

광역철도차량의 귀선전류에 의한 궤도회로 영향 분석

김성진*, 이재호
한국철도기술연구원 열차제어통신연구실

Analysis of Effects of Return Current for Track Circuits on Metropolitan Railway Lines

Seong Jin Kim*, Jaeho Lee
Train Control and Communications Research Department, Korea Railroad Research Institute

요약 철도 교통의 주요 동력원으로 전기의 활용은 고객들에게 편리한 서비스와 고속 이동성뿐 아니라 환경친화적인 교통수단을 제공해 주고 있다. 전동차에 공급된 전류는 차량 내부의 전력 변환단계와 추진장치 등을 거치고, 레일과 임피던스 본드 등의 경로를 통해 변전소로 되돌아간다. 이와 같은 되돌아가는 전류, 즉 귀선전류에 고조파가 포함될 수 있으며, 이러한 고조파는 증폭되어 레일에 인접한 통신선과 철도 신호시스템을 교란할 수 있다. 따라서 철도 신설 노선 또는 주요 신호시스템을 교체하는 개량 노선의 경우, 전동차의 운행에 따라 발생하는 귀선전류와 귀선전류 고조파가 철도 신호시스템 중 하나인 궤도회로에 영향을 주는지 확인하는 시험이 필요하다. 궤도회로는 철도 교통에서 열차 위치의 모니터링과 관리 측면에서 매우 중요한 안전 기능을 수행하고 있다. 본 논문에서는 직류 급전 방식의 광역철도 구간에서 미니 임피던스 본드를 대상으로 귀선전류와 귀선전류 고조파 시험방법을 제시한다. 전동차가 허용 가능한 최고 속도로 주행 시 귀선전류 최대값과 불평형률, 그리고 귀선전류 고조파에 대한 측정 결과를 기술하였다.

Abstract The use of electricity as a major power source of railway transportation provides customers with convenient services and high-speed and eco-friendly transportation. The current supplied to the train passes through the power conversion step and propulsion units and returns to the substation through rails and impedance bonds. Such a return current can contain harmonics, which can be significantly amplified and disrupt communication lines and railway signal systems. Therefore, in the case of a new line or an improved line replacing an old signal system, it is necessary to test whether the return current and the return current harmonics generated by the propulsion of the train affect the track circuit, which is one of the railway signal systems. The track circuit performs an important safety function in monitoring and managing trains in railway transportation. This paper presents a measurement method for the return current and the return current harmonics for mini impedance bonds on metropolitan railway lines with the DC power supply. While driving at the highest allowable speed, the measurement results for the maximum return current, the unbalance rate, and the return current harmonics are presented.

Keywords : Return Current, Harmonic Frequency, Mini Impedance Bond, Track Circuit, Metropolitan Railway

본 논문은 한국철도기술연구원 주요사업(PK2203E2)의 연구비 지원으로 수행되었음.

*Corresponding Author : Seong Jin Kim(Korea Railroad Research Institute)

email: sjkim@krri.re.kr

Received August 29, 2022

Revised October 17, 2022

Accepted November 4, 2022

Published November 30, 2022

1. 서론

철도 교통의 주요 동력원으로 전기의 활용은 고객들에게 편리한 서비스와 고속 이동성뿐 아니라 환경친화적인 교통수단을 제공해 주고 있다.

전기철도의 전철변전소에서 공급되는 전류는 급전선을 통해 전차선에 흐르게 되고, 전기철도 차량의 팬터그래프에 집전되어 차량내 설치된 추진장치 등을 동작시킨 후 차륜을 거쳐 레일, 임피던스 본드, 부급전선 등의 경로를 통하여 변전소로 되돌아간다. 이때 차륜 이후의 경로를 귀선회로라 하며 여기에 흐르는 전류를 귀선전류라고 한다. 전기차량에 공급되었던 전류는 차량 내부의 전력 변환단계와 추진장치 등을 거치게 되고, 이러한 과정을 거치는 동안 귀선전류에 고조파가 포함된다. 주목할 점은 이러한 고조파가 포함된 전류가 변전소로 되돌아갈 때 무시할 수 없는 전력 계통의 품질 문제를 초래하거나 [1] 또는 증폭되어 레일에 인접한 통신선과 철도 신호시스템을 교란할 수 있다는 것이다 [2-7].

특히 철도 신설 노선 또는 궤도회로 등과 같은 주요 신호시스템을 교체하는 개량 노선의 경우 정상 운영을 하기 전에 철도안전법에 따라 시설물 검증시험을 하여야 한다. 시설물 검증시험의 한 항목으로 전기차량의 운행에 따라 발생하는 귀선전류와 귀선전류 고조파가 철도 시설물 중 하나인 신호시스템의 동작에 영향을 있는지 확인하는 과정이 필요하다.

철도 신호시스템 중 궤도회로는 열차의 위치 모니터링, 제한속도 전송, 관리 측면에서 매우 중요한 안전 기능을 수행하고 있다. 이러한 궤도회로에 미치는 귀선전류 및 고조파 영향 관련 선행 연구들을 살펴보면, 2010년 이후 현재까지 교류 급전 방식을 사용하는 고속철도 구간 [4,5]과 일반철도 구간 [3]에서의 연구는 찾아볼 수 있다. 그러나 직류 급전 방식의 광역철도 구간에서의 시험방법 및 기준은 아직 부족한 상황이다 [8].

본 논문에서는 기존 교류 급전 방식의 궤도회로에 대한 귀선전류의 적합성 연구를 바탕으로 [3-5] 직류급전 방식의 광역철도 구간에서 전동차가 운행시 발생하는 귀선전류의 크기와 불평형을 그리고 귀선전류 고조파에 대한 시험방법과 기준에 관해 기술한다. 또한, 실제 측정 결과를 분석하여 해당 노선이 시험기준에 적합함을 확인한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 귀선전류와 귀선전류 고조파 시험방법 및 기준에 관해 기술하고, 3장에서는 전동차를 정상상태와 비정상상태인 조건에서 허용 가능한 최고속도로 주행하며 측정된 귀선전류와 고

조파 결과를 기술하고 기준치에 적합한지 분석하였다. 4장 결론으로 광역철도차량 운행에 따른 궤도회로 귀선전류 최대값과 불평형률, 고조파 영향 분석 결과를 바탕으로 시험기준에 적합함을 확인하였다.

2. 귀선전류와 고조파 시험방법 및 기준

일반적으로 귀선전류와 귀선전류 고조파 시험을 위한 측정 개소는 귀선전류 및 귀선전류 고조파가 시험 구간에서 최대로 측정 될 것으로 예상되는 개소를 선정한다. 이를 위해 교류 급전 방식의 고속철도와 일반철도 구간에서는 전철변전소와 급전구분소 부근 중 측정이 용이한 개소를 선정하여 시험을 시행한다 [3-5].

본 논문의 직류 급전 방식의 광역철도 구간도 마찬가지로 전철변전소 부근의 상/하선 중성선이 연결된 직류용 미니 임피던스 본드 중 부급전 선로에 연결된 개소와 측정이 용이한 개소 2개소를 선정하였다. 선정된 측정 개소에서 전동차(직류 1,500 V 급전, 10량 1편성, 가변 전압 가변 주파수 제어 방식)를 대상으로 차량 조건을 정상상태와 비정상상태(추진제어장치 1계 차단)로 구분하여 운행할 수 있는 최대속도로 주행하며 시험을 시행한다.

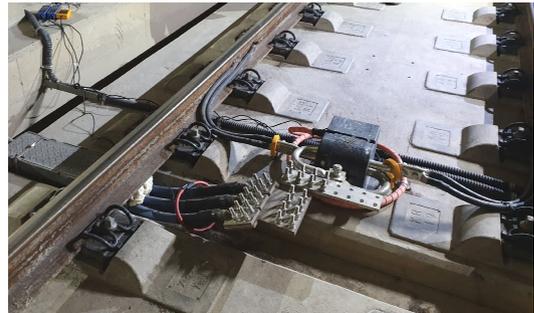


Fig. 1. Mini impedance bond installed in a metropolitan railway line

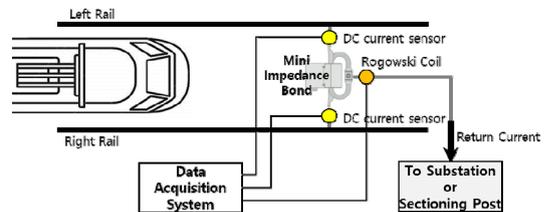


Fig. 2. Measurement configuration of the return current and harmonics

궤도도상 중간에 설치되는 미니 임피던스 본드는 5개의 단자를 갖고 있다. 5개의 단자중 3개의 단자는 귀선전류와 연관되어 Fig. 1에서 보는 바와 같이 단자 2개는 각각 좌/우 레일에 연결되고 중앙의 단자는 중성부라 하며, 연결되지 않은 상태로 설치하거나 전차선 전류의 불평형을 방지하기 위해 상/하선 중성부가 연결되도록 중성선을 설치하기도 한다. 남은 2개의 단자는 궤도회로 관련 장치에 연결되어 있다 [9,10]. Fig. 2에서 보는 바와 같이 레일에 연결된 단자에는 최대 측정범위 2,000 A인 DC 전류 센서를 포함한 프로브를, 중성부에는 고조파를 측정할 수 있는 교류 전류 센서인 로코스키 코일을 포함한 프로브를 설치하였고, 데이터 획득 장치와 측정 소프트웨어를 포함한 데이터 측정시스템을 구성하였다. 교류 급전 방식인 경우에는 측정지점에 로코스키 코일을 포함한 프로브만 사용한다 [3-5].

귀선전류 시험기준의 경우, 본 논문의 광역철도 구간에 사용된 미니 임피던스 본드는 KRS 관련 규격 [9]을 검토해 본 결과 최대 3,000 A를 흘릴 수 있는 제품으로 귀선전류의 최대 기준값은 연속정격전류 3,000 A이어야 한다 [9,10]. 또한 좌/우측 귀선전류의 불평형률 [11]이 기준치인 총 귀선전류의 10% 이상일 경우 불평형으로 기록한다.

귀선전류 고조파 시험기준의 경우, 직류 급전 방식의 광역철도 구간에서 사용되고 있는 궤도회로 기준 주파수 ($F_1=1,590$ Hz, $F_2=2,670$ Hz, $F_3=3,870$ Hz, $F_4=5,190$ Hz)별로 측면주파수($F_i \pm 10$ Hz, $i=1, 2, 3, 4$)에서 측정된 전류 고조파 크기 성분이 Table 1에서 보는 바와 같이 기준 제한값을 초과하면 해당 주파수에서 초과 성분, 즉 노이즈의 지속시간을 기록한다 [3].

Table 1. Harmonic limits at reference frequencies of track circuits

Frequency	F_1	F_2	F_3	F_4
Harmonic limits at side frequencies ($F_i \pm 10$ Hz)	300 mA	300 mA	300 mA	300 mA

3. 측정결과 및 분석

3.1 귀선전류 측정결과 및 분석

전동차가 허용 가능한 최고속도로 주행하며 선정된 시험개소에서 정상상태일 경우와 비정상상태일 경우 각각

2회씩 귀선전류를 측정하였고, 시험 개소당 총 4회 측정하였다.

시험개소 1은 구간 최고속도인 80 km/h로 운행하였으나, 시험개소 2는 역 근처 구간으로 60 km/h 정도로 운행하며 귀선전류를 Fig. 3와 Fig. 4에서 보는 바와 같이 측정하였다. I1과 I2는 좌/우 레일에서 미니 임피던스 본드로 흐르는 전류를 의미하며, 미니 임피던스 본드의 중성부에서 부급전선으로 흐르는 전류는 중성선 전류로 표기하였다. 그리고, 귀선전류의 측정값 중 최대값과 불평형률 그리고 측정시 열차의 통과 속도를 Table 2에 기록하였다. 열차 속도는 전동차 운전실의 속도 계기판에 표시되는 시험개소 진입 전 속도와 진출 후 속도를 평균하여 기록하였다.

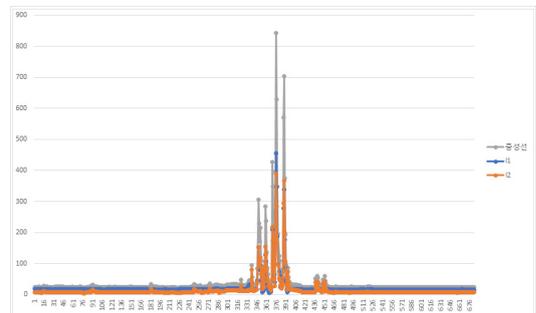


Fig. 3. Measurements of return current at site 1 in normal condition

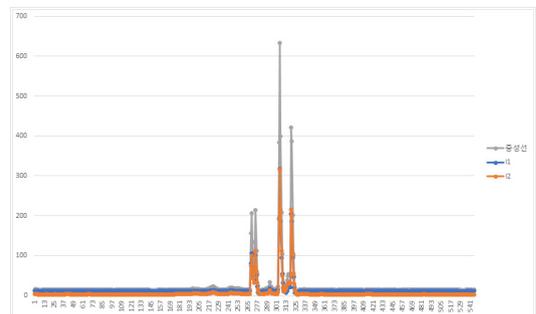


Fig. 4. Measurements of return current at site 1 in abnormal condition

Table 2에서 보는 바와 같이 시험개소 2개소에서 총 8회 측정된 귀선전류 값이 임피던스 본드의 최대 제한값인 3,000 A보다 낮게 측정되었고, 좌/우측 레일의 불평형률도 10% 미만으로 기준에 적합함을 알 수 있다. 측정된 최대전류가 기준값보다 훨씬 낮은 이유는 해당 구간에 시험을 위한 전동차가 1대만 운행하였기 때문이며,

실제 운영할 때는 상선 및 하선에 열차가 교차하여 운행할 수 있다.

Table 2. Return current measurements

Condition		Maximum Current	Unbalance rate	Speed	Remark
Site 1	Normal	842.9 A	7.9% (66.2 A)	79 km/h	Pass
		835.3 A	9.3% (77.5 A)	80 km/h	Pass
	Abnormal	634.0 A	0.3% (2.1 A)	81 km/h	Pass
		611.3 A	0.1% (0.5 A)	78 km/h	Pass
Site 2	Normal	260.8 A	0.3% (0.8 A)	62 km/h	Pass
		222.7 A	0.3% (0.7 A)	65 km/h	Pass
	Abnormal	139.3 A	1.1% (1.5 A)	62 km/h	Pass
		152.3 A	1.0% (1.5 A)	63 km/h	Pass

3.2 고조파 측정결과 및 분석

선정된 2개의 시험개소에서 허용 가능한 최고속도로 운행하며 귀선전류 고조파를 측정하였고, 열차 운행 조건을 정상상태와 추진제어장치를 1계 차단한 비정상상태에서 각각 2회씩 측정하였다.

Table 3부터 Table 6까지는 시험개소 1에서 정상상태와 비정상상태에서의 고조파 측정 결과이며, Table 7부터 Table 10까지는 시험개소 2에서의 정상상태와 비정상상태에서의 측정 결과를 나타낸다. 열차 속도는 전동차가 시험개소를 통과하면서 운전실의 속도 계기판에 표시되는 진입 전 속도와 진출 후 속도를 평균하여 기록하였다.

Table 3. Harmonics of return current measurements at site 1 (normal condition, 78 km/h)

Frequency		Results	Remark
F ₁	-10 Hz	3.28 mA	Pass
	+10 Hz	4.58 mA	Pass
F ₂	-10 Hz	5.26 mA	Pass
	+10 Hz	6.11 mA	Pass
F ₃	-10 Hz	4.73 mA	Pass
	+10 Hz	2.35 mA	Pass
F ₄	-10 Hz	2.03 mA	Pass
	+10 Hz	1.68 mA	Pass

Table 4. Harmonics of return current measurements at site 1 (normal condition, 80 km/h)

Frequency		Results	Remark
F ₁	-10 Hz	5.57 mA	Pass
	+10 Hz	2.84 mA	Pass
F ₂	-10 Hz	3.89 mA	Pass
	+10 Hz	5.55 mA	Pass
F ₃	-10 Hz	2.29 mA	Pass
	+10 Hz	2.37 mA	Pass
F ₄	-10 Hz	1.60 mA	Pass
	+10 Hz	1.75 mA	Pass

Table 5. Harmonics of return current measurements at site 1 (abnormal condition, 78 km/h)

Frequency		Results	Remark
F ₁	-10 Hz	4.57 mA	Pass
	+10 Hz	2.96 mA	Pass
F ₂	-10 Hz	10.58 mA	Pass
	+10 Hz	6.69 mA	Pass
F ₃	-10 Hz	2.96 mA	Pass
	+10 Hz	2.37 mA	Pass
F ₄	-10 Hz	1.56 mA	Pass
	+10 Hz	1.90 mA	Pass

Table 6. Harmonics of return current measurements at site 1 (abnormal condition, 79 km/h)

Frequency		Results	Remark
F ₁	-10 Hz	3.39 mA	Pass
	+10 Hz	2.97 mA	Pass
F ₂	-10 Hz	6.21 mA	Pass
	+10 Hz	6.63 mA	Pass
F ₃	-10 Hz	2.64 mA	Pass
	+10 Hz	2.75 mA	Pass
F ₄	-10 Hz	1.42 mA	Pass
	+10 Hz	1.56 mA	Pass

Table 7. Harmonics of return current measurements at site 2 (normal condition, 22 km/h)

Frequency		Results	Remark
F ₁	-10 Hz	28.69 mA	Pass
	+10 Hz	33.43 mA	Pass
F ₂	-10 Hz	10.87 mA	Pass
	+10 Hz	11.42 mA	Pass
F ₃	-10 Hz	7.80 mA	Pass
	+10 Hz	9.01 mA	Pass
F ₄	-10 Hz	4.85 mA	Pass
	+10 Hz	5.29 mA	Pass

Table 8. Harmonics of return current measurements at site 2 (normal condition, 25 km/h)

Frequency	Results	Remark	
F ₁	-10 Hz	23.08 mA	Pass
	+10 Hz	25.60 mA	Pass
F ₂	-10 Hz	13.78 mA	Pass
	+10 Hz	8.90 mA	Pass
F ₃	-10 Hz	5.71 mA	Pass
	+10 Hz	5.75 mA	Pass
F ₄	-10 Hz	3.77 mA	Pass
	+10 Hz	4.38 mA	Pass

Table 9. Harmonics of return current measurements at site 2 (abnormal condition, 20 km/h)

Frequency	Results	Remark	
F ₁	-10 Hz	14.38mA	Pass
	+10 Hz	14.63mA	Pass
F ₂	-10 Hz	11.84mA	Pass
	+10 Hz	11.32mA	Pass
F ₃	-10 Hz	8.71mA	Pass
	+10 Hz	5.13mA	Pass
F ₄	-10 Hz	6.17mA	Pass
	+10 Hz	4.94mA	Pass

Table 10. Harmonics of return current measurements at site 2 (abnormal condition, 23 km/h)

Frequency	Results	Remark	
F ₁	-10 Hz	12.37 mA	Pass
	+10 Hz	5.11 mA	Pass
F ₂	-10 Hz	18.03 mA	Pass
	+10 Hz	15.35 mA	Pass
F ₃	-10 Hz	5.06 mA	Pass
	+10 Hz	5.35 mA	Pass
F ₄	-10 Hz	3.65 mA	Pass
	+10 Hz	4.02 mA	Pass

시험개소 1에서는 구간 최고 속도인 80km/h로 주행하면서 귀선전류를 측정하여 고조파를 분석하였다. 또한 궤도회로 장치에 대한 영향 여부를 확인하였고, 정상상태 2회 및 비정상상태 2회에 대하여 궤도회로 기준주파수별 측면주파수에서 고조파가 기준 제한치를 초과하는지 Table 3부터 Table 6에서 보는 바와 같이 확인하였다.

시험개소 2에서는 25km/h 이하로 주행하면서 귀선전류를 측정하였고, 정상상태 2회 및 비정상상태 2회에 대하여 궤도회로 기준주파수별 측면주파수에서 고조파가 기준제한치를 초과하는지 Table 7부터 Table 10에서 보는 바와 같이 확인하였다.

Table 3부터 Table 10까지 보는 바와 같이 고조파 측정 결과가 궤도회로 기준주파수별 측면주파수에서 고조파 제한치를 초과하지 않았으므로 기준에 적합함을 알 수 있다.

4. 결론

철도 교통의 주요 동력원으로 전기의 활용으로 인하여 고객들에게 효율성과 환경친화적인 교통수단을 제공해 주고 있다. 그러나 전동차의 운행에 사용한 전류에 고조파가 포함될 수 있으며, 이러한 고조파는 증폭되어 인접한 철도 신호시스템을 교란할 수 있다는 것이다. 따라서 철도 신설 노선 또는 궤도회로 등과 같은 주요 신호시스템을 교체하는 개량 노선의 경우, 전기차량의 운행에 따라 발생하는 귀선전류와 귀선전류 고조파가 철도 신호시스템중 하나인 궤도회로에 영향을 주는지 확인하는 시험이 필요하다.

본 논문에서는 기존 연구에서 다루지 않았던 직류 급전 방식의 광역철도구간에서 미니 임피던스 본드를 대상으로 귀선전류의 크기와 불평형률, 그리고 궤도회로 고조파 시험방법과 기준을 제시하였다. 시험노선에서 허용 가능한 최고 속도로 주행시 귀선전류와 귀선전류 고조파를 측정하였다. 귀선전류 최대값과 불평형률과 귀선전류 고조파가 기준에 적합함을 확인할 수 있었으며, 또한 시험하는 동안 궤도회로가 정상 동작 함을 확인하여 영향을 주지 않음을 확인할 수 있었다.

향후 직류 급전 방식의 광역철도 구간에서 궤도회로에 대한 귀선전류 및 귀선전류 고조파에 대한 시설물검증시험시 본 논문에서 제안한 측정장비 및 시험기준 등이 효과적으로 활용될 수 있을 것이다.

References

- [1] S. A. Assefa, A. B. Kebede and D. Legese, "Harmonic analysis of traction power supply system: case study of Addis Ababa light rail transit," *IET Electrical Systems in Transportation*, Vol.11, No.4, pp.391-404, Dec. 2021.
DOI: <https://doi.org/10.1049/els2.12019>
- [2] J. Ji and J. Lee, "A Study on the Anomalous Phenomenon of Non-Insulated AF Track Circuit.," *Proceedings of 2010 Autumn Conference of the Korean Society of Railway*, Seogwipo, Korea,

pp.1652-1654, Oct. 2010.

- [3] J. Baek, Y. Kim, Y. Yoon, D. Jang and D. Shin, "Analysis of Return Current Effect for AF Non-insulated Track Circuit in ITX Vehicle Operation," *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol.62, No.4, pp.584-590, Apr. 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5370/KIEE.2013.62.4.584>
- [4] J. S. Choi, H. S. Kim, J. H. Park, and B. G. Kim, "Effect Analysis of Classical Line TI-21 type Audio Frequency Track Circuit from KTX Sancheon Return Current Harmonics," *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol.19, No.1, pp.38-45, Feb. 2016.
DOI: <http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2016.19.1.38>
- [5] J. Baek, "Analysis of Rolling-Stock Return Current Effect on Su-Seo High Speed Line's Track Circuit," *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences*, Vol.43, No.4, pp.768-774, Apr. 2018.
DOI: <https://doi.org/10.7840/kics.2018.43.4.768>
- [6] J. Baek, S. Chang and W. Kwak, "Analysis for the Effect of Automatic Train Stop(ATS) by the Return Current Harmonics," *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol.69, No.3, pp.523-528, Mar. 2020.
DOI: <https://doi.org/10.5370/KIEE.2020.69.3.523>
- [7] J. Baek, "Comparative Analysis of Automatic Train Protection(ATP) Balise Interference by Return Current Harmonics," *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol.25, No.6, pp.408-414, Jun. 2022.
DOI: <https://doi.org/10.7782/JKSR.2022.25.6.408>
- [8] D. Jang and J. Baek, "Analysis and Measurement of Harmonic Current in Track Circuit on Urban Transit Vehicle," *Proceedings of The 44th KIEE Summer Conference*, The Korean Institute of Electrical Engineers(KIEE), Seogwipo, Korea, pp.1892-1893, Jul. 2013.
- [9] Korean Railway Standards, Insulated Audio Frequency Track Circuit, KRS SG 0033-21(R), pp.1-13, 2021.
- [10] KORAIL, ATC Audio Frequency Track Circuit Equipment, KRCS C232-05, pp.1-23, 2022.
- [11] T. H. Lee, K. B. Park and S. U. Sung, "A Study on the Effect of Cab Signal through Unbalance of the Traction Return Current," *Proceedings of 2010 Spring Conference of the Korean Society of Railway*, Jeju, Korea, pp.45-51, May 2007.

김 성 진(Seong Jin Kim)

[정회원]



- 2003년 2월 : 한국과학기술원 전기및전자공학과 (전기및전자공학 과석사)
- 2011년 8월 : 한국과학기술원 전기및전자공학과 (전기및전자공학 과박사)
- 2011년 9월 ~ 2013년 3월 : 포항 산업과학연구원 선임연구원
- 2013년 4월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>

클라우드 기반 열차제어, 열차 위치검지

이 재 호(Jaeho Lee)

[정회원]



- 1989년 8월 : 광운대학교 전자공학과 (전자공학 석사)
- 2005년 2월 : 고려대학교 메카트로닉스공학과 (메카트로닉스 박사)
- 1995년 2월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 수석연구원

<관심분야>

열차제어, RAMS, 적합성평가