

## 레일 전력선통신을 위한 임피던스 정합방안 연구

서일권<sup>1</sup>, 안승호<sup>2</sup>, 김철수<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>한국교통대 교통대학원, <sup>2</sup>한국교통대 철도운전시스템공학과, <sup>3</sup>한국교통대 철도차량시스템공학과

### A Study on an Impedance Matching Technique for Rail Power Line Communication

Ill-Kwon Seo<sup>1</sup>, Seung-Ho Ahn<sup>2</sup>, Chul-Su Kim<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Graduate School of Transportation, KNUT

<sup>2</sup>Department of Railroad Operation System Engineering, KNUT

<sup>3</sup>Department of Railway Vehicle System, KNUT

**요약** 장대 터널 및 급곡선 구간과 같은 시계 확보가 어려운 지역에서 위험 및 안전 정보를 함께 공유하기 위해서는 기관사, 열차 관제사 및 현장 작업자 사이에 보조적인 실시간 열차 정보 통신시스템의 개발이 필요하다. 이에 적합한 열차 정보 통신 시스템을 개발하기 위하여 본 연구에서는 작은 노이즈와 신호 감쇄를 동시에 갖도록 하는 레일 전력선 통신을 제안하였다. 이에 대한 레일 전력선 통신의 기초 연구 일환으로서, 본 통신기법의 전송 특성을 향상할 수 있는 레일에 대한 임피던스 측정 및 정합특성 평가가 중요하다. 본 연구에서는 자체 제작한 임피던스 정합 트랜스포머와 네트워크 분석기를 이용하여 레일에 대한 반사 및 전파 특성을 평가하였다. 대향 접속방식의 임피던스 반사특성 시험결과로부터 레일 전력선 통신에 적합한 정합용 트랜스포머의 정합비율은 1:3.28임을 알 수 있었다. 또한, 제작한 임피던스 정합용 트랜스포머는 레일 전력선통신에서 투과 신호 전송을 향상할 수 있음을 확인하였다.

**Abstract** An auxiliary real-time train communications system among drivers, train-traffic controllers and field workers is necessary to share hazard information (i.e. rockfall detection, track maintenance) in low visibility zones (long tunnels and steep curved track). To develop the appropriate communication system, this paper proposes a new way of power line communication using the rail track (Rail - PLC), which has little noise and distortion of attenuation. Therefore, it is important to measure the impedance of the rail and to apply an impedance matching technique to increase the transmission characteristic of the Rail - PLC. This study would evaluate the reflection and the transmission characteristics of the rail using a network analyzer and an impedance matching transformer. The suitable impedance matching ratio was 1:3.28 from the result of back-to-back testing. The results confirmed that the transformer can improve the performance of the transmission signal in Rail - PLC using an impedance matching technique.

**Keywords** : Impedance, Rail Power Line Communication, Reflection Characteristics, Train Communications System, Transmission Characteristics

#### 1. 서론

국내 철도분야는 고속철도(KTX-1) 운행을 계기로 디

젤 차량에서 전기차량으로 개편이 이루어지면서 전기철도 노선 확충 및 관련 전장품의 국산화 등 활발한 전기철도 관련 연구개발이 이루어지고 있다. 특히 철도신호

본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업의 연구비지원(16RTRPB10883002)에 의해 수행되었습니다.

\*Corresponding Author : Chul-Su Kim(Korea National University Transportation)

Tel: +82-70-8855-1649 email: chalskim@ut.ac.kr

Received September 29, 2016

Revised (1st October 31, 2016, 2nd November 9, 2016)

Accepted November 10, 2016

Published November 30, 2016

및 통신 분야인 경우, 국내 IT기술의 발달로 통신기반 열차제어 (Communication Base Train Control, CBTC) 와 무선영상 전송 시스템 개발과 같은 새로운 융복합 기술이 대두되고 있다. 그럼에도 불구하고 열차가 급 곡선, 단선구간 및 장대터널 통과시 시계 확보가 어렵고 철도 유지보수 작업자 미확인으로 인하여 이의 사상사고가 발생한다. 비상방송 혹은 시계확보가 어려운 위험구간의 운행시 그 이전에 전방의 안전 정보(CCTV 영상, 공사구간 이동형 카메라, 낙석 감지장치 등)를 안전업무 종사자 (관제사/신호원/궤도보수작업자/기관사) 간에 상호공유하기 위해서는 실시간 안전정보를 양방향 공유할 수 있는 보조통신시스템 개발이 중요하다[1].

다양한 통신 시스템 중에서 전력선 통신(power line communication) 응용 연구는 기존 상용 전원 라인을 활용한 홈 네트워크이나 제한된 지역의 옥내 제어 분야에서 많은 발전을 이루어 왔다. 최근 전력선 통신은 저속뿐만 아니라 고속 데이터 전송에 대한 수요를 충족할 수 있는 기술로 주로 전력회사의 계측용이나 배전 자동화용으로 많이 연구되어 왔다.[2-5] 전력선 통신 기술은 디지털 변조 기술의 발전에 따른 통신 속도 향상과 인터넷의 급속한 발전으로 통신 매체로써 꾸준히 각광을 받고 있다. 특히 기존의 전력 시설을 활용하기 때문에 비용이 적게 들고 설치 기간이 매우 짧아 새롭게 고속 접속망을 구축하는 것보다는 비용측면에서 효율적인 것으로 알려져 있다.

한편, 기존 전력선 임피던스에 관한 연구들은 최대 신호전력의 전송을 위하여 많은 연구가 진행되었다[2-5]. 이에 반하여 전기철도분야에서 전력선 통신을 적용한 국내의 연구사례는 전차선/조가선을 이용한 연구에 국한된 실정이다.[1,6] 이 방법은 고압 전력의 사용으로 인하여 위험하며, 높은 위치의 설치 때문에 이의 접근성이 떨어져 설치가 어렵다. 뿐만 아니라 조가선과 전차선 사이의 잦은 분기점은 신호전송률의 저하를 가져온다. 이러한 단점을 해결할 수 있는 방안으로서, 안전성과 접근성이 상대적으로 좋은 철도 레일(궤도)를 이용한 전력선통신 방안에 관한 기초연구가 필요하다.

본 연구에서는 철도 레일의 전력선통신 적용을 위한 기초 연구일환으로서, 레일의 임피던스를 측정하고, 이로부터 정합용 트랜스포머의 대향접속(back-to back) 방법으로 이의 정합비율을 제안하고자 한다. 또한 정합용 트랜스포머를 사용하여 레일 전력선 통신에서 투과특성의

향상을 검토하고자 한다.

## 2. 이론 및 시험 방법

### 2.1 레일 전력선통신의 망구성

레일 전력선 통신은 별도의 전용통신 선로를 사용하지 않고 상용 교류전원을 레일(궤도)를 통해 수 MHz~수십MHz의 고주파 통신 신호를 함께 보내면 수신측에서 전용접속 장비로 고주파 신호만을 수신하여 통신하는 기술이다. Fig. 1은 전기 철도에서의 레일 전력선 통신 시스템 개념설계 구조를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 변전실의 급전 시스템의 전기는 전기차량, 레일 및 대지(ground)로부터 페루프를 형성한다. 즉, 전기차량은 주행 중에 구배 또는 사구간(Dead Section)등에서 이선현상이 발생하기도 하지만 접촉부위를 통해 차량 내부의 전장품으로 전기를 공급하며, 공급된 전류는 견인 전동기를 구동하여 차량을 역행(Powering)한다. 그리

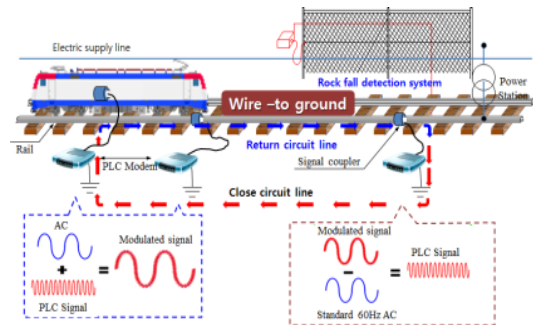


Fig. 1. A concept of rail power line communication network(wire-to - ground)

Table 1. The devices of Rail PLC in electric railway

Device Name	Specification
Signal Coupler	- Direct Contact - In/Out : BNC
PLC Modem	- Frequency band : 1.7 ~ 30Mhz - Interface : In(BNC), Out(TCP/IP)
Function Generator	- Frequency range : 0 ~ 20Mhz - Wave Type : Sign wave
Network Analyzer	- Frequency range : 10Hz ~ 500Mhz - Dynamic range: 115dB@10Hz IFBW - Dynamic accuracy: ±0.05dB,±0.3도
Digital(CCTV) Camera	- Type : Network Camera(TCP/IP)

고 귀선로(return circuit)인 레일을 거쳐 전철변전소로 전류가 유입되는 폐회로구조의 대지귀로(wire-to-ground)를 갖는다. 본 통신의 예상 구성품들 및 사양은 Table 1과 같이 접촉식 신호결합기, 데이터 통신을 송수신하기 위한 PLC 모듈, 신호발생기(function generator), 데이터 송신용 CCTV이다.

### 2.2 레일의 임피던스 평가방법

실제 철도 궤도를 매개체로 하는 전력선통신에서 최대 신호 전송을 구현하기 위해서는 레일의 임피던스 평가가 중요하다. 본 연구의 임피던스 측정기법은 고주파수영역에서 정확도가 높은 네트워크 분석(network analysis)기법의 반사방법(reflection method)이다. 특성 임피던스는 물질의 단락의 유무, 즉 ‘Open’과 ‘Short’에 따른 반사특성을 이용하여 다음의 회로 이론식으로부터 구한다[3]. 물질의 반사특성(reflection characteristic)  $S_{11} = A + jB$ 에서 ‘Open’의 경우  $S_{11(o)} = A_o + jB_o$ 이고, ‘Short’는  $S_{11(s)} = A_s + jB_s$ 이다. 그리고  $S_{11} = \frac{Z_{in} - Z_o}{Z_{in} + Z_o}$ 이므로, 회로이론으로부터 입력 임피던스  $Z_{in}$ 와 반사특성의 관계식은 식 (1)과 같다.

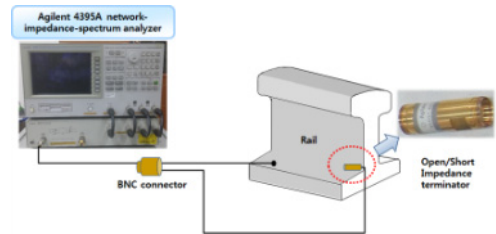
$$Z_{in} = \frac{1 + S_{11}}{1 - S_{11}} = Z_o \frac{1 + A + jB}{1 - A - jB} \quad (1)$$

여기서  $Z_o$ 은 기준 임피던스,  $S_{11}$ 은 반사특성 S-파라미터이다. 이로부터 ‘Open’과 ‘Short’에 따른 특성 임피던스  $Z_c$ 는 식 (2)와 같다.

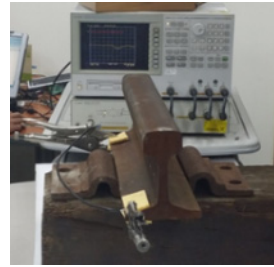
$$Z_c = Z_o \sqrt{\left( \frac{1 + A_o + jB_o}{1 - A_o - jB_o} \right) \left( \frac{1 + A_s + jB_s}{1 - A_s - jB_s} \right)} \quad (2)$$

Fig. 2은 철도 레일 전력선통신을 위한 레일에 대한 임피던스 측정시험 모식도와 사진을 함께 나타낸 것이다. 그림에서 본 연구의 레일은 UIC 60이며, 체결구(Fastener)의 영향 유무를 파악하기 위하여 침목과 체결 조건하에서 본 시험을 수행하였다. 레일 궤도에 대한 식 (1)의 특성 임피던스는 Agilent 4395A 네트워크 분석기(network-impedance-spectrum analyzer)를 사용하여 측정하였다.

Fig. 3은 Fig. 2로부터 얻어진 임피던스 측정결과를 함께 나타낸 것이다. 그림에서 각각의  $Z_c$ 는 주파수에 따른 3종류의 ‘open’과 ‘short’를 각각 조합하여 얻어진 총



(a) Measurement setup



(b) Photo

Fig. 2. Measurement structure of rail impedance test

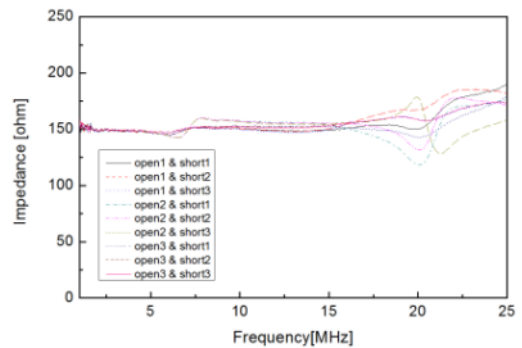


Fig. 3. Measurement results of rail impedance test

9종류의 임피던스 측정값이다. 그림에서 보는 바와 같이 레일에 대한 특성 임피던스는 주파수 15MHz영역까지 125~180Ω범위 이내이며, 이의 평균값은 약 150Ω이다.

## 3. 시험 결과

### 3.1 정합 임피던스 평가

레일과 통신장치사이의 임피던스 부정합시 송신 신호가 반사현상이 발생하므로 이의 손상을 방지하면서 레일에 고주파 신호를 주입할 수 있도록 임피던스 정합(impedance matching)이 필요하다.

본 연구에서는 직렬조합으로 다양한 임피던스의 구성이 가능한 루스로프(Ruthroff)의 전송선로 트랜스포머

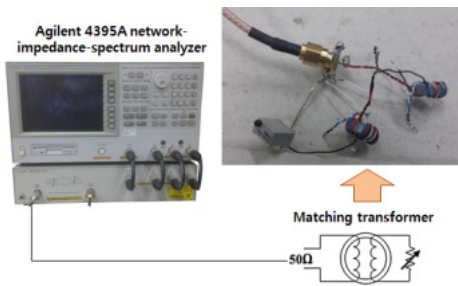
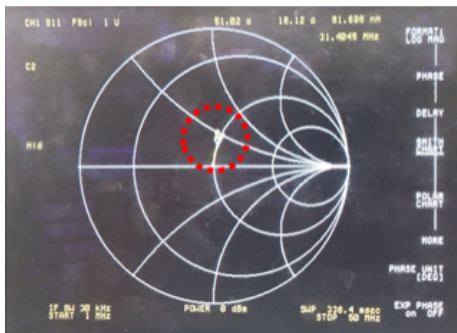
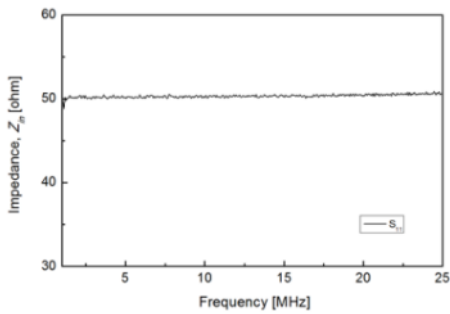


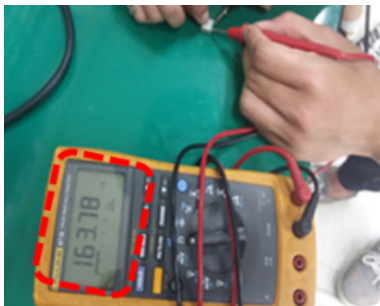
Fig. 4. Measurement structure of impedance matching transformer for rail PLC



(a) Smith chart



(b) Impedance  $Z_{in}$  with frequency



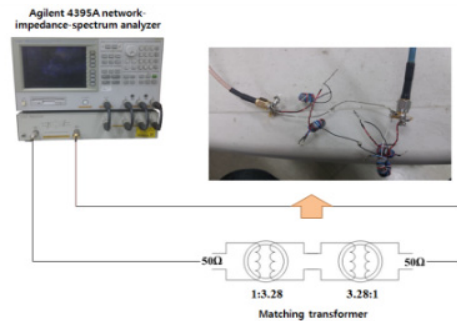
(c) Potentiometer,  $Z_c$

Fig. 5. Measurement results of impedance after matching transformer setup

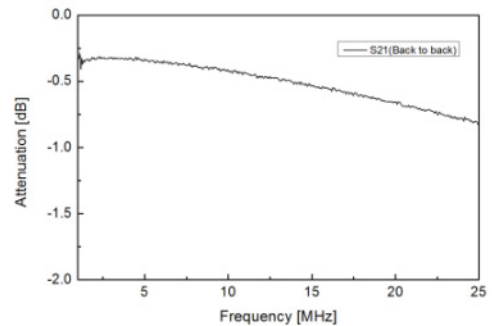
(transformer)를 Fig. 4와 같이 구성하여 제작하였다. 본 레일의 임피던스 약 150Ω을 고려하여 1차측 임피던스는 50Ω로 두고 레일 임피던스에 대한 정합용 트랜스포머는 Fig. 4의 우측 상단과 같이 코어에 감기는 선의 회전수를 찾아 약 1:3의 비율로 제작하였다. 실제 정합된 비율에 맞는 이 회전수의 유효성은 가변저항 (Potentiometer)을 사용하여 Fig. 5(a)와 같이 확인하였다. 그리고 주파수대역에 따른 임피던스 스미스차트 (Smith chart)에서 50Ω원에 근접함으로 변화는 Fig. 5(b)와 같이 다양한 손실로 인하여 다소 오차는 발생하였지만 50Ω임을 확인하였다. 이 50Ω에서 가장 작은 반사특성  $S_{11}$ 에 대한 가변저항 값은 Fig. 5(c) 사진과 같이 164Ω로 측정되었다. 따라서 본 연구의 레일 전력선 통신에 적합한 정합용 트랜스포머의 정합비율은 50Ω:164Ω로부터 1:3.28임을 알 수 있다.

### 3.2 레일의 투과 특성 평가

보다 정확한 레일 전력선통신의 투과 특성평가를 위해서는 이 평가에 사용되는 정합용 트랜스포머 자체의 신호 손실(또는 투과특성)의 측정이 필요하다.



(a) Measurement structure diagram



(b) Signal transmission characteristics

Fig. 6. Signal transmission characteristic( $S_{21}$ ) of the impedance matching transformer

Fig. 6(a)와 (b)은 정합용 트랜스포머의 주파수별 신호 투과 특성을 위한 구성도와 측정결과를 함께 나타낸 것이다. 여기서 투과 특성은 Fig. 6(a)와 같이 2개 정합용 트랜스포머를 대향접속(back-to back)방법으로 얻어진 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 본 정합용 트랜스포머는 레일 전력선통신의 예상 사용 주파수 대역 1 ~ 25MHz에서 약 1dB의 낮은 신호 감쇄를 보인다. 참고로 기존 연구[3]에서 정합용 트랜스포머의 신호통과특성은 30MHz이하에서 투과특성이 약 2dB 감쇄하였다. 이로 부터 본 장치는 실제 레일을 활용한 전력선통신에 양호한 특성을 보이도록 제작된 것이다.

Fig. 7(a)와 (b)는 Fig. 4의 정합용 트랜스포머를 이용한 철도 UIC 60레일에 대한 투과 특성  $S_{21}$ 을 측정하는 구성도 및 측정결과를 각각 나타낸 것이다. Fig. 7(b)에서 실선은 임피던스 정합용 트랜스포머에 의한 측정결과로서 이의 평균  $S_{21}$ 은 -1.5dB이며, 점선의 미사용의 평균  $S_{21}$ 값 -5.7dB인 경우보다 낮은 값이다. 또한 정합용 트랜스포머를 사용한 본 레일의 투과 특성은 주파수 대역 1~25MHz에서 약 3dB 미만이며, 특히 1~10MHz

사이에서는 0.5dB이하이다. 따라서 본 임피던스 정합용 트랜스포머는 레일 전력선통신에서 신호 전송의 향상이 가능하다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 철도 레일의 전력선통신 활용 가능성을 높이기 위하여 임피던스 정합용 트랜스포머를 이용한 신호전송 향상에 관한 기초연구를 수행하였다.

1. 레일에 대한 특성 임피던스는 네트워크분석기로부터 측정된 결과, 주파수 25Hz영역까지 125~180 Ω범위 이내이며, 이의 평균값은 약 150Ω이었다.
2. 통신 신호 전송 능력을 향상하기 위하여 정합용 트랜스포머를 제작하고 가변저항기로부터 측정된 결과, 레일 전력선 통신에 적합한 임피던스 트랜스포머의 정합비율은 1:3.28임을 알 수 있으며, 이러한 정합용 트랜스포머의 반사특성은 25MHz이하 대역에서 약 1dB로서, 레일 전력선 통신에 유효함을 확인하였다.
3. 임피던스 정합용 트랜스포머에 의한 투과특성의 평균값은 -1.5dB로서 미사용(-5.7dB)인 경우보다 낮게 측정되었다. 10MHz이하 대역에서 이의 투과 특성은 0.5dB이하이므로 대부분의 신호를 투과할 수 있었다. 따라서 본 연구의 임피던스 정합용 트랜스포머는 레일 전력선통신에서 신호 전송을 향상할 수 있었다. 향후에는 실제 궤도 현장시험을 통하여 임피던스 정합에 따른 신호 전송능력을 향상하는 연구를 진행할 것이다.

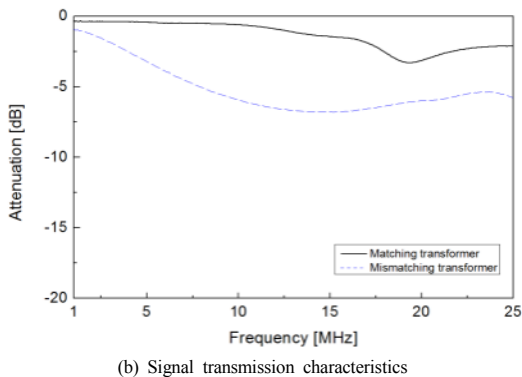
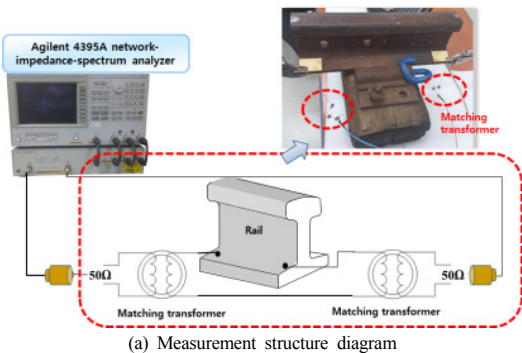


Fig. 7. Signal transmission characteristics( $S_{21}$ ) of rail using the impedance matching transformer

#### References

- [1] J. M. Kim, Y. S. Kim, S. H. Ahn, H. J. Lee, J. G. Lee, "A Study on the Network Design of Electric Railway for Power Line Communication", J. of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, vol. 11, no. 10 pp. 3756-3760, 2010. DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2010.11.10.3756>
- [2] J. J. Lee, Y. J. Park, H. M. Oh, K. H. Kim, D. Y. Lee, "Development of Signal Coupler for Power Line Communication over Medium Voltage Distribution Line", The Trans. of the Korean IEEE (D), vol. 54, pp. 409-416, 2005.
- [3] J. J. Lee, J. H. Yu, C. S. Hong, D. Y. Lee, "Impedance

Measurement and Matching Technique for Medium-Voltage Powerline Communication”, The Transaction of The Korean IEEE (D), vol. 53, no. 5 pp. 345-352, 2004.

- [4] M. Gotz, M. Rap, D. K. Dostert, “Power Line Channel Characteristics and Their Effect on Communication System Design”, IEEE Communication Magazine, vol. 42, pp. 78-86, 2004.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/MCOM.2004.1284933>
- [5] Y. S. Kim, J. C. Kim, “Characteristic Impedances in Low-Voltage Distribution Systems for Power Line Communication”, Journal of Electrical Engineering & Technology, vol. 2, no. 1, pp. 29-34, 2007.  
DOI: <https://doi.org/10.5370/JEET.2007.2.1.029>
- [6] J. M. Kim, Y. S. Kim, S. H. Ahn, C. S. Kim, “The Characteristic of Data Transmission for Power Line Communication using an AC Arrester for Electric Railway”, Trans. KIEE. vol. 61, no. 3, pp. 497-502, 2012.  
DOI: <https://doi.org/10.5370/kiee.2012.61.3.497>

**김 철 수(Chul-Su Kim)**

[종신회원]



- 2002년 8월 : 한양대 일반대학원 기계설계학과 졸업(공학박)
- 2008년 11월 ~ 현재 국토해양부 철도기술 심의위원
- 2003년 3월 ~ 현재 : 한국교통대학 철도차량시스템공학과 교수 (교통대학원 겸직)

<관심분야>

철도차량설계, 철도차량RAMS

**서 일 권(III-Kwon Seo)**

[정회원]



- 1981년 11월 ~ 현재 : 한국철도공사 인재개발원 교수
- 2010년 2월 : 서울산업대학교 철도전문대학원 (석사)
- 2014년 3월 ~ 현재 : 한국교통대학교 교통대학원 (박사과정)

<관심분야>

철도운전 및 안전

**안 승 호(Seung-Ho Ahn)**

[정회원]



- 1981년 5월 ~ 1996년 2월: 철도청 근무
- 2004년 2월 : 한양대학교 일반대학원 기계공학과 졸업(공학박)
- 1996년 3월 ~ 현재 : 한국교통대학교 철도운전시스템공학과 교수

<관심분야>

철도운전 및 안전