

## 5G mmWave 셀룰러 망에서의 TCP 성능 평가

김 건 환\*, 서 원 경\*, 조 유 제

## Performance Evaluations of TCP in 5G mmWave Cellular Network

Geon-Hwan Kim\*, Won-Kyeong Seo\*, You-Ze Cho\*

## 요 약

밀리미터파 (mmWave) 대역의 넓은 대역폭은 초당 멀티 기가비트 데이터 속도의 서비스를 제공할 수 있어 빠른 데이터 속도에 대한 높은 수요를 충족시킬 수 있다. 하지만, 고대역에 해당하는 mmWave 채널은 전파 차단으로 인해 매우 크고 빈번한 수신 신호의 품질 저하를 겪는다. 이러한 매우 동적인 채널 조건은 가장 널리 사용되는 전송계층 프로토콜인 TCP의 종단 간 성능을 크게 감소시킬 수 있다. 본 논문에서는 5G mmWave 셀룰러 망에서 TCP가 겪을 수 있는 문제들을 고찰하고 mmWave 링크를 이용하는 TCP와 관련된 다양한 실험을 수행하였다. 실험을 통해, mmWave 대역의 큰 변동성은 과도한 대기 지연을 유발하며, 셀룰러 망에 적용된 링크 계층 재전송 메커니즘은 상위 계층인 TCP로부터 무선 채널의 상태를 숨기는 역할을 하여 대기열 생성을 더욱 가속하는 것을 확인하였다. Active queue management 기법을 통해 대기 지연을 줄일 수 있었지만, 버퍼의 활용도가 낮아져 종단 간 처리량이 감소하였다. 따라서, mmWave 링크의 가용 용량을 완전히 활용할 수 있는 새로운 혼잡제어 알고리즘이 필요하며 대기열 관리 정책과의 협업을 통해 지연시간을 낮추는 방안을 모색해야 한다.

**키워드** : 5G 밀리미터파, TCP, 링크 계층 재전송, 대기열 관리 정책, 혼잡제어

**Key Words** : 5G mmWave, TCP, Link-level retransmission, Queue management policy, Congestion control

## ABSTRACT

The wide bandwidth of the millimeter-wave (mmWave) band can provide multi-gigabit per second data rate services to meet the high demand for fast data rates. However, high bandwidth mmWave channels suffer from very large and frequent degradation of the received signal quality due to blocking. These highly dynamic channel conditions can significantly degrade the end-to-end performance of TCP, the most widely used transport layer protocol. In this paper, we examined the problems that TCP may experience in 5G mmWave cellular networks and conducted various experiments related to TCP using mmWave links. Experiments confirmed that the large variability of the mmWave band causes excessive queuing delay, and the link-layer retransmission mechanism applied to the cellular network serves to hide the status of the radio channel from

※ This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (No. NRF-2018R1A6A1A03025109) and in part by supported by National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (No. NRF-2019R1A2C1006249).

• First Author : School of Electronic and Electrical Engineering, Kyungpook National University, kgh76@ee.knu.ac.kr, 학생회원

◦ Corresponding Author : School of Electronic and Electrical Engineering, Kyungpook National University, yzcho@knu.ac.kr, 종신회원

\* (ORCID:0000-0001-5920-4858)Department of Military Electronic Communication, Yeungjin University, wkseo@yju.ac.kr, 정회원  
논문번호 : 202107-171-B-RN, Received July 19, 2021; Revised September 27, 2021; Accepted October 7, 2021

the upper layer TCP, thereby further accelerating queue creation. Active queue management policy can reduced queuing delay, but end-to-end throughput is reduced due to low buffer utilization. Therefore, a new congestion control algorithm that can fully utilize the available capacity of the mmWave link is needed, and a way to lower the delay through cooperation with the queue management policy should be sought.

## I. 서 론

전송계층 프로토콜은 인터넷을 통한 중단 간 연결의 성능을 결정한다. 인터넷에서 대부분의 응용 프로그램이 사용하는 전송계층 프로토콜인 TCP (transmission control protocol)는 네트워크 혼잡 상황에 대응하기 위해 적용된 혼잡제어 알고리즘을 기반으로 송신 측이 전송할 수 있는 최대의 데이터의 양을 나타내는 혼잡윈도우를 적절히 조절하여 전송 속도를 제어한다<sup>11</sup>. 또한, 패킷 손실이 발생했을 때 수신 측으로부터 전달된 ACK (acknowledgement) 메시지를 기반으로 손실된 패킷을 재전송하여 복구함으로써 신뢰성 있는 패킷 전달을 보장한다. 네트워크 하드웨어의 빠른 발전과 무선 인터넷의 사용이 확대됨에 따라 우수한 처리량과 낮은 대기시간을 달성하기 위해 다양한 TCP 혼잡제어 연구가 수행되었다<sup>12</sup>.

5G 네트워크의 성능 조건에 따르면 최상의 상태에서는 초당 기가비트 (Gbit/s)를 지원해야 하며, 최소 초당 50 메가비트 (Mbit/s)의 사용자 비트 전송률을 제공해야 한다<sup>13</sup>. 높은 최대 대역폭을 갖는 밀리미터파 (mmWave) 통신은 이러한 5G 네트워크의 처리량 목표를 달성하는 데 주요한 역할을 할 수 있다. 24 GHz 이상의 주파수에 해당하는 mmWave 대역은 기존 이동 통신망보다 더욱 넓은 가용 대역폭을 제공하기 때문에 더 높은 처리량을 기대할 수 있다<sup>14</sup>. 특히, 고용량 저지연 네트워크에 대한 요구와 모바일 인터넷 사용량의 급격한 증가에 의한 처리량 저하 문제는 mmWave 대역을 통해 충족 및 해소될 것으로 예상된다.

하지만 고대역의 무선 채널은 작은 장애물에 의해서도 큰 신호 감쇄가 발생하는 매우 가변적인 성질을 가지며 mmWave 신호는 일반적인 건물 뿐만 아니라 인체에 의해서도 큰 감쇄가 발생할 수 있다<sup>15</sup>. 이러한 고도로 가변적인 무선 채널은 기존의 전송계층 프로토콜과 중단 간의 어플리케이션에게 다양한 과제들을 제시한다<sup>16-111</sup>.

mmWave 대역은 초당 멀티 기가 비트 데이터 속도와 초저지연이라는 5세대 셀룰러 망의 목표를 이루기 위한 유망한 기술로 여겨지지만, 사용자가 경험하

는 중단 간 성능은 결국 전송계층 프로토콜과의 상호작용으로 결정된다. 최근 일부 연구에서는 mmWave 채널의 크고 잦은 변동으로 인해 가용 대역폭을 충분히 활용하지 못하여 중단 간 처리량이 감소할 수 있음이 소개되었다<sup>12,13</sup>. mmWave 링크의 가용 대역폭을 완전히 활용하기 위해서는 최상의 채널 상태에 상응하는 TCP 혼잡윈도우 값을 유지해야 하지만, 무선 채널의 잦은 품질 저하는 링크의 가용 용량을 변화시킨다. 무선 채널의 품질 저하로 인해 링크의 용량이 감소하더라도 TCP 송신 호스트는 혼잡윈도우를 빠르게 줄이지 못하고 많은 양의 패킷을 전송하기 때문에, 무선 링크의 용량을 초과하는 양의 패킷은 기지국의 버퍼에 축적되어 긴 대기열을 생성한다. 이러한 bufferbloat<sup>14</sup> 문제로 인해 발생하는 긴 대기 지연은 RTT (round-trip time) 또한 증가시켜 모바일 기기 사용자에게 낮은 품질의 서비스를 경험하게 한다.

본 논문에서는 대표적인 전송계층 프로토콜인 TCP가 5G mmWave 셀룰러 망에서 동작할 때 발생할 수 있는 문제점들을 분석하고 이와 관련된 실험을 수행하였다. mmWave 채널의 크고 잦은 변동은 과도한 대기 지연을 유발할 수 있으며 성능 향상을 위해 셀룰러 망에 적용된 링크 계층 재전송 메커니즘은 대기열 생성을 더욱 심화시켜 RTT의 증가를 초래했다. 기지국 버퍼에 적용되는 대기열 관리 정책의 변경을 통해 대기 지연을 줄일 수 있었지만, 버퍼의 활용도가 낮아짐에 따라 중단 간 처리량이 감소하였다. 기지국 버퍼의 크기 증가는 중단 간 처리량을 개선할 수 있지만 bufferbloat 문제를 유발하여 RTT가 증가하는 문제가 발생할 수 있다. 혼잡윈도우의 증가 속도가 빠른 혼잡제어 알고리즘은 더 높은 처리량을 보였지만, mmWave 링크의 가용 용량을 완전히 활용하지는 못했다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 5G mmWave 채널의 특징과 이를 이용하는 TCP 연결이 겪을 수 있는 여러 가지 문제점들을 소개한다. 또한, mmWave 환경에서의 TCP에 관한 다양한 관련 연구와 유망한 연구 주제들을 소개한다. III장에서는 5G mmWave 셀룰러 망에서의 TCP 성능을 평가하기 위한 시뮬레이션 환경과 다양한 시나리오 및 실험 결과

를 제시하고, IV장에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

## II. 5G mmWave 채널과 TCP 연결

### 2.1 5G mmWave 채널의 특성

무선 네트워크에서는 경로 내의 혼잡에 의한 패킷 손실보다 갑작스러운 무선 채널의 품질 저하에 의한 패킷 손실이 더욱 빈번하게 발생한다. 따라서, TCP는 무선 네트워크에서 다양한 성능 문제를 가질 수 있으며 4세대 셀룰러 망인 LTE에서 사용자 모바일 기기와 기지국 사이의 거리 및 핸드오버가 TCP의 성능에 미치는 영향에 관한 많은 연구가 이루어져 왔다<sup>15,16</sup>. 주로 1.8 GHz 대역을 사용하는 LTE보다 더욱 높은 24 GHz 이상의 주파수에 해당하는 mmWave 대역은 가용 대역폭이 훨씬 크기 때문에 기존의 셀룰러 망보다 더 높은 처리량을 제공할 수 있다. 하지만, 주변 환경에 따라 신호의 감쇄가 빈번하게 발생하는 고주파수의 무선 링크는 종단 간 연결 관점에서 다양한 전파 조건을 제시한다.

전파 장애물에 의해 LoS (line-of-sight)에서 NLoS (non line-of-sight)로 전환될 때 mmWave 신호의 최대 대역폭은 큰 폭으로 줄어든다<sup>12</sup>. 높은 최대 대역폭을 갖는 mmWave 채널은 신호 차단으로 인해 SINR (signal to interference plus noise ratio)이 30 dB 이상 감소할 수 있으며 링크의 사용 가능한 전송용량이 크게 줄어들 수 있다. 또한, 높은 주파수를 갖는 mmWave 신호는 비교적 좁은 범위의 셀 네트워크로 구성되며 작은 크기의 장애물, 심지어는 인체에 의해서도 신호 차단이 발생할 수 있어서 LTE보다 더욱 빈번한 변동성을 보인다. 모바일 기기와 mmWave 기지국 사이의 통신이 완전히 단절되는 Outage 상황의 발생 빈도 또한 LTE보다 높다.

따라서 높은 최대 대역폭을 가지며 채널의 변동이 빈번한 mmWave 대역은 종단 호스트 간에 안정적이고 신뢰성 있는 데이터 전달을 보장해야 하는 TCP의 동작에 심각한 영향을 미칠 수 있다.

### 2.2 종단 간 TCP 연결 시나리오

<그림 1>은 UE (user equipment)가 BS (base station)를 통해 원격 서버와 통신하는 5G 네트워크 시나리오를 나타낸다. 모바일 기기에 mmWave 무선 서비스를 제공하는 기지국은 이더넷 연결을 통해 원격 서버와 통신한다. NAS (non-access stratum)는 셀 타워와 외부 IP 네트워크 간의 연결을 설정하는 다양한 기능들로 구성되며, AS (radio access stratum)는

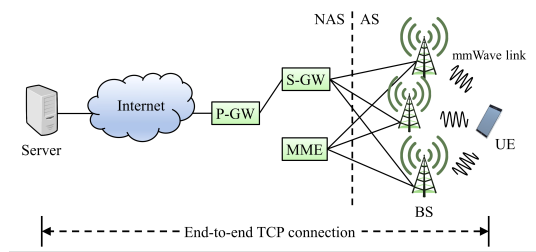


그림 1. 5G mmWave 링크를 지나는 종단 간 TCP 연결  
Fig. 1. End-to-end TCP connection over 5G mmWave link

기지국과 모바일 기기 사이의 무선 연결을 담당한다. P-GW (packet data network gateway)는 외부 IP 네트워크와의 통신을 가능하게 하고, S-GW (serving gateway)는 기지국과 P-GW 간에 데이터를 전달하는 라우터 역할을 한다. MME (mobility management entity)는 UE에 대한 인증, 이동성 상태 관리 및 핸드오버를 수행하며 UE가 인터넷을 사용하는데 필요한 논리적인 터널을 관리한다.

### 2.3 링크 계층 재전송과 TCP

mmWave 신호는 다양한 전파 장애물에 의해 큰 폭의 SINR 감소를 겪는 매우 역동적인 채널이다. 무선 채널에서 발생할 수 있는 패킷 손실의 영향을 최소화하면서 모바일 기기에서의 처리량을 최대화하기 위해, 현재의 이동통신에는 링크 계층 재전송 메커니즘이 적용되어 있다.

LTE와 같은 3GPP (third generation partnership project) 네트워크 프로토콜 스택<sup>17</sup>에는 MAC (media access control) 계층 위에 RLC (radio link control) 계층이 존재하며, RLC 및 MAC 계층에서 개별적인 링크 계층 재전송이 수행된다. 먼저 MAC 계층에서는 HARQ (hybrid automatic repeat request) 기법이 사용된다. HARQ는 FEC (forward error correction) 기법과 ARQ (automatic repeat request) 기법이 결합된 방식이다. 송신 측에서는 패킷에 CRC (cyclic redundancy check) 코드와 패리티 비트를 추가하여 전송하며, 수신 측에서는 데이터를 복호하고 CRC를 체크한다. 수신 측에서 패킷 오류를 감지하면 재전송을 요청하여 오류가 발생한 패킷을 재전송받는다.

하지만 MAC 계층에서의 HARQ로 인한 재전송 시도는 제한적이기 때문에 RLC 계층에서 추가적인 재전송을 수행하여 패킷 손실에 대처한다. RLC 계층에서는 데이터 전송의 신뢰성을 보장하기 위해 AM (acknowledged mode)으로 동작할 수 있고, ARQ를

통해 전송 오류에 대한 복구를 수행한다. 데이터 전송에 정확성이 필요한 경우에는 AM으로 동작하며, 실시간으로 빠르게 전달하고자 할 때는 ARQ를 수행하지 않는 UM (unacknowledged mode)으로 동작할 수 있다.

MAC 계층의 HARQ와 RLC 계층의 AM 재전송만으로는 mmWave 신호가 오랜 시간 동안 차단되는 상황 (NLoS의 지속 또는 연속된 Outage의 발생)에서의 모든 패킷 손실을 대처할 수 없다. 따라서 TCP 송신 호스트는 무선 링크에서 발생한 패킷 손실을 혼잡으로 간주하여 혼잡원도우를 줄이게 되며, 이후 채널의 상태가 나아지더라도 최대 가용 용량에 도달하기까지 오랜 시간이 소요된다.

즉, 무선 채널에서 발생하는 패킷 손실에 대한 영향을 최소화하기 위해 적용된 링크 계층 재전송 메커니즘은 TCP와 같은 상위 계층의 전송 프로토콜에 무선 채널의 불안정성을 숨기는 역할을 한다. 이는 LTE보다 더 큰 폭으로 급격하게 채널의 용량이 변화하는 mmWave 대역에서 더욱 두드러지게 나타난다.

#### 2.4 mmWave 네트워크에서의 대기열 관리 기법

다양한 장애물에 의한 LoS에서 NLoS로의 급격한 전환은 mmWave 대역의 가용 용량을 크게 변화시켜 전송계층 프로토콜의 성능에 많은 영향을 미친다. 특히, mmWave 기지국의 버퍼 크기가 충분한 경우에는 LoS에서 NLoS로의 전환으로 인해 긴 대기열이 빠르게 생성되기 때문에 중단 간 데이터 전달 시간이 크게 지연될 수 있다. 반면, 기지국의 버퍼가 작을 때는 TCP가 mmWave 링크의 가용 대역폭을 충분히 사용하지 못해 처리량이 감소한다<sup>18)</sup>.

mmWave 채널의 큰 가용 대역폭을 완전히 활용하려면 TCP 혼잡원도우가 매우 큰 값으로 증가해야 한다. 채널의 상태가 우수한 LoS 상황에서 큰 크기의 혼잡원도우를 통해 많은 양의 데이터를 전송하던 송신 호스트는 mmWave 링크의 일시적인 채널 상태 악화에 즉시 반응하지 못하고 과도한 양의 데이터를 지속해서 전달한다. 가용 용량을 넘어서는 양의 패킷은 기지국의 버퍼에 축적되어 긴 대기열을 생성하고, 이로 인해 bufferbloat 문제가 발생한다<sup>14)</sup>.

지연성을 목표로 하는 5G 네트워크는 LoS와 NLoS간의 전환이 빈번하고 그 폭이 큰 mmWave 대역에서 발생하는 bufferbloat 문제를 해결하기 위해 AQM (active queue management) 알고리즘을 mmWave 기지국에 적용할 수 있다.

#### 2.5 최대 세그먼트 사이즈에 따른 TCP 성능

TCP 호스트가 전송할 수 있는 데이터의 최대 크기인 MSS (maximum segment size)는 MTU (maximum transmission unit)에 의해 결정된다. 일반적인 유선 환경에서의 최대 송신 단위는 1500 Byte이며, MSS는 IP 헤더와 TCP 헤더를 제외하면 1460 Byte의 크기를 갖는다. 작은 크기의 MSS는 헤더로 인한 오버헤드가 존재하기 때문에 데이터를 효율적으로 전송하지 못한다. 즉, MSS가 너무 작으면 데이터의 비율이 감소하므로 링크의 사용 가능한 대역폭을 효율적으로 쓰지 못하게 된다.

TCP의 혼잡회피 구간에서는 모든 패킷이 올바르게 수신되었다면 혼잡원도우가 각 RTT마다 1 MSS만큼 증가한다. 따라서, MSS가 작으면 혼잡원도우의 증가 속도는 느려지고 처리량 또한 더디게 증가하기 때문에 MSS는 혼잡원도우의 증가 속도를 결정하는 요소로 해석될 수 있다. 기존 LTE보다 더욱 큰 최대 용량을 갖는 mmWave 대역에서는 혼잡원도우가 증가하는데 오랜 시간이 소요되며, 빈번한 채널의 변동은 가용 대역폭을 급격히 변화시켜서 급변하는 대역폭 용량에 빠르게 반응하기 어렵게 한다. 이로 인해 TCP 호스트는 mmWave의 가용 용량을 충분히 활용하지 못하게 된다.

#### 2.6 끊임없는 통신을 위한 TCP 이동성 지원

좁은 셀 범위를 갖는 고대역의 mmWave 망에서는 UE의 셀 이동에 따라서 기존 BS와 단절된 후 새로운 BS와 연결을 수행하는 수평 핸드오버가 빈번하게 일어난다. UE의 이동에 의한 핸드오버 외에도, 전파 방해물에 의한 신호 차단으로 인해 mmWave 채널의 품질이 급격히 저하되어 새로운 인접 BS를 찾는 상황이 발생할 수 있다. 따라서, mmWave 망에서는 중단 간 연결을 유지하며 끊임없는 서비스를 제공하기 위한 초고밀도의 셀 배치가 중요하다. 하지만 고밀도의 셀 배치 환경에서는 불필요한 핸드오버의 반복이 지연시간의 증가를 초래할 수 있고 핸드오버의 실패에 의한 성능 감소 문제 또한 발생할 수 있다.

관련 연구인 [19]에서는 단일 플로우의 핸드오버 및 다중 플로우의 핸드오버 시나리오 두 가지를 구성하여 혼잡제어 알고리즘에 따른 성능을 비교하였다. 단일 플로우를 이용하는 UE가 겪는 짧은 신호 차단은 빈번한 핸드오버를 일으켜 처리량의 저하를 유발하였다. 또한, 다수의 mmWave BS가 여러 대의 UE와 연결된 시나리오에서는 핸드오버를 수행하는 UE에 의해 기존에 연결된 UE의 처리량이 감소할 수 있음을

보였다.

### 2.7 신뢰성 향상을 위한 다중경로 TCP 연결

수평 핸드오버는 UE가 특정 셀에서 빠져나오거나 더 나은 채널 품질을 가지는 BS와 연결을 맺음으로써 데이터 세션을 전환하는 방식의 핸드오버이다. 다양한 네트워크 인터페이스 컨트롤러 또는 무선 기술 (Wi-Fi, 4G 및 5G) 간에 데이터 세션을 전환하는 것은 수직 핸드오버 방식이며, 이를 통해 잦은 수평 핸드오버로 발생하는 성능 저하 문제를 해결할 수 있다.

IETF (internet engineering task force)에 의해 표준화된 MPTCP (multi-path TCP)는 다중경로 서비스를 제공하기 위한 표준 TCP의 확장으로, TCP 연결이 다수의 경로에서 동시에 작동할 수 있도록 한다<sup>20</sup>. MPTCP 연결에 포함되는 각 경로를 통해 전송되는 일련의 TCP 세그먼트는 서브플로우로 정의된다<sup>21</sup>. 데이터 스트림을 서브플로우로 나누어서 전송하면 자원 이용률을 극대화하여 중단 간 처리량을 높일 수 있다. 또한, 수직 핸드오버가 수행되는 동안 다른 서브플로우를 통해 끊임없는 연결을 지원할 수 있으며 특정 네트워크 또는 링크에 문제가 발생하여도 다른 서브플로우를 사용함으로써 높은 견고성과 복원력을 제공할 수 있다<sup>22</sup>.

[13]에서는 5G mmWave 및 LTE 네트워크를 동시에 이용하는 MPTCP의 성능 분석 연구를 수행하였다. 두 개의 mmWave 링크를 이용하는 MPTCP는 UE와 BS 간의 거리가 가까울 때는 단일 TCP보다 처리량이 향상될 수 있지만, 거리가 증가함에 따라서 급격한 성능 저하가 발생하였다. 이때, coupled MPTCP 혼잡제어 알고리즘<sup>[23]</sup>이 적용되었을 때는 mmWave 채널에서 발생하는 많은 패킷 손실에 대응하기 위한 혼잡원도우 감소 동작이 모든 경로에서 수행되기 때문에 단일 TCP보다도 낮은 성능을 보였다. 또한, MPTCP와 단일 TCP가 동일한 BS를 지날 때는 공평하지 않은 대역폭 할당에 따른 네트워크 공평성 문제가 발생할 수 있다.

### 2.8 mmWave 환경을 위한 TCP 혼잡제어 연구

TCP 혼잡제어 알고리즘은 중단 간 처리량을 결정하는 중요한 요소이다. 기존의 TCP 혼잡제어 알고리즘은 mmWave 링크의 넓은 대역폭을 충분히 활용하지 못하였으며, 채널 상태의 빈번한 변화 때문에 과도한 대기 지연 문제가 발생하였다<sup>[24][25]</sup>. 따라서, mmWave 환경에서 TCP의 성능을 높이기 위한 TCP 혼잡제어 연구가 소개되었다<sup>[26,27]</sup>.

TCP 송신 측이 mmWave 링크의 상태를 정확하게 파악하고 혼잡원도우를 조절하면 링크의 이용률을 높여서 중단 간 성능이 향상될 수 있다. 링크 계층의 매개변수를 사용하여 혼잡제어를 수행하는 교차 계층 혼잡제어 기법인 X-TCP<sup>[26]</sup>는 BS가 UE에게 할당된 자원 정보와 SINR을 통해 최적의 혼잡원도우 값을 찾는다. X-TCP는 처리량 저하 없이 대기 지연을 최소화 하였으며 링크의 상태 변화에 빠르게 적응하였다. 하지만 기존 TCP 혼잡제어와의 공정성 문제가 발생하였으며, 상향링크에서만 적용 가능한 교차 계층 혼잡제어 기법이라는 한계점을 갖는다.

mmWave 셀룰러 망을 위한 TCP 프록시인 milliProxy<sup>[27]</sup>는 중단 간 연결을 두 개의 세그먼트로 나누어 유선과 무선에 대해 서로 다른 전략을 수행한다. milliProxy는 무선 부분인 mmWave 링크를 통해서 더 큰 MSS로 데이터를 전달함으로써 처리량 향상을 유도하였다. 교차 계층 기법이 적용된 milliProxy 또한 링크의 상태 변화에 빠르게 적응할 수 있었으며 대기 지연의 감소와 처리량 향상을 동시에 이끌었다. 하지만 mmWave 기지국에 프록시 기능을 적용하는 것은 배치 난이도가 높은 편이며, 중단 간 연결을 두 개의 세그먼트로 분리하여 수행되는 구분 동작으로 인한 오버헤드가 발생할 수 있다는 문제점이 존재한다.

## 2.9 mmWave에서의 TCP 관련 기타 연구 주제

### 2.9.1 네트워크 공평성 문제

네트워크 공평성은 전송계층 프로토콜을 설계할 때 고려해야 할 핵심 요소이다. mmWave 망에서의 성능 향상에만 초점을 둔 새로운 혼잡제어 알고리즘의 설계와 배치는 기존 TCP 프로토콜과의 공평성 문제를 일으킬 수 있다<sup>[26]</sup>. 또한, <sup>[28]</sup>에서는 mmWave 링크를 지나는 TCP 플로우 간에 RTT 차이가 존재할 때 채널 품질의 변화에 따라 RTT 공평성 문제가 발생할 수 있음을 보였다. 중단 간 처리량의 향상을 이끌고 연결의 견고성을 높이기 위한 다중경로 TCP의 적용에 의해서도 공평성 문제가 나타날 수 있으므로<sup>[29]</sup>, mmWave 환경에서 최상의 성능을 보이며 공평성을 유지할 수 있는 프로토콜의 연구가 필요하다.

### 2.9.2 다양한 이동성 모델에서의 mmWave 성능 연구

셀 반경이 작은 mmWave 네트워크에서는 UE의 이동성 지원을 위한 핸드오버 기술이 중요하다. 특히, UE가 차량 또는 고속 열차에 위치하여 mmWave 기

지국과 통신을 할 때는 빠르고 빈번한 셀 이동 때문에 다양한 성능 저하 문제가 발생할 수 있다.

mmWave 통신 기반 차량 간 연결 네트워크에서의 TCP 연구<sup>[30]</sup>에서는 차량의 속도에 의한 TCP 혼잡제어의 동작 특징을 보였으며, <sup>[25]</sup>에서는 고속철도 환경에서 mmWave 링크를 이용하는 TCP는 혼잡제어 알고리즘에 따라서 큰 성능 차이가 발생할 수 있음을 실험을 통해 확인하였다. UE의 빠른 이동에 의한 성능 변화 연구 외에도 이동성 모델에 따른 TCP 성능 분석 연구<sup>[31]</sup>가 소개되었다. 더욱 정확한 중단 간 성능 평가를 위해서는 각각의 mmWave 네트워크 배치 시나리오에 적합한 이동성 모델을 적용할 필요가 있다.

### 2.9.3 최적의 RLC 버퍼 크기 설정

UE와 연결된 mmWave 기지국의 RLC 버퍼 크기는 TCP의 성능에 영향을 미칠 수 있다<sup>[19]</sup>. 버퍼의 크기가 커지면 버퍼에 공간이 부족하여 새로 도착하는 패킷이 드랍되는 buffer overflow가 감소하기 때문에 패킷의 손실률이 줄어든다. 하지만 버퍼에 생성되는 긴 대기열에 의해 중단 간 지연시간이 매우 증가할 수 있으며, 대기열의 과도한 증가는 bufferbloat 문제를 유발한다. bufferbloat 문제를 해결하기 위해 버퍼의 크기를 줄이면 buffer overflow의 발생 빈도가 증가하여 패킷 손실로 인한 TCP의 처리량 감소 문제가 발생할 수 있다.

따라서, 5G mmWave 기지국의 RLC 버퍼의 최적 크기 설정에 관한 연구 시도가 필요하며 본 논문의 3장에서는 RLC 버퍼 크기가 중단 간 성능에 미치는 영향에 대한 실험을 수행하였다.

## III. 실험환경 및 성능평가

### 3.1 ns-3 기반 5G mmWave 프레임워크

ns-3<sup>[32]</sup> 기반 5G mmWave 프레임워크<sup>[33][34]</sup>는 ns-3 LTE 모듈인 LENA<sup>[35][36]</sup>를 기반으로 구성되었으며, mmWave 통신을 위한 맞춤형 PHY 및 MAC 계층을 구현하기 위해 기존 LENA 모듈에서의 LTE/EPC 프로토콜 구조를 활용하였다. ns-3를 기반으로 구현된 LENA는 LTE/EPC 네트워크 시뮬레이터이며 LTE와 관련된 다양한 애플리케이션 (다운링크 및 업링크 스케줄러의 설계, 무선 자원 관리 알고리즘, 셀 간 간섭 조절 및 UE 이동성 관리, 중단 간 서비스 품질 테스트 등)을 만들고 테스트할 수 있도록 지원하는 오픈소스 프레임워크이다. LENA 프레임워크에는 LTE 통신에 필수적인 PDCP, RRC 및 RLC 계층, MAC, PHY 계

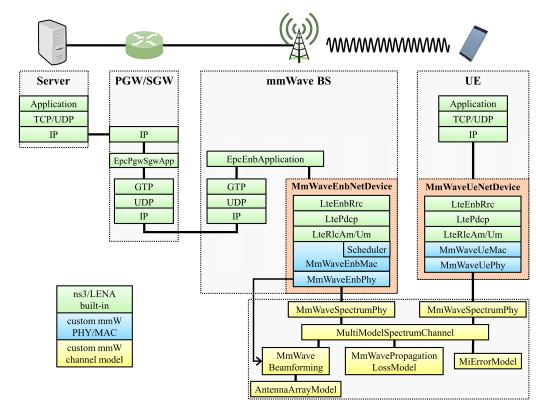


그림 2. ns-3에서의 중단 간 5G mmWave 모듈 구조[33]  
Fig. 2. End-to-end 5G mmWave module architecture in ns-3[33]

층, 그리고 다양한 안테나 모델이 구현되어 있다. 이러한 LENA 모듈의 구조를 기반으로 하여 mmWave 시뮬레이션 모듈이 개발되었고, 다양한 연구자가 새로운 5G 프로토콜을 설계하고 테스트할 수 있도록 5G mmWave 프레임워크 또한 공개되어 있다.

<그림 2>는 중단 간 관점에서의 5G mmWave 모듈 구조를 나타내며 mmWave를 위한 클래스뿐만 아니라 다양한 LTE LENA 클래스가 존재한다. 각 클래스의 구조와 기능들은 기존의 LTE LENA 모듈을 상속하기 때문에 상세한 정보는 LENA 프로젝트의 문서와 5G mmWave 프레임워크 구현 논문에서 확인할 수 있다<sup>[33-36]</sup>.

### 3.2 시뮬레이션 시나리오 및 실험 결과

본 장에서는 5G mmWave 링크를 지나는 TCP와 관련된 다양한 시나리오를 구성하여 그 성능을 평가하였다. <표 1>은 실험에 사용된 네트워크 매개변수의 설정값을 나타낸다. 각 시나리오의 주요 목적에 따라 특정한 네트워크 매개변수를 변경하였으며, 해당 매개변수의 변화에 따른 TCP의 성능 차이를 분석하였다.

#### 3.2.1 시나리오 1: 링크 계층 재전송과 TCP

링크 계층 재전송 메커니즘이 mmWave 링크를 이용하는 TCP의 성능에 미치는 영향을 확인하기 위해 <그림 3>의 시뮬레이션 시나리오를 고려하였다. 5G mmWave 기지국과 모바일 기기의 거리에 따라서, 링크 계층 재전송 메커니즘의 활성화 여부에 의한 TCP 처리량과 중단 간 지연시간을 확인하였다. TCP 혼잡 제어로는 CUBIC이 사용되었으며 mmWave 기지국

표 1. 각 시나리오에 대한 실험 매개변수  
Table 1. Experimental parameters for each scenario

	시나리오1	시나리오2	시나리오3	시나리오4
Carrier frequency	28 GHz			
Bandwidth	1 GHz			
TxPower	30 dBm			
RLC buffer size	4 MB	20 MB	4 MB	1, 4, 8, 16 MB
RLC ACK mode	Enabled / Disabled	Enabled	Enabled	Enabled
Hybrid ARQ	Enabled / Disabled	Enabled	Enabled	Enabled
TCP RTO	200 ms			
Congestion control	CUBIC	CUBIC	NewReno, CUBIC, HighSpeed	CUBIC
Queue management	FIFO	FIFO, CoDel	CoDel	FIFO
TCP MSS [Bytes]	1,400	1,400	1,400, 14,000	1,400
Simulation time	30 seconds	15 seconds	30 seconds	10 seconds

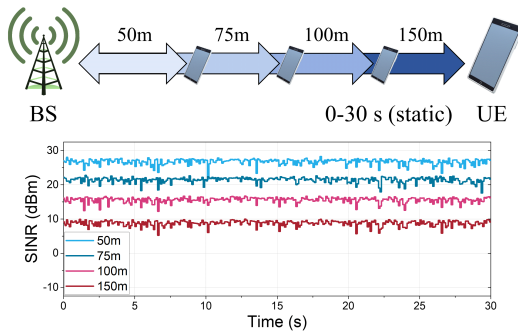


그림 3. 시나리오 1 구성도 및 거리에 따른 SINR  
Fig. 3. Scenario 1 configuration and SINR according to distance

의 RLC 버퍼 관리 정책으로는 FIFO (first-in first out)이 적용되었다.

<그림 4>에서 모바일 기기와 기지국 사이의 거리가 가까울 때 (50 m)는 mmWave 채널이 좋은 상태를 유지하기 때문에 링크 계층 재전송이 활성화되지 않은 경우에도 충분한 처리량을 보인다. 하지만, 모바일 기기와 기지국 사이의 거리가 증가함에 따라서 처리량과 RTT는 변화한다. 링크 계층 재전송이 수행될 때는 재전송이 없는 경우보다 2~3배 높은 처리량을 보였지만 RTT 또한 1.5~4배 높게 나타났다. 이는 링크

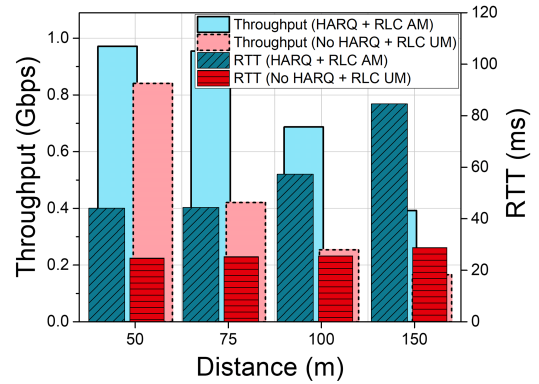


그림 4. 링크 계층 재전송 여부에 따른 TCP의 성능  
Fig. 4. TCP performance with and without link-level retransmissions

계층에서 수행되는 재전송으로 인해 TCP 송신 호스트는 mmWave 채널의 상태를 정확하게 파악하지 못한 채 지속해서 많은 데이터를 보내며, mmWave 링크의 용량을 초과하는 전송량이 RLC 버퍼에 쌓이면서 RTT가 증가했기 때문이다. 재전송을 사용하지 않을 때는 짧은 대기열로 인해 RTT가 최소 전파 지연과 비슷하지만, 많은 패킷 손실에 대처하지 못하여 중단된 처리량이 감소한다.

5G 네트워크는 높은 처리량과 짧은 지연시간이 동시에 충족되는 것을 목표로 한다. 하지만 <그림 4>의 결과로부터 모바일 기기가 기지국으로부터 먼 거리에 위치하거나 NLoS로 인해 채널의 상태가 나빠졌을 때, 높은 처리량을 얻기 위해서는 지연시간 또한 증가하게 된다. 처리량의 증가와 지연시간의 감소를 동시에 이루기 위해서는 먼저 TCP가 mmWave 채널의 상태를 정확히 파악할 수 있어야 한다. 실제 물리적인 측면으로는 초고밀도의 기지국 배치를 통해 높은 품질의 mmWave 신호를 연속적으로 제공하는 방법이 있지만, 핸드오버 및 셀 배치와 같은 관리의 문제로 인해 비용이 과도하게 증가할 수 있다<sup>37)</sup>.

### 3.2.2 시나리오 2: 대기열 관리 기법의 영향

높은 최대 대역폭을 갖는 mmWave 네트워크에서는 bufferbloat 문제<sup>14)</sup>가 발생할 수 있으며, 무선 기지국에 효율적인 대기열 관리 정책을 적용하여 이를 해결할 수 있다. 가장 일반적인 단일 대기열 스케줄링 기법인 선입선출 (FIFO)은 패킷 드랍 정책인 Tail-drop을 통해 버퍼가 가득 찼을 때 마지막으로 도착하는 패킷을 드랍한다. 선입선출 정책은 필수적으로 대기열을 생성하며 동작하기 때문에 RTT의 증가를 초래한다. AQM 기법의 하나인 CoDel은 100 ms마다

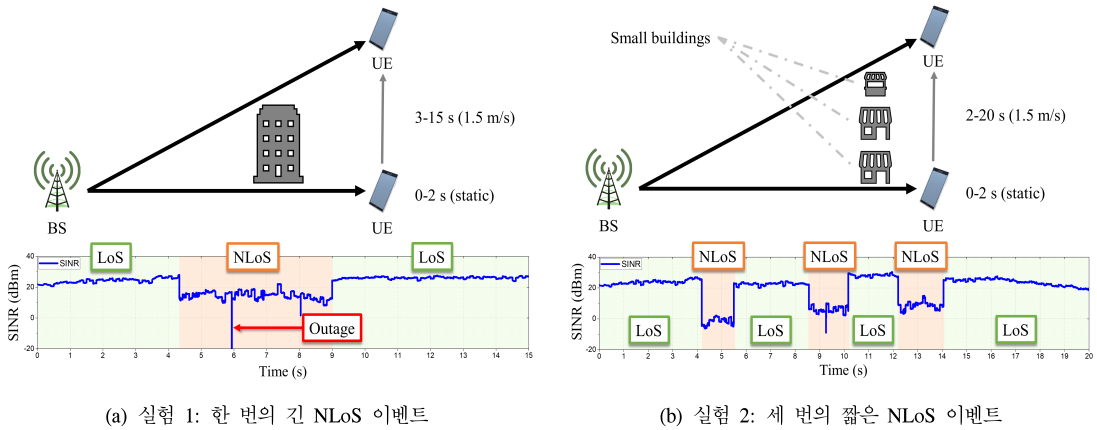


그림 5. 시뮬레이션 시나리오 2의 두 가지 실험 구성도와 시간에 따른 SINR  
 Fig. 5. Two experimental configurations of simulation scenario 2 and SINR vs. time

최소 대기 지연을 관찰하여 최소 대기 지연이 5 ms 이상이면 패킷을 드랍한다<sup>38)</sup>. 따라서 CoDel은 설정된 지연시간 이하의 대기 지연을 유지하기 때문에 RTT를 줄일 수 있다.

시나리오 2에서는 대기열 관리 정책이 mmWave 링크를 지나는 TCP의 중단 간 성능에 미치는 영향을 확인하였다. 시나리오 2의 실험은 두 가지의 전파 차단 예시로 구성된다. <그림 5(a)>는 한 번의 긴 NLoS를 겪는 실험 1의 구성도와 모바일 장치 측에서의 시간에 따른 SINR를 나타낸다. 이어서 세 번의 짧은 NLoS를 겪는 실험 2를 수행하였고, 이에 대한 SINR도표와 실험 구성도를 <그림 5(b)>에 나타냈다. 각 실험에서 mmWave 기지국의 대기열 관리 정책으로는 FIFO와 CoDel이 적용되었고, 대기열 관리 정책에 따른 중단 간 성능 차이를 여러 측면에서 살펴보았다. RLC 버퍼의 크기는 20 MB로 설정하였고 RLC AM과 HARQ가 활성화되어 링크 계층 재전송이 수행되도록 하였다.

<그림 6>은 약 5초의 긴 NLoS를 겪는 실험 1에서의 혼잡원도우, 처리량, RTT 및 RLC 대기열 크기의 변화를 나타낸다. RLC 버퍼에 FIFO가 적용되면 mmWave 대역의 가용 대역폭을 완전히 활용할 수 있는 크기 이상의 혼잡원도우를 유지한다. NLoS로 전환된 4초 이후에도 혼잡원도우는 계속해서 증가하기 때문에 9초가 지나 LoS로 재전환되어도 즉시 mmWave 링크의 최대 대역폭에 도달한다. 하지만 CoDel의 경우에는 NLoS로의 전환으로 인해 발생하는 대기열의 생성을 억제하기 위해 패킷을 드랍한다. NLoS 구간 동안에도 추가로 패킷을 드랍하기 때문에 LoS로 전환된 시점에서는 낮은 혼잡원도우 값을 갖는다. 이후,

LoS로의 전환으로 무선 링크의 용량이 증가했음에도 TCP 송신 호스트는 혼잡회피를 수행하고 있으므로 혼잡원도우를 빠르게 증가시키지 못한다. 따라서 CoDel이 적용된 기지국을 지나는 실험에서는 NLoS에서 LoS로 전환되더라도 사용 가능한 대역폭을 충분히 활용하지 못하여 낮은 처리량을 보였다.

하지만, <그림 6> 아래에 나타낸 RTT와 RLC 대

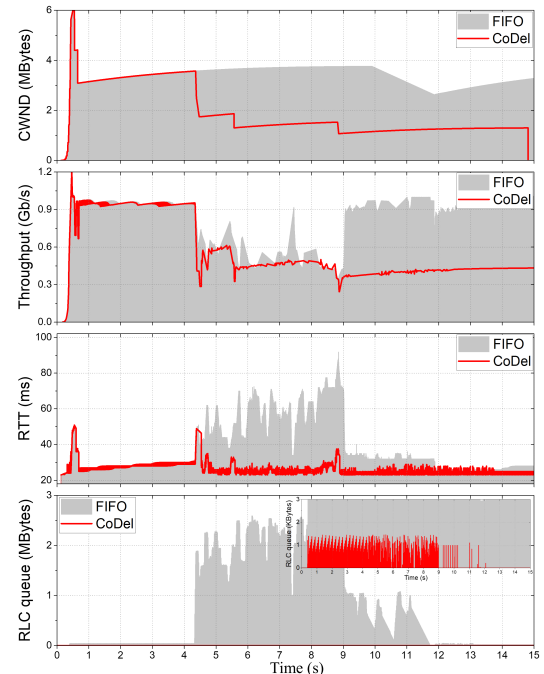


그림 6. 실험 1 결과: 혼잡원도우, 처리량, RTT, RLC 대기열 크기  
 Fig. 6. Experiment 1 results: cwnd, throughput, RTT and RLC queue size



기열 크기의 변화에서는 CoDel이 더욱 우수한 성능을 보인다. FIFO는 NLoS로의 전환 즉시 2 MB의 긴 대기열을 생성한 후 이를 계속 유지하였다. FIFO가 적용된 기지국과 연결된 TCP 송신 호스트는 mmWave 채널의 갑작스러운 대역폭 감소를 빠르게 감지하지 못하여 많은 양의 데이터를 전달하고 가용 용량을 초과하는 패킷은 그대로 RLC 버퍼에 축적된다. 이러한 긴 대기열의 생성은 RTT의 증가로 이어진다. 반면 CoDel은 설정된 최소 대기 지연을 넘어서면 패킷을 드랍하기 때문에 RLC 버퍼를 거의 채우지 않았고 RTT 또한 낮게 유지되었다.

<그림 7>은 약 20 dBm의 큰 SINR 감소를 세 번 겪는 실험 2의 결과를 나타낸다. 실험 2에서는 20 dBm의 큰 NLoS를 겪은 CoDel이 다수의 패킷을 드랍하여 혼잡윈도우가 큰 폭으로 감소하였고 이를 복구하는 데 오랜 시간이 소요되었다. FIFO은 실험 1에서보다 더욱 긴 대기열을 생성하였고, 이로 인해 높은 RTT를 보였다. 이러한 긴 중단 간 왕복 지연시간은 모바일 장치 사용자가 낮은 QoS를 경험하게 한다.

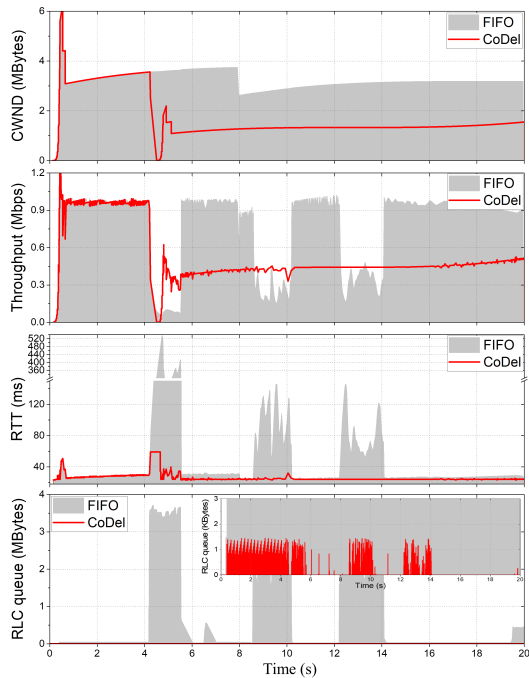


그림 7. 실험 2 결과: 혼잡윈도우, 처리량, RTT, RLC 대기열 크기  
 Fig. 7. Experiment 2 results: cwnd, throughput, RTT and RLC queue size

3.2.3 시나리오 3: 최대 세그먼트 크기의 영향  
 mmWave 채널의 최고 대역폭은 LTE보다 더욱 높

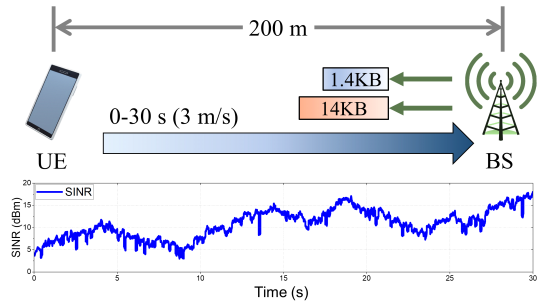


그림 8. 시뮬레이션 시나리오 3의 실험 구성도와 시간에 따른 SINR  
 Fig. 8. Experimental configurations of simulation scenario 3 and SINR vs. time

으므로 TCP 혼잡윈도우가 최대 가용 용량에 도달하기까지 오랜 시간이 걸린다. MSS는 혼잡윈도우의 증가 속도를 결정하기 때문에 큰 크기로 데이터를 전달한다면 최대 용량에 더욱 빠르게 도달할 수 있다. 시나리오 3에서는 5G mmWave 네트워크에서 MSS가 TCP의 처리량에 미치는 영향을 확인하였다.

<그림 8>과 같이, 모바일 기기 사용자는 5G mmWave 기지국과 200 m 떨어진 거리에서 3 m/s의 속도로 다가온다. 원격 서버로부터 전송되는 세그먼트의 크기가 1,400 Bytes인 경우와 14,000 Bytes일 때의 TCP 혼잡윈도우의 변화를 확인하였다. <그림 9>는 원격 서버에 세 가지의 TCP 혼잡제어 알고리즘이 적용되었을 때, MSS에 따른 혼잡윈도우의 변화를 나타낸다. 시나리오 3 실험에서 나타나는 혼잡윈도우의 감소는 mmWave 채널의 품질 하락으로 인해 발생한다.

시나리오 3 실험에서 평가된 세 가지 혼잡제어 알고리즘의 특징은 아래와 같다.

- *TCP NewReno*<sup>39)</sup>: AIMD (additive increase multiplicative decrease)를 기반으로 동작하는 NewReno는 ACK를 수신할 때마다 혼잡윈도우를 1 씩 증가시키는 혼잡회피를 수행한다. 패킷 손실이 발생하면 혼잡윈도우를 절반으로 줄여 혼잡 상황에 대처한다.

NewReno의 느린 혼잡회피 메커니즘은 사용 가능한 링크의 대역폭을 충분히 이용하지 못하게 하였고 이를 해결하기 위해 더욱 공격적인 혼잡윈도우 증가 메커니즘을 가진 다양한 손실기반 혼잡제어 알고리즘이 제안되었다.

- *TCP CUBIC*<sup>40)</sup>: BIC (binary increase congestion control) 알고리즘<sup>41)</sup>을 기반으로 하는 CUBIC은

ACK가 수신될 때 동작하는 NewReno와 달리 패킷 손실이 발생한 시점으로부터 경과된 시간에 따라 3차 함수를 통해 혼잡윈도우의 크기를 증가시키는 RTT와 독립적인 혼잡제어 알고리즘이다<sup>[2]</sup>. 따라서 CUBIC은 기존 혼잡제어 알고리즘보다 더 나은 공평성을 보장하며 혼잡회피에서의 증가 속도도 빠른 편이다.

- **HighSpeed TCP**<sup>[42]</sup>: 고속 망 환경에서 기존 TCP 혼잡제어 알고리즘이 갖는 한계를 극복하고자 혼잡윈도우의 크기를 매우 크게 설계한 HighSpeed TCP는 고속의 유선망 환경에서 충분한 성능 개선을 보장한다. 혼잡윈도우 크기가 작을 때는 NewReno와 동일하게 동작하지만, 사전에 정의된 임계값을 초과하면 혼잡윈도우를 빠르게 증가시켜 높은 BDP 네트워크에 적합하도록 동작한다.

NewReno와 CUBIC이 기존 크기의 MSS로 전송할 때는 혼잡회피 구간에서의 혼잡윈도우 성장이 매우 더디며, 10~15초 및 23~30초에서 나타나는 SINR의 증가를 빠르게 쫓지 못하여 가용 대역폭을 충분히 활용하지 못한다. 하지만 MSS가 클 때는 두 혼잡제어 알고리즘의 혼잡윈도우 성장이 가속화되어 중단 간 처리량이 증가한다. 혼잡윈도우가 증가하기까지 오랜

시간이 걸리던 NewReno와 CUBIC은 큰 크기의 MSS를 통해서 혼잡윈도우를 신속하게 증가시켜서 무선 링크의 활용도를 다소 높일 수 있었다. HighSpeed TCP는 NewReno 및 CUBIC과는 다르게 mmWave 채널의 SINR 변화에 빠르게 대응하였으며, MSS와 관계없이 혼잡윈도우를 빠르게 증가시켜 높은 처리량을 달성했다.

### 3.2.4 시나리오 4: RLC 버퍼 크기와 수신 거리의 영향

UE와 연결된 mmWave 기지국의 RLC 버퍼 크기는 중단 간 성능에 영향을 미칠 수 있다. 큰 크기의 버퍼는 긴 대기열을 생성하여 지연시간의 증가를 초래할 수 있으며, 버퍼 크기가 작으면 잦은 패킷 손실에 의한 처리량 저하 문제가 발생할 수 있다. 시나리오 4에서는 RLC 버퍼 크기와 UE의 수신 거리가 중단 간 성능에 미치는 영향을 확인하였다.

시나리오 4의 실험은 시나리오 1의 <그림 3>과 같이 전파 방해물 또는 건축물이 존재하지 않는 오픈 스페이스 환경을 고려하였으며, UE가 75, 100, 125, 150 m 거리에 위치할 때 mmWave 기지국의 RLC 버퍼 크기에 따른 처리량 및 RTT의 변화를 <그림 10>을 통해 나타냈다.

RLC 버퍼 크기가 1 MB일 때 UE의 거리가 멀어짐에 따라 처리량은 큰 폭으로 감소하지만, 버퍼 크기가 비교적 작으므로 RTT가 낮게 유지됨을 확인할 수 있다. UE가 100 m 및 125 m에 위치할 때는 RLC 버퍼의 크기 증가가 처리량 개선에 영향을 미쳤지만, UE 거리가 더욱 멀어진 경우에는 처리량 향상 정도가 미미했다. 하지만 UE의 수신 거리 증가와 더불어 RLC 버퍼 크기가 충분히 커졌을 때는 bufferbloat 문제가 발생하여 대기 지연으로 RTT가 과도하게 증가

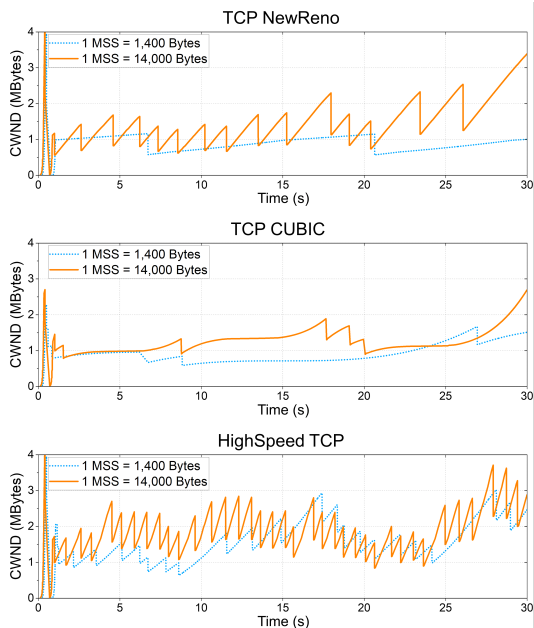


그림 9. MSS에 따른 TCP 혼잡윈도우 변화  
Fig. 9. TCP cwnd changes according to MSS

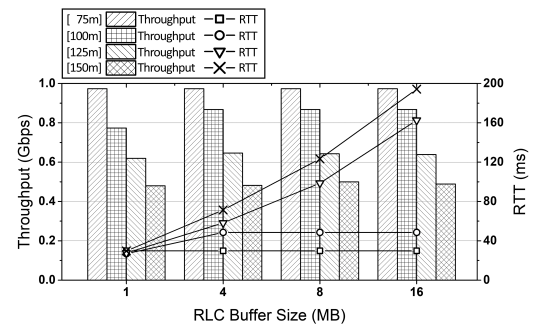


그림 10. 거리와 RLC 버퍼 크기에 따른 TCP 성능  
Fig. 10. TCP performance according to distance and RLC buffer size

하였다. 본 실험을 통해 RLC 버퍼 크기의 증가는 처리량의 개선보다는 RTT의 과도한 증가를 초래할 수 있으므로 최적의 RLC 버퍼 크기를 결정할 필요가 있음을 알 수 있다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 5G mmWave 셀룰러 망에서 TCP가 겪을 수 있는 문제에 대해 살펴보고 시뮬레이션 실험을 통해 그 원인을 분석하였다. 이동통신 네트워크에서의 성능 향상을 위해 설계 및 적용된 링크 계층 재전송 메커니즘은 상위 계층인 TCP가 무선 채널의 상태를 알지 못하도록 숨기는 역할을 했고, 링크의 상태를 모르는 TCP 호스트는 과도한 데이터를 전달해 RTT의 증가를 초래하였다. mmWave 링크를 이용하는 TCP의 처리량 증가와 RTT 감소를 동시에 이루기 위해서는 전송계층 프로토콜이 실제 mmWave 채널의 상태를 정확히 파악할 수 있어야 한다.

mmWave 대역의 큰 변동성은 과도한 대기 지연을 유발할 수 있으며 이를 해결하기 위해서는 RLC 버퍼에 대기열 관리 기법이 적용될 수 있다. 하지만 대기 지연을 줄이기 위해 적용된 AQM 기법은 TCP가 혼잡원도우를 줄이게 하여 처리량이 감소할 수 있다. 기존의 혼잡제어 알고리즘으로는 감소한 혼잡원도우를 mmWave 채널의 최대 대역폭까지 증가시키는 데 오랜 시간이 걸린다. 단순히 MSS를 크게 설정한다면 혼잡원도우를 빠르게 증가시킬 수 있지만, TCP 호스트에 의해 MSS가 결정되는 것은 아니며 통신 매체에 따라 달라지는 MTU에 의해 그 크기가 결정된다. 혼잡원도우의 증가 속도가 빠른 혼잡제어 알고리즘을 적용함으로써 중단 간 처리량이 향상될 수 있지만 mmWave 링크의 가용 용량을 완전히 활용하기 위해서는 새로운 느린 시작 및 혼잡회피 기법을 가진 혼잡제어의 설계가 필요하다.

적절하지 않은 RLC 버퍼 크기는 buffer overflow 또는 bufferbloat 문제를 일으켜 처리량이 줄어들거나 지연시간이 증가할 수 있다. 최적의 RLC 버퍼 크기를 결정하고 적절한 대기열 관리 정책을 선택하는 것은 5G mmWave 네트워크에서의 처리량과 대기 지연 사이의 균형을 보장할 수 있는 열린 연구 주제이다.

mmWave 링크를 이용하는 중단 간 연결의 신뢰성 향상과 처리량 증가를 위한 MPTCP 지원 연구가 수행될 수 있으며 다중경로의 사용에 따라 mmWave 환경에 적합한 새로운 coupled 혼잡제어 및 스케줄러 연구가 이어질 수 있다. 또한, 끊임없는 이동성을 지원

하기 위한 핸드오버 연구와 높은 이동성 시나리오에서 mmWave 링크를 지나는 TCP에 관한 연구는 아직 초기 단계에 머물러 있으며 더욱 많은 연구가 필요하다.

#### References

- [1] J. Postel, "Transmission Control Protocol," RFC 793, IETF, 1991. [Online]. Available: <https://tools.ietf.org/html/rfc793>.
- [2] Y. J. Song, G. H. Kim, and Y. Z. Cho, "Performance evaluation between TCP congestion control algorithms," *J. KICS*, vol. 44, no. 11, pp. 2102-2113, 2019.
- [3] M. Polese, R. Jana, and M. Zorzi, "NGMN view on 5G architecture," in *Proc. IEEE 81st Veh. Technol. Conf.*, pp. 1-5, May 2015.
- [4] Samsung, "5G 국제 표준의 이해," 2018. [Online] Available: [https://images.samsung.com/is/content/samsung/p5/global/business/networks/insights/white-paper/who-and-how\\_making-5g-nr-standards/who-and-how\\_making-5g-nr-standards\\_KR.pdf](https://images.samsung.com/is/content/samsung/p5/global/business/networks/insights/white-paper/who-and-how_making-5g-nr-standards/who-and-how_making-5g-nr-standards_KR.pdf).
- [5] J. S. Lu, D. Steinbach, P. Cabrol, and P. Pietraski, "Modeling human blockers in millimeter wave radio links," *ZTE Commun.*, vol. 10, no. 4, pp. 23-28, Dec. 2012.
- [6] J. Lorincz, Z. Klarin, and J. Ozegovic, "A comprehensive overview of tcp congestion control in 5g networks: Research challenges and future perspectives," *Sensors*, vol. 21, Jun. 2021.
- [7] Y. Ren, W. Yang, X. Zhou, H. Chen, and B. Liu, "A survey on TCP over mmWave," *Comput. Commun.*, vol. 171, pp. 80-88, Feb. 2021.
- [8] B. Hindawi and A. S. Abbas, "Congestion control techniques in 5G mm wave networks: A review," in *Proc. 1st Int. Conf. Info. Technol. and Sci.*, pp. 305-310, Apr. 2021.
- [9] R. Poorzare and A. C. Auge, "Open trends on TCP performance over urban 5G mmWave networks," in *Proc. 17th ACM Symp. Perform. Eval. Wireless Ad Hoc, Sensors, Ubiquitous Netw.*, pp. 85-92, Nov. 2020.

- [10] R. Poorzare and A. C. Auge, "Challenges on the way of implementing TCP over 5G networks," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 176393-176415, Oct. 2020.
- [11] R. Poorzare and A. C. Auge, "How sufficient Is TCP when deployed in 5G mmWave networks over the urban deployment?," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 36342-36355, Mar. 2021.
- [12] M. Zhang, et al., "Transport layer performance in 5G mmWave cellular," in *Proc. IEEE INFOCOM Wkshp.*, pp. 730-735, Apr. 2016.
- [13] M. Polese, R. Jana, and M. Zorzi, "TCP and MP-TCP in 5G mmWave networks," *IEEE Internet Computing*, vol. 21, no. 5, pp. 12-19, Sep. 2017.
- [14] J. Gettys and K. Nichols, "Bufferbloat: Dark buffers in the internet," *ACM Queue*, vol. 9, no. 11, 2011.
- [15] B. Nguyen, et al., "Towards understanding TCP performance on LTE/EPC mobile networks," in *Proc. 4th Wkshp All Things Cellular: Oper., Appl., and Challenges*, pp. 41-46, 2014.
- [16] R. Li, M. Shariat, and M. Nekovee, "Transport protocols behaviour study in evolving mobile networks," in *Proc. Int. Symp. Wireless Commun. Syst.*, pp. 456-460, 2016.
- [17] 3GPP, "TR 38.913, Study on Scenarios and Requirements for Next Generation Access Technologies, V14.1.0," 2017.
- [18] W. Roh, et al., "Millimeter-wave beamforming as an enabling technology for 5g cellular communications: Theoretical feasibility and prototype results," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 2, pp. 106-113, Feb. 2014.
- [19] P. J. Mateo, C. Fiandrino, and J. Widmer, "Analysis of TCP performance in 5G mm-wave mobile networks," in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun.*, pp. 1-7, May 2019.
- [20] A. Ford, C. Raiciu, M. Handley, and O. Bonaventure, "TCP extensions for multipath operation with multiple addresses," RFC 6824, IETF, 2013. [Online]. Available: <https://tools.ietf.org/html/rfc6824>.
- [21] A. Ford, C. Raiciu, M. Handley, S. Barre, and J. Iyengar, "Architectural Guidelines for Multipath TCP Development," RFC 6182, IETF, 2011. [Online]. Available: <https://tools.ietf.org/html/rfc6182>.
- [22] G. H. Kim, Y. J. Song, I. Mahmud, and Y. Z. Cho, "Adaptive decrease window for BALIA (ADW-BALIA): Congestion control algorithm for throughput improvement in nonshared bottlenecks," *Electron.*, vol. 10, no. 3, pp. 1-20, Jan. 2021.
- [23] Q. Peng, A. Walid, J. H. Hwang, and S. H. Low, "Multipath TCP: Analysis, design, and implementation," *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 24, no. 1, pp. 596-609, Feb. 2016.
- [24] A. Srivastava, F. Fund, and S. S. Panwar, "An experimental evaluation of low latency congestion control for mmWave Links," in *Proc. IEEE INFOCOM Wkshps.*, Jul. 2020.
- [25] M. Zhang, et al., "Will TCP work in mmWave 5G cellular networks?," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 57, no. 1, pp. 65-71, Jan. 2019.
- [26] T. Azzino, M. Drago, M. Polese, A. Zanella, and M. Zorzi, "X-TCP: A cross layer approach for TCP uplink flows in mmWave networks," in *Proc. 16th Ann. Mediterranean Ad Hoc Netw. Wkshp.*, 2017.
- [27] M. Polese, et al., "milliProxy: A TCP proxy architecture for 5G mmWave cellular systems," in *Proc. 51st Asilomar Conf. Sign., Syst., and Comput.*, 2017.
- [28] M. Pieska, A. Kassler, H. Lundqvist, and T. Cai, "Improving TCP fairness over latency controlled 5G mmWave communication links," in *Proc. 22nd Int. ITG Wkshp. Smart Ant.*, Jun. 2018.
- [29] D. Wischik, C. Raiciu, A. Greenhalgh, and M. Handley, "Design, implementation and evaluation of congestion control for multipath TCP," in *Proc. Usenix NSDI*, 2011.
- [30] W. S. Na, D. S. Lakew, J. H. Lee, and S. R. Cho, "Congestion control vs. link failure: TCP behavior in mmWave connected vehicular networks," *Future Generation Comput. Syst.*, vol. 101, pp. 1213-1222, Dec. 2019.

[31] Md. T. Hassan and Md. M. Mowla, "Investigation of TCP Performance in 5G mmWave Networks," in *Proc. IEEE Region 10 Symp.*, pp. 1688-1691, Jun. 2020.

[32] T. R. Henderson, M. Lacage, G. F. Riley, C. Dowell, and J. Kopena, "Network simulations with the ns-3 simulator," *SIGCOMM demonstration*, vol. 14, no. 14, 2008.

[33] M. Mezzavilla, et al., "End-to-end simulation of 5G mmWave networks," *IEEE Commun. Surv. & Tuts.*, vol. 20, no. 3, pp. 2237-2263, 2018.

[34] NYU Wireless, *University of Padova, ns-3 Module for Simulating mmwave-Based Cellular Systems*, [Online]. Available: <https://github.com/nyuwireless-unipd/ns3-mmwave>.

[35] *LTE-EPC Network Simulator*, [Online]. Available: [http://iptechwiki.cttc.es/LTE-EPC\\_Network\\_Simulator\\_\(LENA\)](http://iptechwiki.cttc.es/LTE-EPC_Network_Simulator_(LENA)).

[36] Centre Tecnologic de Telecomunicacions de Catalunya, *The LENA ns-3 LTE Module Documentation*.

[37] M. Polese, et al., "Improved handover through dual connectivity in 5G mmWave mobile networks," *IEEE J. Sel. Areas in Commun., special issue on Millimeter Wave Commun. for Future Mob. Netw.*, vol. 35, no. 9, 2017.

[38] K. Nichols and V. Jacobson, "Controlling queue delay," *ACM Queue*, vol. 10, no. 5, May 2012.

[39] T. Henderson, S. Floyd, S. Gurtov, and Y. Nishida, "The NewReno modification to TCP's fast recovery algorithm," RFC 6582, IETF, 2012. [Online]. Available: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc6582>.

[40] S. Ha, I. Rhee, and L. Xu, "CUBIC: A new TCP-friendly high speed TCP variants," *ACM SIGOPS Oper. Syst. Rev.*, vol. 42, no. 5, 2008.

[41] L. Xu, K. Harfoush, and I. Rhee, "Binary increase congestion control (BIC) for fast long-distance networks," in *Proc. IEEE INFOCOM Wkshps.*, vol. 4, pp. 2514-2524, 2004.

[42] S. Floyd, "HighSpeed TCP for Large Congestion Windows," RFC 3649, IETF, 2003.

[Online]. Available: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc3649>.

김 건 환 (Geon-Hwan Kim)



2015년 2월 : 경북대학교 전자공학부 졸업  
 2017년 2월 : 경북대학교 전자공학부 석사  
 2017년 3월~현재 : 경북대학교 전자전기공학부 박사과정

<관심분야> 차세대 이동 네트워크, 드론 ICT 융합 기술, TCP 혼잡제어, MPTCP 혼잡제어

[ORCID:0000-0003-2739-8939]

서 원 경 (Won-Kyeong Seo)



2005년 : 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 졸업  
 2007년 : 경북대학교 전자공학 석사  
 2012년 : 경북대학교 전자공학 박사  
 2012년~2014년 : 지웰주식회사

대표이사

2015년~현재 : 영진전문대학교 국방전자통신전공 교수

<관심분야> 차세대 이동 네트워크, 무선 에드혹 네트워크, 이동성 관리 기술, 차세대 전송 계층 프로토콜

[ORCID:0000-0001-5920-4858]

조 유 제 (You-Ze Cho)



1982년 : 서울대학교 전자공학과 졸업

1983년 : 한국과학기술원 전기전자공학 석사

1988년 : 한국과학기술원 전기전자공학 박사

1989년~현재 : 경북대학교 전자공학부 교수

1992년~1994년 : Univ. of Toronto in Canada, 객원 교수

2002년~2003년 : NIST(미국국립표준연구소) 객원연구원

<관심분야> 차세대 이동 네트워크, 무선 애드혹 네트워크, 이동성 관리 기술, 차세대 전송 계층 프로토콜

[ORCID:0000-0001-9427-4229]