

# LTE 기반의 철도무선통신망과 국가재난안전통신망 공동구축에 따른 전파간섭 분석 및 공존방안 연구

조한벽\*, 김호겸\*, 손일수<sup>o</sup>

## Research on Co-Channel Interference Analysis of Jointly Deployed LTE-Based Railway Communication Systems and Public Safety Communication Systems and Their Coexistence Strategy

Hanbyeog Cho\*, Hokyom Kim\*, Illsoo Sohn<sup>o</sup>

### 요 약

본 논문에서는 4세대 이동통신인 long-term evolution (LTE) 기반 철도무선통신망(LTE-R)과 국가재난안전통신망(PS-LTE)의 공동구축에 따른 전파간섭을 연구한다. 먼저, 동일 지역에 LTE-R과 PS-LTE를 공동구축할 경우 발생하는 전파간섭 시나리오를 살펴보고 LTE 표준규격에서 정의된 간섭제어 기술들의 적용을 검토한다. LTE-R과 PS-LTE 상호간의 전파간섭을 완화시키고 공존을 향상시킬 방안으로써 구현방식에 따라 radio access network sharing (RAN-Sharing), intercell interference coordination (ICIC), coordinated multipoint (CoMP) 방식의 다양한 해결책을 적용한다. LTE-R, PS-LTE 공동구축 환경을 모델링한 system-level-simulator (SLS) 기반 시뮬레이션을 통해 사용자 throughput 성능을 보이고 RAN-Sharing, ICIC, CoMP를 적용하였을 때 공존성이 얼마나 개선되는지 확인한다.

**Key Words** : LTE-R, PS-LTE, co-channel interference, coexistence

### ABSTRACT

This paper studies co-channel interference issues caused by the joint deployment of the long-term evolution (LTE)-based railroad radio communication network (LTE-R) and the national disaster public safety communication network (PS-LTE). First, we examine the co-channel interference scenarios that occur when LTE-R and PS-LTE are jointly deployed in the same area, and investigate the application of the interference mitigation techniques defined in the LTE standard specifications. Radio access network sharing (RAN-Sharing), intercell interference coordination (ICIC), and coordinated multipoint (CoMP) solutions are applied to mitigate radio interference between LTE-R and PS-LTE and improve coexistence. We demonstrate user throughput performance under LTE-R and PS-LTE co-deployment environments through system-level-simulator (SLS) and verify how coexistence improves when RAN-Sharing, ICIC and CoMP are applied for interference mitigation.

※ 본 논문은 2016년도 국토교통부 및 국토교통과학기술진흥원의 지원을 받은 철도기술연구사업(16RTRP-B089546-03)과 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. NRF-2015R1D1A1A01057100)의 일환으로 수행하였음.

♦ First Author : Electronics and Telecommunications Research Institute (ETRI), hbcho@etri.re.kr, 정희원

° Corresponding Author : Seoul National University of Science and Technology, Department of Computer Science and Engineering, isohn@seoultech.ac.kr, 정희원

\* Electronics and Telecommunications Research Institute (ETRI), hokykim@etri.re.kr

논문번호 : KICS2017-02-053, Received February 27, 2017; Revised May 21, 2017; Accepted May 23, 2017

## I. 서 론

최근 3rd Generation Partnership Project (3GPP)에서 표준화한 4세대 이동통신인 long-term evolution (LTE)은 큰 상업적 성공을 거두었다. LTE는 기존 3G 시스템 대비 월등한 전송속도를 강점으로 2009년 미국에서 첫 상용화 이후 전 세계적으로 매우 빠르게 보급되었으며, 2011년 7월에는 국내에서도 상용화 되었다. 2015년 하반기 기준 전 세계 140개국이 LTE 서비스를 개시하였고 지금도 서비스국가가 지속적으로 확대되고 있다<sup>1,2)</sup>. LTE는 일반 상용 셀룰라통신용을 넘어 다양한 무선통신 응용서비스로 확대 적용되고 있다. 대표적인 것이 철도무선통신망(high-speed railway communication system)에 적용한 LTE-R<sup>3,4)</sup>과 국가재난안전통신망(public safety communication system)에 적용한 PS-LTE이다<sup>5,6)</sup>.

미국에서는 2001년 9/11 테러, 2005년 카트리나 태풍 재해 이후 대형 재난에 효율적으로 대응하기 위해 범국가적인 광대역 공공안전망 구축하기로 결정하였다. 기존에는 기관별 음성 중심의 협대역 자가망을 구축하여 사용 중이었으나 영상을 포함한 광대역화계획에 따라 2012년에 광대역 국가재난안전통신망 기술로 LTE 방식을 선정하였다. 전담기관인 FirstNet을 설립하고 전용 주파수인 700MHz대역 20MHz 대역폭에 대한 사용권한을 부여함으로써 전국을 LTE 단일 플랫폼으로 제공하고자 사업을 추진하고 있다. FirstNet은 전국토에서 운영 가능한 공공안전 전용의 무선광역망을 설치하여 경찰, 소방, 응급은 물론 기타 공공안전 관련 종사자들이 더욱 효율적으로 업무를 수행하도록 하였다. 그림 1과 같이 FirstNet은 3-in-1 접근 전략(지상+위성+차량탐재이동)으로 충분한 무선커버리지 확보하고, 기지국 장애 및 과부하를 대비하고 있

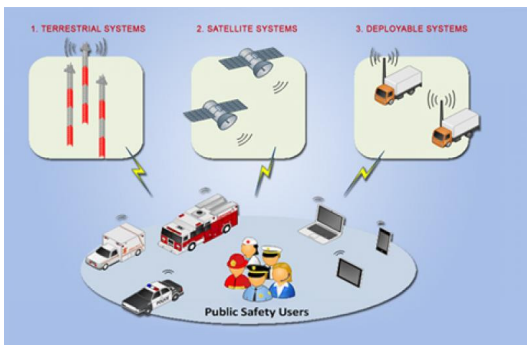


그림 1. FirstNet의 3-in-1 접근 전략<sup>7)</sup>  
Fig. 1. 3-in-1 Strategy of FirstNet

다. 구축비용 절감을 위해 자가망 외에 외곽지역은 상용망을 적극 활용하며 이 모두가 불가능한 산간 및 오지는 위성망을 이용한다.

우리나라에서는 2014년 11월 LTE 기반의 전용 공공통합망을 구축하기로 결정하였다. 주파수로는 TV 방송의 디지털 전환 후 회수배치된 700MHz 대역 중에서 그림 2와 같이 하향링크 773MHz~783MHz, 상향링크 718MHz~728MHz로 상/하향 10MHz 대역 폭으로 결정하였다. 하지만, 공공통합망 주파수는 다양한 목적의 시스템이 공유하도록 결정되었다. 즉, 국민안전처가 구축하는 PS-LTE 재난안전통신망, 국토교통부가 구축하는 LTE-R 철도무선통신망, 해양수산부가 구축하는 LTE-M 연안해상통신망 등이 동일 주파수를 사용하게 된다. LTE-M의 경우는 무선커버리지 전개지역이 해상이므로 망설계 측면에서 기타 망들과의 전파간섭문제를 피할 수 있다. 그러나, 전국토를 무선커버리지로 구축하는 PS-LTE와 철로변 주변에서 운용되는 LTE-R은 동일주파수를 사용할 경우 전파간섭 문제를 피할 수 없다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 목적이 상이한 이종시스템의 공동구축에 따른 주파수 간섭을 분석하고 간섭을 완화하여 효율적인 공존방법을 모색하는 것을 목적으로 한다.

공동구축 된 두 개 이상의 네트워크사이의 공존에 대한 이슈는 다양한 방식으로 논의되었다. 네트워크의 운용기술 측면로서 radio access network sharing (RAN-Sharing)은 네트워크 간에 무선 주파수 혹은 일부 네트워크 장비를 공유함으로써 주파수 간섭을 해결하려는 접근법이다<sup>8)</sup>. Intercell interference coordination (ICIC) 기술은 기지국간 협력을 통해 무선자원을 배타적으로 사용함으로써 주파수 간섭을 해결하는 방법이다<sup>9)</sup>. 또, coordinated multipoint transmission and reception (CoMP) 기술은 기지국간 협력을 더욱 적극적으로 활용하여 동적으로 자원을 스케줄링하거나 MIMO beamforming을 적용함으로써 주파수 간섭을 해결하는 방법이다<sup>10)</sup>. 상기의 기술들을 통해 일반적인 셀룰라 환경의 주파수 간섭을 완화하는 연구는 많이 되었으나 PS-LTE와 LTE-R의 공동구축 환경 같은 특수한 상황에 대한 고려는 부족하였다.

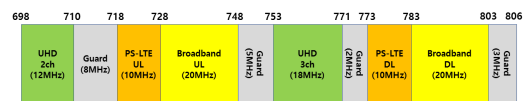


그림 2. 국내 700MHz 대역의 주파수 분배현황  
Fig. 2. Spectrum map of 700MHz in Korea

본 논문에서는 PS-LTE와 LTE-R 간의 특징적인 간섭시나리오를 분석한 후 기지국간 협력 시나리오에 따라 이를 해결할 수 있는 다양한 간섭완화기술을 각각 소개한다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 각각의 간섭완화기술의 성능을 비교 분석한다. 최종적으로 성능분석 결과를 통해 PS-LTE와 LTE-R 간의 간섭을 상당히 완화할 수 있음을 보였다.

## II. 본 론

본론에서는 먼저 PS-LTE와 LTE-R 간의 간섭시나리오를 분석해 본 후, 이러한 간섭 문제를 해결하여 두 시스템간의 공존성을 향상시키기 위한 다양한 기술들을 적용한다.

### 2.1 PS-LTE와 LTE-R간 간섭 시나리오

LTE-R과 PS-LTE는 동일하게 상/하향 10MHz 대역폭을 사용하도록 설계되었으며 이 경우 co-channel interference를 겪게 되어 성능열화가 필연적이다. PS-LTE는 다양한 재난발생 상황을 대응해야 하는 목적상 넓은 지역을 서비스해야 하므로 macro-type의 네트워크 구축이 필요하며, LTE-R은 철도용 무선서비스만을 목적으로 하므로 철로변을 중심으로 좁은 지역을 서비스하므로 pico-type의 네트워크 구축이 필요하다. LTE-R과 PS-LTE의 공동구축은 이러한 네트워크 특징을 고려하면 하기 그림과 같이 넓은 PS-LTE 기지국 커버리지 내에 다수의 LTE-R 기지국 커버리지가 overlay 형태로 구현되는 이중망 네트워크(heterogeneous network)로 표현된다.

일반적인 heterogeneous network의 경우

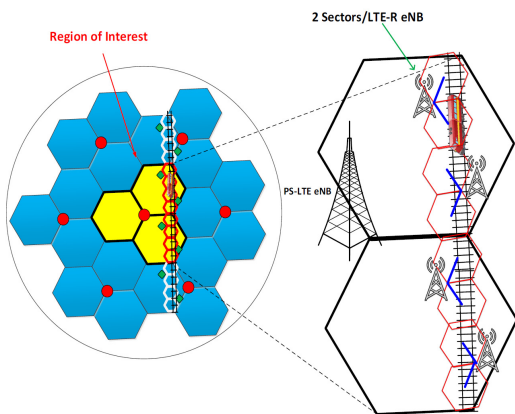


그림 3. LTE-R과 PS-LTE 네트워크의 이중망네트워크 구축 형태  
Fig. 3. Deployment plan of LTE-R and PS-LTE networks

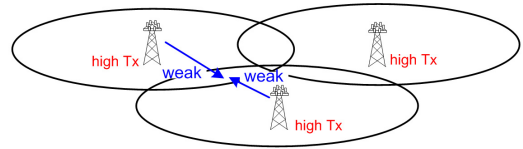


그림 4. Homogeneous 환경에서의 간섭 시나리오  
Fig. 4. Co-channel interference scenario in homogeneous network environments

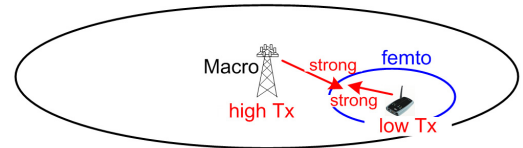


그림 5. Heterogeneous 환경에서의 간섭 시나리오  
Fig. 5. Co-channel interference scenario in heterogeneous network environments

macro-cell의 기지국이 강한 출력파워를 가지며 pico-cell의 기지국이 작은 출력파워를 가지게 되어 pico-cell이 강한 간섭신호를 겪게 된다. 이때, macro-cell이 aggressor, pico-cell이 victim인 관계가 성립한다. 하지만, LTE-R 기지국의 경우 PS-LTE 기지국과 동일한 출력파워를 가지게 되므로 전통적인 heterogeneous network 환경과는 다른 간섭시나리오를 가지게 된다. LTE-R 단말이 받는 간섭 시나리오는 물리적으로는 overlay 형태이나 실제로는 일반적인 homogeneous 환경이 된다. 즉, homogeneous 환경의 intercell-interference를 받게 된다. PS-LTE 단말이 받는 간섭 시나리오는 철도망과 원거리에 위치한 단말의 경우 일반적인 homogeneous 환경이지만 철도망과 근거리에 위치한 단말의 경우 Heterogeneous 환경 (Aggressor: LTE-R의 기지국, Victim: PS-LTE 단말)이 된다.

### 2.2 PS-LTE와 LTE-R간 공존성 향상을 위한 기술

PS-LTE와 LTE-R 공동구축에 따른 간섭을 해결하기 위해서는 다양한 간섭해결 기술을 적용할 수 있다. 먼저, 네트워크 운용기술로서 간섭을 해결하는 접근법인 radio access network sharing (RAN-Sharing) 방법을 살펴보고, 그 다음으로 3GPP LTE 표준기술인 intercell interference coordination (ICIC) 방법과 coordinated multipoint (CoMP) transmission and reception 방법을 살펴본다.

### 2.2.1 RAN-Sharing

RAN-sharing은 radio access 장비의 공유를 통해 동일 site의 구축비용을 절감하는 기술이다. RAN-sharing을 이용하면 PS-LTE나 LTE-R 단말이 상대방의 네트워크 신호가 강한 지역에 위치하고 있을 때 해당 기지국에 접속을 허가함으로써 간섭신호가 아닌 서비스신호로 활용할 수 있게 된다. RAN-sharing은 구축방식에 따라 그림 6과 같이 다양한 방식이 존재한다<sup>8)</sup>.

- **Site-Sharing:** 동일 위치의 송신타워를 공유하여 구축비용을 절감하는 방식으로 동일 주파수와 무선 커버리지를 전개할 경우 간섭제어의 효과는 없음
- **MORAN (Mobile Operator Radio Access Network):** 다수의 통신사업자가 기지국의 신호처리와 backhaul 네트워크를 공유하는 방식으로 RF 처리부와 무선주파수는 구분하여 사용함
- **MOCN (Multi-Operator Core Network):** 다수의 통신사업자가 무선주파수를 포함한 기지국, backhaul 네트워크를 모두 공유하는 방식으로 이 경우 상호 네트워크 간에 간섭시나리오가 존재하지 않음

무선주파수자원까지 공유하는 RAN-sharing 정책의 경우 무선에서의 간섭신호 문제에서 자유롭고 망 구축 비용 절감된다는 장점이 있으나, 민감한 안전관련 정보에 대하여 보안 이슈 해결 필요하고 용량의 한계로 우선순위 정책수립 필요하다.

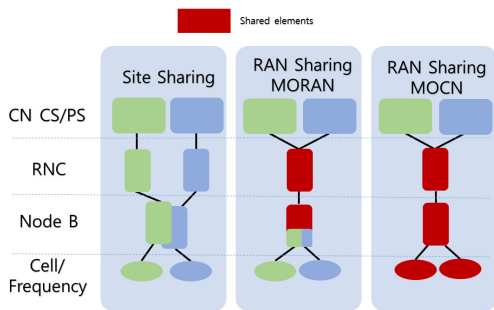


그림 6. RAN-Sharing의 다양한 구현방식  
Fig. 6. Various types of RAN-sharing deployments

### 2.2.2 ICIC

ICIC는 인접 셀 간의 간섭신호를 제어하는 기술로 3GPP LTE Rel-10에 정의된 표준기술이다. 일반적인 3-sector 형태의 셀룰라 구조를 가정하였을 때, 셀 경

계 지역에서 사용자 단말은 최대 3개의 기지국으로부터 강한 신호를 수신하게 된다. 인접한 기지국간 전체 주파수 자원을 3개로 배타적으로 분할하여 사용함으로써 간섭을 줄일 수 있는 기술이다<sup>9)</sup>. 특히, soft frequency reuse는 유연하게 무선자원을 분배하여 사용하는 ICIC 기술로 그림 7과 같이 signal-to-noise-interference ratio (SINR)이 높은 기지국 주변은 frequency reuse 1로 설정하고 SINR이 낮은 셀 경계 지역은 frequency reuse 3으로 무선자원을 운용함으로써 인접 셀로부터의 간섭신호를 완화하는 기술이다. 기지국 환경, 사용자 분포, 트래픽 부하에 따라 적응적으로 경계설정, 무선자원배분 등을 적용하게 되면 효과적이다.

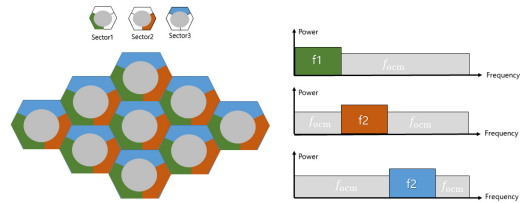


그림 7. Soft frequency reuse 기술 개요  
Fig. 7. Soft frequency reuse

### 2.2.3 CoMP

CoMP는 3GPP LTE Rel-11의 표준기술로서 eNB 간 정보 공유와 협력을 통해 간섭을 제어하는 기술이다. 네트워크 형상에 따라 coordinated scheduling / coordinated beamforming (CS/CB), Joint Processing (JP) 등 다양한 CoMP scheme 존재한다<sup>10)</sup>.

- **Coordinated scheduling/coordinated beamforming (CS/CB):** Channel state information (CSI) 정보를 공유하지만 data channel은 공유하지 않는 방식
- **Joint Processing (JP):** CSI를 정보 공유하고 data channel도 공유하는 방식으로 JT는 CS/CB에 비하여 엄격한 cell간 synchronization이 요구됨

본 연구에서는 구현용이성을 고려하여 CoMP CS/CB를 고려하기로 한다. CoMP CS는 그림 8과 같이 협력셀간 scheduling 정보를 교환하여 간섭을 회피한다. 셀간간섭에 민감한 사용자단말(e.g., 셀 외곽단말)들이 동일 주파수자원 (resource block & time slot)에 scheduling 되는 것을 방지하는 것이 핵심이다. 이때, 기대할 수 있는 장점은 협력 기지국간 scheduling map 정보만 공유하면 되므로 구현이 간단

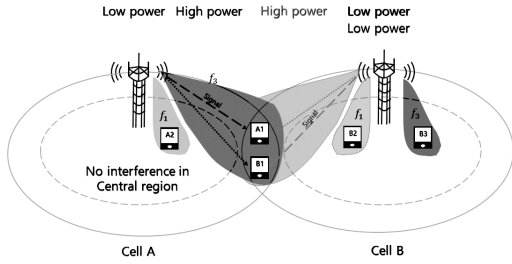


그림 8. CoMP coordinated scheduling 기술 개요  
Fig. 8. CoMP coordinated scheduling

하다는 것이고 단점으로 셀 부하가 높아서 주파수자원의 여유가 충분하지 못할 때 효과에 한계가 있게 된다.

CoMP CB는 그림 9와 같이 협력 셀간 MIMO beamforming을 통해 간섭을 회피한다. eNB에서의 transmit precoding matrix를 조절하여 셀 간 간섭에 민감한 사용자단말(e.g., 셀 외곽단말)들에게 미치는 effective interference를 줄이는 것이 핵심이다. 기대할 수 있는 장점은 외곽단말들이 동일 주파수자원에 scheduling 되어 있어도 적용 가능하다는 것이다. 단점은 beamforming을 위해 간섭채널의 CSI 정보를 알아야 하므로 단말의 복잡도, 제어신호 오버헤드가 증가한다는 것이다.

CoMP CB의 수학적 모델링은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \underset{w_1, \dots, w_K}{\text{maximize}} && f(\text{SINR}_1, \dots, \text{SINR}_K) \\ & \text{subject to} && \sum_{k=1}^K \|w_k\|^2 \leq P. \end{aligned} \quad (1)$$

즉, 목적함수  $f(\bullet)$ 를 전체시스템의 전송량으로 놓을 때, 전체 송신전력  $P$ 가 제한된 조건에서 적절히 beamforming 벡터  $w$ 를 결정하여 전체시스템의 전송량을 최대화하는 문제로 귀결된다. 이 문제는 통상의 해석적 방법으로 수학적인 해를 얻을 수 없는 NP-hard 문제로 밝혀졌으며 최적의 beamforming 해

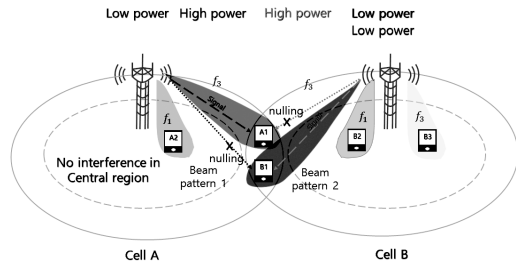


그림 9. CoMP coordinated beamforming 기술 개요  
Fig. 9. CoMP coordinated beamforming

를 얻기 힘들다. 따라서, 준최적의 방법 중 가장 효율적인 방법 중 하나인 Signal-to-Leakage-and-Noise Ratio Maximizing (SLNR-MAX) beamforming을 적용한다<sup>[11]</sup>.

$$w_k^* = \sqrt{p_k} \frac{\left( I_N + \sum_{i=1}^K \frac{\lambda_i}{\sigma^2} h_i h_i^H \right)^{-1} h_k}{\left\| \left( I_N + \sum_{i=1}^K \frac{\lambda_i}{\sigma^2} h_i h_i^H \right)^{-1} h_k \right\|} \quad (2)$$

SLNR-MAX beamforming은 매우 복잡한 수식 형태를 가지지만 그림10과 같이 기하학적으로 의미를 해석할 수 있다. Maximizing signal power (MRT)의 방향은 beamforming을 수행했을 때, 자신의 무선채널의 power를 최대화 하는 방향이고 zero inter-user interference (ZFBF)의 방향은 beamforming을 수행했을 때, 자신이 미치는 간섭채널의 power를 최소화 하는 방향이다. SLNR-MAX beamforming은 이기적인 전략인 MRT의 방향과 이타적인 전략인 ZFBF의 방향 사이에서 최적의 균형을 찾아서 beamforming에 적용함으로써 전체 네트워크 전송량을 최대화하게 된다.

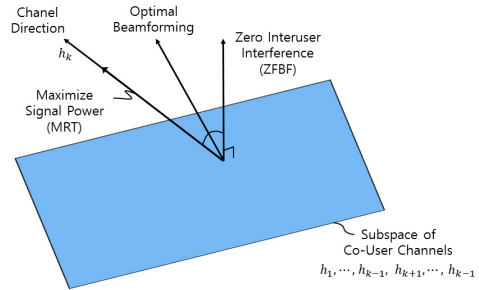


그림 10. SLNR-MAX beamforming의 기하학적 의미  
Fig. 10. Geographical interpretation of SLNR-MAX beamforming

### III. 실험

본 장에서는 상기 간섭완화 기술들의 성능을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 비교 분석하였다. LTE 하향링크의 시뮬레이션 위해 Vienna LTE-A downlink system level simulator<sup>[12]</sup>를 시뮬레이션 플랫폼으로 선정하였다. 사용하는 Vienna LTE-A downlink system level simulator은 오스트리아 Vienna University of Technology가 개발한 LTE simulator 중 하나로 object-oriented MATLAB으로 구현되었다.



학술적 용도로는 무료로 사용이 가능하며, 현재 수많은 연구자들이 참여하고 발전시키고 있다. 본 연구에서는 2016년 2사분기에 배포된 가장 최신버전인 v1.9를 기반으로 시뮬레이션을 수행하였다.

PS-LTE와 LTE-R의 공동구축 특성에 맞도록 네트워크 layout을 설정하도록 한다. 주파수는 773MHz~783MHz의 10MHz 대역폭의 하향링크를 대상으로 한다. PS-LTE 1개 셀 내에 LTE-R 셀 다수가 공동 구축되어 있는 overlay network 형태를 고려한다. PS-LTE는 전형적인 1-site 3-sector 구조이고 LTE-R은 철길을 따라 펼쳐져 있는 1-site 2-sector 구조로 설정한다. 전체 시뮬레이션 공간은 [-2000m, -2000m, 2000m, 2000m]로 구성하고 PS-LTE 기지국은 (0, 0)에 위치하고 LTE-R 기지국은 (1000, -1000), (1000, 0), (1000, 1000)에 위치시킨다. 사용자단말은 셀당 5개씩 생성, PS-LTE의 경우 섹터마다 uniform distribution 형태로 생성, LTE-R의 경우 KTX 차량의 길이(약 380m)를 고려하여 차량 내 균등한 거리로 분포하도록 설정한다. 기지국의 TX 안테나는 4개, 단말의 RX 안테나는 2개로 한다 (beamforming 적용시는 RX 안테나 1개로 설정).

안테나 빔패턴 모델링은 두가지를 고려한다. LTE-R의 경우 철로변을 따라 좁은 방사각도가 필요하므로 유효빔폭 60도의 섹터안테나로 설정하고 PS-LTE의 경우 일반적인 3GPP LTE 규격 TS36.942에서 정의하는 유효빔폭 120도의 섹터안테나로 설정한다. 경로손실(Pathloss model)은 3GPP LTE 규격

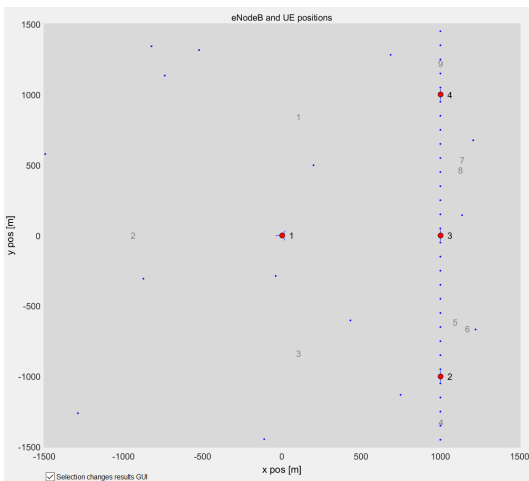


그림 11. 시뮬레이션을 위한 PS-LTE, LTE-R 네트워크 layout  
Fig. 11. PS-LTE and LTE-R network layout for simulations

TR36.942에서 정의한 urban area model을 따른다.

$$L = 40 \cdot (1 - 4 \cdot 10^{-3} \cdot D_{hb}) \cdot \log_{10}(R) - 18 \cdot \log_{10}(D_{hb}) + 21 \cdot \log_{10}(f) + 80 \text{dB} \quad (3)$$

여기서, R은 기지국과 사용자단말의 거리, f는 MHz 단위의 중심주파수, D<sub>hb</sub>는 평균적인 건물높으로부터의 기지국 안테나 높이를 의미한다. Small-scale fading은 3GPP의 3D MIMO channel model에 따라 생성한다. 사용자단말의 이동속도는 KTX의 운행속도를 고려 250km/h로 설정한다. 본 연구는 데이터 네트워크의 간섭신호 분석이 주목적이므로 사용자마다 full-buffer traffic으로 설정한다 (full-loading 가정). Transmission Mode (TM)는 closed-loop spatial multiplexing (TM4)을 적용하고 beamforming 사용시에는 TM7으로 설정한다.

그림 12는 사용자단말의 위치에 따른 SINR 분포를 보여준다. SINR이 높을수록 붉은색으로 나타나고 SINR이 낮을수록 푸른색으로 나타난다. 전체적으로 기지국에 가까울수록 높은 SINR을 보여주고 셀경계 지역으로 갈수록 낮은 SINR을 보여준다. 특징적으로 철로변 주변에는 LTE-R 신호가 강하므로 강한 간섭 신호로 인하여 신호품질이 낮아진다. Log-normal

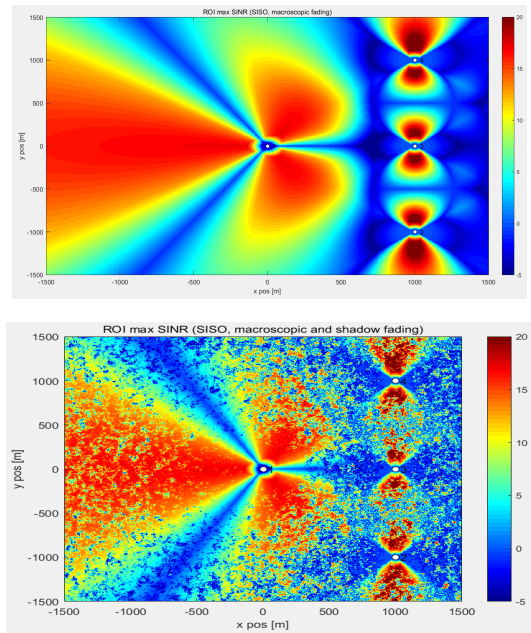


그림 12. 경로손실을 반영한 SINR 분포도 (위: 섀도우페이딩 없음, 아래: 섀도우페이딩 있음)  
Fig. 12. SINR distribution (Top: no shadowing, Bottom: shadowing)

shadow fading을 적용한 경우에는 이러한 분포가 산개된 형태로 나타나게 된다.

그림 13은 각 기지국의 커버리지를 보여준다. 단일 색으로 칠해진 구역에 있는 사용자 단말은 동일 기지국에 접속하는 것을 의미한다. 앞에서 본 것과 같이 PS-LTE 기지국은 철로변 주변에서 커버리지를 형성하지 못함을 알 수 있다. 각각의 LTE-R 기지국은 기지국 안테나가 향하고 있는 철로변을 따라 좁은 빔패턴으로 작은 커버리지를 형성하고 있으나 상기의 결과와 종합해 볼 때, 경로손실이 짧아서 커버리지 내에서는 매우 강한 전계강도를 형성하고 있음을 알 수 있다. 마찬가지로, Log-normal shadow fading을 적용한 경우에는 이러한 분포가 산개된 형태로 나타나게 된다.

그림 14는 link-level-simulator (LLS)를 통해 얻어진 performance graph이다. 왼쪽 결과는 SNR에 따라

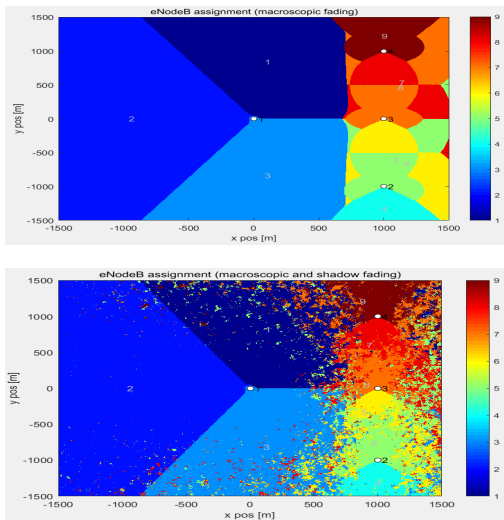


그림 13. 경로손실을 반영한 기지국 커버리지 분포도 (위: 웨도우페이딩 없음, 아래: 웨도우페이딩 있음)  
Fig. 13. eNB assignment (Top: no shadowing, Bottom: shadowing)

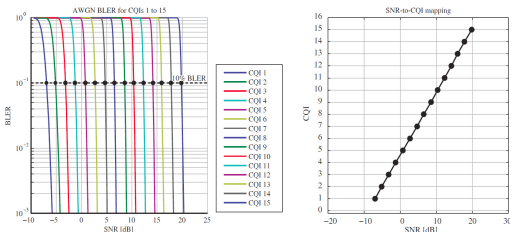


그림 14. SNR-to-CQI 매핑 (좌: BLER과 SNR 관계, 우: CQI와 SNR 관계)  
Fig. 14. SNR-to-CQI mapping (Left: BLER versus SNR, right: CQI versus SNR)

서 block-error-rate (BLER)이 어떻게 달라지는지 보여준다. 일반적으로 BLER performance target을 10%로 설정하게되며 그 결과 SNR에 따른 적절한 channel quality indicator (CQI)은 오른쪽 결과와 같이 결정된다. 이 LLS에서의 결과를 SLS와 결합하여 실제 사용자 분포에 따른 경로손실과 채널특성을 반영한 throughput 결과를 도출하게 된다.

표 1에서는 다양한 간섭제어 기술을 적용하였을 때 SLS를 통한 실제 사용자 throughput 성능을 비교한 것이다. 간섭제어의 효과를 명확히 분석하기 위해서 사용자 throughput 성능을 peak, average, edge 세 가지 관점으로 나누어 비교하였다.

간섭제어 미적용시, PS-LTE는 LTE-R로부터의 간섭에 의해 큰 성능열화가 관찰된다. 특히 edge throughput이 0으로 철로 주변에 위치한 PS-LTE 단말들은 사실상 서비스불능 상태임을 알 수 있다. LTE-R은 peak / average /edge throughput 모두 양호한 성능이 관찰된다. 그 이유는 LTE-R 기지국의 전송출력이 PS-LTE와 동일하고 빔방사패턴이 철로변에 집중되어 있어 LTE-R 단말은 항상 양호한 SINR 환경에 놓여있기 때문이다.

RAN-Sharing 적용시, PS-LTE는 큰 성능향상을 보여준다. 특히, 철로변 주변에 위치하여 서비스가 불가능했던 단말들이 LTE-R 기지국에 접속하여 서비스를 받음으로써 큰 성능향상이 이루어지게 된다. LTE-R은 여전히 peak / average /edge throughput 모두 양호한 성능이 관찰된다. 다만, RAN-Sharing을 위해 일부 무선자원을 PS-LTE 단말에게 할당해 주었기 때문에, 약간의 성능열화를 보인다.

ICIC 적용시, PS-LTE는 peak / average throughput 측면에서는 큰 변화가 없으나 edge

표 1. 간섭제어 기술 적용에 따른 사용자 throughput 성능 비교  
Table 1. User throughput performance comparison with respect to various interference mitigation schemes

Interference mitigation scheme	PS-LTE			LTE-R		
	Peak	Average	Edge	Peak	Average	Edge
None (default)	4.49	1.91	0	8.13	4.16	1.28
RAN-Sharing	7.75	3.61	0.77	7.8	3.47	0.58
ICIC	4.78	1.75	0.04	5	3.3	0.44
CoMP CS	4.88	1.89	0	7.75	4.12	1.42
CoMP CB	9.27	3.1	0.36	9.28	8.74	6.95

throughput 측면에서는 성능개선이 있다. 이는 frequency division에 의해 co-channel 간섭은 줄이고 대신 사용할 수 있는 무선자원량이 제한되었기 때문이다 (섹터당 1/3). LTE-R은 peak / average / edge throughput 모두 큰 폭으로 감소하는데 이는 LTE-R은 이미 양호한 SINR 환경으로 frequency division으로 줄일 수 있는 간섭량이 많지 않으며 오히려 무선자원의 감소가 전체성능에 더 큰 영향을 미치기 때문이다.

CoMP CS 적용시, PS-LTE, LTE-R 모두 간섭제어를 미적용하였을 때와 비교하여 유의미한 차이를 발견할 수 없다. 그 이유는 트래픽 환경이 full-buffer로 설정된 것에 기인하는 것으로, 모든 무선자원이 사용되고 있을 경우 coordinated scheduling을 통해 기대할 수 있는 성능향상 폭이 많지 않음을 의미한다. CoMP CB 적용시, PS-LTE는 peak / average / edge throughput 모든 측면에서 큰 폭으로 성능개선이 관찰된다. 특히, 철로변 주변에 위치한 서비스 불가능했던 단말들의 성능이 크게 개선된다. 이는 SLNR-MAX Beamforming을 통해 LTE-R 기지국이 PS-LTE 단말에게 가해지는 간섭량을 크게 완화시켰기 때문이다. LTE-R의 성능도 peak / average / edge throughput 모든 측면에서 큰 폭으로 개선된다. 이는 SLNR-MAX Beamforming을 통해 PS-LTE 기지국이 LTE-R 단말에게 가해지는 간섭량을 크게 완화시켰기 때문이다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 국가재난안전통신망(PS-LTE)와 철도무선통신망(LTE-R)의 700MHz 대역 공동구축에 따른 전파간섭을 분석하고 공존방안을 모색하였다. 분석 결과에 따르면, PS-LTE와 LTE-R 간의 협력적 간섭제어를 수행하지 않는 경우 셀 외곽에 위치한 사용자에게서 심각한 throughput 성능열화가 관찰되었다. 특히, 철도변에 위치한 PS-LTE 사용자의 경우 이러한 성능열화가 두드러지게 나타남을 확인하였다. 우리는 사실적인 무선통신환경을 반영하는 system-level-simulator를 이용하여 성능을 평가하였고, RAN-Sharing, ICIC, CoMP CB를 적용할 경우 이러한 사용자 성능열화를 상당히 완화할 수 있음을 보였다. RAN-Sharing과 ICIC의 경우, 이러한 성능개선의 근본적인 이유는 LTE-R 네트워크가 무선자원을 일부 할당하여 PS-LTE 네트워크에 공유해 주었기 때문이다. 이를 실제 네트워크 운용상에서 구현하기 위해서는 공익성/공

공성 측면에서 정책적인 장치가 마련되어야 할 것으로 보인다. 이론적 분석으로는 PS-LTE, LTE-R 모두의 성능을 개선시키는 CoMP CB가 가장 좋은 간섭제어 해결책으로 보이지만, 실제 네트워크에 적용하기 위해서는 협력적인 beamforming 결정을 위하여 연산 복잡도의 증가, 제어신호의 부하증가 등 종합적인 고려가 선행되어야 할 것이다.

#### References

- [1] *An OpenSignal Report*, 2015, <https://opensignal.com/>
- [2] S. W. Lee, Y. Yang, and J. Cho, "Coexistence study between LTE-Advanced system and current mobile communication system," *J. KICS*, vol. 35, no. 10, pp. 1019-1026, 2010.
- [3] B. Ai, X. Cheng, T. Kürner, Z.-D. Zhong, K. Guan, R.-S. He, L. Xiong, D. W. Matolak, D. G. Michelson, and C. Briso-Rodriguez, "Challenges toward wireless communications for high-speed railway," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 15, no. 5, pp. 1-16, Oct. 2014.
- [4] H. Cho, H. Oh, and J. Choi, "Trends of LTE based railway communication systems," *J. KIECS*, vol. 11 no. 4, pp. 373-378, 2016.
- [5] T. Doumi, M. Dolan, S. Tatesh, A. Casati, G. Tsirtsis, K. Anchan, and D. Flore, "LTE for public safety networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 51, no. 2, pp. 106-112, Feb. 2013.
- [6] S. Wu, O.-S. Shin, and Y. Shin, "Frequency resource obtaining method based on D2D device discovery in public safety communication networks," *J. KICS*, vol. 41, no. 11, pp. 1440-1442, 2016.
- [7] <http://www.afcea.org/content/?q=Article-satellite-first-responder-rescue>
- [8] I. Ahmad, C. Wan, and K. Chang, "LTE-Railway user priority-based cooperative resource allocation schemes for coexisting public safety and railway networks," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 7985-8000, May 2017.
- [9] T. Novlan, J. G. Andrews, I. Sohn, R. Ganti, and A. Ghosh, "Comparison of fractional frequency reuse approaches in the OFDMA



cellular downlink,” in *Proc. IEEE GLOBECOM 2010*, Miami, USA, Dec. 2010.

- [10] J. Lee, Y. Kim, H. Lee, B. L. Ng, D. Mazzaresse, J. Liu, W. Xiao, and Y. Zhou, “Coordinated multipoint transmission and reception in LTE-advanced systems,” in *IEEE Commun. Mag.*, vol. 50, no. 11, pp. 44-50, Nov. 2012.
- [11] E. Bjornson, M. Bengtsson, and B. Ottersten, “Optimal multiuser transmit beamforming: A difficult problem with a simple solution structure,” *IEEE Sign. Process. Mag.*, vol. 31, no. 4, pp. 142-148, Jun. 2014.
- [12] M. Rupp, S. Schwarz, and M. Taranetz, *The Vienna Lte-Advanced Simulators: Up and Downlink, Link and System Level Simulation*, 1<sup>st</sup> Ed., Springer Publishing Company, Incorporated, 2016.

**조 한 벽 (Hanbyeog Cho)**



1981년 : 아주대학교 산업공학과 공학사  
 1983년 : 한양대학교 대학원 산업공학과 공학석사  
 1992년 : 한양대학교 대학원 산업공학과 공학박사  
 1984년 3월~현재 : 한국전자통신연구원 책임연구원

<관심분야> 텔레메틱스/ITS 서비스 및 표준화, 차량간 통신기술, 차량-인프라통신기술, 협력주행기술, 철도무선통신기술

**김 호 겹 (Hokyom Kim)**



1983년 2월 : 연세대학교 전자공학사  
 1989년 2월 : 연세대학교 전자공학석사  
 1983년 3월~1987년 4월 : 효성중공업 기술연구소 연구원  
 1987년 4월~1988년 4월 : 삼성종합기술원 주임연구원

1989년 2월~현재 : 한국전자통신연구원 책임연구원  
 <관심분야> 무선통신, 방송 신호처리

**손 일 수 (Illsoo Sohn)**



2003년 2월 : 서울대학교 전기공학사  
 2005년 2월 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 공학석사  
 2009년 8월 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 공학박사  
 2009년 9월~2010년 9월 : The

University of Texas at Austin postdoc 연구원  
 2010년 11월~2012년 7월 : LG전자 선임연구원  
 2012년 8월~2013년 8월 : KT 매니저  
 2013년 9월~2017년 2월 : 가천대학교 전자공학과 조교수  
 2017년 2월~현재 : 서울과학기술대학교 컴퓨터공학과 조교수  
 <관심분야> 무선통신시스템, 분산네트워크 최적화