가상연결이후 선행열차와 후행열차가 가질 수 있는 최소안전거리를 기존 CBTC의 간격제어 방식 및 ATCS에서의 간격제어 방식과 비교하였다. 최소안전거리는 선행열차와 후행열차가 같은 속도인 경우에 달성할 수 있다. 두 열차의 속도를 10 km/h부

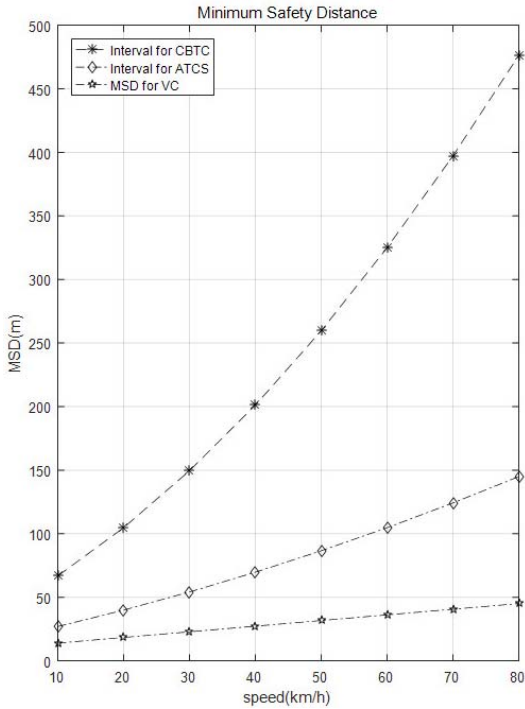


그림 6. CBTC, ATCS, 가상연결기의 최소안전간격 비교
Fig. 6. Comparison of minimum safety intervals for CBTC, ATCS, and Virtual Coupler(VC)

터 최대 80 km/h까지 변화하면서 속도오차, 위치오차를 감안하여 최소 안전거리를 시뮬레이션 한다. CBTC의 경우 시속 80 km/h인 경우 약 475m의 최소 안전거리를 가지며, ATCS의 간격제어는 약 145m, ATCS에서 가상연결시 최소 안전거리는 약 45m 정도로 단축할 수 있음을 확인할 수 있다.

CBTC의 경우 선행열차의 위치에 기반 한 간격제어를 수행하므로 열차의 속도가 높을수록 후행열차가 확보해야하는 최소안전거리 또한 속도의 제곱에 비례하여 증가하게 된다. ATCS의 간격제어는 선행열차가 정지시 까지 가지는 최소 제동거리를 후행열차가 이용하여 자신의 안전간격에 반영한다. 따라서 CBTC의 최소 안전거리과 ATCS의 최소안전거리의 차이는 선행열차의 최소 제동거리에 기인한다. 한편 가상연결기의 경우 후행열차는 정지시까지의 안전간격을 확보할 필요 없이 *GEBR* 출력 전까지의 제동거리를 확보하므로 ATCS의 최소 안전거리와 차이는 *GEBR* 출력 시간(t_e)부터 0 km/h 속도까지의 제동거리에 기인한다. CBTC 및 ATCS의 안전간격과 달리 가상연결기의 최소 안전거리는 속도에 1차 함수임을 확인할 수 있다.

열차의 가속성능은 일반적으로 간격제어의 성능과 밀접하게 연관된다. 그림 7의 경우 열차의 가속도를 3.0 km/h/s, 4.0 km/h/s, 5.0 km/h/s로 변화시킴에 따라 최소 안전거리에 대한 변화를 CBTC 및 ATCS, 가상연결기를 대상으로 시뮬레이션한 결과이다. 열차의 가속도 성능향상으로 인해 열차가 확보해야하는 최소 안전거리가 CBTC의 경우 546m에서 476m로, ATCS의 경우 177m에서 145m로 감소된다. 반면 가상연결기의 최소 안전거리의 경우 가속도 성능에 따른 영향이 크게 작용하지 않고 45m를 유지하게 됨을 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있다.

가상연결기는 선행열차와 후행열차 간에 직접적인 통신을 이용하여 간격을 제어한다. 따라서 통신지연은 가상연결제어에 있어서 중요한 파라미터이다. 그림 8은 T2T 통신지연을 0.05초에서 1.0초까지 변화를 주면서 가상연결기의 최소안전거리를 시뮬레이션 한 결과를 보여준다. 선행열차와 후행열차 모두 80 km/h 속도로 주행 시 통신지연이 0.05초인 경우 가상연결기가 안전을 위해 확보해야하는 최소안전간격은 약 41m 이지만 통신지연이 1초인 경우 약 115m까지 증가하고 있음을 확인할 수 있다. 낮은 속도에서는 통신지연에 따른 최소안전거리의 차이가 크지 않지만 속

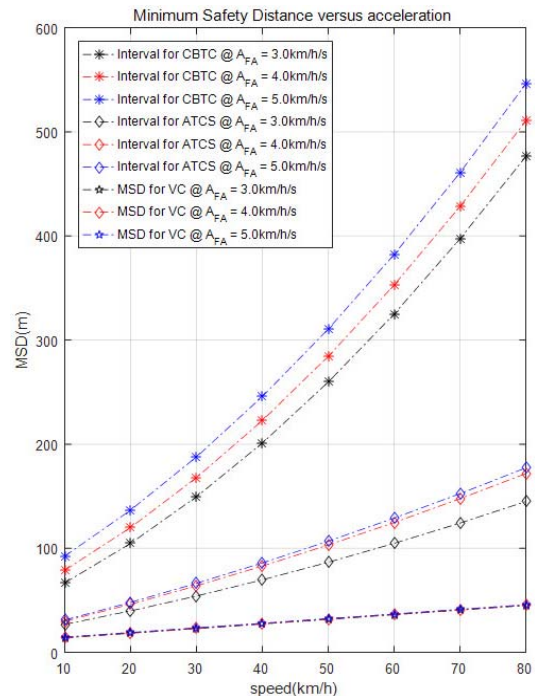


그림 7. 열차 가속도 변화에 따른 최소안전간격 비교
Fig. 7. Comparison of minimum safety intervals versus train acceleration

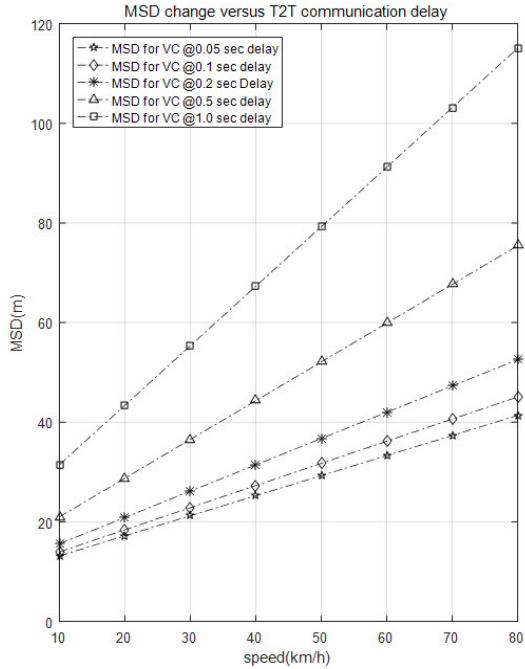


그림 8. T2T 통신지연에 따른 최소안전간격의 변화
 Fig. 8. Minimum safety distance change versus T2T communication delay

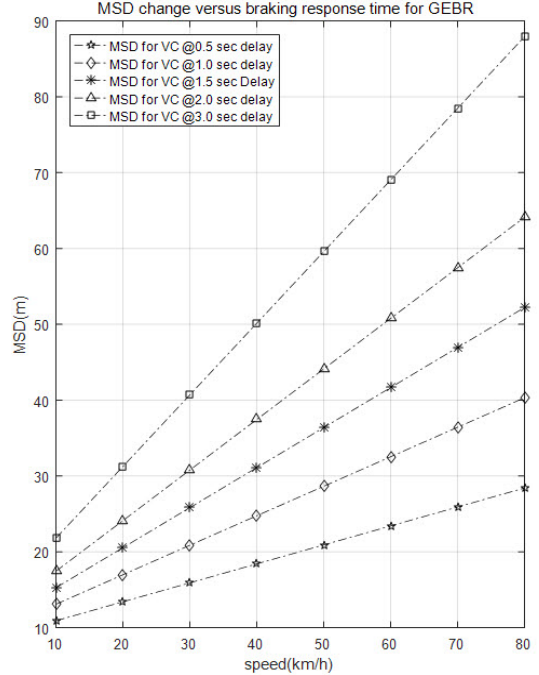


그림 9. GEBR 출력 지연에 따른 최소안전간격의 변화
 Fig. 9. Minimum safety distance change versus braking response time for GEBR

도가 높아질수록 최소안전거리 차이가 크게 발생하고 있음을 확인할 수 있다.

열차가 가지는 제동시스템의 *GEBR* 출력 지연시간(t_c), 즉 등가제동시간에 따른 가상연결기 성능을 분석하였다. 그림 9와 같이 제동지연을 0.5초부터 3.0초까지 변화시키면서 제동지연에 따른 최소안전간격의 변화를 시뮬레이션 하였다. 선행열차와 후행열차 모두 80 km/h로 주행시 제동지연이 0.5초인 경우 가상연결기가 안전을 위해 확보해야하는 최소안전간격은 약 28m에 불과하지만 제동지연이 3초인 경우 최소안전간격은 약 87m까지 증가함을 확인할 수 있다. 통신지연에서와 마찬가지로 속도가 높아질수록 제동지연에 따른 최소안전간격의 차이가 크게 나타남을 확인할 수 있다.

제동시스템 지연과 통신지연 외에도 열차제어시스템 자체의 응답지연시간에 따른 가상연결기 최소안전간격에 대한 영향력 분석이 필요하다. 그림 10은 열차제어시스템 응답지연시간을 0.1초부터 1.5초까지 변화를 주면서 가상연결기 최소안전간격을 시뮬레이션한 결과를 보여준다.

선행열차와 후행열차 모두 80 km/h로 주행시 열차제어시스템 지연시간이 0.1초인 경우 가상연결기가

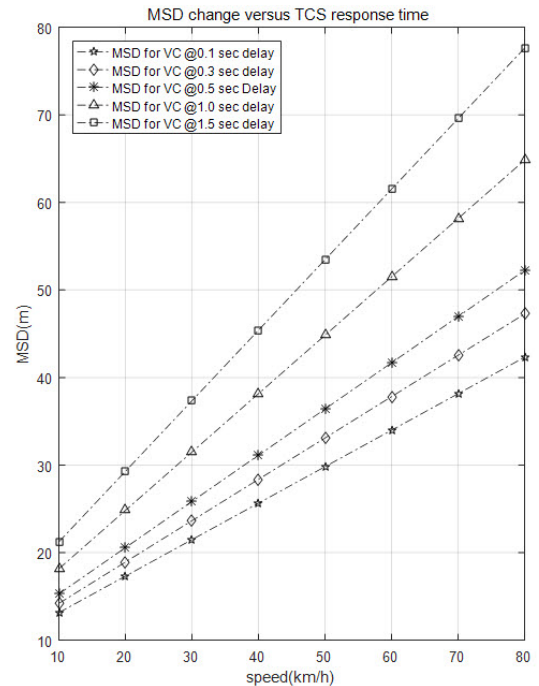


그림 10. TCS 지연에 따른 최소안전간격의 변화
 Fig. 10. Minimum safety distance change versus TCS Response Time

안전을 위해 확보해야하는 최소안전간격은 약 42m 이지만 열차제어시스템 지연시간이 1.5초인 경우 최소안전간격은 약 77m까지 증가하게 됨을 확인할 수 있다. 마찬가지로 속도가 높아질수록 열차제어시스템 지연에 따른 최소안전간격의 차이가 크게 나타남을 확인할 수 있다.

V. 결 론

본 연구에서는 열차 간 직접적인 통신기반의 ATCS 환경 하에서 가상연결기를 위한 방호 알고리즘을 제안하였다. 제안된 방호알고리즘은 열차의 주행선로와 같은 선로자원을 결합 전 상호 배타적으로 소유 하며 결합 이후 하나의 열차에 의해 소유 및 관리될 수 있도록 자원을 안전하게 병합하는 방법을 제시하였다. 열차의 특성과 주행속도에 따라 가상 연결된 열차 간 확보해야하는 최소 안전거리를 제시하였으며 가상연결기를 위한 열차 제동모형을 새롭게 제안하였다.

제안된 가상연결기 최소안전거리를 기존의 CBTC와 ATCS 간격제어 알고리즘과 비교함으로써 가상연결기가 최소안전거리를 대폭 단축할 수 있음을 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 또한 열차의 속도, 통신 및 제동시스템이 가지는 지연시간이 최소안전거리에 미치는 영향을 확인하였다. 가상연결시 선행열차와 후행열차 간 *GEBR*의 분할에 의해 ATCS보다 최소안전거리를 크게 줄일 수 있으나 가상연결된 선행열차의 *GEBR* 출력 지연시간(ΔT)은 선행열차에 앞서 주행하고 있는 타 열차와의 간격제어의 효율에 영향을 미칠 수 있다. 그러나 물리적 연결기와의 비교하더라도 연결에 따른 열차의 총 중량 증가에 따라 제동거리가 늘어날 수밖에 없는 점을 고려할 때 접근 방법은 타당하다고 판단된다.

향후 열차 모델을 통한 *GEBR* 출력 지연시간(ΔT)의 산정과 함께 최소안전거리를 침범하지 않도록 가상연결기 간격제어기에 대한 연구를 진행할 계획이다.

References

[1] S. Oh, K. Lee, M. Kim, and Y. Yoon, "ATP functional specification for automated train coupling/decoupling operation," *IEEE ICEMS*, pp. 1338-1341, Busan, South Korea, 2013.

[2] S. Oh, K. Lee, M. Kim, and J. Baek, "ATP functional procedure of the train control

system for an automated train coupling/decoupling operation," *IEEE ICCAS*, pp. 430-433, Seoul, South Korea, 2014.

[3] T. Schumann, "Increase of capacity on the Shinkansen high-speed line using virtual coupling," *Int. J. Transp. Develop. and Integration*, vol. 1, no. 4, pp. 666-676, 2017.

[4] RSSB, *Research in Brief - Closer Running (Reducing Headways)*, 2017.

[5] J. Goikoetxea, "Roadmap towards the wireless virtual coupling of trains," *Int. Workshop on Commun. Technol. for Veh.*, pp. 3-9, 2016.

[6] Shift2Rail, *The Rail Joint Undertaking*, <http://www.shift2rail.org>

[7] J. Winter, A. Lehner, and E. Polisky, "Electronic coupling of next generation trains," *3rd Int. Conf. Railway Technol.: Research, Develop. and Maintenance*, Cagliari, Civil-Comp Press, 2016.

[8] S. Oh and Y. Cho, "Shared resource allocation scheme and interval control algorithm for the T2T-Based autonomous train control system," *J. KICS*, vol. 42, no. 9, pp. 1781-1791, Sept. 2017.

[9] S. Oh and Y. Cho, "A track switching algorithm for the T2T-based autonomous train control system," *J. KICS*, vol. 42, no. 11, pp. 2160-2169, Nov. 2017.

[10] T. Parkinson and I. Fisher, "Rail transit capacity," *Transp. Res. Board*, vol. 13, 1996.

[11] R. W. Chen and J. Guo, "Development of the new CBTC system simulation and performance analysis," *WIT Trans. The Built Environ.*, vol. 114, 2010.

[12] R. Chen, C. Zhu, and L. Liu, "Calculation and optimization of train headway in CBTC system," *J. Southwest Jiaotong Univ.*, vol. 4, 2011.

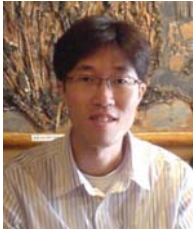
[13] L., Dongsheng and X. Yi, "Analysis of train minimum headway and realization of simulation algorithm under CBTC train control mode [J]," *Modern Urban Transit*, vol. 4, 2011.

[14] IEEE Std. 1474.1, *IEEE Standard for Communication-Based Train Control (CBTC)*

Performance and Functional Requirements,
2004.

- [15] IEEE Std. 1474.3, *IEEE Recommended Practice for Communication-Based Train Control (CBTC) System Design and Functional Allocations*, 2008.

오 세 찬 (Sehchan Oh)



2004년 8월 : 광주과학기술원 정
보통신공학과 석사

2013년 3월~현재 : 아주대학교
컴퓨터 공학 박사과정

2004년 11월~현재 : 한국철도기
술연구원 선임연구원

<관심분야> 무선통신기반 열차
제어, UTO/DTO 설계, 시스템 모듈화 설계

최 현 영 (Hyeon-Yeong Choi)



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 : 한국철도기
술연구원 선임연구원

<관심분야> 철도신호통신, 정보통신