

무인운전 도시철도차량 및 PSD 인터페이스 기능안전성에 관한 연구

최용은, 정기호, 오효석, 문병민, 김재문*
한국교통대학교

A Study on the Interface Functional Safety between Driverless Urban Railway Vehicle and PSD

Yong-Eun Choi, Ki-Ho Jeong, Hyo-Seok Oh, Byung-Min Moon, Jae-Moon Kim*
Korea National University of Transportation

요약 국내 철도안전법 개정에 따라 광역철도(광역철도와 연계되는 철도 포함)의 승강장에는 승강장안전문 설비 설치 의무화 시행으로 일부 기존에 설치 운영되던 별도의 승강장 안전장치 시스템(GIDS)을 승강장안전문(PSD)으로 변경하는 작업과 신규 노선의 경우 의무설치가 시행되고 있다. 최근 무인운전 시스템에 도입되는 PSD 기능안전성 확보를 위하여 PSD와 직접적으로 연동되는 차량에 설치 적용되는 차량RF장치에 대한 안전성을 요구하고 있다. 따라서, 본 논문은 무인운전 철도차량 시스템에서 PSD 신규 도입에 따른 PSD와 도시철도차량 출입문 인터페이스 기능안전성 확보를 위해 요구사항 분석하였다. 도시철도차량 출입문의 열림, 닫힘 신호명령(Enable)을 활성화하는 PSD/차량 RF장치의 안전무결성수준(SIL)에 대한 기능안전 적용 및 기능개선을 구현하였다. 이를 토대로 시험을 통해 도시철도 무인운전시스템 차량과 PSD의 기능안전성을 입증하였다.

Abstract Under the revision of the National Railroad Safety Act, some existing platform safety systems are being changed to platform safety doors (PSDs) and have mandatory installation for new routes. To secure the safety of PSD functions recently introduced in unmanned driving systems, the safety of a vehicle RF device installed in vehicles that are directly linked to a PSD is required. Therefore, this study analyzed safety requirements to secure functional safety of the interface between the PSD and the vehicle door according to the introduction of a new PSD for onboard RF control devices. Functional safety application and functional improvement were implemented for opening and closing signal commands for an urban railway vehicle door. We verified the functional improvement through field-tested functional safety of an urban railway driverless system between a vehicle and a PSD.

Keywords : Urban Railway, PSD, SIL, Functional Safety, Driverless System

1. 서론

철도안전법이 도입됨에 따라 기존에 설치 운영되고 있는 플랫폼 안전장치 시스템(GIDS: Guideway Intrusion

Detecting System)에 대하여 승강안전문 (PSD: Platform Screen Door) 신규 도입되고 있다[1]. 따라서 PSD와 직접적으로 연동되는 철도차량 출입문의 차량 RF장치에 대해 안전무결성수준(SIL: Safety Integrity

본 연구는 국토교통과학기술진흥원 2023년 철도차량 부품 개발사업 중 '도시철도 차량용 전기식 출입문 개발' 과제 지원을 받아 이루어진 연구로서, 관계 부처에 감사드립니다.

*Corresponding Author : Jae-Moon Kim(Dept. of Transportation System Engineering, Graduate School of Transportation, Korea National University of Transportation, Korea)

email: goldmoon@ut.ac.kr

Received September 7, 2023

Revised October 10, 2023

Accepted December 8, 2023

Published December 31, 2023

Level) 의 기능안전 적용을 통해 철도차량 출입문과 PSD 사이에 인터페이스 안전성을 확보하고자 하는 연구가 이루어지고 있다. 현재 국내의 경우 PSD 발주시 설계 단계에서부터 적용되어야 할 RAMS(Reliability, Availability, Maintainability and Safety) 관리 및 안전무결성수준 입증, 안전성 평가 등 안전관리 프로세스가 거의 요구되지 않고 있다. 단지, PSD 설비는 한국철도표준규격 KRS SG 0068-17(R) 3.4의 5항에 근거하여 “승강장 안전문이 열려 있을 때는 승강장에 접근열차의 진입을 막고 승강장에 정차한 열차는 출발할 수 없도록 열차운행과 연계되는 안전방호 기능이 새로이 설치되는 승강장안전문 시스템에서 동작하여야 한다”라고만 규정하고 있다[2]. 그러나 PSD의 잦은 고장 및 오작동으로 인한 안전사고를 줄이고 PSD 안전성 및 신뢰성 확보를 위해 RAMS 관리 및 SIL 등의 활동을 할 필요가 있다.

본 연구에서는 무인운전 철도차량을 운영하고 있는 시스템에 지상에 설치되는 PSD 도입에 따른 무인운전 철도차량 출입문과 PSD 상호간 요구사항 분석, 인터페이스 시험을 통해 기능 안전성을 확보하였다.

2. 본론

2.1 무인운전시스템 PSD 기능안전 분석

일반적으로 PSD 설비가 설치되어 있지 않은 경우 플랫폼 안전장치 시스템(GIDS)으로 운영하고 있다. 그러나 승강장 안전문(PSD)이 설치되면서 GIDS 시스템을 대체하는 안전 기능이 요구되고 있다[3-5]. 이를 위해 PSD가 닫히지 않거나 승객이 PSD를 임의로 개방한 경우 등 안전무결성 상실 상태에서 진입방지 기능을 수행할 수 있도록 기능안전 적용을 분석할 필요가 있다.

기존 GIDS 시스템에서는 승강장이 안전무결성 상실 상태일 때 열차의 출발을 방지하는 안전방호 기능은 완전하게 구현이 되지 않았다. GIDS 기능으로 출발방지 제어를 하게 되면 상선 또는 하선 승강장 중 한 곳에서 출발방지 제어를 해야 할 경우 반대측 승강장의 열차도 동일한 상태로 제어되어 진입방지 및 출발방지 상태가 된다.

이와 같이 과도한 제어로 열차운행의 정시성을 저해하고 불필요한 긴급제동 등 역효과를 유발하므로 개별적인 상선과 하선 제어가 요구된다. 따라서 개별적인 상선, 하선 출발방지 기능을 수행하려면 지상 PSD의 상태와 도시철도차량 사이에 연동이 되어야 하며, 이를 위한 최소한의 연동장치가 도시철도차량에 구비되어야 한다.

PSD와 차상간의 연동을 위해 차상 RF장치를 설치하고 열차 출발방지 기능은 도시철도차량 출입문의 닫힘 및 잠금 완료 상태신호인 Train Door Close Lock Status(이하 TDCLS) 신호를 PSD와 연동하기 위해 차상 RF 장치 설치 및 TDCLS 신호선의 일부 개조가 요구된다[6-8].

또한 도시철도차량이 승강장에 진입하여 정차하기 전까지의 안전방호기능은 PSD 시스템에 의해 수행되고, 정차 이후 출발할 때까지의 안전방호 기능은 RF 통신에 의한 TDCLS 신호선 제어로 수행한다.

2.2 PSD/차상 RF장치 기능 요구사항

PSD와 도시철도차량 상호간의 인터페이스 기능안전성 확보를 위해 인터페이스 장치인 차상 RF 출입문 신호(Door Enable Command)에 대한 기능안전성, PSD/차상 RF장치 요구사항을 Table 1과 같이 도출하였다[2].

- 선로변 Close Lock Status(이하 CLS) 신호가 도달하지 않을 때까지 도시철도차량 출발방지 활성화 명령을 PSD에 전달
- 재개폐 (장애물 감지 후 출입문 재순환)
 - 출입문 개별 제어
 - PSD에 대한 방해시만 처리
 - 도시철도차량 출입문의 장애물만 처리

Table 1. All Functional safety implementation plan

Functional safety	Derivation of PSD functional safety	Signal
Prevention of train platform entry and departure	Implementation of functional safety to prevent train entry and departure through the GIDS signal line in the PSD-linked control unit when platform safety integrity is lost	GIDS Signal (Wiring)
	In order to maintain the safety integrity of the vehicle, separate train entry prevention and departure prevention functions by on-board (RF) are not implemented.	
Door open and door close control	Interlocking train door control signals through onboard (RF) devices (implementation of redundancy to improve signal data reliability)	Vehicle door (CAN Data) 1.Right door: TDOR, TDCL 2.Left door: TDOL, TDCR 3.Active signal: TDEL, TDERC Safety
	Onboard (RF) device transmits the received signal to ground PSD	
	Ground (RF) device and interlocking control unit interface with conditions such as train position to control PSD opening/closing	

- PSD 및 차량 출입문 장애물 모두 처리
- 장애물 감지시 반대편 출입문 기능 정지

- 출입문 닫힘 경고 신호처리/PSD용 표시기 점멸고장 도어 관리
 - 도시철도차량에서 해당 선로변 문 열림 방지
 - 역간 선로변에서 도시철도차량이 해당 문을 열지 못하도록 방지
 - 개별 출입문 기준 방지

2.3 PSD/차상 RF장치 기능안전 적용

PSD와 도시철도차량의 인터페이스 안전성 확보를 위해 Fig. 1과 같이 차상RF 장치를 이중계로 구성하고 도시철도차량 CAN 네트워크에 수신 모드로 연동한다.

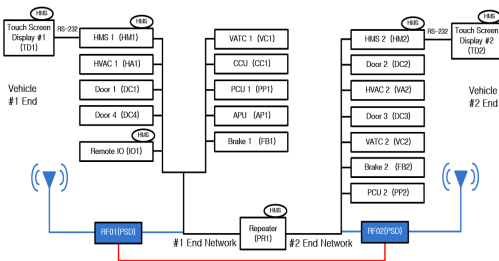


Fig. 1. PSD Onboard(RF) Redundant Network System

차상 RF장치는 도시철도차량 전두부(END#1) RFO 및 후두부(END#2) RFO 설치 분리되고 증계기로 연결되어 차량의 어느 한쪽 계통의 고장에도 다른 쪽으로 제어가 가능하다.

Fig. 2는 차상 RF장치(RFO)의 신호 계통도로 차상 RF장치와 도시철도차량의 하드웨어 사이의 인터페이스 신호이다. 차상 RF장치는 도시철도차량 CAN 네트워크와 접속하여 도시철도차량의 상태정보와 제어명령을 수신하여 지상 RF장치로 전송하고 PSD와 도시철도차량 출입문 사이에 열림, 닫힘 동작 동기화를 구현하였다[9].

한편 PSD 신규 도입에 따른 차상 RF장치의 기능안전 강화를 위해 TDCLS Safety Loop 계통도에서 PSD가 안전무결성 확보가 되지 않은 상태에서 TDCLS 안전루프 개방으로 제어하여 도시철도차량이 출발하지 못하도록 루프를 통해 제어하였다.

Fig. 3에서 BYPASS#1과 BYPASS#2는 PSD가 장애 상태이거나 정상적으로 “닫힘” 완료되지 못하는 경우 도

시철도차량을 출발할 수 있게 하는 기능을 수행한다.

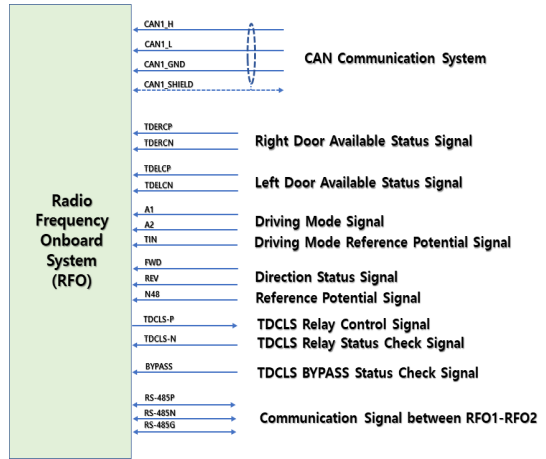


Fig. 2. Onboard RF Device Matching Signal

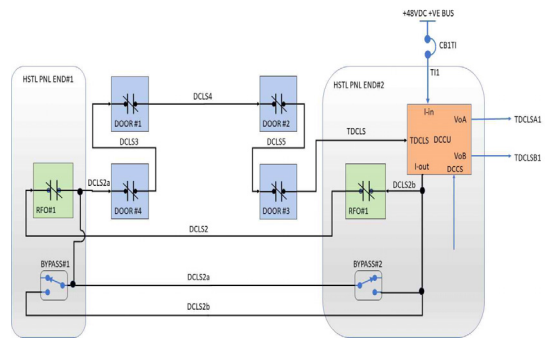


Fig. 3. RFO Install, Door TDCLS Safety Loop

그리고 PSD 와 차량 출입문 사이에 개폐에 따른 열림과 닫힘 연동하는 절차가 존재한다. Fig. 4은 PSD 와 차량 출입문 닫힘 연동하는 절차로 차상 RF장치의 역할을 나타낸다.

만일 Fig. 5와 같이 출입문이 장애물로 인해 닫힘 완료되지 못하면 자동 재순환 과정을 진행하게 된다. 이때 PSD는 도시철도차량 출입문의 자동 재순환 과정을 차상 RF장치에 의해 동기화하지 않고 PSD의 출입문 감지 기능으로 동기화 수행한다. 장애물로 인한 재순환 3회 실시 후 원인 제거 되지 않을 경우 VATO에서는 전동차 출입문 개방 후 대기 상태가 된다.

이때 Vehicle Auto Train Operation(이하 VATO)에서 도시철도차량 출입문으로 출입문 열기 명령을 송신하여 해당 PSD가 열림으로 제어한다.

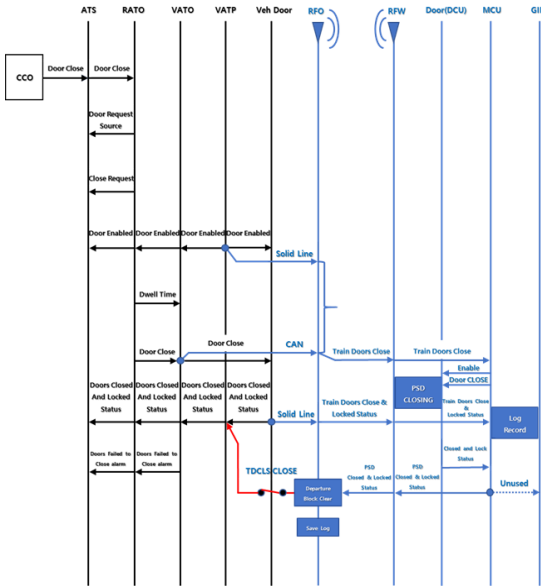


Fig. 4. PSD & Vehicle door Closing I/O process with RFO

Table 2는 TLCLS 제어조건을 나타낸다. 차상 RF장치는 지상 RF장치가 전송하는 PSD상태 정보를 수신하여 PSD가 안전무결성 상실 상태가 되면 전동차의 TDCLS 신호를 차단하여 전동차 출발을 방지한다.

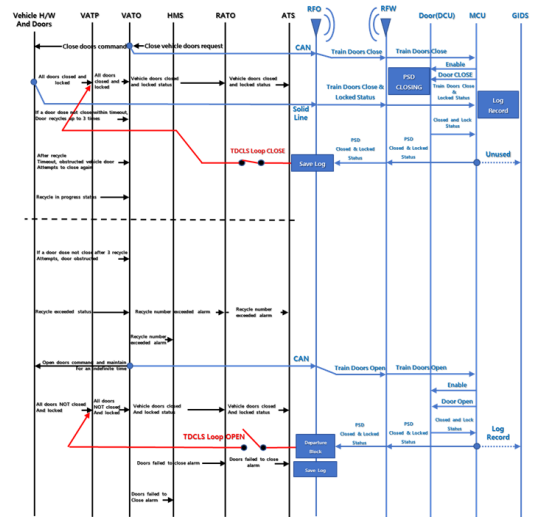


Fig. 5. Door Recycle Exceeded by door obstacles

Table 2. TDCLS Control Conditions

Power	VATC Connect	RF Comm Connect	By-Pass	Vehicle Door	Vehicle Stop Status	PSD	TDCLS
Off	*	*	*	*	*	*	Closed
	*	*	*	*	*	*	Closed
On	Disconnect	*	*	*	*	*	Closed
	Connected	Disconnect	Enable	*	*	*	Closed
				*	*	*	Closed
	Connected	Connected	Disable	Closed	*	*	Closed
				Open	Short /Long	*	Closed
					Good	Closed	Closed
					OPEN	OPEN	OPEN

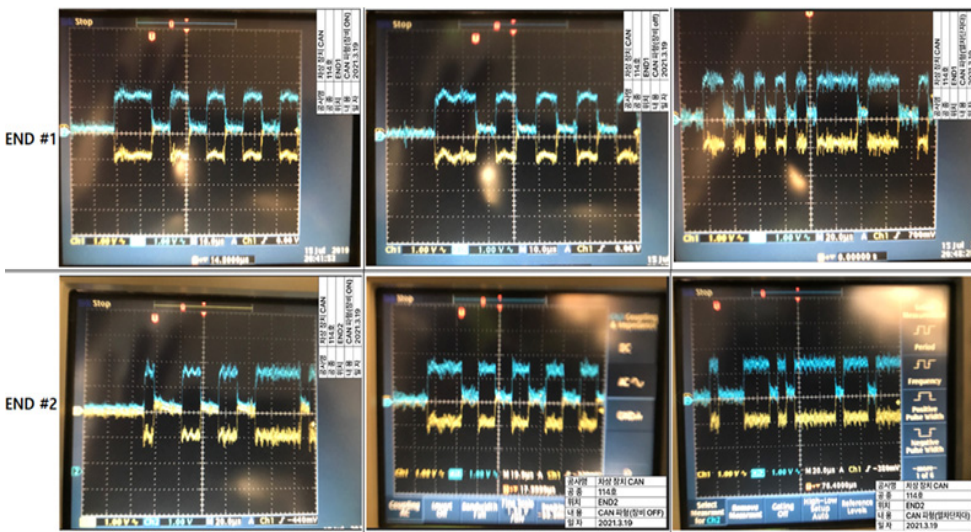


Fig. 6. RF Comm (CAN) Data Results

2.4 PSD/차상 RF 인터페이스 기능안전 검증

차상 RF장치/PSD 기능안전성 확보를 위해 도시철도 차량의 CAN 통신 시험을 통해 RF 데이터를 분석하였다 [10,11].

Fig. 6에서 보듯이 실제 운영 중인 도시철도차량으로 CAN 네트워크 데이터 계측한 결과 데이터 상태별 파형

이 정상임을 확인하였다. 또한 PSD 설치에 따른 차상 RF장치 인터페이스 기능안전성 확보를 위한 시험선 및 본선 운행선 동적시험을 하였다.

시험결과 “Door Enable” 및 “릴레이 점접 출력문제”로 인해 출입문 알람발생에 따른 문제점을 Fig. 7, Fig. 8과 같이 도출하였다.

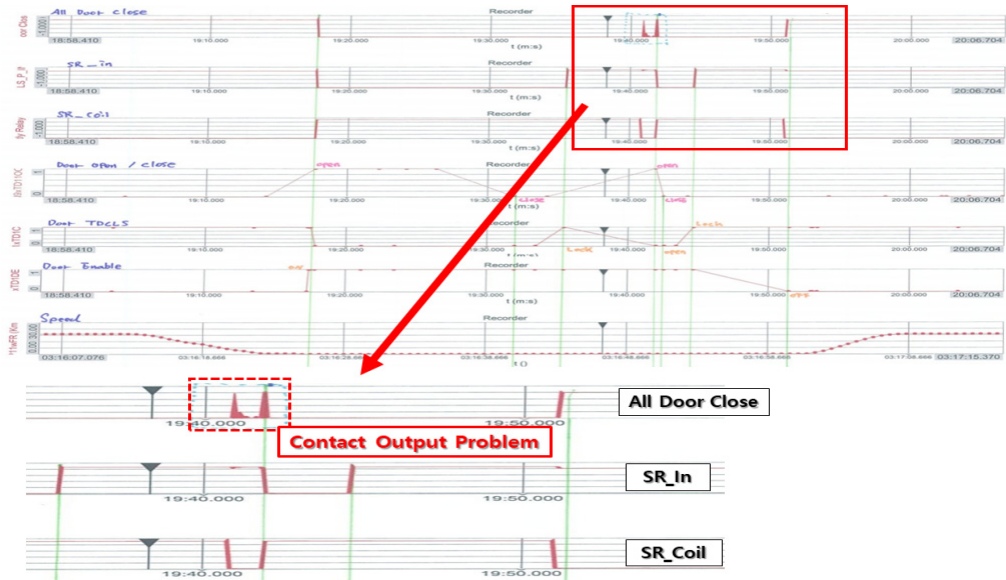


Fig. 7. PSD with Door Failed to Close Events

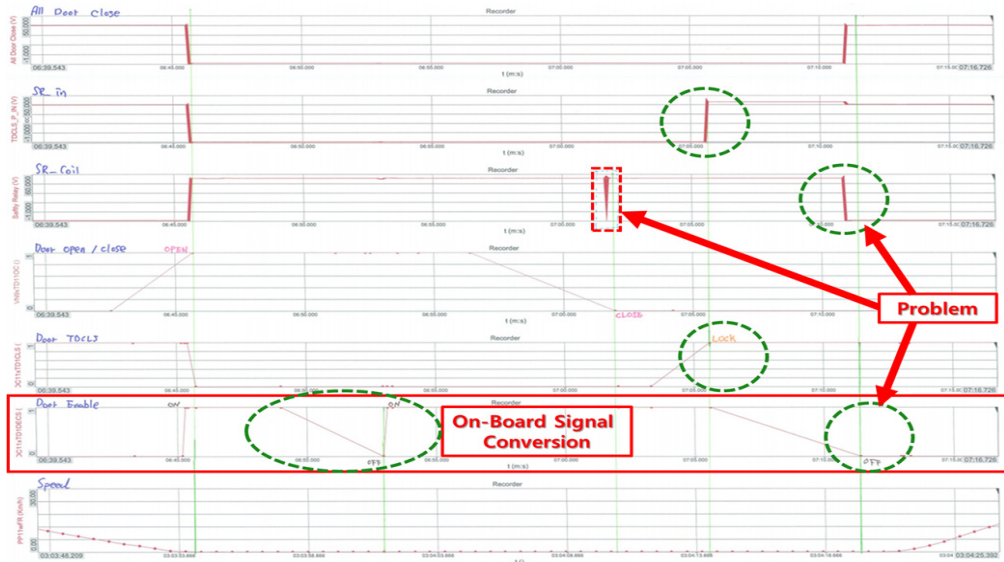


Fig. 8. PSD with Door Enable Signal Fault

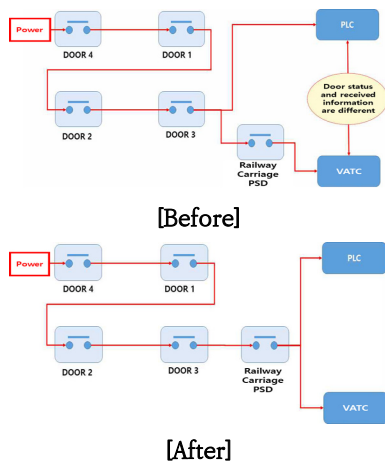


Fig. 9. Improvement of Door Enable Signal Loop

Table 3. Test Result for PSD Interface with Onboard (RF) Normal Operation

Station Status	Good	Error	Pass/Fail
Door Operation	Yes	No	Pass
All Door Closed Status	Yes	No	Pass
Relay coil excitation state	Yes	No	Pass
SD communication status between Train and PSD	Yes	No	Pass
Train Alarm	Yes	No	Pass
Train status information	Yes	No	Pass
ALL Door Closed	Yes	No	Pass
Train Departure and Arrival status	Yes	No	Pass

3. 결론

본 논문은 도시철도 무인운전시스템에서 기존에 설치 운영되던 플랫폼 안전장치 시스템(GIDS: Guideway Intrusion Detecting System)에서 승객 안전성 강화를 위해 PSD도입에 따른 인터페이스 기능안전성에 대해 연구하였다.

먼저, PSD와 도시철도차량 출입문과 직접적으로 연동되는 차량 RF장치 인터페이스에 대한 기능안전성 확보를 위하여 요구사항을 도출하였다. 또한, 전력용 계전기를 철도차량 신호용 계전기로 변경하여 TDCLS(출입문 닫힘 잠금 신호)의 신뢰성 강화를 통해 기능안전성을 입증하여 문제를 해결하였다. 이를 토대로 PSD와 도시철도차량 출입문 상호 인터페이스, 시스템 연동 및 현차 시험을 수행하여 양호한 특성을 얻었다.

향후 연구 결과를 토대로 도시철도차량 및 주요 시스템에 대해 기능안전성 측면에서 실제 운영 및 유지보수에 기여할 것으로 사료된다.

References

- [1] Railroad Safety Act Article 25, Enforcement Rule Article 43, Railroad Facility Technical Standard Article 75(Platforms)
- [2] Korean Railway Standards(KRS SG 0068-17[R] 3.4 Paragraph 5)
- [3] Sung Kyu Kim, "A Study on a Safety Life Cycle of IEC 61508 for Functional Safety", Journal of Applied Reliability, Vol. 14, No. 1, pp.81-91, 2014.
- [4] Si Young Jeong, "A study of Requirement Analysis for Applying Functional Safety based on IEC 61508", Master's thesis at Ajou University 2009.
- [5] Yu Ho Kim, "Railway System Functional Safety and Certification", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 63P, No. 4, pp. 226-235, 2014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5370/KIEEP.2014.63.4.226>
- [6] EN 50126(2017), Railway applications: The specification and Demonstration of Dependability-RAMS

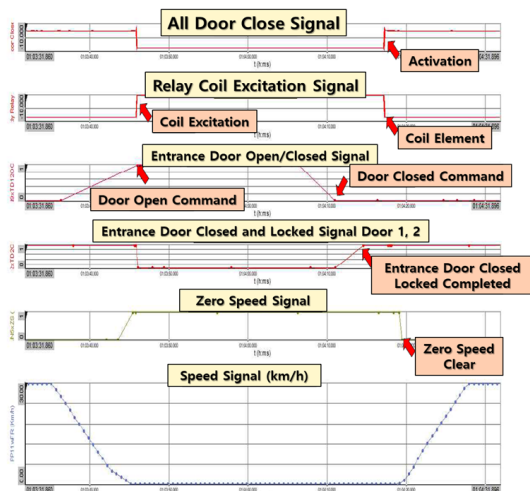


Fig. 10. Improvement of Interface between Vehicle and Wayside RF Communication

- [7] EN 50129:2018 Railway applications. Communication, signalling and processing systems
- [8] BS EN 50657:2017 Railways Applications – Software on Board Rolling Stock
- [9] Yongin Light Rail Transit Onboard Wireless Device Maintenance Manual_2, YL-RFO-MM-V1.0, 2020.
- [10] IEC 62267:2009 – Railway applications Automated urban guided transport Safety requirements
- [11] Unmanned Operation System(UTO) Safety Requirement Satisfaction Status Survey Table based on EN 62267

최 용 은(Yong-Eun Choi)

[정회원]



- 2019년 2월 : 광주대학교 전기전자공학과 졸업
- 2022년 2월 : 한국교통대학교 교통시스템공학과 (공학석사)
- 2022년 3월 ~ 현재 : 한국교통대학교 교통대학원 박사과정

<관심분야>

전력전자, 전기철도

정 기 호(Ki-Ho Jeong)

[정회원]



- 2016년 8월 : 한양대학교 공학대학원 철도시스템공학과 (공학석사)
- 2023년 8월 : 한국교통대학교 교통대학원 교통정책·시스템공학과 (공학박사)
- 2023년 8월 ~ 현재 : 용인에버라 인운영(주) 안전처장

<관심분야>

철도시스템, 전기철도

오 호 석(Hyo-Seok Oh)

[정회원]



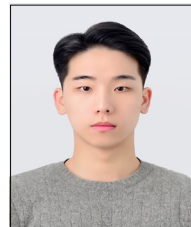
- 2020년 2월 : 인덕대학교 메카트로닉스공학과 졸업
- 2022년 2월 : 한국교통대학교 교통시스템공학과 (공학석사)
- 2022년 3월 ~ 현재 : 한국교통대학교 교통대학원 박사과정

<관심분야>

전력전자, 전기철도

문 병 민(Byung-Min Moon)

[준회원]



- 2022년 2월 : 인덕대학교 메카트로닉스공학과 졸업
- 2022년 3월 ~ 현재 : 한국교통대학교 교통시스템공학과 석사과정

<관심분야>

전력전자, 전기철도

김 재 문(Jae-Moon Kim)

[정회원]



- 2000년 2월 : 성균관대학교 전기공학과 (공학박사)
- 2000년 3월 ~ 2004년 2월 : 현대모비스(주) 기술연구소 선임연구원
- 2004년 3월 ~ 2012년 2월 : 한국철도대학 철도차량전기와 교수
- 2006년 1월 ~ 현재 : 국토교통부 철도기술 전문위원
- 2013년 3월 ~ 현재 : 한국교통대학교 교통시스템공학과 교수

<관심분야>

전력전자, 전기철도