

# 철도환경에서 듀얼홉 통신시스템을 적용한 하향링크 성능

조웅\* · 김범곤\*\* · 조한벽\*\*\*

## Performance of Downlink with Dual-Hop Communication Systems in Railway Environments

Woong Cho\* · Bum-Gon Kim\*\* · Han-Byeog Cho\*\*\*

### 요약

중계기는 송신기에서 수신기로 신호를 전송할 때 통신반경을 확장시키고 음영지역을 제거시키는 장점 때문에 다양한 무선통신 시스템에서 적용이 가능하다. 본 논문에서는 철도환경에서 중계기를 사용하는 듀얼홉 통신시스템을 적용하여 하향링크에서의 성능을 분석한다. 통신방식은 기지국에서 중계기사이에서는 동기변조방식을 사용하고 중계기에서 수신기 사이에서는 차등변조방식을 사용하는 비대칭 전송방식을 적용한다. 시스템의 성능은 심벌오류율을 이용하여 분석하며 전체시스템이 동기방식을 이용하는 시스템과의 성능을 비교한다. 중계기 거리 및 에너지할당에 따른 성능 또한 분석한다.

### ABSTRACT

Due to the advantage of communication coverage extension and removal of shadowing area, relay can be applied in various wireless communication systems. In this paper, we analyze performance of downlink with dual-hop communication systems which use a relay in railway environments. We adopted asymmetric communication system which use coherent modulation scheme in base station-relay link and differential modulation scheme in relay-destination link. The performance of communication system is analyzed using symbol error rate, and performance comparison with the systems which adopts fully coherent scheme is studied. We also investigate the performance of system depending on relay distance and energy allocation.

### 키워드

Dual-Hop Communication, Relay, Railway Environments, Error Rate  
듀얼홉 통신, 중계기, 철도 환경, 오류율

## 1. 서론

중계네트워크는 중계기를 사용하여 신호를 전송함으로써 통신범위를 확장시킬 수 있으며 음영지역을 제거할 수 있다. 또한, 중계기를 사용하여 송신기와 중계기 및 중계기와 수신기 사이에 신뢰성 있는 채널

을 확보함으로써 데이터 전송률을 높일 수 있는 장점을 제공한다[1-5]. 중계기를 사용하여 신호를 전달하는 중계프로토콜에는 대표적인 두 가지 방식이 있는데 하나는 증폭후전송(AF: Amplify-and-Forward) 프로토콜이고, 또 다른 방식은 복조후전송(DF: Decode-and-Forward) 프로토콜이다. 증폭후전송 프

\* 중원대학교 컴퓨터시스템공학과 (wcho@jwu.ac.kr)

\*\* 한국철도공사

\*\*\* 교신저자: 한국전자통신연구원

• 접수일 : 2016. 12. 29

• 수정완료일 : 2017. 02. 13

• 게재확정일 : 2017. 02. 24

• Received : Dec. 29, 2016, Revised : Feb. 13, 2017, Accepted : Feb. 24, 2017

• Corresponding Author : Hanbyeog Cho

Electronics and Telecommunications Research Institute

Email : hbcho@etri.re.kr

로토콜은 중계기가 송신기로부터 수신된 신호를 단순히 증폭하여 수신기로 전송하는 방식이며, 복조후전송 프로토콜은 중계기가 송신기로부터 수신된 신호를 복조 및 재 변조를 하여 수신기로 전송하는 방식이다. 수신기에서 신호의 정확한 정보사용 유무에 따라 동기방식과 비동기방식의 통신방식이 정의될 수 있는데, 동기방식은 신호를 수신하여 복조할 때 채널상태정보(CSI: Channel State Information)를 이용하는 방식이고 비동기방식은 채널상태정보를 이용하지 않는 방식이다. 비동기방식의 대표적인 변조방식은 이웃한 신호와의 차이 값을 전송하는 차등변조방식이다. 철도환경에서 중계네트워크에서의 성능이 일부 소개되었으나 듀얼홉 환경에서의 성능은 분석되지 않았다[6-7]. 본 논문에서는 하나의 중계기를 이용하여 신호를 전송하는 듀얼홉 통신시스템의 성능을 철도환경에서 분석한다. 신호의 전송은 기지국(송신기)에서 중계기를 거쳐 단말기(수신기)에서 신호를 수신하는 하향링크를 고려한다. 변조방식은 철도통신 하향링크의 특성을 반영하여 송신기와 중계기 및 중계기와 수신기의 신호전송방식이 서로 다른 방식을 사용하는 비대칭 시나리오를 고려한다. 즉, 송신기와 중계기사이에서는 동기방식을 이용하여 신호를 전송하고, 중계기와 수신기 사이에서는 차등변조방식을 사용한다. 전체시스템의 성능은 심벌오류율(SER: Symbol Error Rate)을 이용하여 분석하며 전체시스템이 동기방식 혹은 변조방식을 사용하는 경우와 성능을 비교한다. 또한 듀얼홉 통신시스템에서 중계기의 위치와 에너지할당의 영향이 전체 시스템의 성능에 미치는 효과에 대해서도 분석한다.

## II. 시스템모델

그림 1에 철도환경에서의 듀얼홉 통신시스템 모델을 나타내었다. 그림 1.(a)신호전송 모델을 나타내는데, 앞장에서 언급했듯이 본 논문에서는 비대칭 신호전송시나리오를 고려한다. 철도환경의 하향링크에서는 송신기와 중계기사이의 채널은 천천히 변하지만 중계기와 수신기 사이의 채널은 급격히 변하는 경우에 해당된다. 따라서 송신기와 수신기사이에서는 채널상태정보를 사용할 수 있는 동기변조방식을 적용하고, 중계기와 수신기 사이에서는 급격한 채널변화에 의해

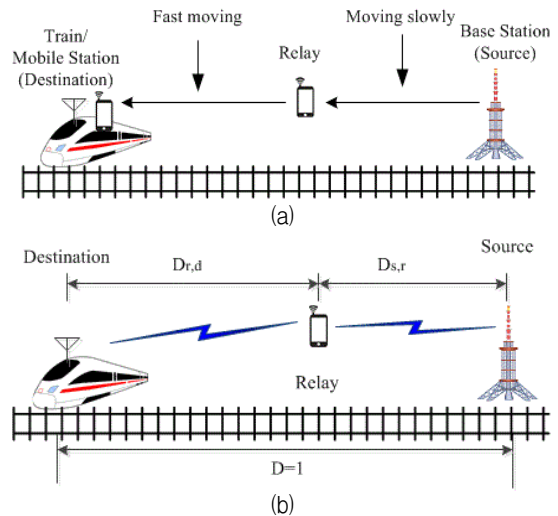


그림 1. 철도환경 듀얼홉 통신시스템 모델  
(a)신호전송 모델 (b)네트워크 형상

Fig. 1 Dual-hop communication system model in railway environments (a) signaling model (b) network topology

채널상태정보를 사용할 수 없는 차등변조방식을 적용한다. 그림 1.(b)에서는 철도환경의 네트워크 형상을 선 형상을 사용하여 모델링 하였다. 그림에서처럼 송신기는  $s$ , 중계기는  $r$ , 그리고 수신기는  $d$ 로 나타내었다. 송신기에서 수신기사이의 거리( $D$ )는 1로 두고 송신기와 중계기사이의 거리와 중계기와 수신기 사이의 거리를 각각  $D_{s,r}$ 와  $D_{r,d}$ 로 나타내며  $D_{s,r} + D_{r,d} = 1$ 이라고 가정한다. 이 모델은 철도환경 뿐만 아니라 이동국이 도로를 따라서 이동하는 차량 환경에서도 적용이 가능하다.

## III. 신호모델

본 논문에서는 복조후전송 프로토콜을 사용하여 신호를 전송한다. 송신기에서 중계기로 전송되는  $n$ 번째 위상변조(PSK: Phase Shift Keying) 심벌은  $s_n = e^{j2\pi c_n/M}$ ,  $c_n \in \{0, 1, \dots, M-1\}$  로 나타낼 수 있다. 중계기에서 수신된 신호는 식 (1)과 같다.

$$y_n^{s,r} = \sqrt{E_s} h_n^{s,r} s_n + z_n^r \quad (1)$$

복조후전송 프로토콜을 사용하므로 중계기에서는 먼

저 수신된 신호를 복조한다. 복조된 신호를 이용하여 중계기에서는 동기변조방식이 아닌 차등변조방식을 이용하여 재 변조 한다. 중계기에서 복조된 신호를  $\hat{s}_n$ 이라고 하면 중계기에서 재 변조된  $n$ 번째 신호는  $x_n^r = x_n^r \hat{s}_n$ 으로 주어지며 초기값  $x_0^r = 1$ 을 가진다. 그러면, 수신기에서 수신되는 신호를 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$y_n^{r,d} = \sqrt{E_r} h_n^{r,d} x_n^r + z_n^d \quad (2)$$

식 (1)과 (2)의 송신신호 형태가 다름을 주목해야 한다. 식 (1)에서와 같이 중계기에서 수신된 신호는 채널상태정보를 이용하여 신호를 복조하며, 식 (2)에 나타난 것처럼 수신기에서의 신호는 수신되는 신호자체의 채널상태정보를 이용하는 것이 아니라 수신된 신호의 차이만을 이용하여 신호를 복조한다. 식 (1)과 (2)에서  $\sqrt{E_i}$ 는 송신기  $i, i \in \{s, r\}$ 에서 심벌당 에너지를 나타내며,  $h_n^{i,j}, \forall i, j \in \{s, r, d\}$ 와  $z_n^j, j \in \{r, d\}$ 는 평균이 0이고 분산이 각각  $\sigma_{i,j}^2, \forall i, j \in \{s, r, d\}$ 와  $N_0$ 인 복소가우시안 분포를 가지는 페이딩 계수와 잡음을 나타낸다. 따라서 수신된 순시 신호대잡음비(SNR: Signal-to-Noise Ratio)는 식 (3)으로 나타낼 수 있고

$$\gamma_{i,j} = \frac{|h_n^{i,j}|^2 E_i}{N_0} \quad (3)$$

평균 신호대잡음비는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{\gamma}_{i,j} = \frac{\sigma_{i,j}^2 E_i}{N_0} \quad (4)$$

중계기( $r$ )에서와 수신기( $d$ )에서의 신호 결정규칙은 각각 식 (5)와 (6)으로 주어진다.

$$\hat{s}_n = e^{j2\pi m'/M} : \quad (5)$$

$$m' = \arg \max_m R\{(h_n^{i,j})^* y_n^{i,j} e^{j2\pi m/M}\}$$

$$\hat{s}_n = e^{j2\pi m'/M} : \quad (6)$$

$$m' = \arg \max_m R\{(y_{n-1}^{i,j})^* y_n^{i,j} e^{j2\pi m/M}\}$$

여기서  $R(\cdot)$ 와  $(\cdot)^*$ 는 각각 실수부와 켈레복소수를 나타낸다. 식 (5)에서는 채널상태정보를 알고 있기 때문에 페이딩계수  $h_n^{i,j}$ 를 이용하여 신호를 복조하고 식 (6)에서는 채널상태정보를 이용하지 않기 때문에 현재 수신된 신호( $n$ 번째 신호)와 이전 신호( $n-1$ 번째 신호)를 이용하여 신호를 복조한다.

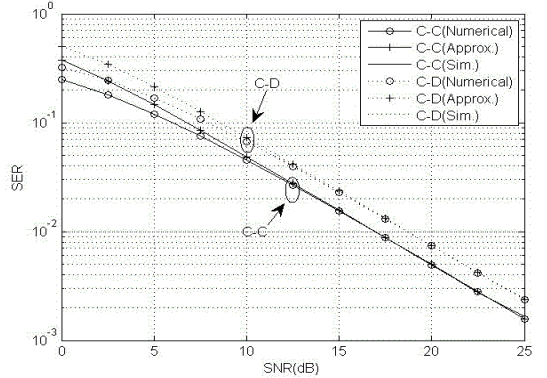


그림 2. 듀얼홉 통신시스템의 평균 심벌오류율 비교  
Fig. 2 Comparison of average SER in dual-hop communication systems

#### IV. 성능분석

이 장에서는 앞 장에서 설명한 시스템모델을 이용한 신호의 성능을 수학적결과 및 시뮬레이션을 통해 분석한다. 본 논문에서는 이진신호의 경우만 고려하여 성능을 분석한다. 이진신호의 경우 듀얼홉 통신시스템의 성능은 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다[8].

$$P_{e,s-d} = P_{e,s-r} + P_{e,r-d} - 2P_{e,s-r}P_{e,r-d} \quad (7)$$

이진신호의 경우에는 위상변조신호의 오류율(송신기와 중계기사이)과 차등변조신호의 오류율(중계기와 수신기사이)은 식 (8)과 (9)로 주어진다.

$$P_{e,s-r} = 0.5(1 - \sqrt{\bar{\gamma}_{s,r}/(1 - \bar{\gamma}_{s,r})}) \quad (8)$$

$$P_{e,r-d} = 1/[2(1 + \bar{\gamma}_{r,d})] \quad (9)$$

신호대잡음비가 크다고 가정하면 식 (8)과 (9)는 아래 식 (10), (11)과 같이 근사화 될 수 있다.

$$1/4\bar{\gamma}_{s,r} \quad (10)$$

$$1/2\bar{\gamma}_{r,d} \quad (11)$$

따라서, 식 (7)의 평균 심벌오류율은 식 (12)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{e,s-d} = \frac{2\bar{\gamma}_{s,r} + \bar{\gamma}_{r,d}}{4\bar{\gamma}_{s,r}\bar{\gamma}_{r,d}} \quad (12)$$

그림 2는 신호대잡음비에 따른 평균 심벌오류율을 나타낸다. 그림에서 C는 동기변조방식을 나타내며 D는 차등변조방식을 나타낸다. 그림의 평균 심벌오류율

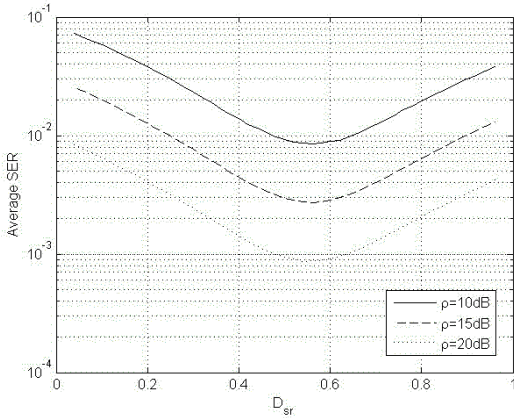


그림 3. 중계기위치에 따른 평균 심벌오류율  
Fig. 3 Average SER depending on relay location

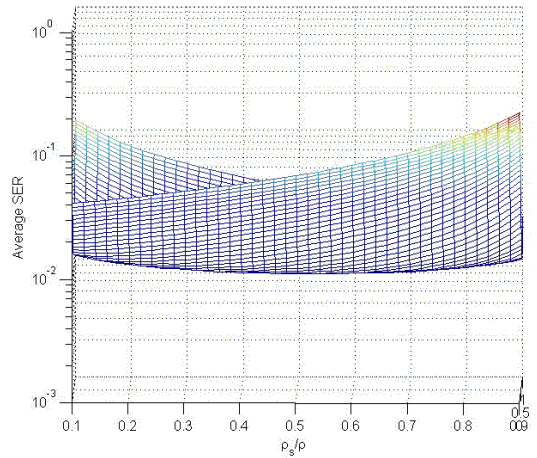


그림 5. 에너지 할당관점에서 본 평균 심벌오류율  
Fig. 5 Average SER with respect to the energy allocation

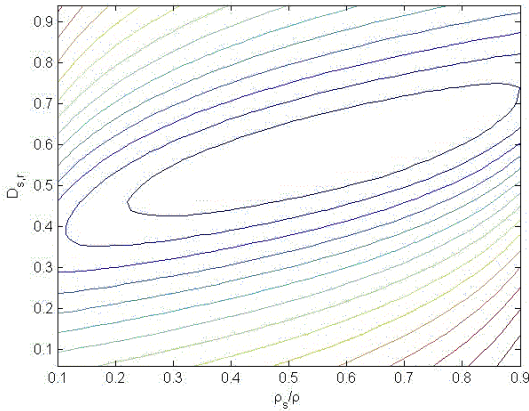


그림 4. 중계기위치 및 에너지할당에 따른 평균 심벌오류율 등곡선  
Fig. 4 Average SER contour depending on relay location and energy allocation

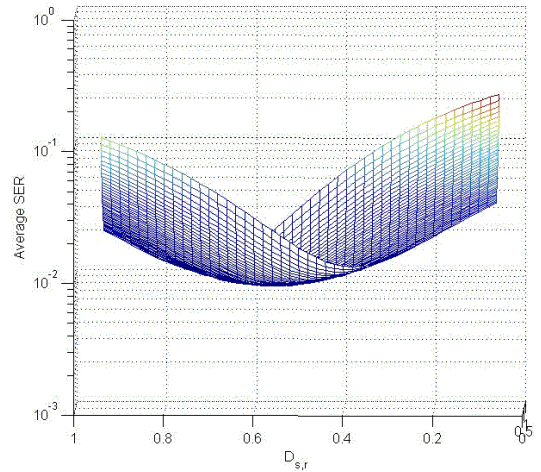


그림 6. 중계기위치 관점에서 본 평균 심벌오류율  
Fig. 6 Average SER with respect to the relay location

은 수식적인 결과, 근사화 결과 및 시뮬레이션 결과가 매우 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 그림에서 알 수 있듯이 동기변조방식과 차등변조방식을 동시에 사용한 경우는 동기방식을 사용한 경우보다 전체적인 성능이 약 2.5dB정도 떨어지는 것을 알 수 있다. 이는 중계기와 수신기사이에서 차등변조방식을 이용한 결과에 기인한다.

그림 3은 중계기의 위치에 따른 평균 심벌오류율을 나타낸다. 그림에서  $\rho$ 는 송신기와 중계기에서 전송하는 에너지대잡음비를 합친 전체 에너지대잡음비를 나

타낸다( $\rho = E_s/N_0 + E_r/N_0$ ). 시뮬레이션을 위해 송신기와 수신기가 동일한 에너지로 신호를 전송한다고 가정하였다. 즉  $E_s/N_0 (= \rho_s) = E_r/N_0 (= \rho_r) = \rho/2$ . 또한 그림에서처럼  $D=1$ 이라고 가정하고 중계기의 위치를 0에서부터 1까지 변화 시켰다. 그림에 나타난 것처럼 중계기의 위치에 따라 다른 성능이 나타남을 알 수 있다. 또한 특정위치에서 최소 심벌오류율이 나타나는 것을 확인할 수 있으며 이 위치는 전체 에너지

대잡음비와는 무관함을 알 수 있다. 이 결과는 전체시스템이 동기변조방식 혹은 차등변조방식을 사용하는 경우와 다른 것을 알 수 있는데[2][4], 이는 송신기와 중계기사이 및 중계기와 수신기 사이에서 서로 다른 변조방식을 사용하는 비대칭 전송방식에 따라 발생하는 현상이다.

그림 4는 중계기의 위치 및 에너지할당을 동시에 고려한 평균 심벌오류율 등곡선을 나타낸다. 그림에서  $\rho = 10\text{dB}$ 를 사용하였으며  $\rho_s$ 의 변화 및  $D_{s,r}$ 의 변화에 따른 성능을 나타내었다. 그림에서 최적의 성능을 나타내는 곳을 알 수 있는데, 그 지점은 약 60%의 에너지가 송신기에 할당되고 중계기가 0.6지점에 위치하는 경우라는 것을 확인할 수 있다.

그림 5와 6은 그림 4에서 나타난 성능 곡선을 에너지할당 측면과 위치할당 측면에서 바라본 성능을 나타낸 것이다. 그림 5에서 알 수 있듯이 주어진 에너지할당에서 적절한 위치만 선택하면 에너지할당과 상관없이 거의 유사한 성능을 획득할 수 있음을 알 수 있다. 그림 6은 중계기위치측면에서 바라본 성능을 나타내는데, 주어진 중계기위치에서 송신기와 중계기에 적절한 에너지를 할당하더라도 중계기 위치에 따라 성능차이가 많이 발생하는 것을 알 수 있다. 그림 5와 6의 결과를 볼 때 에너지 할당보다는 중계기의 위치가 전체에너지 할당에 미치는 영향이 큼을 알 수 있다.

### V. 결론

본 논문에서는 철도환경에서 듀얼홉 통신시스템을 적용한 경우의 성능을 분석하였다. 송신기와 중계기 사이에서는 동기변조방식을 적용하고 중계기와 수신기 사이에서는 차등변조방식을 적용하는 비대칭 시나리오를 가정하여 전체 시스템의 성능을 분석하였다. 전체시스템의 성능은 동기방식을 이용하는 경우보다는 좋지 않음을 확인할 수 있었다. 또한 중계기위치에 따른 성능을 분석하였는데 적절한 위치를 선택함으로써 최상의 성능을 획득할 수 있음을 확인하였고, 이 위치는 기존에 전체시스템이 동기식변조방식이나 차등변조방식을 사용하는 경우와는 다름을 확인할 수 있었다. 또한, 중계기위치와 에너지할당을 동시에 고려해본 결과 중계기의 위치가 전체성능에 더 큰 영향

을 주는 것을 확인할 수 있었다. 본 논문의 결과를 바탕으로 상향링크에서 최적의 성능을 제공하기 위한 중계기의 위치 및 에너지 할당도 유추해 볼 수 있다. 철도통신 환경에서 양방향링크 모두에 본 논문의 결과를 적용하여 통신환경의 신뢰성을 향상 시키는데 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 논문은 2016년도 한국전자통신학회 추계 종합 학술대회 우수논문을 확장한 논문입니다.  
본 논문은 2016년도 국토교통부 및 국토교통과학기술진흥원의 지원을 받은 철도기술연구사업(16R TRP-B089552-03)의 지원으로 수행되었음.

### References

- [1] J. Naneman and G. Wornell, "Energy-efficient antenna sharing and relaying for wireless networks," In *Proc. Wireless Commun. Netw. Conf.*, Chicago, IL, Sep. 23 - 28, 2000, vol. 1, pp. 7 - 12.
- [2] A. Ribeiro, X. Cai, and G. Giannakis, "Symbol error probabilities for general cooperative links," *IEEE Trans. Wireless Comm.*, vol. 4, no. 3, May 2005, pp. 1264 - 1273.
- [3] W. Cho and L. Yang, "Optimum resource allocation for relay networks with differential modulation," *IEEE Trans. on Comm.*, vol. 56, no. 4, Apr. 2008, pp. 531-534.
- [4] W. Cho, R. Cao, and L. Yang, "Optimum resource allocation for amplify-and-forward relay networks with differential modulation," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 56, no. 11, Nov. 2008, pp. 5680-5691.
- [5] R. Cao and L. Yang, "The affecting factors in resource optimization for cooperative communications: A Case Study," *IEEE Trans. on Wireless Communications*, vol. 11, no. 12, Dec. 2012, pp.4351 - 4361.
- [6] W. Cho and H-B. Cho, "Performance of relay networks with partially differential

modulation scheme depending on energy allocation in railway environments," *J. of the Korea Institute of Electronics Communication Sciences*, vol. 11, no. 1, 2016, pp.17-22

- [7] W. Cho, "Performance of cooperative networks with mixed relaying protocols in railway environments," *J. of the Korea Institute of Electronics Communication Sciences*, vol. 11, no. 3, 2016, pp.271-276
- [8] M. Kimon and M. Alouini, *Digital Communication over Fading Channels*, 2nd ed. Wiley, 2004, Chap. 8.2.



**조한벽(Han-Byeog Cho)**

1981년 아주대학교 산업공학과 졸업(공학사)  
1983년 한양대학교 대학원 산업공학과 졸업(공학석사)

1992년 한양대학교 대학원 산업공학과 졸업(공학박사)  
1984년 3월~현재 : 한국전자통신연구원 책임연구원  
※ 관심분야 : 텔레매틱스/TTS 서비스 및 표준화, 차량간 통신기술, 차량-인프라통신기술, 협력주행기술, 철도무선통신기술

저자 소개



**조 웅(Woong Cho)**

1997년 울산대학교 전자공학과 졸업(공학사)  
1999년 한양대학교 대학원 전자통신공학과 졸업(공학석사)

2003년 Univ. of Southern California 대학원 전기전자공학과 졸업(공학석사)  
2007년 Univ. of Florida 대학원 전기컴퓨터공학과 졸업(공학박사)  
2008년 2월~2011년 2월 한국전자통신연구원  
2012년 3월~현재 중원대학교 컴퓨터시스템공학과 교수  
※ 관심분야 : 무선통신, 협력통신, ITS

**김범곤(Bum-Gon Kim)**



1997년 2월 서울시립대학교 전자공학과 졸업(공학사)  
2005년 2월 및 2010년 8월 서울시립대학교 대학원 전자전기컴퓨터공학부 졸업(공학석사 및 공학박사)

1999년 3월~2003년 1월 (주)한국SHARP 개발부(주임)  
2010년 8월~현재 한국철도공사 연구원(차장)  
※ 관심분야 : 일반·고속철도 무선통신(LTE-R), 철도분야 IoT기술, ICT 융합기술