

밀리미터웨이브 대역에서 열차 간 직접통신 성능 측정

김 영 주[°], 고 경 준*, 박 성 수**, 정 락 교***

Performance Measurement of Direct Communication between Trains in Millimeter-Wave Bands

Youngju Kim[°], Kyeongjun Ko*, Sungsoo Park**, Rag-Gyo Jeong***

요 약

최근 열차 자율주행을 기반으로 선로 용량을 더욱 향상 시키기 위해 열차 가상 연결 기술과 이를 위한 열차 간 직접통신 기술에 대한 연구가 진행되고 있다. 본 논문에서는 열차 간 직접통신 기술로서 밀리미터 웨이브 대역(60 GHz)을 사용하는 IEEE 802.11ad 표준을 고려한다. IEEE 802.11ad 기반의 열차 간 직접통신 장치를 적용한 열차 주행환경 테스트베드를 구축하여 직접통신의 처리율, 수신 신호 강도 지표, 패킷 손실률, 지연시간을 측정하고 결과에 대해 논의한다. 측정된 결과를 바탕으로 밀리미터 웨이브 대역 무선 통신 기술의 철도 환경 적용 가능성 및 한계점에 대해 고찰한다.

키워드 : 열차 간 직접통신, 밀리미터 웨이브 대역, IEEE 802.11ad, 철도 테스트 베드, 성능 측정

Key Words : Direct Communication between Trains, Millimeter-wave Bands, IEEE802.11ad, Railway Test-bed, Performance Measurement

ABSTRACT

Recently, research on train virtual coupling and direct communication between trains is being conducted to further improve track capacity based on autonomous train driving. In this paper, we consider the IEEE 802.11ad standard using millimeter-wave bands (60 GHz) as a direct communication between trains. By constructing a train driving environment test bed to which direct communication between trains based on IEEE 802.11ad is applied, the direct communication throughput, received signal strength index, packet loss rate, and latency are measured and the results are discussed. Based on the measured results, the applicability and limitations of the millimeter-wave band wireless communication technology to the railway environment are considered.

I. 서 론

최근 국내외에서는 선행 열차와 후행 열차 간, 열차와 선로 변 설비 간 무선 통신을 통해 무인 자율주행

이 가능한 열차 자율주행 기술에 관한 관심이 높아지고 있다. 열차 자율주행을 기반으로 선로 용량을 더욱 향상 시키기 위해 열차 가상 연결(virtual coupling) 기술과 이를 위한 열차 간 직접통신 기술에 관한 연구

※ 본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업(열차자율주행제어 핵심기술개발, PK2201B1)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

•° First & Corresponding Author : Korea Railroad Research Institute, yjkim@krii.re.kr, 정회원

* Korea Railroad Research Institute, kkj8000@krii.re.kr, 정회원

** Korea Railroad Research Institute, sspark@krii.re.kr, 정회원

*** Korea Railroad Research Institute, rgjeong@krii.re.kr, 정회원

논문번호 : 202209-226-C-RU, Received September 27, 2022; Revised November 5, 2022; Accepted November 12, 2022

또한 활발히 이루어지고 있다¹⁻³⁾.

가상 연결 기술은 선행 열차와 후행 열차 간 물리적 연결기(mechanical coupler)에 의한 분리(uncoupling)/결합(coupling) 없이 가상 열차편성(virtually-coupled train sets)을 구성함으로써 선행 열차와 후행 열차 간격을 제동거리(braking distance) 이하로 줄일 수 있는 장점이 있다. 가상 열차편성 내에서 열차 간격을 유지하면서 주행하기 위해서는 열차 주행 및 안전과 관련된 다양한 정보가 선/후행 열차 사이에 실시간으로 공유되어야 한다. 무선 통신이 안정적으로 정보를 전달하지 않을 경우, 긴급 제동과 같은 상황이 발생하여 선로 용량을 감소시키거나 최악의 경우 추돌 사고까지 발생할 수 있다. 따라서 가상 열차편성 내에서 선/후행 열차 사이에 실시간으로 정보를 주고받을 수 있는 고신뢰, 저지연의 열차 간 직접통신 기술이 필요하다^{4,5)}.

열차 간 직접통신 기술로서, 차량 간 통신 기술로 개발된 WAVE (Wireless Access in Vehicular Environments)와 C-V2X (Cellular-Vehicle to Everything)를 고려할 수 있다. WAVE와 C-V2X는 모두 5.9 GHz의 비면허 대역을 사용한다. 도로 교통에 적용되는 이 기술을 철도에 적용하기 위해서는 철도 전용 주파수 할당 등 주파수 사용에 대해 고려하여야 한다^{6,7)}.

본 논문에서는 열차 간 직접통신 기술로서 밀리미터 웨이브 대역(60 GHz)을 사용하는 IEEE 802.11ad 무선랜 표준 시스템을 고려하였다. 밀리미터 웨이브 주파수 대역은 넓은 대역폭을 활용하여 Gbps급의 무선 전송이 가능한 대역으로서, 고주파 대역에서의 높은 경로 감쇄로 인해, 주로 실내 환경에서 사용되었다⁸⁻⁹⁾. 본 논문에서는 밀리미터 웨이브 대역의 IEEE 802.11ad 표준을 열차 간 직접통신에 적용하여 통신 성능을 측정하고 분석함으로써, 밀리미터 웨이브 대역을 사용하는 무선 통신 기술의 철도 환경 적용 가능성에 대해 고찰한다. 이를 위해 IEEE 802.11ad 기반의 열차 간 직접통신 장치를 적용한 열차 주행환경 테스트베드를 구축하였다.

먼저, IEEE 802.11ad 기반의 열차 간 직접통신 장치 및 테스트 환경, 개활지와 터널로 구성된 열차 주행환경 테스트베드에 대해 소개한 후, 통신 성능으로 처리율, 수신 신호 강도 지표, 패킷 손실률, 지연시간을 측정하고 결과에 대해 논의한다. 마지막으로 측정된 결과를 바탕으로 밀리미터 웨이브 대역의 무선 통신 기술의 철도 환경 적용 가능성 및 한계점에 대해 논의한다.

II. 열차 간 직접통신 테스트베드

2.1 IEEE 802.11ad

IEEE 802.11ad는 60 GHz의 고주파 대역에서 동작하며 수 기가비트의 처리율을 갖는 무선 LAN 규격이다. 이 표준은 6개의 주파수 채널을 정의하고 각 채널은 2.16 GHz의 대역폭을 제공한다. 해당 채널은 비면허 대역으로 비용 없이 사용할 수 있는 장점이 있다.

60 GHz 주파수 대역은 짧은 전파 길이를 가지고 상대적으로 낮은 투과율로 인해 경로 손실이 기존 마이크로파 대역(2.4 또는 5 GHz ISM 대역)과 비교해 상대적으로 매우 크다. IEEE 802.11ad의 6개 채널에서의 경로 감쇄는 그림 1에서와 같이 나타난다¹⁰⁾. IEEE 802.11ad 송수신기에서는 신호 강도를 개선하기 위해서 특정 방향으로 빔을 형성하는 빔 포밍 기술을 이용한다.

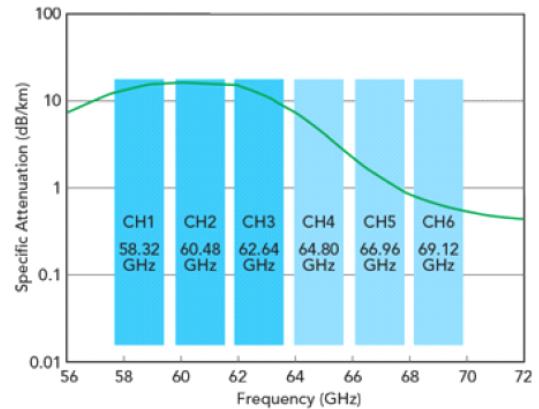


그림 1. IEEE 802.11ad의 6개 채널에서의 경로 감쇄
Fig. 1. The path attenuation of the six channels of IEEE802.11ad

2.2 열차 간 직접통신 테스트베드 구축

IEEE 802.11ad 기반의 열차 간 직접통신 시스템의 성능 측정을 위해 충북 오송 철도종합시험선로의 개활지와 터널을 포함한 13 km의 선로 구간을 이용한다. 그림 2는 철도종합시험선로의 시험 구간을 나타낸다.

제작한 자율주행 축소 열차 2대에 IEEE 802.11ad 통신 장치 및 Global positioning system (GPS)를 열차의 지붕에 설치하여 통신 장치 간에 직진 파 경로가 존재할 수 있도록 하였다. 통신 장치는 차량 내부의 노트북과 유선으로 연결되고, 노트북은 iperf 서버 및 클라이언트로 동작하도록 한다. 그림 3은 열차 간 직접통신 테스트 구성도를 나타낸다. 열차 간 직접통신 테스트를 위한 통신 장치는 Peraso 사의 IEEE802.11ad



그림 2. 철도종합시험선로
Fig. 2. Railway test track



그림 6. 터널 시험 환경
Fig. 6. Test environments in a tunnel

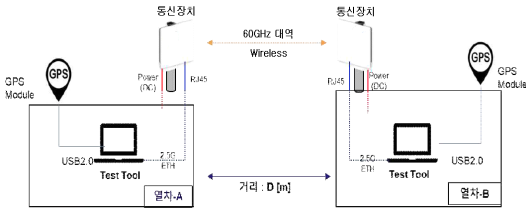


그림 3. 열차 간 직접통신 테스트 구성도
Fig. 3. Test diagram for train-to-train communication

상용 제품을 사용하였다. 테스트베드에 적용된 통신 장치의 블록 다이어그램을 그림 4에 나타내었다.

실제 테스트는 철도 채널 환경 특성에 대한 영향을 파악하기 위해 개활지 구간과 터널 구간을 나누어서 진행한다. 그림 5와 그림 6은 각각 개활지와 터널에서 두 대의 차량으로 구성된 시험 환경을 나타낸다.

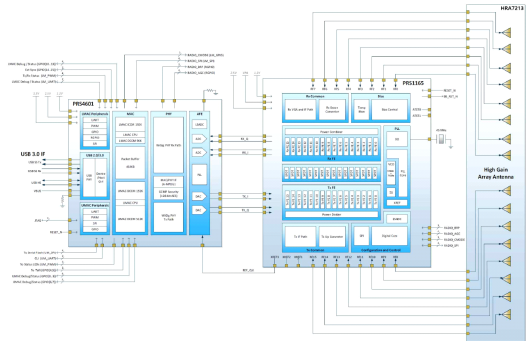


그림 4. 통신 장치 블록 다이어그램
Fig. 4. Block diagram of the communication module



그림 5. 개활지 시험 환경
Fig. 5. Test environments in open space

III. 시험 결과

이 장에서는 앞 장에서 설명한 테스트 환경에서 수행된 IEEE 802.11ad 기반 열차 간 직접통신 시스템의 통신 성능 시험 결과에 대해 소개한다.

두 대의 열차에 설치된 IEEE 802.11ad 통신 장치는 점대점으로 연결된 PTP (point-to-point) 방식을 사용한다. 단일 반송파와 변조 방식을 사용하고, 변조 코딩 구성은 0에서 12 까지 사용한다.

IEEE 802.11ad 기술을 열차 간 직접통신에 적용하기 위하여 6 개 주파수 채널에 대한 경로 감쇄를 조사하고, 경로에 의한 성능 저하가 적은 채널 (65.88 GHz ~ 68.04 GHz)를 적용하였다. 빔 포밍을 위해 송수신기에 각각 16 개의 위상배열 안테나 및 49 개의 빔 섹터를 사용한다. 빔 폭은 고정되어있으며, 상하 좌우 45 도의 각도를 가진다.

개활지 및 터널 각각의 특성을 유지하기 위해서 열차 간 최대 떨어진 거리는 1.4 km로 설정하였고, 열차의 이동 속도는 20 km/h이다. 본 논문에서 구축한 시험 환경에서 최대 전송률은 2.2 Gbps로 주어진다.

표 1. 테스트 파라미터
Table 1. Test parameters

Parameter	Value
Specification	IEEE 802.11ad
Transmission scheme	PTP
Modulation	single carrier (SC)
Modulation coding scheme index	0~12
Frequency	ch 5 (65.88 GHz ~ 68.04 GHz)
antenna array	16 elements
Number of beam sectors	49
Beam	±45° azimuth, ±45° elevation
Maximum transmit power	40 dBm
Train speed	0, 20 km/h
Maximum distance between trains	1.4 km
Maximum transmit data rate	2.2 Gbps

표 2. 변조 코딩 구성
Table 2. MCS (Modulation Coding Scheme) table

MCS index	Modulation	Coding Rate	Repetition	Data Rate (Mbps)	RSSI (dBm)
0	$\pi/2$ -BPS K	1/2	32	27.5	-78
1		1/2	2	385	-68
2		1/2	1	770	-66
3		5/8	1	962.5	-65
4		3/4	1	1155	-64
5		13/16	1	1251.25	-62
6	$\pi/2$ -QPS K	1/2	1	1540	-63
7		5/8	1	1925	-62
8		3/4	1	2310	-61
9	$\pi/2$ -16-Q AM	13/16	1	2502.5	-59
10		1/2	1	3080	-55
11		5/8	1	3850	-54
12	3/4	1	4620	-53	

성능 테스트에 사용한 파라미터는 표 1 및 표 2와 같다. 성능 측정은 철도중합시험신로의 개활지와 터널 구간에서 각각 진행했다.

3.1 개활지 시험 결과

그림 7과 8에서는 시험선의 개활지에서 두 대의 열차가 정지된 상태에서 열차 간 거리 (Distance)에 따라 처리율 (Throughput), 수신 신호 강도 지표 (Received Signal Strength Indicator), 패킷 손실률 (Packet Loss Rate), 지연시간(Latency)을 측정하여 결과를 나타낸다. 철도의 선로 환경에서 IEEE 802.11ad 기반의 열차 간 직접통신 기술의 기본적인 성능을 테스트하기 위해 정지 상태 시험을 먼저 시행하였다.

IEEE 802.11ad 기반 열차 간 직접통신 시스템은 대용량의 데이터 전송이 가능한 시스템으로 본 논문에서는 최대 데이터 전송량이 2.2 Gbps인 환경에서 시험하였다. 열차 간 거리가 100 m 이하인 경우에는 그림 7에서와 같이 손실 없이 데이터를 수신하는 것

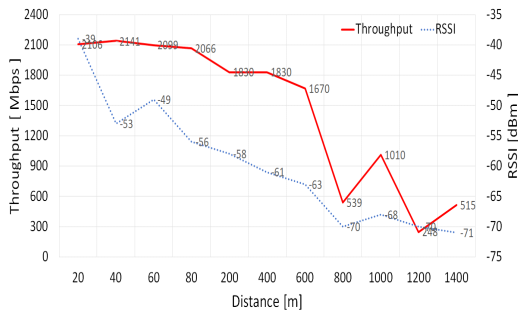


그림 7. 개활지에서 처리율 및 수신 신호 강도 지표 성능
Fig. 7. Throughput and RSSI in open space

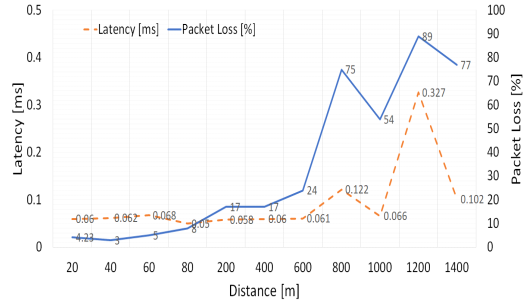


그림 8. 개활지에서 패킷 손실률 및 지연시간 성능
Fig. 8. Packet loss rate and latency in open space

으로 나타났다. 열차 간 거리가 최대인 1.4 km일 때는, 수신 신호 강도 지표가 -71 dBm, 처리율이 515 Mbps인 결과를 나타낸다.

특히, 열차 간 거리가 800 m인 지점을 기점으로 처리율 감소 폭이 커지는 결과를 나타내는데, 이는 수신 신호 강도 지표에 따른 변조 코딩 구성 (Modulation Coding Scheme) 선택이 불연속적으로 이루어짐에 따라 특정 거리 이상에서 처리율 감소 폭이 커지는 것으로 분석할 수 있다. 상세하게는 열차 간 떨어진 거리가 600 m일 때 수신 신호 강도 지표가 -63 dBm으로 MCS 레벨이 6으로 선택되는 반면, 800 m일 때 수신 신호 강도 지표가 -70 dBm으로, MCS 0이 선택되어, 처리율의 감소 폭이 커지는 결과가 나타났다. 지연시간 측면에서는 모든 테스트케이스에서 안정적으로 1 ms 이하의 성능을 나타낸다.

차량 간 통신에 이용되는 WAVE 표준 기술의 최대 처리율이 27 Mbps이고, 지연시간이 100 ms 이하인 것을 참고하면, 본 논문에서 열차 간 직접통신의 처리율 및 지연시간 등의 성능은 양호한 결과를 나타낸다⁶⁾.

그림 9에서는 두 대의 열차가 200 m의 간격을 유지하며, 20 km/h의 등속도로 이동할 때, 처리율 및 수신 신호 강도 지표 측정 결과를 나타내었다. 두 대의 열차가 200 m의 간격을 두고 정지한 상태에서 측정한 처리율이 약 1.8 Gbps인 것과 비교하여, 동일한 간격을 유지하며 열차가 이동하는 환경에서 측정한 처리율은 약 1 Gbps ~ 2 Gbps 사이에서 변동한다. 일시적으로 약 500 Mbps 근접하게 떨어지는 결과를 나타내기도 한다.

열차의 이동에 의한 선로 변 지장물의 변화와 차량 진동의 영향으로 송수신 장치에서 안테나 메인 로브의 중심 방향이 움직임에 따라 안테나 빔 매칭의 정확도가 떨어질 수 있다. 실제로, 열차가 선로 위에서 이

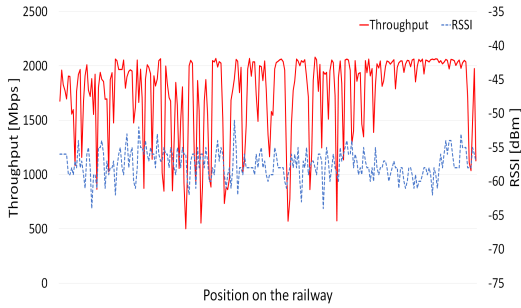


그림 9. 개활지 이동 환경에서 처리율 및 수신 신호 강도 지표
Fig. 9. Throughput and RSSI in open space with mobility

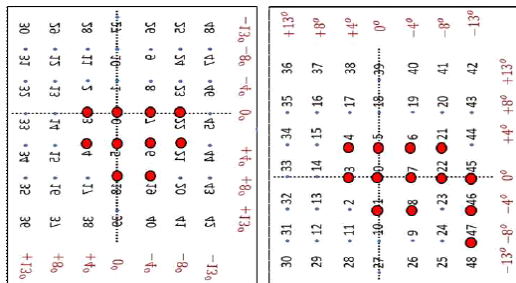


그림 10. 개활지 이동 시 송수신기의 빔 선택 결과
Fig. 10. Beam selection results of the transmitter and the receiver while trains are moving in open space

동함에 따라, 선로의 분기기, 전차선, 신호기 등 지장 물에 따라 일시적으로 열차 간 통신 성능이 떨어지는 것을 관찰할 수 있었다. 그림 10에서는 개활지에서 두 대의 열차가 등속으로 이동하는 환경에서 송수신 장치에서의 빔 선택 결과를 표시하였다. 송수신 장치의 빔 테이블은 대칭 형태로, 송수신 장치에서 같은 번호의 빔을 선택했을 때 빔 매칭이 정확히 이루어졌다고 할 수 있다. 그림 10에서와 같이 빔 매칭이 이루어지지 않는 경우가 발생하여 이동 시 처리율의 변동에 영향을 미친 것으로 분석할 수 있다. 고주파 대역인 60 GHz 주파수 대역을 사용하는 IEEE 802.11ad 기술을 이동성이 있는 철도 환경에 적용하기 위해서는 빔 포밍에 관한 기술을 중점을 두고 연구해야 할 필요가 있다.

3.2 터널 시험 결과

그림 11과 12는 시험 선로의 터널에서 두 대의 열차가 정지된 상태에서 열차 간 거리에 따라 처리율, 수신 신호 강도 지표, 패킷 손실률, 지연시간을 측정 한 결과를 나타낸다.

그림 11과 같이 터널에서는 열차 간 거리가 대략 1,000 m인 지점까지 처리율의 감소 폭이 개활지에 비해 매우 적다는 것을 확인할 수 있다. 선로의 개활지

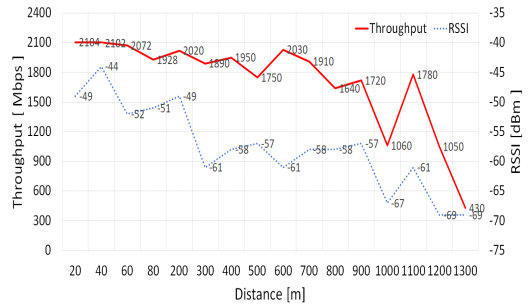


그림 11. 터널에서 처리율 및 수신 신호 강도 지표 성능
Fig. 11. Throughput and RSSI in tunnel

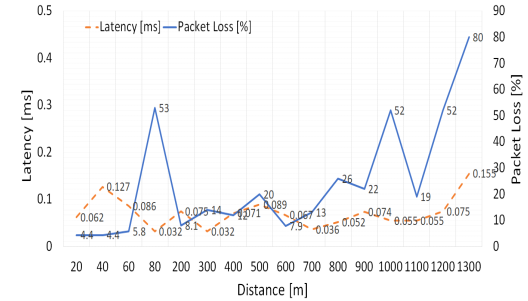


그림 12. 터널에서 패킷 손실률 및 지연시간 성능
Fig. 12. Packet loss rate and latency in tunnel

와 터널이 모두 LOS(line of sight)가 있는 환경이지만, 개활지에서는 직접파 이외의 간접 파는 소실되는 반면, 터널에서는 터널이 일종의 도파관과 같은 역할을 하여 직접파와 간접 파가 모두 수신되고, 이로 인해 더 높은 수신 신호 세기 결과를 나타내는 것으로 분석할 수 있다. 개활지 대비 터널에서의 지연시간 성능 역시 향상된 결과를 나타내었다.

그림 13에서는 터널에서 두 대의 열차가 200 m의 간격을 유지하며, 20 km/h의 등속도로 이동하며 데이터를 주고받았을 때, 처리율 및 수신 신호 강도 지표 측정 결과를 나타내었다.

두 대의 열차가 200 m의 간격을 두고 정지한 상태에서 측정한 처리율은 약 2 Gbps인 것과 비교하여, 같은 간격이지만, 열차가 이동하고 있는 환경에서 측정한 처리율은 대체로 약 1 Gbps~2 Gbps에서 변동한다. 역시 이동 환경에서 빔 매칭의 정확도 저하를 원인으로 분석할 수 있다. 터널에서 측정한 처리율의 최댓값은 약 600 Mbps로 개활지에서보다 높으며, 이러한 경향은 여러 번의 측정에서도 동일한 수준으로 나타났다.

터널은 GPS 신호가 수신되지 않으므로, GPS를 이용한 송수신 장치 간 시간 동기화 방식을 이용하는 무

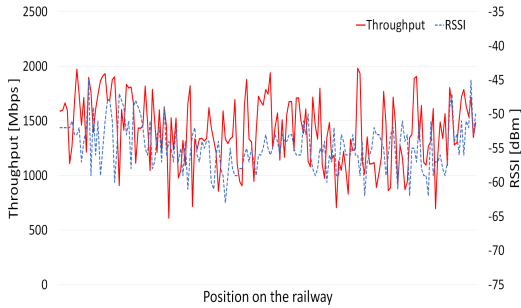


그림 13. 터널 이동 환경에서 처리율 및 수신 신호 강도 지표
Fig. 13. Throughput and RSSI in tunnel with mobility

선 통신 기술들은 터널이 많은 철도 환경에 적용 시 GPS 신호를 수신하기 위한 추가적인 장치 및 기술을 필요로 한다. 그러나 본 논문의 IEEE 802.11ad 기반의 열차 간 직접통신 기술은 GPS를 이용하지 않으므로, 터널이 많은 철도 환경 적용에 큰 장점이 될 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 열차 자율주행을 위한 열차 간 직접 통신에 IEEE 802.11ad 무선 통신시스템을 적용하여 철도종합시험선로에서 통신 성능을 측정하고 그 결과에 대해 소개하였다.

열차 간 거리에 대해 정지 상태 및 이동 상태에서 처리율, 수신 신호 강도 지표, 지연시간 등을 측정하였다. 정지 상태에서 열차 간 거리가 최대인 1.4 km일 때, 수신 신호 강도 지표가 -71 dBm, 처리율이 515 Mbps인 결과를 나타내었다. 이동 환경에서는 선로 변지장물 및 열차 진동에 의한 영향 등으로 처리율이 변동하는 형태를 나타냈지만, 열차 간 거리가 200 m일 때, 500 Mbps 이상의 처리율 성능을 나타냈다. 밀리미터 웨이브 대역이 경로 손실이 심하고, 특히, 이동 환경에서 취약하지만, 본 논문의 성능 측정 결과를 바탕으로 60 GHz 대역을 사용하는 IEEE 802.11ad 기술의 열차 간 직접 통신시스템 적용 가능성을 긍정적으로 평가할 수 있다.

IEEE 802.11ad와 같이 밀리미터 웨이브 대역에서 동작하는 무선 통신 기술이 철도의 고속 이동 환경에서 더 안정적인 성능을 얻기 위해서는 먼저 철도 운행 환경(도시철도 100 km/h 이하, 고속철도 300 km/h 이하)에서 성능 평가 및 성능 저하 요인에 대해 분석하고, 철도 환경 적용 기술을 개발하는 것이 필요하다. 특히, 철도 환경에 대응하는 빔 포밍, 고속 이동 시에 적용 가능한 빔 매칭 기술 등의 연구를 통한 성능 개

선이 가능할 것으로 기대한다.

References

- [1] 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, 2017. (<https://doi.org/10.7840/kics.2017.42.9.1781>)
- [2] S. Oh, "Next generation communication-based train control system," *J. Rail way*, vol. 21, no. 3, pp. 79-86, 2018.
- [3] *Shift2Rail multi-annual action plan*, Nov. 2015. (https://rail-research.europa.eu/wp-content/uploads/2013/07/S2R-JU-GB_Decision-N-15-2015-MAAP.pdf)
- [4] 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.
- [5] S. Park, J. Kim, and K. Ko, "Train-to-train communication for train auto nomous-driving control," in *Proc. KICS*, pp. 21-22, Jan. 2017.
- [6] B. Kang, J. Bae, W. Seo, E. Yang, and D. Seo, "Performance analysis of WAVE communication under high-speed driving," *ICT Express*, vol. 3, no. 4, pp. 171-177, 2017. (<https://doi.org/10.1016/j.ict.2017.11.011>)
- [7] S. Chen, J. Hu, Y. Shi, L. Zhao, and W. Li, "A vision of C-V2X: Technologies, field testing, and challenges with chinese development," *IEEE Internet of Things J.*, vol. 7, no. 5, pp. 3872-3881, May 2020. (<https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.2974823>)
- [8] Z. Pi and F. Khan, "An introduction to millimeter-wave mobile broadband systems," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 49, no. 6, pp. 101-107, Jun. 2011. (<https://doi.org/10.1109/MCOM.2011.5783993>)
- [9] T. Nitsche, C. Cordeiro, A. B. Flores, E. W. Knightly, E. Perahia, and J. C. Widmer, "IEEE 802.11 ad: Directional 60 GHz communication for multi-Gigabit-per-second Wi-Fi," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 12, pp. 132-141, Dec. 2014.

(<https://doi.org/10.1109/MCOM.2014.6979964>)

- [10] I. M. A. Sivers, "Adopting the 64 to 71 Ghz band for fixed wireless applications," *Microwave J.* vol. 62, no. 6, pp. 72-78, 2019.

김 영 주 (Youngju Kim)



2004년 2월: 연세대학교 대학원 전자공학과 석사
2010년 8월: 연세대학교 대학원 전자공학과 박사
2010년 9월~2015년 3월: 삼성 전자 책임연구원
2015년 3월~현재: 한국철도 기술연구원 선임연구원

<관심분야> 철도 통신, 5G, 6G
[ORCID:0000-0003-0762-5436]

고 경 준 (Kyeongjun Ko)



2006년 2월: 서울대학교 전기공학부 학사
2012년 8월: 서울대학교 전기컴퓨터공학 박사
2013년 9월~현재: 한국철도 기술연구원 선임연구원

<관심분야> 철도 통신, 5G, 6G, 측위
[ORCID:0000-0001-7575-864X]

박 성 수 (Sungsoo Park)



2008년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 석사
2012년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 박사
2013년 3월~현재: 한국철도 기술연구원 선임연구원

<관심분야> 철도 통신, 5G, 6G
[ORCID: 0000-0002-4457-3164]

정 락 교 (Rag-Gyo Jeong)



1999년 8월: 인하대학교 대학원 전기공학과 석사
2005년 2월: 인하대학교 대학원 전기공학과 박사
1990년 12월~1994년 12월: 한진중공업 사원
1995년 1월~현재: 한국철도 기술연구원 수석연구원

<관심분야> 전기공학, 통신공학, 제어공학
[ORCID:0000-0002-7505-7955]