

Multi-Connectivity의 구조와 최신 연구 동향

장 지 석*, 박 서 영*, 김 준 영*, 정 소 이°

Structure and Recent Research Trends of Multi-Connectivity

Jiseok Jang*, Seoyeong Park*, Junyoung Kim*, Soyi Jung°

요 약

본 논문은 Multi-Connectivity (MC) 기술이 네트워크 성능 향상에 기여하는 핵심적인 역할을 분석한다. 통신 네트워크는 고속 데이터 전송, 초저지연, 높은 신뢰성, 그리고 다양한 환경에서의 지속적인 연결성을 요구하며, 이를 실현하기 위해 MC와 같은 기술이 주목받고 있다. MC는 사용자 장비가 다중 기지국과 동시에 연결될 수 있도록 지원함으로써 데이터 전송의 신뢰성과 효율성을 극대화하는 기술이다. 본 논문에서는 MC의 기본 아키텍처와 핵심 기술을 상세히 설명하고, 3GPP 표준 내 네트워크 요소들의 구현 방식과 최신 연구 동향을 분석한다. 또한, 6G 네트워크에서의 MC 확장 가능성과 이를 위한 기술적 요구사항 및 도전 과제를 논의하며, MC 기술이 지속적인 연결성을 보장하고 다양한 애플리케이션의 요구를 충족시키는 데 기여할 수 있는 방안을 제시한다.

키워드 : 비지상 네트워크, 지상 네트워크, 다중연결, 듀얼연결, DualSteer, 3GPP

Key Words : Non-terrestrial networks, Terrestrial networks, Multi-connectivity, DualSteer, 3GPP

ABSTRACT

This paper analyzes the critical role of Multi-Connectivity (MC) technology in enhancing the performance of communication networks. Networks demand high-speed data transmission, ultra-low latency, high reliability, and continuous connectivity in various environments, drawing significant attention to technologies like MC. MC enables user equipment to connect to multiple base stations simultaneously, maximizing data transmission reliability and efficiency. In this paper, the fundamental architecture and key technologies of MC are thoroughly explained, along with an analysis of the implementation methods of network components within the 3GPP standards and the latest research trends. Additionally, the paper discusses the scalability of MC in 6G networks, the technical requirements, and challenges for its realization, and proposes ways in which MC can ensure continuous connectivity and meet the demands of diverse applications

1. 서 론

5세대 이동통신 기술 (5G)과 그 이후의 통신 기술 발전은 다양한 요구사항과 서비스, 애플리케이션에 걸

쳐 진화하고 있다. 이러한 발전은 대역폭의 확장과 높은 신뢰성을 요구하고 있다^[1]. 복합적인 요구사항을 충족하기 위해 동적 자원 할당법^[2], 역 페어링 기술^[3], 간접 최적화^[4], 핸드오버 최적화^[5] 그리고 다중 연결 (multi-

※ 본 연구는 과학기술정보통신부 재원으로 정보통신기획평가원의 지원(No. RS-2021-0-00847, 3차원 공간 위성통신 기술 개발, 50%)과 과학기술정보통신부 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2024-00358662, Industry 5.0 실현:협력인공지능 기반 이기종 산업용로봇 차세대 제어기술 개발, 50%)

• First Author : Department of Artificial Intelligence Convergence Network, Ajou University, star12191254@ajou.ac.kr, 학생회원

° Corresponding Author : Ajou University Department of Electrical and Computer Engineering, sjung@ajou.ac.kr, 종신회원

* Department of Artificial Intelligence Convergence Network, Ajou University, {syjm0819, junzero0615}@ajou.ac.kr, 학생회원

논문번호 : 202412-309-C-RN Received December 3, 2024; Revised January 2, 2025; Accepted January 17, 2025

connectivity, MC) 등 다양한 기술들이 5G 네트워크의 성능 향상을 위해 활발히 연구되고 있다. 이 중에서도 MC는 통신이 끊임없이 연결되는 데 중요한 역할을 하며, 본 논문에서는 MC에 대해 심도 있게 다루고자 한다.

MC는 5G 네트워크에서 고속 데이터 전송 및 저 지연 서비스 제공이 요구되는 환경에서 중요한 역할을 한다. 예를 들어, 초고화질 스트리밍, 실시간 게임, 자율주행 차량과 같은 애플리케이션은 안정적이고 지속적인 연결이 필수적이다. 그러나 기존의 단일 기지국 의존 방식은 이러한 애플리케이션의 요구사항을 충족하는 데 근본적인 한계를 지니고 있다. 특히 단일 경로 의존 방식은 통신 간섭, 데이터 병목현상, 또는 기지국 장애와 같은 문제로 인해 안정적인 데이터 전송을 보장하기 어렵다. MC는 이러한 문제를 해결하기 위해 사용자 장비 (user equipment, UE)가 여러 기지국에 동시에 연결되도록 지원함으로써 데이터 경로를 다중화한다. 이를 통해 네트워크의 유연성을 높이고, 데이터 손실 및 서비스 중단 위험을 크게 줄일 수 있다. 나아가, 사용자 경험을 향상함으로써 고속 데이터 전송과 안정적인 연결이 필수적인 환경에서 네트워크의 품질을 극대화한다. 이처럼 MC는 5G와 차세대 통신 기술의 성능을 끌어올리는 데 중요한 역할을 한다.

MC의 표준화 및 기술적 구현은 국제 이동통신 표준화 기구인 3rd Generation Partnership Project (3GPP)가 주도하고 있다. 3GPP는 이동통신 시스템의 표준을 정의하는 주요 기관으로, 다양한 표준과 기술 사양을 제정해왔다. 예를 들어, LTE (long term evolution)에서는 LTE 기지국과의 다중 연결을 가능하게 하는 MC 개념이 도입되어 데이터 전송 성능을 향상한다⁶⁾. 5G에서는 이러한 개념이 더욱 발전하여 3GPP Release 15에서 5G NR (new radio)과 LTE를 동시에 사용하는 EN-DC (E-UTRA-NR dual connectivity)와 같은 MC 기술이 정의되었다. Release 16 및 17에서는 5G 네트워크의 효율성을 높이기 위한 추가적인 MC 기능들이 도입되었으며, 이를 통해 네트워크 운영자는 더욱 유연하고 효율적인 네트워크 관리를 수행할 수 있다. Release 18 및 19에서는 더욱 복잡한 네트워크 시나리오에 적합하도록 개선되고 향후 기술 요구사항을 충족하기 위한 MC의 확장이 예상된다.

본 논문에서는 MC 기술의 기본 원리, 설계 방식, 그리고 5G 및 그 이후의 통신 환경에서의 활용 사례를 심도 있게 조사한다. 또한 위성과 지상 네트워크가 공존하는 네트워크 환경에서 MC의 서비스 가능 여부에 대해서도 논의한다. 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서

MC 기술의 기본 원리에 대해 논의하고, 3장에서 3GPP MC 표준 동향을 살펴본다. 4장에서 5G 및 그 이후의 통신 환경에서의 MC 활용 사례를 분석하며, 5장에서는 앞으로의 연구 방향을 제시하고 마지막으로, 6장에서는 결론을 제시한다.

II. Multi-Connectivity의 아키텍처 및 핵심 기술

MC는 UE가 동시에 여러 통신 링크에 연결되어 무선 네트워크의 신뢰성과 용량을 향상하는 시스템 아키텍처이다^{7,8)}. MC는 소스와 목적지 간의 다양한 독립적 경로를 활용하여 diversity와 multiplexing 간의 trade-off를 가능하게 하는 유연한 통신 프레임워크를 제공한다. 특히, 초 신뢰 저 지연 통신 (ultra-reliable low latency communication, URLLC) 시나리오에서 MC는 프레임 오류율 10^{-5} ~ 10^{-9} 의 매우 높은 신뢰성과 중단 간 지연 1ms 이하의 초저지연을 요구하는 애플리케이션을 지원하는 데 필수적이다. MC는 사용자 장비가 매크로 기지국, WiFi 액세스 포인트, 위성 등의 여러 네트워크 노드에 다중 연결을 지원하여 데이터 속도 향상, 중단 확률 감소, 네트워크 장애 또는 간섭 회복력을 제공한다.

2.1 Multi-Connectivity의 아키텍처

MC에서는 사용자 평면 (user plane, UP) 트래픽이 송신 프로토콜 계층에서 splitting 또는 duplication 되어 전송될 수 있다. 이후 수신 프로토콜 계층에서 aggregation 또는 assembly 과정을 거치면서 원래의 형태로 복원된다. 이 프로세스는 MC anchor layer에서 수행된다. MC anchor layer는 상위 계층과 하위 계층 간의 데이터를 조정하는데, 위치하는 네트워크 구성 요소에 따라 서로 다른 MC architecture를 구성한다⁹⁾. Radio access network (RAN) 기반 MC는 RAN에 MC anchor layer를 배치하여 무선 자원을 조정한다. Core network (CN) 기반 MC는 CN에 MC anchor layer를 배치하여 데이터를 관리하며, end-to-end 기반 MC는 애플리케이션 서버에서 다중 연결성을 관리한다.

2.1.1 END-to END MC

End-to-end 기반 MC는 상위 계층의 프로토콜 기능을 활용하여 UE와 애플리케이션 서버 간에 다중 연결성을 제공하는 방식이다¹⁰⁾. 이 방식은 특정 RAT (radio access technology) 또는 CN 구성과 독립적으로 작동한다. End-to-end MC는 3GPP 기지국 간 연결을 기반으로 하거나, 3GPP와 비 3GPP 기지국 간 연결을 통해

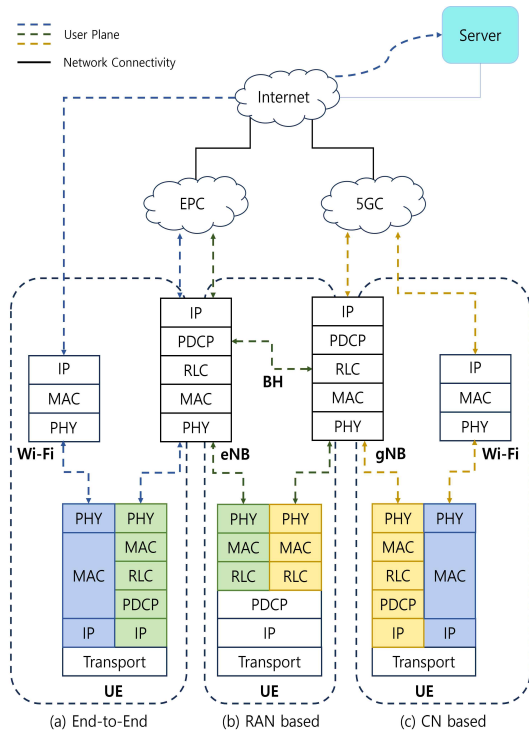


그림 1. 사용자 평면 관점에서 MC의 구조
Fig. 1. MC architecture from the user plane perspective

구현될 수 있다.

3GPP 기지국 간 end-to-end MC는 UP 연결을 중복으로 설정하여 데이터 전송의 신뢰성을 강화한다. 여기서 UP 연결은 사용자 평면에서 데이터를 전송하는 경로를 말하며, 이를 중복으로 설정함으로써 데이터 손실을 방지하고 전송 신뢰성을 극대화한다. UE와 CN 사이에서 두 개 이상의 독립적인 UP 연결이 설정되며 이는 URLLC에서 필수적이다. 그러나 이러한 방식은 모든 네트워크 엔터티 (RAN과 CN)에 중복 구성이 필요하여 높은 구현 비용과 시스템 복잡성을 초래할 수 있다.

반면, 3GPP와 비 3GPP 기지국 간 end-to-end MC는 UE와 애플리케이션 서버 간에 직접 연결을 설정하여 네트워크 구성과 무관하게 작동한다. 이 방식은 비 3GPP 네트워크와의 통합을 지원하며, 별도의 네트워크 구성 없이도 다중 연결을 제공할 수 있고 구현이 간단하다. 그러나 이러한 접근 방식은 네트워크 사업자 (mobile network operator, MNO)가 제어할 수 없어 주어진 QoS (quality of service) 기준을 보장하기 어렵다. 그림 1 (a)는 3GPP인 LTE와 비 3GPP인 Wi-Fi 네트워크 간의 MC 동작을 나타낸다.

주요 프로토콜인 MPTCP (multipath transmission control protocol)와 multipath QUIC (quick user data-

gram protocol internet connection) 프로토콜은 TCP (transmission control protocol) 기반 트래픽을 다중 경로로 전송할 수 있는 경제적인 옵션을 제공한다. MPTCP는 하나의 연결에서 여러 경로를 동시에 사용하는 기능을 제공하며, 각 경로가 독립적으로 작동하므로 네트워크의 신뢰성과 성능을 향상할 수 있다. Multipath QUIC은 연결 설정 없이 데이터를 빠르고 간단하게 전송하는 UDP (user datagram protocol)를 기반으로 동작하며, 지연이 낮고 확장성이 뛰어나 실시간 애플리케이션에서 효과적으로 사용된다.

2.1.2 RAN 기반 MC

RAN 기반 MC는 무선 자원 관리가 여러 기지국 간 조정을 통해 UE에 최적화된 연결을 제공하는 구조를 가진다. 그림 1(b)는 RAN 기반 MC의 multi-radio dual connectivity (MR-DC)에 대한 UP을 나타낸다. 이 방식에서 MC anchor layer는 RAN에 위치하며, 주어진 기지국 간의 신호 메시지 교환 및 통신 경로 조정을 통해 UE와 MC 작동을 유지한다. MC 작동 중 하나의 BS가 anchor 역할을 하며, 백홀을 통한 통신은 5G BS의 경우 Xn 인터페이스, LTE BS의 경우 X2-U 인터페이스를 통해 이루어진다^[11].

Anchor BS는 무선 자원의 효율적 할당과 제어를 담당하는 radio resource control (RRC) 프로토콜을 통해 BS 간에 신호 메시지를 교환하고, 각 통신 경로에서 무선 기능은 독립적으로 처리된다. 또한 RAN에 MC anchor layer가 있으면 radio resource management (RRM) 알고리즘이 갑작스러운 채널 품질 변화에 신속하게 대응하는 데 도움이 된다. RRM 알고리즘은 무선 네트워크에서 주파수, 전력, 시간 슬롯 등의 자원을 효율적으로 관리하여 네트워크 성능을 최적화하고 간섭을 최소화하는 알고리즘이다. 그러나 이러한 접근 방식은 모든 BS에 필요한 하드웨어 및 소프트웨어 업그레이드 비용으로 인해 MC의 확장성을 제한할 수 있다. 백홀의 지연 시간 및 용량 요구사항은 MC 솔루션의 효율성을 제한할 수 있는 주요 요인이다. RAN 기반 MC는 물리 계층 (PHY), 매체 접근 제어 계층 (MAC), 패킷 데이터 수렴 프로토콜 계층 (PDCP) 등에서 anchor layer의 위치에 따라 다양한 방식으로 구현될 수 있으며, 각각의 계층은 특정한 요구사항과 네트워크 조건에 따라 선택적으로 적용된다.

PHY 계층에서의 MC 구현은 여러 BS의 스펙트럼 및 시간 자원을 조정하여 특정 UE에 제공하는 것을 의미한다. UE의 간섭 정보는 선택적으로 활용되어 특정 시간에 어느 BS와 통신할지를 결정한다. PHY MC는

높은 수준의 조정과, BS 간 지속적인 제어 정보 교환이 요구된다. 5G의 multi-transmission and reception point(TRP) 및 4G의 coordinated multi-point (CoMP)은 이러한 PHY 계층 MC 기술의 대표적인 예로, 셀 간 간섭을 완화하기 위해 여러 BS에서 사용자 데이터의 송수신을 조정하는 데 사용된다^[12,13].

MAC 계층에서의 MC 구현은 transmission block (TB)의 전송을 여러 PHY 계층에 걸쳐 조정하는 기술을 포함한다. 이는 무선 링크 상태가 급격히 변화하는 상황에서도 빠른 시스템 적응이 가능하다는 이점을 제공한다^[14]. 그러나 단일 MAC 엔티티가 다양한 TB 크기, 시간 슬롯, 그리고 RAT 간의 데이터 재전송을 조정하는 HARQ (hybrid automatic repeat request) 절차를 지원해야 하므로 스케줄러 복잡성이 증가한다. 예를 들어, NR은 uplink (UL)과 downlink (DL)에 송수신 타이밍이 유연하게 설정되는 비동기 HARQ를 사용하지만, LTE는 UL에서 송신과 수신이 정해진 시간에 이루어지는 동기 HARQ를 사용한다. 이러한 차이로 인해 URLLC 애플리케이션에서 요구되는 낮은 슬롯 지속 시간을 달성하는 것이 어려워진다.

PDCP 계층에서의 MC 구현은 비교적 단순한 방식으로 작동하여 LTE와 NR 모두에 유사한 사양을 가지기 때문에 MC anchor layer 역할에 적합하다. PDCP 기반 MC에서는 각 BS가 독립적으로 링크 적응 및 자원 할당 절차를 수행할 수 있다. 이를 통해 큰 구현 복잡성 없이 여러 BS를 사용하여 packet data unit (PDU)를 분할 혹은 복제하여 여러 경로로 전송하는 기능을 제공함으로써 데이터 안정성과 사용자 처리량을 동시에 향상시킬 수 있다^[15]. PDCP-MC 솔루션으로는 DC, MR-DC, NR-U with DC, dual active protocol stack (DAPS), LTE-WLAN aggregation (LWA)의 3GPP 기술이 고려될 수 있다^[16].

2.1.3 CN 기반 MC

CN 기반 MC는 MC와 관련된 제어 평면 (control plane, CP) 및 UP 기능을 CN에서 직접 관리하는 구조를 특징으로 한다. 이를 통해 동일한 CN에 연결된 BS 뿐만 아니라 서로 다른 CN에 연결된 BS에서도 UE에게 서비스를 제공할 수 있다. 후자의 경우, 예를 들어 LTE와 5G CN 간의 조정을 통해 서로 다른 기술 환경에서도 MC를 지원한다. 그러나 이러한 복잡성을 고려할 때, 일부 시나리오에서는 RAN 기반 MC가 더 간단한 대안이 될 수 있다. CN 기반 MC는 사용자 트래픽을 분리된 통신 경로로 전송하며, 각 BS에 대해 독립적인 CN 연결을 사용하여 구현된다. 이를 통해 UE는 각 연

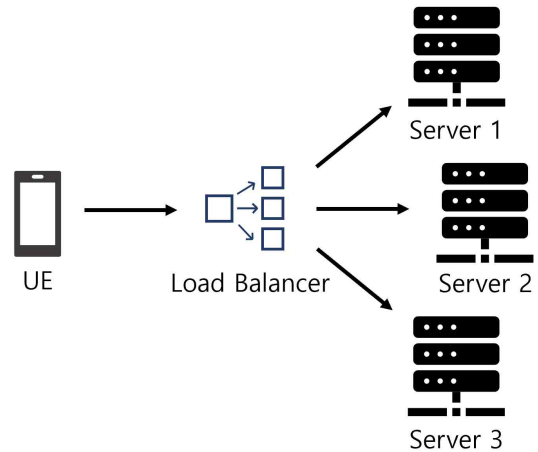


그림 2. MC에서 Load Balancing의 분산 방식
Fig. 2. Distributed method of load balancing in MC

결에 대해 별도의 IP (internet protocol) 주소를 사용할 수 있다. 이 접근 방식은 BS의 수와 기술에 관계없이 다양성과 확장성을 제공하는 경제적인 솔루션으로 간주된다. 그러나 동적 무선 링크 조건에 대해 실시간 적응이 어렵다는 문제가 존재한다.

이와 관련하여, 3GPP는 CN 기반 MC의 효율성을 높이기 위해 모바일 네트워크 사업자가 NR과 Wi-Fi 네트워크 간의 트래픽을 조정할 수 있는 access traffic steering, switching, and splitting (ATSSS) 기술을 도입하였다. ATSSS는 CN과 UE 간에 특정 다중 경로 기능을 사용하여 사용자 트래픽과 제어 메시지를 전송하는 기술로, 트래픽 조정 및 왕복 시간 측정을 지원한다. 현재 ATSSS는 TCP 기반 트래픽만을 지원하지만, 향후 UDP 기반 프로토콜로의 확장이 논의되고 있다. 그림 1 (c)는 CN 기반 MC의 ATSSS의 user plane을 보여준다.

2.2 Multi-Connectivity의 주요기능

Load balancing, packet splitting, packet duplication은 MC의 주요 기능으로, 네트워크 자원의 효율적 활용과 안정적인 통신 품질을 제공하기 위해 핵심적으로 구현된다^[17].

2.2.1 Load Balancing

Load balancing은 MC에서 네트워크 부하를 효율적으로 분산하기 위한 메커니즘이다^[18]. MC는 UE가 여러 네트워크 노드 (e.g., eNB, gNB)에 동시에 연결될 수 있는 구조를 제공하며, 이를 통해 특정 기지국 또는 네트워크 노드에 집중되는 부하를 완화한다. MC 환경에서는 각 기지국의 부하 상태, 채널 품질, 사용 가능한

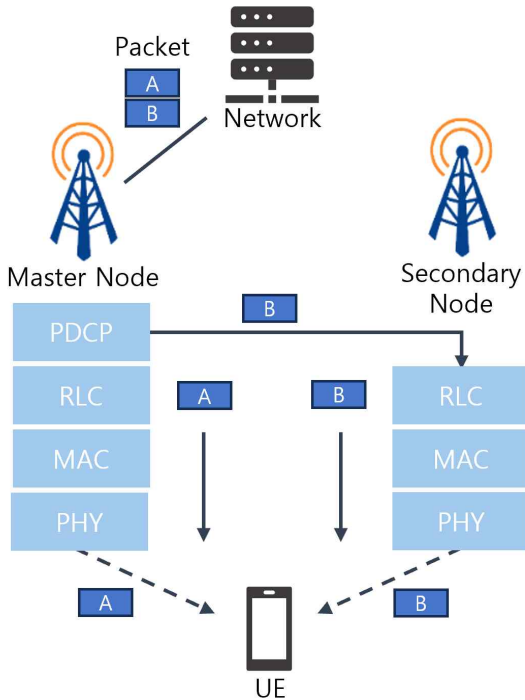


그림 3. MC에서 Packet Splitting의 분산 방식
Fig. 3. Distributed method of packet splitting in MC

자원 등을 동적으로 평가하여 UE가 연결된 노드 간의 트래픽을 조정한다. Load balancing의 분산 방식은 그림 2와 같다.

2.2.2 Multi-Connectivity의 아키텍처

Packet splitting은 MC에서 데이터를 효율적으로 전송하기 위한 기술이다. 이 기술은 PDCP 계층에서 수행되며, 그림 3과 같이 데이터 패킷을 여러 경로로 나누어 병렬 전송한다. MC는 master node (MN)와 secondary node (SN)간의 동시 연결을 활용하여 데이터 패킷을 분할 한 후 각각 다른 경로를 통해 전송한다.

2.2.3 Packet Duplication

Packet duplication은 MC에서 신뢰성을 극대화하기 위해 도입된 기술로, 그림 4와 같이 같은 데이터를 여러 경로를 통해 중복 전송한다¹⁹⁾. 이 기술은 URLLC와 같은 고신뢰 저 지연 응용에서 데이터 손실을 방지하고 링크장애 시에도 안정적인 서비스를 제공한다. Packet duplication은 송신 단계에서 동일한 데이터 패킷을 두 개의 독립적인 링크 (e.g., eNB와 gNB)를 통해 전송하며, 수신 측에서는 가장 먼저 도착한 패킷을 처리한 후 나머지 중복된 패킷을 무시한다.

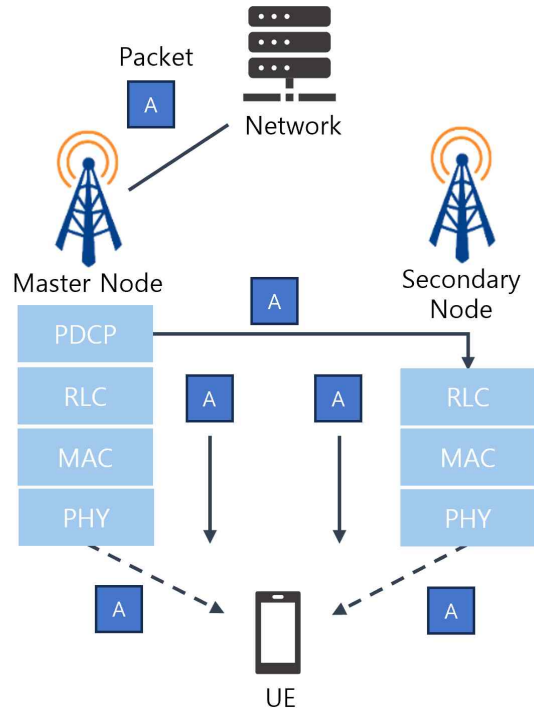


그림 4. MC에서 Packet Duplication의 분산 방식
Fig. 4. Distributed method of packet duplication in MC

2.3 Multi-Connectivity 지원기술

MC를 지원하는 대표적인 기술에는 CoMP, carrier-aggregation (CA), dual connectivity (DC), 분산 MIMO가 있다.

2.3.1 CoMP 기술

CoMP 표준은 3GPP Release 11에서 처음 도입됐고 이후 release 12에서 확장했다. CoMP는 셀 경계 지역에서 UE가 여러 기지국과 데이터를 송수신할 수 있도록 설계된 최초의 표준화된 다중 연결 기술이다. LTE-CoMP는 UE와 기지국 간 전송 및 수신 데이터의 동적 조정을 가능하게 하여 네트워크 커버리지를 개선하고 셀 간 간섭을 감소함으로써 네트워크 자원 활용률을 향상할 수 있다.

CoMP는 두 셀에서 동일한 radio link control (RLC) 엔티티와 MAC 엔티티를 사용하는 구조를 기반으로 한다. 이 기술은 X2 백홀 인터페이스를 통해 서로 다른 노드 간의 조정을 수행하며, UL과 DL의 스케줄링 조정, 빔포밍의 조정, 공동 수신, 공동 처리, 그리고 셀 간 간섭 조정을 포함하는 다양한 작업을 지원한다²⁰⁾. 이러한 조정은 기지국 간에 trade-off 부하 수준, 수신 신호 강도, 전력 측정값 등 다양한 정보를 교환함으로써

이루어진다. CoMP 기술은 비용과 이점 간의 trade-off를 평가하여 최적의 네트워크 성능을 제공할 수 있는 솔루션을 정의할 수 있도록 설계되었다^[21].

5G 네트워크의 등장 이후 3GPP release 16에서 CoMP 프로토콜은 5G NR과 LTE 간의 다중 연결을 지원하도록 확장되어 5G-CoMP로 발전하였다. 5G-CoMP는 기본적인 CoMP 원칙을 유지하면서도 높은 데이터 전송 속도와 낮은 지연 시간을 보장하는 공간 diversity와 multiplexing 기능을 포함한다.

2.3.2 Carrier Aggregation 기술

CA는 3GPP release 10에서 도입된 기술로, 다중 연결을 지원하는 초기 기술 중 하나이다. CA는 UE가 여러 주파수 대역을 동시에 사용하여 데이터 전송 용량을 증가시키는 것을 목표로 한다. CA는 단일 네트워크 노드에서 제공되는 주파수 자원을 병합하거나, 여러 네트워크 노드 간의 주파수를 통합하여 네트워크 용량을 확장한다.

CA는 주파수 대역의 결합 방식에 따라 intra-band contiguous CA, intra-band non-contiguous CA, inter-band CA로 구분된다. Intra-band contiguous CA는 동일 주파수 대역에서 인접한 캐리어를 결합하며, intra-band non-contiguous CA는 동일 대역 내에서 떨어져 있는 캐리어를 결합한다. Inter-band CA는 서로 다른 주파수 대역을 결합하는 방식으로, 특히 비연속적 스펙트럼 자원을 효율적으로 활용하는 데 적합하다.

2.3.3 Dual Connectivity 기술

DC 표준은 3GPP release 12에서 처음 도입되었다. DC와 CoMP 표준은 모두 UE가 여러 기지국과 연결될 수 있도록 하는 다중 연결성 지원이라는 동일한 목표를 가진다. 두 기술 모두 X2 인터페이스를 통해 기지국 간의 직접적인 데이터 교환을 기반으로 한다^[22].

DC 표준은 다중 연결 과정에서 기지국 간의 역할을 명확히 정의한다. 하나의 기지국은 주 노드로 지정되어 제어면 연결을 관리하며, 다른 하나는 보조 노드로 간주한다. CoMP와 달리, DC에서는 UE가 각 기지국에 대해 고유한 component carrier를 사용한다. 이를 통해 각 기지국은 독립적인 RLC 및 MAC 엔터티를 관리하며, 각 기지국에 별도의 무선 스케줄러가 작동한다. 그러므로 UE는 다수의 UL 캐리어를 지원해야 하며, 이를 통해 CA가 가능하다.

DC는 비이상적인 백홀 X2 인터페이스를 고려하여 설계되었고, 더 높은 데이터 전송 속도와 더 낮은 지연 시간을 제공하는 것을 목표로 한다. 그러나 이러한 접근

방식은 보다 효율적인 간섭 조정이 요구된다. 특히, 다중 연결 환경에서 각 기지국 간의 간섭을 최소화하기 위해 효과적인 조정 메커니즘이 필수적이다.

5G NR의 등장 이후, 3GPP release 16에서는 LTE-DC 표준이 EN-DC를 지원하도록 확장되었다. EN-DC 프로토콜의 주요 목표는 다양한 5G NR 배포 단계에서 네트워크 관리를 제공한다^[23]. Non-stand-alone (NSA)에서는 4G 코어 네트워크를, stand alone (SA)에서는 5G 코어 네트워크를 사용하는 방식으로, 각 단계에 맞춘 제어 솔루션이 제안되었다. EN-DC는 사용자 데이터 경로를 LTE-DC와 마찬가지로 코어 네트워크와 매크로셀 기지국 간에 분리하여 관리할 수 있다.

2.3.4 MIMO 기술

MIMO는 3GPP release 8에서 처음 도입된 기술로, 다중 안테나를 활용하여 네트워크 성능을 극대화하는 기술이다^[24]. MIMO는 여러 송신 안테나와 수신 안테나를 통해 데이터를 동시에 송수신하여 데이터 처리량을 향상하고 스펙트럼 효율성을 극대화한다. 특히, 동일한 주파수 대역 내에서 여러 데이터 스트림을 독립적으로 전송함으로써 대역폭 사용 효율을 극대화하고, 신호 품질을 개선할 수 있다.

MIMO 기술은 spatial multiplexing, diversity gain, beamforming을 기반으로 작동한다. Spatial multiplexing은 여러 데이터 스트림을 병렬로 전송하여 데이터 처리 속도를 높이는 기술이다. Diversity gain은 공간 다이버시티를 활용해 채널 품질 저하를 극복하며, 신호 손실과 페이딩을 완화한다. 빔포밍은 특정 방향으로 신호를 집중시켜 간섭을 최소화하고 신호 품질을 개선하는 기술이다.

III. 3GPP Multi Connectivity 동향

3GPP는 이동통신 시스템의 성능 향상과 네트워크 효율성을 극대화하기 위해 지속적으로 기술 표준화를 진행하고 있다. MC는 이러한 표준화 과정에서 주목받는 핵심 기술로, 데이터 전송의 신뢰성과 효율성을 높이고, 사용자 경험을 개선하는 데 기여하고 있다. 3GPP는 MC 기술을 DC 프레임워크를 통해 표준화하였으며, 이를 통해 5G 네트워크의 성능을 최대한으로 끌어올리고자 한다.

3.1 Dual Connectivity 표준화 동향

DC는 3GPP 표준에서 정의된 기술이다^[16]. 하나의

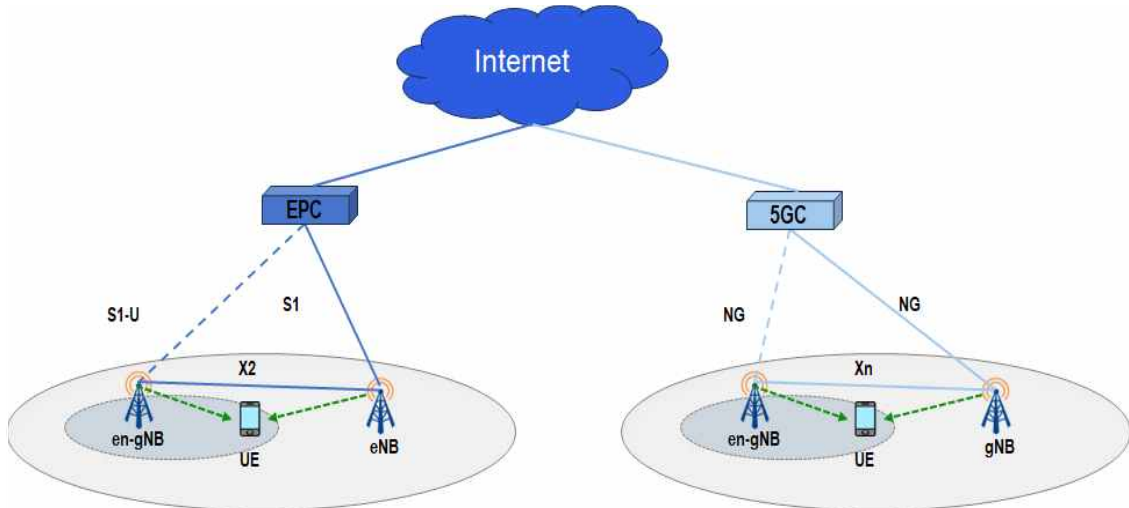


그림 5. 사용자 평면 관점에서 DC의 구조
Fig. 5. DC architecture from the user plane perspective

사용자 단말이 동시에 두 개의 기지국에서 데이터를 송수신할 수 있도록 지원하는 기술이다. 이를 통해 MN과 SN이 협력하여 단말과의 연결을 관리하며, 네트워크 성능과 효율성을 향상한다.

3.2 Dual Connectivity의 연결방식

MR-DC는 여러 무선 접속 기술을 통해 하나의 CN으로 이중 연결을 이루고 LTE와 5G NR 연결로 구성한다. 그림 5에서 볼 수 있듯이 5G core (5GC)와 evolved packet core (EPC)에 각각 다른 2개의 무선 기지국이 연결을 하고 있고, 이때 각 기지국이 MN과 SN으로 역할을 분담한다^[15].

MN은 LTE 기지국 (eNB)으로 동작하며, 주로 UE와의 제어 평면 신호를 관리하고 일부 사용자 평면 데이터를 처리한다. MN은 EPC와의 연결을 위해 S1-MME (S1-control plane)와 S1-U (S1-user plane) 인터페이스를 사용한다. 또한, MN은 SN과의 협력을 위해 X2 인터페이스를 활용하며, X2-C (X2-control plane)를 통해 SN과 제어 신호를 교환하고, X2-U (X2-user plane)를 통해 사용자 데이터를 전달한다.

SN은 5G NR 기지국 en-gNB로 작동하며, 사용자 평면 데이터를 처리함으로써 네트워크의 데이터 처리량을 확장한다. 또한, 트래픽 부하 또는 네트워크 설정에 따라 SN은 S1-U 인터페이스를 통해 EPC와 직접 연결되어 사용자 평면 데이터를 전달할 수 있는 구조를 가진 신호를 교환하고, X2-U를 통해 사용자 데이터를 전달한다. SN은 5G NR 기지국 en-gNB로 작동하며,

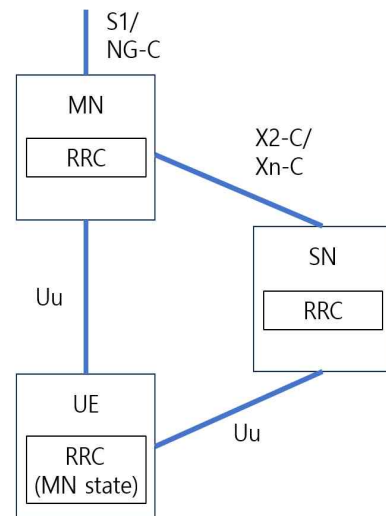


그림 6. DC의 제어 평면
Fig. 6. DC from control plane

사용자 평면 데이터를 처리함으로써 네트워크의 데이터 처리량을 확장한다. 또한, 트래픽 부하 또는 네트워크 설정에 따라 SN은 S1-U 인터페이스를 통해 EPC와 직접 연결되어 사용자 평면 데이터를 전달할 수 있는 구조를 갖춘다. MR-DC의 제어 평면과 사용자 평면의 동작 원리는 3.2.1, 3.2.2 절에서 자세히 설명한다.

3.2.1 Dual Connectivity에서의 제어평면

그림 6을 보면 MR-DC 환경에서 UE는 단일 RRC 상태를 유지하며, 이는 MN를 통해 코어 네트워크와

단일 제어 평면 연결로 설정한다. MN의 RRC 엔티티는 UE의 단일 RRC 상태를 주로 관리하고 SN의 RRC 엔티티는 독립적으로 작동하지만, MN과 협력하여 UE와의 통신을 지원한다. MN과 SN은 각각 RRC PDU를 독립적으로 생성한다. SN에서 생성된 RRC PDU는 MN을 통해 UE로 전달되고 초기 연결 설정에서는 MN이 SN의 초기 RRC 구성을 MCG SRB (SRB1)를 통해 UE로 전송하며, 이후의 재구성 메시지는 네트워크 설정에 따라 MN 또는 SN을 통해 전달된다.

EN-DC에서는 초기 연결 시 E-UTRA PDCP가 사용되며, 이후 네트워크는 E-UTRA PDCP 또는 NR PDCP 중 하나를 선택하여 MCG SRB (SRB1 및 SRB2)를 구성한다. 특히 SN이 gNB로 구성된 경우, UE는 SRB3을 통해 SN과 직접 RRC 메시지를 주고받을 수 있다.

MR-DC는 split SRB를 통해 MN과 SN 경로로 동시에 전송할 수 있고 이를 통해 중복 경로를 제공함으로써 네트워크 신뢰성을 향상한다. 또한 연결 손실 상황에서도 데이터 무결성을 유지할 수 있다. 하지만 SN에서 생성된 RRC PDU를 MN과 SN 경로로 동시에 복제하여 전송하는 기능은 현재 규격에서 지원되지 않는다.

CP 연결은 MN과 SN 사이에서 X2-C 또는 Xn-C 인터페이스를 통해 이루어진다. MN은 코어 네트워크와 S1-MME 또는 NG-C 인터페이스로 연결되며, 초기 연결 및 코어 네트워크와의 상호작용을 주도적으로 담당한다. 반면 SN은 MN과 협력하여 보조적인 무선 자원 관리를 수행하며, 자체적으로 자원을 독립적으로 제어할 수 있다. 이러한 구조는 네트워크 효율성과 안정성을 동시에 보장하며, 데이터 전송의 bearer 유형이 존재한다. 각 bearer는 MN과 SN에서 처리되며, 네트워크 아키텍처와 프로토콜 설정에 따라 다르게 구성되며 신뢰성을 유지하는 가능하다.

3.2.2 Dual Connectivity에서의 사용자평면

MR-DC 환경에서는, 그림 7에서 볼 수 있듯이 UE 관점에서 master cell group (MSG) bearer, secondary cell group (SCG) bearer, 그리고 split bearer의 세 가지

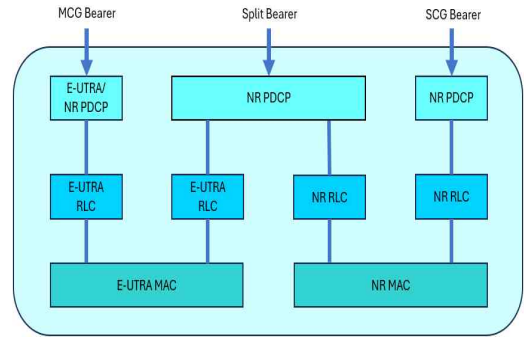


그림 7. DC의 사용자 평면
Fig. 7. DC from user plane

종류가 있다. E-UTRA가 EPC와 연결된 EN-DC 환경에서는 MCG bearer의 경우 E-UTRA PDCP 또는 NR PDCP를 선택적으로 사용할 수 있다. 반면, SCG bearer와 split bearer는 항상 NR PDCP가 사용된다. E-UTRA PDCP에서 NR PDCP로의 전환 또는 그 반대의 전환은 네트워크 재구성 절차를 통해 이루어지며, 핸드오버를 포함하거나 포함하지 않는 방식으로 수행될 수 있다. 5GC와 연결된 MR-DC, NR-DC에서는 모든 bearer 유형에서 NR PDCP가 일관되게 사용되며, bearer 구성은 네트워크 아키텍처에 따라 달라진다. NGEN-DC (NR-based next generation dual connectivity)에서는 MN에서 E-UTRA RLC/MAC이, SN에서는 NR RLC/MAC이 사용된다. 반면, NE-DC (next generation dual connectivity)는 MN에서 NR RLC/MAC이, SN에서 E-UTRA RLC/MAC이 사용된다. NR-DC (NR-based dual connectivity)는 MN과 SN 모두 NR을 사용하는 구조로, NR 중심의 네트워크 아키텍처를 구성한다.

네트워크 관점에서, 각 bearer는 MN 또는 SN에서 종료될 수 있으며, bearer가 종료되는 위치에 따라 사용자 평면 데이터의 처리 방식이 결정된다. MCG bearer는 MN에서 처리되며, MN이 CN과 연결을 설정한다. SCG bearer는 SN에서 처리되며, SN이 CN과 직접 연결을 설정한다. Split bearer는 MN과 SN 간에 데이터

표 1. Dual connectivity의 연결 방식
Table 1. Connections type of dual connectivity

DC Configuration Type	CN	MN	SN
EN-DC	EPC	LTE(eNodeB)	LTE(eNodeB)
NGEN-DC	5GC	LTE(eNodeB)	NR(gNodeB)
NE-DC	5GC	NR(gNodeB)	LTE(eNodeB)
NR-DC	5GC	NR(gNodeB)	NR(gNodeB)

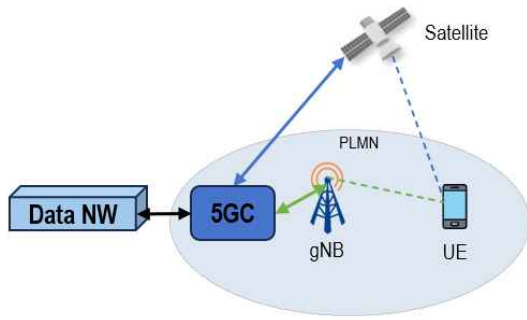


그림 8. Case1 하나의 PLMN에서 5G
Fig. 8. Case1 single PLMN in NR

가 분할 처리되며, MN-SN 사용자 평면 인터페이스를 사용하여 데이터를 전송한다. 이러한 구조는 다양한 네트워크 구성에서 효율적이고 신뢰성 있는 데이터 전송을 지원하며, 네트워크 복잡성을 감소시키면서도 QoS를 보장할 수 있도록 설계한다.

3.3 Dual Connectivity의 연결방식

5G 네트워크 환경에서의 DC NR과 E-UTRA 간의 유기적 연결을 통해 데이터 전송 효율성과 네트워크 유연성을 증대시키기 위해 설계되었다. DC는 네트워크의 구성 방식과 MN 및 SN의 역할에 따라 표 1과 같이 EN-DC, NGEN-DC, NE-DC, NR-DC 네 가지 유형으로 구분된다.

3.3.1 EN-DC

EN-DC는 EPC를 사용하는 듀얼 연결 구성으로, E-UTRA가 MN으로 작동하며 NR이 SN으로 작동한다. 이 구성에서는 MN이 LTE 기지국 (eNodeB)이고, SN이 NR 기지국 (gNodeB)으로 동작한다. LTE가 네트워크의 중심을 담당하며, NR은 SCG bearer 또는 split bearer를 통해 데이터 전송을 보조한다.

3.3.2 NGEN-DC

NGEN-DC는 5GC를 사용하는 듀얼 연결 구성으로, E-UTRA가 MN으로 동작하며 NR이 SN으로 동작한다. MN은 eNodeB이며, SN은 gNodeB이다. NGEN-DC는 LTE 기반 네트워크 환경에서 5GC와 NR을 결합하여 LTE 중심 네트워크의 확장을 지원한다. 이를 통해 기존 LTE 인프라를 활용하면서 5G 서비스로의 원활한 전환이 가능하다.

3.3.3 NE-DC

NE-DC는 5GC를 사용하는 듀얼 연결 구성으로, NR

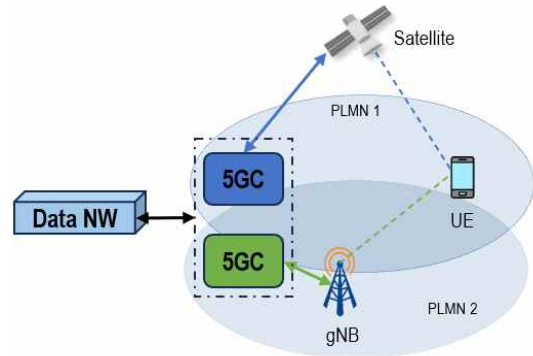


그림 9. Case2 두 개의 다른 PLMN에서 5G
Fig. 9. Case2 different PLMNs in NR

이 MN으로 작동하며 E-UTRA가 SN으로 작동한다. 이 구성에서는 MN이 gNodeB이고, SN이 eNodeB로 동작한다. NE-DC는 NR 중심의 네트워크 구성에 LTE를 보완적으로 활용하는 방식으로, NR 기반의 고성능 네트워크 환경을 구축하면서 기존 LTE 자원을 활용할 수 있다.

3.3.4 NR-DC

NR-DC는 5GC를 사용하는 듀얼 연결 구성으로, NR이 MN, SN 모두로 작동한다. MN과 SN 모두 gNodeB로 구성되며, 완전한 NR 기반의 네트워크 기반 아키텍처를 형성한다.

3.4 Release 19 이후의 MC 표준화 동향

이전까지는 EN-DC, NE-DC, NGEN-DC, NR-DC와 같은 DC 기술들이 3GPP 표준에 의해 정의되고 구현했다. 이러한 기술들은 E-UTRA와 NR을 효과적으로 결합하거나, NR 중심의 완전한 네트워크 구조를 구축하는 데 초점을 맞추어 발전했다. 그러나 최근 네트워크 환경이 점점 복잡해지면서, 다중 네트워크와 접속 방식을 효율적으로 지원하기 위한 새로운 기술적 접근이 요구되고 있다. 이러한 요구를 충족하기 위해 3GPP는 release 19에서 dualsteer 기술을 제안하였다²⁵⁾. Dualsteer는 사용자 장치가 두 개의 네트워크에 동시에 연결하고 트래픽을 관리하고 효율적으로 전송할 수 있도록 설계된 기술이다. Dualsteer는 steering과 switching 기능을 제공하며, non-3GPP 접속과 3GPP 접속을 모두 지원하는 역할도 수행한다. 현재 이 기술의 주요 연구 방향으로서는 구독 관리 (subscription management), 등록 절차 (registration procedure), 세션 관리 (session management)가 제시되고 있다. 3GPP는 세 가지 주제와 관련된 이슈들에 솔루션을 제안하며, 다양한

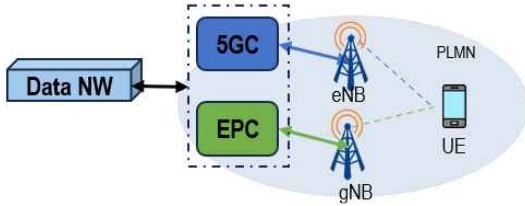


그림 10. Case3 하나의 PLMNs에서 5G and LTE
Fig. 10. Case3 single PLMN NR and E-UTRA

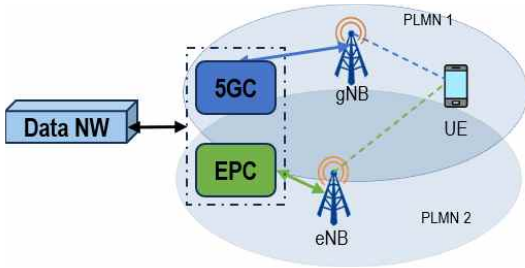


그림 11. Case4 다른 PLMNs에서 5G and LTE
Fig. 11. Case4 different PLMN in NR and E-UTRA

네트워크 환경에서 dualsteer 기술의 성능을 검증하기 위해 다섯 가지 시나리오를 정의하였다²⁶⁾. 다섯 가지 시나리오는 다음과 같이 정의된다. 첫째, 그림 8의 PLMN (public land mobile network)에서 NR/5GC 접속 두 개를 병행하여 활용하는 경우, 둘째, 그림 9의 서로 다른 PLMN에서 NR/5GC 접속 두 개를 활용하는 경우, 셋째, 그림 10의 서로 다른 PLMN에서 NR/5GC와 E-UTRA/EPC 접속을 조합하여 활용하는 경우, 넷째, 그림 11의 동일한 PLMN에서 NR/5GC와 E-UTRA/EPC 접속을 조합하여 활용하는 경우, 마지막으로 그림 12의 PNI-NPN (private network integration - non-public network)과 PLMN 접속 간 비동시 전송을 가정하는 경우이다²⁷⁾.

3GPP는 이러한 시나리오를 통해 dualsteer에 대한 표준을 정립하고 있다²⁸⁾. 이 기술을 통해 다중 네트워크 환경에서 효율성과 신뢰성을 증대시키며, 향후 5G와 beyond 5G 네트워크의 필수적인 기술로 주목받을 것으로 예상된다. 특히, 위성을 포함한 비지상 네트워크와의 통합 가능성 또한 검토되고 있어, 지상 및 위성 네트워크 간의 유기적 연결을 통해 글로벌 커버리지와 서비스 품질 향상을 지원할 수 있는 기술로 주목받고 있다.

IV. Multi-Connectivity의 아키텍처 및 핵심 기술

MC는 5G 및 이후의 네트워크에서 스펙트럼 효율성,

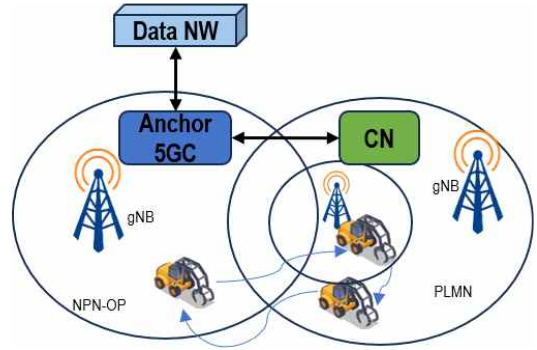


그림 12. Case5 PNI-NPN과 PLMN 사이에서 연결
Fig. 12. Case5 PNI-NPN and PLMN access

높은 전송률과 끊임없는 연결에 필수적인 기술로 부상하고 있다. 특히, MC는 여러 무선 액세스 기술과 네트워크 계층을 결합함으로써 네트워크 효율성을 극대화하고 사용자 경험을 향상하는 데 중요한 역할을 한다. 본 4장에서는 표 2와 같이, MC를 통한 전송률, 끊임없는 연결을 위한 핸드오버 등 접근 방식에 따른 최근 연구 동향을 분석한다.

4.1 MC 신뢰성과 성능분석

MC는 다중 연결을 통해 스펙트럼 효율성과 네트워크 신뢰성을 개선할 수 있으나, 리소스 분배 및 실패 모델에 따라 성능이 저하될 위험이 있다. [29]의 연구는 single connectivity (SC)에 비해 MC의 실제 네트워크 성능을 정량적으로 평가할 필요성을 제기하면서, 다양한 링크 실패 모델을 적용하여 MC가 무선 네트워크의 채널 용량 및 중단 확률에 미치는 영향을 수학적으로 분석한다. 분석 결과, 모든 사용자가 동일하게 MC를 사용하는 경우 사용자의 용량이 감소할 수 있다. 그러나 MC는 네트워크 실패 상황에서 중단 확률을 유의미하게 줄이면서 신뢰성을 강화한다²⁹⁾. 또한 [7]의 연구에서는 MC의 통신 성능을 outage probability와 전송률의 관점에서 신뢰성을 분석한다. MC가 SC보다 전송 전력을 획기적으로 감소시킬 수 있음을 입증하였고 signal noise ratio (SNR) 감소 관점에서 주파수 효율과 링크 수가 증가할수록 SNR 이득 관점에서 더 효율적이라는 점을 확인했다⁷⁾. [30]의 연구는 테라헤르츠 (THz) 통신에서 낮은 투과성과 제한된 커버리지를 가지고 있는 문제를 해결한다. 이 문제를 해결하기 위해, 기지국이 각각 Poisson point process 그리고 Thomas cluster process를 기반으로 배치되는 듀얼 연결 THz 및 mmWave 이중 네트워크를 제안한다. 확률론적 기하학 (stochastic geometry)을 도입하여 DC를 사용하는

mmwave-THz 이중 네트워크가 다양한 조건에서 높은 신뢰성 확률과 성능을 제공한다는 것을 입증한다^[30].

4.2 패킷 손실 문제 해결을 위한 MC

패킷 손실 및 신뢰성 문제는 5G 및 이후 네트워크에서 신뢰성 높은 데이터 전송을 위해 해결해야 할 핵심 과제이다. 이에, [31]의 연구는 5G NR과 4G LTE 간의 DC 환경에서 PDCP 재정렬 시간 문제를 최적화하여 데이터 처리량을 안정적으로 유지하는 방법을 제안한다. PDCP 타이머 설정은 너무 짧은 경우 데이터 손실 증가, 너무 긴 경우는 평균 지연 증가라는 딜레마를 동반한다. 이에 RLC, MAC Layer에서 발생하는 지연 및 재전송 딜레이를 고려하여 PDCP 타이머를 모델링하고, 핸드오버 지연 기반 확률 분포로 최적의 타이머 값을 계산한다. 시뮬레이션 결과 PDCP 재정렬 타이머 만료를 방지했을 때, 핸드오버 구간의 데이터 처리량이 최대 24% 증가한다^[31]. 5G mmWave의 높은 대역폭 활용성과 제한된 커버리지를 극복하기 위해, [32]의 연구는 두 BS 간 신호 간섭 비율 차이에 따라 패킷 중복 전송을 켜거나 끄는 적응형 부분 패킷 중복 전송 (A-FPD) 기법을 제안한다. Fade-threshold 기반으로 신호가 특정 임계 값 아래로 떨어지는 경우 패킷 중복 전송을 활성화하는 방식을 사용하고, 확률 기반으로 중복 전송 비율을 결정한다. 시뮬레이션 결과, 패킷 손상

률 감소 및 신뢰성이 향상되고, A-FPD 표준 패킷 중복 전송 대비 자원 효율성을 크게 개선하는 것을 보인다^[32]. [33]의 연구는 packet duplication은 5G 네트워크에서 전송률과 신뢰성을 향상하기 위해 제안된 기술이지만 필요하지 않은 상황에서 패킷 복제가 활성화될 수 있어 처리량 손실을 초래할 수 있다는 문제를 제시한다. 사용자 장비가 패킷 복제를 동적으로 활성화하는 방안을 연구하였으며, 이를 통해 복제를 동적으로 제어함으로써 신뢰성과 자원 활용 간의 trade-off를 달성한다^[33].

4.3 NTN과 TN 공존상황에서 MC

5G NTNs는 시골 지역, 긴급 상황, 또는 데이터 수요가 높은 지역에서 TN을 보완할 수 있다. NTN은 낮은 지연과 넓은 커버리지를 제공하지만, 높은 대역폭이 요구되기 때문에 MC와 같은 효율적인 기술이 필요하다. [34]의 연구는 기존 TN에 NTN을 통합함으로써 TN의 커버리지 부족으로 인해 성능이 저하되는 구간에 서비스 연속성을 보장할 수 있음을 보인다. 5G NSA 모델과 SpaceX Starlink 위성 단말기를 통해 데이터 수집하여 MC와 SC를 비교한 결과, 평균 지연 시간을 약 20.5% 개선하며, 100ms 이하의 지연을 99.99% 신뢰도로 제공함을 보인다^[34]. [35]의 연구는 5G NTN에서 사용자 처리량을 향상하기 위해 RSRP 신호 강도를 기반으로 SN 추가를 결정하고, traffic steering 알고리즘을 사용

표 2. Multi-Connectivity에서 연구 방향과 그 영향
Table 2. Research Directions and Their Impact in Multi-Connectivity

Research Direction	Key Features	Research Impact	Reference
Performance Analysis of MC	Compares MC to SC in reliability and throughput.	Highlights MC's potential to improve network stability and adaptability in challenging environments.	[7],[29],[30]
Packet Loss and Reliability	Proposes PDCP timer optimization and adaptive packet duplication	Ensures reliable data delivery during handovers, reducing packet loss while balancing latency and throughput for critical applications	[31],[32],[33]
Integration of NTN and MC	Integrates TN and NTN for expanded coverage	Demonstrates that NTN-MC integration can enhance connectivity in underserved areas and enable reliable IoT applications like HAPs and satellite IoT	[34],[35],[36]
Energy Efficiency and Resource Management	Develops energy-efficient algorithms for IoT	Advances sustainable network operations by reducing energy consumption and enabling efficient IoT connectivity in constrained environments	[37],[38],[39],[40]
Traffic Management and QoS	Proposes DQN-based traffic steering strategies	Improves network efficiency by reducing latency and enhancing traffic distribution in smart cities and industrial IoT networks.	[41],[42],[43],[44]
Handover Optimization	Advanced handover optimization strategies	Addresses seamless connectivity in dense and mobile environments, reducing service interruptions and optimizing handover performance.	[46],[47],[48],[49]

하여 MN이 SN으로 데이터를 분배하는 방식을 최적화한다. 두 개의 저궤도 위성이 있는 시나리오에서, MC를 활성화한 경우가 MC 비활성화 시나리오 대비 평균 사용자 처리량이 14.6% 증가한다^[35]. [36]의 연구는 저궤도 위성, high altitude platforms(HAPs), 그리고 cellular communications의 3차원 네트워크에서 MC를 사용하여 저궤도 항공기 (e.g., eNB, gNB)의 안전한 원격 조종을 보장하고자 한다. Multi-RAT 통합으로 direct air-to-ground, air-to-air, HAPs, 저궤도 위성 간의 다중 경로 통신을 통해 QoS를 보장하고, CoMP joint transmission을 사용한다. 시뮬레이션 결과, 단일 경로는 고도 QoS 요구를 충족하지 못하지만, HAP 또는 CoMP를 포함한 MC가 신뢰성과 지연 요구사항을 충족함을 보인다^[36].

4.4 MC 기반 에너지 절감 및 자원 최적화 기법

에너지 효율성 측면에서 MC를 활용할 수도 있다. 5G EN-DC 네트워크에서는 CA와 DC를 통해 데이터 속도와 네트워크 범위를 확장할 수 있다. 그러나 이는 에너지 소모 증가 및 복잡한 자원 관리 문제를 동반한다. [37]의 연구는 기존의 static power sharing 방식보다 다음 시점에서 단말의 수신 신호 세기를 예측한다. 이 채널 상태와 UE 트래픽 특성을 고려하지 않아 네트워크 성능이 저하된다고 주장한다. 이에 joint power-sharing and carrier aggregation (JPSCA) 알고리즘을 제안한다. JPSCA는 compound-action actor-critic 알고리즘을 활용하여 UE의 SCC 활성화와 UL power sharing을 동시에 최적화한다. 이 저자가 제안한 JPSCA 알고리즘은 discrete joint power-sharing and carrier aggregation, activated CCs with equal power-sharing 등의 기존 방식보다 전력 소모를 28%, 지연을 16% 줄여 URLCC와 같은 지연 민감 애플리케이션의 QoS 요구를 충족한다^[37]. [38]의 연구는 두 네트워크의 자원을 효율적으로 활용하여 지연에 민감한 트래픽 처리의 QoS를 보장할 수 있음을 보인다. 이 논문은 트래픽이 두 네트워크로 나뉘었을 때 패킷 지연 위반 확률을 최소화하여 QoS 요구사항을 충족하여 지연을 보장하고, 데이터 전송 비용을 줄이면서도 높은 네트워크 성능을 유지하여 비용 효율성을 높이려 한다. 이에 트래픽 분배를 최적화하여 DC 네트워크에 새로운 노드를 효율적으로 수용하기 위한 node admission control 알고리즘을 제안한다. 시뮬레이션 결과 제안된 모델은 통계적 지연 보장을 제공하고 DC 네트워크의 자원 활용도를 높일 뿐만 아니라 지연 및 비용 성능을 크게 향상한다. 또한, 기존의 트래픽 동등 분배 방식보다 더

많은 노드를 수용하고 딜레이 위반 확률을 낮춘다는 것을 검증한다^[38]. [39]의 연구는 통합 센싱 및 통신 환경에서 분산 노드들이 통합 신호를 사용하여 센싱 정보를 기지국에 전달하는 환경에서 기지국 간의 UL 전력 분배 및 제어 문제를 해결한다^[39]. MC로 5G와 4G 네트워크 병행 사용으로 인한 주파수 커버리지 격차와 채널 상태의 불안정성 문제가 발생한다. [40]의 연구는 UL 시나리오에서 UL radio resource의 예측 정확도를 향상하기 위해 transformer 기반 self-attention-based UL radio resource estimation 모델을 제안한다. 이 모델은 5G DC 환경에서의 UL resource 예측 정확도를 크게 향상했고, CUBIC, BBR 등의 기존 혼잡 제어 알고리즘과 통합하여 네트워크 성능을 최적화한다^[40].

4.5 MC 기반 트래픽 관리와 QoS 최적화

MC 환경에서 트래픽을 제어하는 방법과 QoS의 향상은 중요한 요소이다. 이에, [41]의 연구는 QoS 보장과 지연 감소를 위한 또 다른 접근법인 deep q-network (DQN) 기반 traffic steering 방식을 제안한다. DQN 알고리즘을 통해 네트워크 상태 및 사용자 요구사항을 실시간으로 학습하고, 최적의 트래픽분배를 수행한다. DQN 알고리즘은 q-learning 및 heuristic 접근법에 비해 평균 처리량을 각각 6% 및 10% 증가시키고, 네트워크 지연을 23% 및 33% 감소시켜 네트워크 용량 활용을 극대화한다^[41]. 기존의 플로우 제어 방법은 링크 상태의 동적 변화와 상위 계층 프로토콜 (TCP, UDP)의 영향을 고려하지 않는다. [42]의 연구는 MR-DC 작동에서 TCP 및 UDP의 영향이 애플리케이션의 처리량을 향상하는 데 매우 중요하다는 것을 보여준다. 이를 위해 RLC 버퍼 지연 및 MAC SDU 크기를 활용하여 MN과 SN 간 트래픽을 동적으로 분배하는 capacity and congestion aware flow control 알고리즘을 제안하여 트래픽 플로우 제어 시 혼잡을 완화하고, 지연 차이를 최소화한다^[42]. [43]의 연구는 5G 네트워크에서 MR-DC를 활용하여 small cells (SCs)와의 효율적인 상호 운용성을 구현하는 방법을 제안한다. SCs는 데이터 용량은 크지만 범위가 제한적이고, MN은 광범위한 커버리지를 제공한다. 이 저자는 이를 MR-DC로 결합하여 효율성을 극대화한다. MN과 SN을 통해 control plane과 data plane을 분리하여 높은 처리량과 안정성을 제공하며, small cell controller를 도입해 클라우드 엣지 기반의 중앙 집중화된 제어를 실현한다. 이를 통해 핸드오버 중 데이터 손실을 최소화하고 네트워크 효율성을 향상한다. 제안된 MR-DC 구조는 처리량 증가, 지연 감소, 비용 절감, 그리고 다양한 무선 기술 간의 상호 운용성

을 지원한다^[43]. [44]의 연구는 위성과 지상 기지국 간의 협력하는 환경에서 사용자 장비가 이동성관리의 필요성을 제시한다. DQN으로 만든 제어를 통해 적응형 자원 할당 및 네트워크 선택에 활용하는 방법을 제시한다. 이를 통해 통신 자원 활용을 최적화하고 load balancing을 달성했다^[44].

4.6 MC를 활용한 핸드오버 전략

핸드오버 최적화는 높은 이동성과 초밀집 네트워크 환경에서 안정적인 연결을 유지하는 데 필수적이다. 그렇기에 [45], [46], [47], [48]의 연구는 기존 하드 핸드오버보다 서비스 중단 시간이 적은 DC를 활용하여 핸드오버를 관리하는 기법을 제안한다. [45]의 연구는 핸드오버 및 연결 안정성을 개선하기 위해 smart hand-over strategy (SHS)를 제안한다. SHS는 핸드오버 매개변수인 hysteresis margin과 time-to-trigger를 실시간 signal to interference plus noise ratio (SINR)에 따라 자동으로 조정하여 핸드오버 빈도와 핸드오버 실패율 및 평평 핸드오버 비율을 줄인다. 이 저자가 제안한 기법은 기존 기법 대비 처리량을 15% 이상 증가시키고 HOF 및 HOPP를 77% 이상 감소시킨다^[45]. [46]의 연구는 UE 위치, SINR, 노드 부하 정보를 기반으로 최적의 핸드오버 결정을 내리고, MN과 SN 간의 핸드오버를 포함하여 불필요한 핸드오버를 줄이는 double-deep q-learning 알고리즘을 제안한다. 이 알고리즘은 Q-Learning, Fuzzy Logic 등의 기존 알고리즘보다 처리량을 최대 15% 향상하고, 서비스 중단 시간을 최대 40% 감소시킨다^[46]. [47]의 연구는 시스템을 Markov decision process로 모델링하여 핸드오버 및 데이터 분할 정책 최적화한다. 또한 사용자 속도와 5G 기지국 밀도에 따라 4G 및 5G 간 데이터 트래픽을 분할하고, aggressive 및 coward 데이터 분할 전략을 제안한다. 이 메커니즘은 4G와 5G의 이기종 네트워크에서 핸드오버 효율성을 높이고 QoS를 유지하는 데 효과적이다. 특히, 초밀집 네트워크 및 고속 이동 UE 환경에서도 안정적인 연결을 제공하며, 기존 기법 대비 더 높은 처리량과 낮은 핸드오버 빈도를 보여준다^[47]. [48]의 연구는 cellular vehicle-to-everything에서 LTE 또는 5G 기능을 지원하는 차량에 DC 기술을 활용한다. 차량이 동시에 두 개의 네트워크를 사용하여 연결될 수 있도록 하고, 빈번한 핸드오버 문제를 proximal policy optimization과 advantage actor-critic을 사용하여 네트워크를 테스트하고 성능을 검증한다^[48].

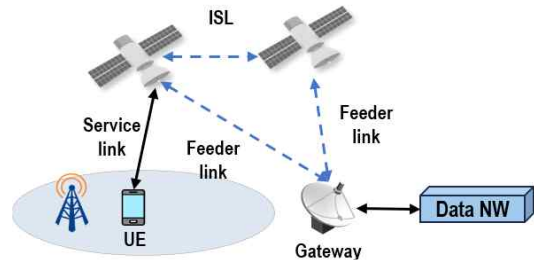


그림 13. 위성 regenerative payload 구조
Fig. 13. Satellite regenerative payload architecture

V. 향후 연구 방향

MC는 5G와 그 이후의 네트워크에서 QoS 개선, 에너지 효율성 향상, 그리고 전송률 향상과 같은 목표를 달성하기 위해 중요한 기술로 주목받고 있다^[49,50]. 그러나, 비 지상 네트워크 환경에서 MC에 대한 연구는 상대적으로 제한적이며, 주요 기술적 과제가 해결되지 않은 채로 남아있다. 이는 MC가 비 지상 네트워크의 환경에서는 신뢰성의 문제 등 완전히 구현되지 않았음을 시사하며, 해당 연구 분야를 보완하기 위한 연구 방향을 다음과 같이 제안한다. 6G로 발전함에 따라서 위성 자체가 신호를 단순히 수신하고 재송신하는 기능인 중계기 방식에서 벗어나, 신호를 처리하고 변조 또는 복조하는 기능을 가진 페이로드 역할을 한다. 그렇기에 그림 13과 같이 regenerative payload를 고려한 위성과의 MC를 시스템 모델이 요구된다^[51]. 또한, 비 지상 네트워크 간 연결이 아닌, 비 지상 네트워크와 지상 네트워크의 공존 경우에는 지연 차이, PDCP 버퍼 크기, 경로 최적화 등을 고려해야 한다. 특히, 애플리케이션의 요구사항에 따라 적합한 PDCP 전달 모드를 선택하고, 신호 절차를 최적화하여 성능과 효율성을 극대화할 필요가 있다. Dualsteer에서의 traffic switching과 traffic steering은 아직까지 완전히 개발되지 않은 영역이다. 특히, 비 지상 네트워크 환경에서 두 개 이상의 링크를 효율적으로 관리하기 위한 트래픽 제어 알고리즘과 프로토콜이 필요하다. 이를 위해서는 사용자의 이동성, 서비스 요구사항, 네트워크 상태 등을 실시간으로 분석하고 최적의 트래픽 분배를 위한 시스템 개발이 필요하다.

VI. 결 론

본 논문에서는 MC의 아키텍처와 주요 기능에 대해 자세히 설명하고 3GPP에서 MC를 표준 최신 동향을 살펴보았다. 특히 EN-DC, NGEN-DC, NE-DC,

NR-DC 등 다양한 DC 구성 유형과 release 19에서 제안된 dualsteer 기술에 대해 논의하였다. 이 기술은 다양한 방법으로 연구되고 있고 끊임없는 연결, 고속 데이터 전송과 저 지연 서비스가 요구되는 다양한 애플리케이션에서 필수적이다. 그러나 비 지상 네트워크 환경에서의 MC 구현은 기술적 과제가 남아있으며, 신뢰성 문제 등 해결해야 할 부분이 많다. 이를 고려한 MC의 구현과 비 지상 네트워크와 지상 네트워크 공존 시나리오에서 연결 가능성에 대한 연구가 필요하다.

결론적으로, MC 기술은 5G 및 그 이후의 통신 네트워크에서 필수적인 요소로 자리매김하고 있으며, 지속적인 연구와 발전을 통해 효율적이고 신뢰성 있는 네트워크 환경을 구축하는 데 핵심적인 역할을 할 것이다.

References

- [1] J. Jang, S. Park, and S. Choi, "An overview of non-terrestrial network technologies in 3GPP release 19," *J. KICS*, vol. 49, no. 8, pp. 1064-1073, Aug. 2024.
(<https://doi.org/10.7840/kics.2024.49.8.1064>)
- [2] H.-W. Lee, C.-C. Chen, C.-I. S. Liao, A. Medles, D. Lin, I.-K. Fu, and H.-Y. Wei, "Interference mitigation for reverse spectrum sharing in B5G/6G satellite-terrestrial networks," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 73, no. 3, pp. 4247-4263, Mar. 2024.
(<https://doi.org/10.1109/TVT.2023.3328599>)
- [3] H. Martikainen, M. Majamaa, and J. Puttonen, "Coordinated dynamic spectrum sharing between terrestrial and non-terrestrial networks in 5G and beyond," in *Proc. 2023 IEEE 24th Int. Symp. WoWMoM*, pp. 419-424, Boston, MA, USA, Jun. 2023.
(<https://doi.org/10.1109/WoWMoM57956.2023.00074>)
- [4] Y. Cho, W. Yang, D. Oh, and H.-S. Jo, "Multi-agent deep reinforcement learning for interference-aware channel allocation in non-terrestrial networks," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 27, no. 3, pp. 936-940, Mar. 2023.
(<https://doi.org/10.1109/LCOMM.2023.3237207>)
- [5] C. Wang, J. Yang, H. He, R. Zhou, S. Chen, and X. Jiang, "Neighbor cell list optimization in handover management using cascading bandits algorithm," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 134137-134150, Jul. 2020.
(<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3011015>)
- [6] 3GPP TS 36.300, "Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA) and evolved universal terrestrial radio access network (E-UTRAN) (Release 18)," V18.3.0, Oct. 2023
- [7] A. Wolf, P. Schulz, M. Dörpinghaus, J. C. S. S. Filho, and G. Fettweis, "How reliable and capable is multi-connectivity?," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 67, no. 2, pp. 1506-1520, Feb. 2019.
(<https://doi.org/10.1109/TCOMM.2018.2873648>)
- [8] M. Majamaa, "Toward multi-connectivity in beyond 5G non-terrestrial networks: Challenges and possible solutions," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 62, no. 11, pp. 144-150, Nov. 2024.
(<https://doi.org/10.1109/MCOM.001.2300581>)
- [9] C. Pupiales, D. Laselva, Q. De Coninck, A. Jain, and I. Demirkol, "Multi-connectivity in mobile networks: Challenges and benefits," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 59, no. 11, pp. 116-122, Nov. 2021.
(<https://doi.org/10.1109/MCOM.111.2100049>)
- [10] 3GPP TS 23.501, "5G; System architecture for the 5G system (5GS) (Release 18)," V18.7.0, Oct. 2024.
- [11] D. S. Michalopoulos, I. Viering, and L. Du, "User-plane multi-connectivity aspects in 5G," in *Proc. 2016 23rd ICT*, pp. 1-5, Thessaloniki, Greece, Jun. 2016.
(<https://doi.org/10.1109/ICT.2016.7500422>)
- [12] M.-T. Suer, C. Thein, H. Tchouankem, and L. Wolf, "Comparison of multi-connectivity schemes on different layers for reliable low latency communication," in *Proc. 2021 IEEE 32nd Annual Int. Symp. PIMRC*, pp. 1357-1362, Helsinki, Finland, Sep. 2021.
(<https://doi.org/10.1109/PIMRC50174.2021.9569560>)

- [13] J. Liu, K. Au, A. Maaref, J. Luo, H. Baligh, H. Tong, A. Chassaigne, and J. Lorca, "Initial access, mobility, and user-centric multi-beam operation in 5G new radio," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 56, no. 3, pp. 35-41, Mar. 2018. (<https://doi.org/10.1109/MCOM.2018.1700827>)
- [14] A. Ravanshid, P. Rost, D. S. Michalopoulos, V. V. Phan, H. Bakker, D. Aziz, S. Tayade, H. D. Schotten, S. Wong, and O. Holland, "Multi-connectivity functional architectures in 5G," in *Proc. 2016 IEEE ICC*, pp. 187-192, Kuala Lumpur, Malaysia, Jul. 2016. (<https://doi.org/10.1109/ICCW.2016.7503786>)
- [15] M.-T. Suer, C. Thein, H. Tchouankem, and L. Wolf, "Multi-connectivity as an enabler for reliable low latency communications-an overview," *IEEE Commun. Surv. & Tuts.*, vol. 22, no. 1, pp. 156-169, Firstquarter Oct. 2020. (<https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2949750>)
- [16] 3GPP TS 37.340, "Universal mobile telecommunications system (UMTS); LTE; 5G; evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA) and NR; Multi-connectivity; Overall description; Stage-2 (Release 18)," V18.7.0, Oct. 2024.
- [17] X. Ba, Y. Wang, D. Zhang, Y. Chen, and Z. Liu, "Effective scheduling scheme for multi-connectivity in intra-frequency 5G ultra-dense networks," in *Proc. 2018 IEEE ICC Wkshps.*, pp. 1-5, Kansas City, MO, USA, Jul. 2018. (<https://doi.org/10.1109/ICCW.2018.8403506>)
- [18] G. Pocovi, T. Kolding, M. Lauridsen, R. Mogensen, C. Markmler, and R. Jess-Williams, "Measurement framework for assessing reliable real-time capabilities of wireless networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 56, no. 12, pp. 156-163, Dec. 2018. (<https://doi.org/10.1109/MCOM.2018.1800159>)
- [19] P. Popovski, J. J. Nielsen, C. Stefanovic, E. d. Carvalho, E. Strom, K. F. Trillingsgaard, A. -S. Bana, D. M. Kim, R. Kotaba, J. Park, and R. B. Sorensen "Wireless access for ultra-reliable low-latency communication: Principles and building blocks," *IEEE Netw.*, vol. 32, no. 2, pp. 16-23, Mar.-Apr. 2018. (<https://doi.org/10.1109/MNET.2018.1700258>)
- [20] M. Yassin, M. A. AboulHassan, S. Lahoud, M. Ibrahim, D. Mezher, B. Cousin, and E. A. Sourour, "Survey of ICIC techniques in LTE networks under various mobile environment parameters," *Wireless Netw.*, vol. 23, pp. 403-418, Feb. 2017. (<https://doi.org/10.1007/s11276-015-1165-z>)
- [21] F. Qamar, K. B. Dimyati, MHD N. Hindia, K. A. B. Noordin, and A. M. Al-Samman, "A comprehensive review on coordinated multi-point operation for LTE-A," *Computer Netw.*, vol. 123, pp. 19-37, Aug. 2017. (<https://doi.org/10.1016/j.comnet.2017.05.003>)
- [22] M. Gapeyenko, V. Petrov, D. Moltchanov, M. R. Akdeniz, S. Andreev, N. Himayat, and Y. Koucheryavy, "On the degree of multi-connectivity in 5G millimeter-wave cellular urban deployments," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 68, no. 2, pp. 1973-1978, Feb. 2019. (<https://doi.org/10.1109/TVT.2018.2887343>)
- [23] O. N. C. Yilmaz, O. Teyeb, and A. Orsino, "Overview of LTE-NR dual connectivity," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 57, no. 6, pp. 138-144, Jun. 2019. (<https://doi.org/10.1109/MCOM.2019.1800431>)
- [24] B. Shang, X. Li, Z. Li, J. Ma, X. Chu, and P. Fan, "Multi-connectivity between terrestrial and non-terrestrial MIMO systems," *IEEE Open J. Commun. Soc.*, vol. 5, pp. 3245-3262, May 2024. (<https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2024.3400393>)
- [25] 3GPP TR 23.700-54, "Study on multi-access (dualsteer and ATSSS_Ph4) (Release 19)," V1.2.0, Oct. 2024.
- [26] SP-241349, "Revised SID on multi-access (dualsteer and ATSSS_Ph4)," Apple, #SA105
- [27] 3GPP TS 22.261, "Service requirements for the 5G system (Release 19)," V19.7.0, Jun. 2024.
- [28] 3GPP TS 22.841, "Study on upper layer

- traffic steer, switch and split over dual 3GPP access* (Release 19),” V19.0.0, Dec. 2023.
- [29] L. Weedage, C. Stegehuis, and S. Bayhan, “Impact of multi-connectivity on channel capacity and outage probability in wireless networks,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 72, no. 6, pp. 7973-7986, Jun. 2023. (<https://doi.org/10.1109/TVT.2023.3242358>)
- [30] E. Ataebojd, M. Rasti, and M. Latva-Aho, “Stochastic geometry analysis of URLLC services in dual connectivity THz-mmwave heterogeneous networks,” in *Proc. 2024 IEEE WCNC*, pp. 1-6, Dubai, United Arab Emirates, Apr. 2024. (<https://doi.org/10.1109/WCNC57260.2024.10571240>)
- [31] Y.-G. Kim and S.-H. Kim, “A study of PDCP reorder time in dual connectivity in multiple wireless heterogeneous base stations,” *J. KICS*, vol. 46, no. 11, pp. 1796-1803, Nov. 2021. (<https://doi.org/10.7840/kics.2021.46.11.1796>)
- [32] R. A. Paropkari and C. Beard, “Multi-connectivity-based adaptive fractional packet duplication in cellular networks,” *Signals*, vol. 4, no. 1, pp. 251-273, Mar. 2023. (<https://doi.org/10.3390/signals4010014>)
- [33] S. M. Rayavarapu, S. D. Amuru, and K. Kiran, “Dynamic control of packet duplication in 5G-NR dual connectivity architecture,” in *Proc. 2020 Int. COMSNETS*, pp. 539-542, Bengaluru, India, Jan. 2020. (<https://doi.org/10.1109/COMSNETS48256.2020.9027289>)
- [34] M. López, S. B. Damsgaard, I. Rodríguez, and P. Mogensen, “Connecting rural areas: An empirical assessment of 5G terrestrial-LEO satellite multi-connectivity,” in *Proc. 2023 IEEE 97th VTC2023-Spring*, pp. 1-5, Florence, Italy, Aug. 2023. (<https://doi.org/10.1109/VTC2023-Spring57618.2023.10199206>)
- [35] M. Majamaa, H. Martikainen, L. Sormunen, and J. Puttonen, “Multi-connectivity for user throughput enhancement in 5G non-terrestrial networks,” in *Proc. 2022 18th Int. Conf. Wireless and Mobile Computing, Netw. and Commun. (WiMob)*, pp. 412-418, Thessaloniki, Greece, Oct. 2022. (<https://doi.org/10.1109/WiMob55322.2022.9941510>)
- [36] F. Salehi, M. Ozger, and C. Cavdar, “Reliability and delay analysis of 3-dimensional networks with multi-connectivity: Satellite, HAPs, and cellular communications,” *IEEE Trans. Netw. and Service Manag.*, vol. 21, no. 1, pp. 437-450, Feb. 2024. (<https://doi.org/10.1109/TNSM.2023.3307909>)
- [37] F. Khoramnejad, R. Joda, A. B. Sediq, G. Boudreau, and M. Erol-Kantarci, “AI-enabled energy-aware carrier aggregation in 5G new radio with dual connectivity,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 74768-74783, Jul. 2023. (<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3297099>)
- [38] M. Prakash, A. Abdrabou, and W. Zhuang, “Stochastic delay guarantees for devices with dual connectivity,” *IEEE Internet of Things J.*, vol. 11, no. 2, pp. 2126-2138, Jan. 2024. (<https://doi.org/10.1109/JIOT.2023.3292296>)
- [39] P. Charatsaris, M. Diamanti, E. E. Tsiropoulou, and S. Papavassiliou, “Efficient power control for integrated sensing and communication networks with dual connectivity,” in *Proc. 2023 IEEE ICC*, pp. 5910-5915, Rome, Italy, May 2023. (<https://doi.org/10.1109/ICC45041.2023.10279737>)
- [40] J. Jung, S. Lee, J. Shin, and Y. Kim, “Self-attention-based uplink radio resource prediction in 5G dual connectivity,” *IEEE Internet of Things J.*, vol. 10, no. 22, pp. 19925-19936, Nov. 2023. (<https://doi.org/10.1109/JIOT.2023.3283490>)
- [41] M. A. Habib, H. Zhou, P. E. Iturria-Rivera, M. Elsayed, M. Bavand, R. Gaigalas, S. Furr, and M. Erol-Kantarci, “Traffic steering for 5G multi-RAT deployments using deep reinforcement learning,” in *Proc. 2023 IEEE 20th CCNC*, pp. 164-169, Las Vegas, NV,

- USA, Jan. 2023.
(<https://doi.org/10.1109/CCNC51644.2023.10060026>)
- [42] C. Pupiales, D. Laselva, and I. Demirkol, "Capacity and congestion aware flow control mechanism for efficient traffic aggregation in multi-radio dual connectivity," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 114929-114944, Aug. 2021.
(<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3105177>)
- [43] J. F. Monserrat, F. Bouchmal, D. Martin-Sacristan, and O. Carrasco, "Multi-radio dual connectivity for 5G small cells interworking," *IEEE Commun. Standards Mag.*, vol. 4, no. 3, pp. 30-36, Sep. 2020.
(<https://doi.org/10.1109/MCOMSTD.001.1800030>)
- [44] C. Wan and B. Li, "DQN-based network selection and load balancing for LEO satellite-terrestrial integrated networks," in *Proc. 2024 7th WCCCT*, pp. 233-238, Chengdu, China, Apr. 2024.
(<https://doi.org/10.1109/WCCCT60665.2024.10541404>)
- [45] V. R. Gannapathy, R. Nordin, N. F. Abdullah, and A. Abu-Samah, "A smart handover strategy for 5G mmwave dual connectivity networks," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 134739-134759, Nov. 2023.
(<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3336907>)
- [46] H. Wang and B. Li, "Double deep q-learning based handover management in mmwave heterogeneous networks with dual connectivity," *IEEE Trans. Emerging Telecommun. Technol.*, vol. 35, no. 1, Jan. 2024.
(<https://doi.org/10.1002/ett.4907>)
- [47] T. Mumtaz, S. Muhammad, M. I. Aslam, and N. Mohammad, "Dual connectivity-based mobility management and data split mechanism in 4G/5G cellular networks," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 86495-86509, May 2020.
(<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2992805>)
- [48] A. Arwa, K. Hend, and Z. Faouzi, "Performance study in heterogeneous vehicular networks using dual connectivity and deep reinforcement learning," in *Proc. 2024 IWCMC*, pp. 1589-1594, Ayia Napa, Cyprus, May 2024.
(<https://doi.org/10.1109/IWCMC61514.2024.10592371>)
- [49] M. Majamaa, H. Martikainen, J. Puttonen, and T. Hämäläinen, "Satellite-assisted multi-connectivity in beyond 5G," in *Proc. 2023 IEEE 24th Int. Symp. WoWMoM*, pp. 413-418, Boston, MA, USA, Jun. 2023.
(<https://doi.org/10.1109/WoWMoM57956.2023.00073>)
- [50] M. F. Özkoç, A. Koutsaftis, R. Kumar, P. Liu, and S. S. Panwar, "The impact of multi-connectivity and handover constraints on millimeter wave and terahertz cellular networks," *IEEE J. Sel. Areas in Commun.*, vol. 39, no. 6, pp. 1833-1853, Jun. 2021.
(<https://doi.org/10.1109/JSAC.2021.3071852>)
- [51] 3GPP TR 38.821, "Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN) (Release 16)," V16.2.0, Mar. 2023.

장 지 석 (Jiseok Jang)



2025년 2월 : 아주대학교 전자
공학과 학사
2025년 3월~현재 : 아주대학교
AI융합네트워크학과 석사과
정
<관심분야> 저궤도 위성통신,
위성 라우팅, 스케줄링

박 서 영 (Seoyeong Park)



2025년 2월 : 아주대학교 전자
공학과 학사
2025년 3월~현재 : 아주대학교
AI융합네트워크학과 석사과
정
<관심분야> 저궤도 위성통신,
주파수 할당, 인공지능

김 준 영 (Junyoung Kim)



2023년 2월 : 한림대학교 소프트웨어학부 학사
2023년 3월~현재 : 아주대학교
AI융합네트워크학과 석·박사
통합 과정
<관심분야> 모빌리티, 자율주
행, 저궤도 위성통신, 인공
지능

정 소 이 (Soyi Jung)



2013년 2월 : 아주대학교 전자
공학과 학사
2015년 2월 : 아주대학교 전자
공학과 석사
2021년 2월 : 아주대학교 전자
공학과 박사
2021년 3월~2021년 8월 : 고려
대학교 정보통신기술연구소 연구교수
2021년 3월~2022년 8월 : 한림대학교 소프트웨어학
부 조교수
2021년 9월~2022년 8월 : University of California
at Irvine 방문교수
2022년 9월~현재 : 아주대학교 전자공학과 조교수
<관심분야> 모빌리티, 자율주행, 이동통신, 저궤도
위성통신, 인공지능