

다중 무선 이중망 기지국에서 이중 연결성 환경의 PDCP 재정렬 시간 연구

김 영 균*, 김 상 호^o

A Study of PDCP Reorder Time in Dual Connectivity in Multiple Wireless Heterogeneous Base Stations

Young-Gyun Kim*, Sang-Hyo Kim^o

요 약

최근 5G NR(New Radio) 무선통신이 본격적으로 상용화됨에 따라 사용자들이 더 빠른 무선 접속과 더 높은 데이터 처리량(throughput)을 요구하고 있다. 기지국 측면에서 더 높은 데이터 처리량을 지원하기 위해서는 이중 연결성(dual connectivity) 기능이 필수적이다. 이중 연결성 기능은 필연적으로 수신 단에서 패킷(packet)을 재정렬해야 한다. 또한, 재정렬 타이머의 성질에 의해 재정렬 시간이 만료되었을 때까지 수신하지 못한 패킷에 대해서는 손실(loss)로 판단하게 되며 이 손실은 데이터 처리량의 저하로 나타나게 된다. 본 논문에서는 더 높은 데이터 처리량을 순간적인 감소 없이 안정적으로 지원하기 위한 재정렬 시간 최적화 방법을 제안하고 모의실험 결과를 통해 제안기술의 성능을 보인다.

키워드 : 이중 연결성 환경, 재정렬 시간

Key Words : 5G NR, Dual connectivity, reorder timer

ABSTRACT

Recently, as 5G NR(New Radio) wireless communication has been commercialized in earnest, users are demanding faster wireless access and higher data throughput. In order to support higher data throughput from the base station side, a dual connectivity function is essential. The dual connectivity function inevitably requires reordering of packets at the receiving end. In addition, due to the nature of the reordering timer, a packet that is not received until the reordering time expires is determined as a loss, and this loss appears as a decrease in data throughput. In this paper, we propose a reordering time optimization method to support higher data throughput without instantaneous reduction, and show the performance of the proposed technology through simulation results.

I. 서 론

최근 5G NR(New Radio) 무선통신이 본격적으로

상용화됨에 따라 사용자들이 더 빠른 무선 접속과 더 높은 데이터 처리량(throughput)을 요구하고 있다. 기지국 측면에서 더 높은 데이터 처리량을 지원하기 위

* First Author : College of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University, kafka0401@naver.com, 정회원

^o Corresponding Author : College of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University, iamshkim@skku.edu, 종신회원

논문번호 : 202105-114-A-RN, Received May 27, 2021; Revised July 23, 2021; Accepted August 12, 2021

해서는 4G LTE(Long Term Evolution)와 5G NR의 무선 구간을 동시에 사용하는 이중 연결성(dual connectivity) 기능이 필수적이다. NSA(Non Stand Alone)의 형태에서 이중 연결성 기능을 사용하지 않고 5G NR의 무선 구간만을 사용하는 경우에는 이중 연결성을 사용하는 경우보다 현저히 더 낮은 데이터 처리량을 지원할 수밖에 없다. 이중 연결성 기능은 필연적으로 수신 단에서 패킷(packet)을 재정렬 해야 한다. 또한, 재정렬 타이머의 성질에 의해 재정렬 시간이 만료되었을 때까지 수신하지 못한 패킷에 대해서는 손실(loss)로 판단하게 되며 이 손실은 대부분의 어플리케이션(application)에서 사용하고 있는 TCP(Transmission Control Protocol)단에서 데이터 처리량의 저하로 나타나게 된다.

본 논문에서는 더 높은 데이터 처리량을 순간적인 감소 없이 안정적으로 지원하기 위한 재정렬 시간 최적화 방법을 제안하고 모의실험 결과를 통해 제안기술의 성능을 보인다. 모의실험을 위한 모델링 방법으로 각 계층에서 겪을 수 있는 지연 상황에 대해서 지연시간을 모델링 하여 단말(UE)에서 수신 예상 지연을 계산하는 것으로 시스템 모델링을 하였다. 참고논문[1]을 통해 핸드오버(handover) 상황에 적용할 수 있는 핸드오버 지연에 대해서 셀 당 단말수에 대한 확률 변수로 나타낼 수 있다는 것에 착안하여, 이를 통해 재정렬 시간도 셀 당 단말수에 대한 확률 변수로 나타낼 수 있다. 따라서 셀 당 단말수에 대한 outage 확률을 기준으로 적절한 재정렬 시간을 제시하여 모의실험을 진행한다.

II. 본 론

2.1 이중 연결성과 재정렬 시간

2.1.1 이중 연결성

5G NR에서 이중 연결성 기능은 더 높은 데이터 처리량으로 NSA를 지원하기 위해 필수적인 기능이다. 여기서 NSA는 4G core network를 사용하며 4G signaling control로 동작하여 5G data 경로를 지원하는 방법이다. 이는 5G의 Air 자원을 사용하면서 유선 core 망은 4G를 사용하는 완전한 5G를 지원하기 전 과도기적인 형태이다. 각국의 통신사에서 상호 운용성 시험의 문제와 비용 절감을 위해 대부분 채택하고 있다

NSA architecture에서 이중 연결성 기능의 PDCP(Packet Data Convergence Protocol)는 이중의 경로로 패킷을 분배하여 송신하고 수신하여 조합하는

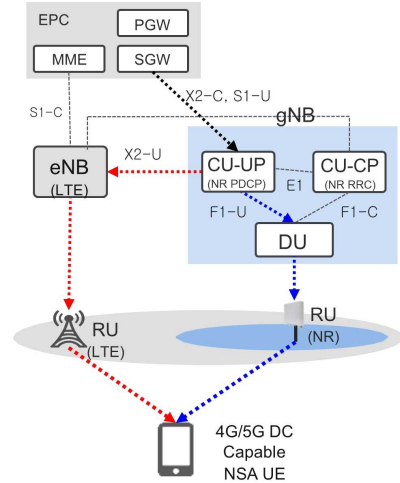


그림 1. NSA(Non StandAlone)기반 4G 기지국과 5G CU-DU 분배형 기지국의 이중 연결성
Fig. 1. Dual connectivity between NSA (Non StandAlone) based 4G base station and 5G CU-DU distributed base station

layer로써 높은 데이터 처리량을 위해서 가장 중요한 계층이다. 4G LTE에서의 PDCP는 IP 헤더 압축, 압축화 및 정상성 보호 등을 담당하였으나, 5G NR PDCP에서는 이중 연결성을 지원하면서 송신 PDCP는 패킷 송신 시 일련 번호(sequence number) 기준으로 분배하고 수신 PDCP는 수신 시 일련 번호 순으로 재정렬 기능을 수행한다. Downlink 기준으로 단말의 수신 PDCP는 4G LTE/5G NR 무선 상황에 의해서 비순차적 일련 번호의 패킷을 수신할 수 있다. 수신된 비순차적 일련 번호의 패킷들은 단말에 설정된 PDCP 재정렬 타이머(PDCP Reordering timer)만큼 대기한다. 만약 비 순차적 일련 번호의 패킷이 설정된 PDCP 재정렬 타이머 안에 수신되지 못한다면, PDCP 재정렬 타이머는 만료되며 수신되지 못한 패킷을 제외하고 현재까지 수신한 패킷을 상위 계층으로 송신한다.

2.1.2 재정렬 시간

비 순차적 일련 번호의 패킷을 수신 시 설정된 PDCP 재정렬 타이머가 시작되고, 비 순차적 일련 번호를 순차적으로 만들어줄 패킷을 수신하였을 때 PDCP 재정렬 타이머를 재설정하게 된다. 설정된 PDCP 재정렬 타이머만큼 대기하여도 비 순차적 일련 번호를 순차적으로 만들어줄 패킷을 수신하지 못하였을 때는 PDCP 재정렬 타이머를 만료하고 현재까지 수신된 패킷을 상위 계층으로 전달하게 된다. 이 때, 대부분의 응용프로그램에서 사용하는 TCP protocol

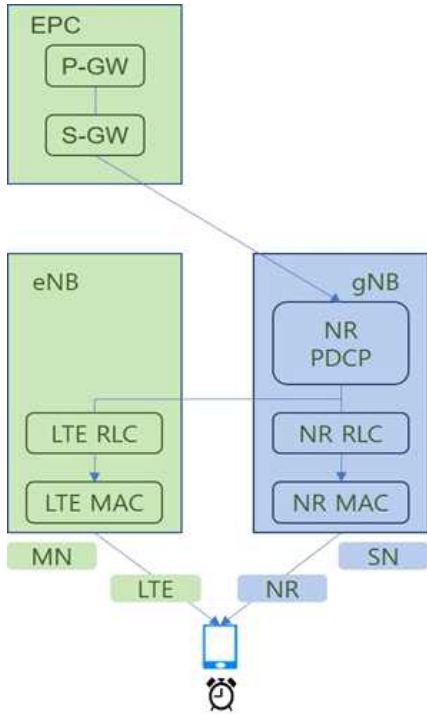


그림 2. NSA(Non StandAlone)기반 4G 기지국과 5G 통합 기지국의 이중 연결성
Fig. 2. Dual connectivity between NSA(Non StandAlone) based 4G base station and 5G integrated base station

의 알고리즘은 TCP 수신 측에서는 비어 있는 패킷을 손실로 판단하게 되고, TCP 송신 측으로 해당 패킷을 받지 못하였다는 TCP ACK를 계속 보내게 된다. 이후 TCP 송신 측에서는 중복된 3개의 3개의 TCP ACK(3-Duplication ACK)을 수신하였을 때, TCP 혼잡제어 알고리즘을 이용하여 혼잡 윈도우(congestion window)를 줄이는 동작을 하고, 이는 데이터 전송량

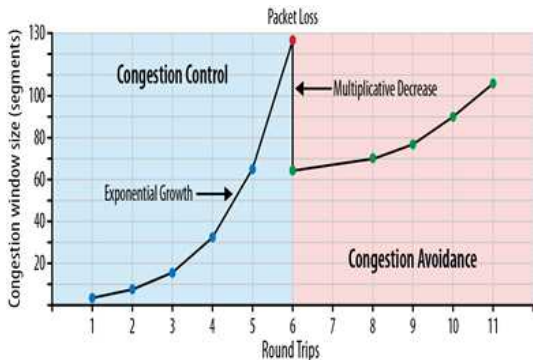


그림 3. 패킷 손실로 인한 TCP 혼잡 윈도우 변화
Fig. 3. TCP congestion window size variation due to packet loss

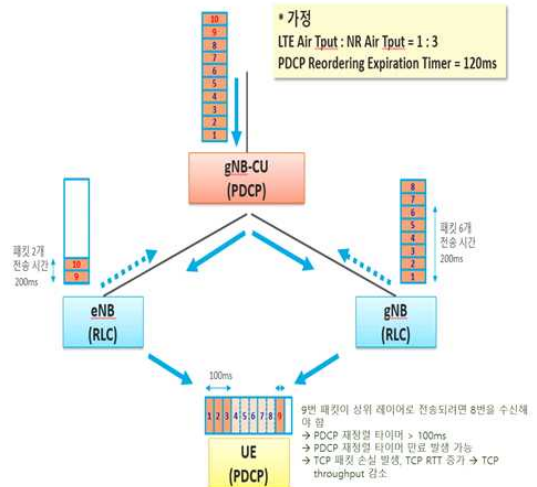


그림 4. 이중 연결성의 패킷 분배에 따른 PDCP 재정렬 시간 만료 예시
Fig. 4. Example of PDCP reordering timer expired according to packet distribution of dual connectivity

의 저하를 가져오게 된다. PDCP 재정렬 타이머를 작게 설정하여 만료되는 경우 지연 패킷을 수신하지 못하여 데이터 처리량이 감소하게 된다. 또한, 타이머를 크게 설정하면 이미 손실된 패킷을 위해 불필요한 대기과 지연이 발생할 수 있다.

PDCP 재정렬 타이머를 작게 설정하여 비 순차적인 일련번호를 복구하기 전에 PDCP 재정렬 타이머가 만료되면 지연 패킷을 수신하지 못하게 된다. TCP 혼잡제어 알고리즘은 지연 패킷을 손실 패킷으로 판단하여 TCP 송신 측에서 설정하는 혼잡 윈도우 (Congestion window)를 감소시키고 이에 따라 데이터 처리량이 감소하게 된다. 또한, 타이머를 크게 설정하게 되면 손실 패킷에 대한 대기에 의한 평균 지연 시간이 길어지게 된다. TCP 프로토콜 상 RTO(Retransmission Time Out) 값이 존재하여, TCP RTO 값만큼 ACK를 수신하지 못한다면 TCP 송신 측에서는 혼잡 윈도우를 감소시키는 동작을 하므로 재정렬 타이머는 TCP RTO 값보다는 작게 설정해야 한다. 마지막으로 재정렬 타이머는 단말의 버퍼(buffer), 메모리와 직접적으로 연관되어 있다.

2.2 데이터 처리량 저하의 원인 분석

2.2.1 필드 테스트 분석

필드 테스트 결과 가입자의 체감 품질 저하의 큰 요인 중 하나는 PDCP 재정렬 타이머 만료로 인한 TCP 패킷 손실이다. 가입자 품질 측정을 위한 필드

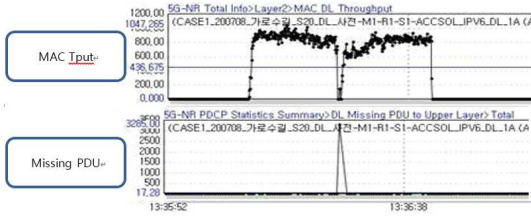


그림 5. Missing PDU 발생과 MAC 계층 데이터 처리량 감소 단말 로그
 Fig. 5. UE log of missing PDU occurrence and MAC layer data throughput reduction

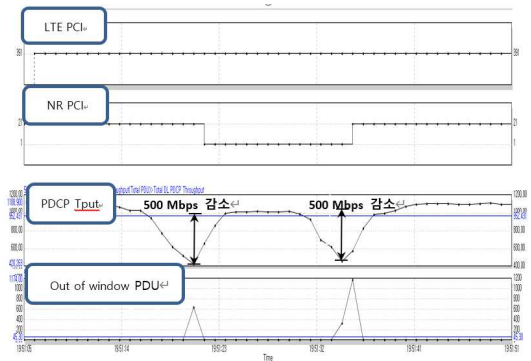


그림 6. Out of window PDU 발생과 PDCP 계층 데이터 처리량 감소 단말 로그
 Fig. 6. UE log of out of window PDU occurrence and PDCP layer data throughput reduction

테스트를 주기적으로 수행하였고, 그림 5와 6은 필드 테스트의 단말로그이다. PDCP 재정렬 타이머 만료는 단말로그에서 각 계층의 데이터 처리량 저하로 확인할 수 있다. 패킷 손실은 PDCP 계층에서 “Missing PDU to upper layer”와 “Out of window PDU”의 값에서 확인 가능하다. 그림 5의 로그는 Missing PDU 발생과 MAC 계층 데이터 처리량 감소 로그이다. Missing PDU to upper layer는 PDCP 계층에서 상위로 패킷을 송신할 때 일련번호 기준으로 송신하지 못한 패킷의 수이며, Out of window PDU는 재정렬 시간 만료 후 수신 윈도우 밖의 수신된 패킷의 수이다.

그림 6의 로그는 Out of window PDU 발생과 PDCP 계층 데이터 전송량 감소 로그이다. NR PCI(Physical Cell ID)가 변하였기 때문에 NR 핸드오버를 수행한 것을 알 수 있다. NR 핸드오버 시점에 Out of window PDU가 급격히 증가하였고, 이것은 PDCP layer에서 TCP layer로 송신할 때 일부 TCP 패킷을 손실하였다는 것을 의미한다. 따라서 PDCP 데이터 처리량이 약 500Mbps 정도 급락한 것을 관찰할 수 있다.

대부분의 PDCP 재정렬 시간의 만료가 발생하는 시점은 4G LTE 핸드오버 시점이거나, NR 핸드오버 시점에서 나타난다. 그 이유는 NSA 이중 연결성으로 서비스를 받고 있는 경우 PDCP 송신 측에서 각 벤더의 고유의 패킷 분배 알고리즘으로 패킷의 일련 번호 순서대로 송신할 것이고 이중 연결을 구성하는 각 경로들의 무선 상황이 동일 할 수 없기 때문에 필연적으로 PDCP 수신 측에서는 수신된 패킷의 비 순차적인 일련 번호가 필연적으로 발생할 수밖에 없다. 이 상태에서 순차적으로 만들어 줄 수 있는 패킷을 수신하지 못하는 핸드오버 구간으로 이동하였을 때, PDCP 재정렬 타이머가 충분히 크지 않다면 재정렬 타이머의 만료가 발생할 가능성이 높다.

2.3 재정렬 시간의 최적화 방법 제안

2.3.1 PDCP 재정렬 타이머 모델링

2절에서는 이중 연결성 환경에서 재정렬 시간의 최적화 필요성에 대해서 알아보았다. 이에 따라 최적화 방법에 대해 제안하고자 한다. PDCP 재정렬 타이머에 대한 모델링을 하면 기지국 PDCP에서 패킷을 송신할 때, 각 계층에서 겪을 수 있는 지연 상황에 대해서 모델링 하여 단말에서 수신 예상 지연을 계산한다.

- 1) PDCP-RLC(Radio Link Control) Layer 송신 지연: Target buffering time
- 2) RLC layer 재전송 지연: ARQ(Auto Repeat reQuest) delay, RLC 재전송 1% 가정
- 3) MAC(Media Access Control) layer 재전송 지연: HARQ(Hybrid Auto Repeat reQuest) delay, Initial Tx BLER(Block Error Rate) 10% 가정
- 4) F1, X2 Link delay: 평균 2.5ms (1~5ms, 국내 측정 결과)
- 5) 핸드오버 interruption time: 참조 논문[1]

$$Expected\ Delay(E_d) = Target\ buffering\ time + HARQ\ de\ lay + ARQ\ de\ lay + Link\ de\ lay + Handover\ Interruption\ time \quad (1)$$

각각의 계층에서 겪는 지연에 대해서 참조 논문[2]의 값과 각종 타이머 값은 가정하여 수식을 정리한다.

$$ARQ\ de\ lay = 0.01 \times RLC\ status\ prohibit\ timer \approx 0.25ms \quad (2)$$

$$Link\ de\ lay \approx 2.5ms \quad (3)$$

식(2)는 RLC layer에서 수행하는 ARQ 지연으로 RLC 재전송을 1%, RLC status prohibit 타이머를 25ms로 가정하였다. 식(3)은 PDCP Layer에서 패킷을 분배하여 RLC Layer까지 도달하는 Ethernet link 지연으로 국내 측정 평균으로 2.5ms를 가정하였다. HARQ initial Tx BLER 10% 가정하여 전체 지연의 1.1배로 근사하고, 핸드오버 interruption time을 참조 논문[1]의 표현으로 대체하여 표현하면 식(4)와 같다

$$Expected\ Delay(E_D) = 1.1 \times (Handover\ Interruption\ time + 2.75) \quad (4)$$

참조 논문[1]에 따르면 핸드오버 interruption time은 셀 당 단말수(x)의 정규분포로 식(5)와 같이 모델링 할 수 있고, 평균적으로 총 핸드오버 지연의 21.08%의 비율을 차지한다. 이를 통해 재정렬 시간도 정규분포로 표현 수 있다. 재정렬 시간의 분포로부터 희망 outage 확률에 대한 재정렬 타이머를 구할 수 있다. 이를 정리하면 식(6)과 같다. 또한 식(6)을 분포를 도식하면 아래 그림 7과 같다.

$$f_{HIT}(x) \sim N(\mu, \sigma^2) = N\{0.39x + 16.34, (0.12x + 0.27)^2\} \quad (5)$$

$$f_{TReord}(x) = Expected\ delay(E_D) \sim N\{1.1 \times (\mu + 2.75), (1.1 \times \sigma)^2\} = N\{0.429x + 20.099, (0.132x + 0.297)^2\} \quad (6)$$

$x = \text{umber of UE/cell/min}$

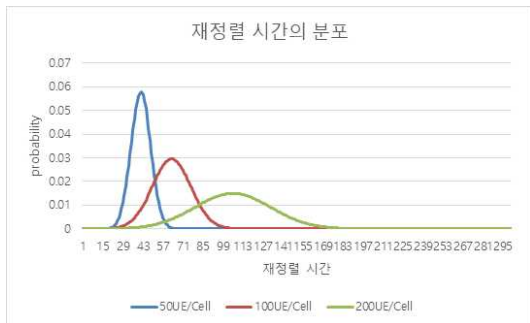


그림 7. 셀 당 단말수 별 재정렬 시간의 분포
Fig. 7. Distribution of reordering time by number of UEs per cell

2.3.2 셀 당 단말수의 통계 분석

위의 식(6)에서 셀 당 단말수에 따라 PDCP 재정렬 타이머에 대한 식을 유도하였다. 셀 당 단말수는 크게 2가지 종류의 단말로 구분할 수 있다. 현재 단말을 사

표 1. 사업자의 셀 당 RRC connected 단말 통계
Table 1. RRC connected UE statistics per cell by operator

| | Operator A | Operator B | Operator C |
|------|------------|------------|------------|
| eNB수 | 75 | 105 | 99 |
| 셀 수 | 1,024 셀 | 1,641 셀 | 565 셀 |
| Mean | 42.67 | 54.45 | 43.37 |
| Std | 53.85 | 54.09 | 66.51 |

용하지 않고 있지만 언제든지 연결이 가능한 RRC (Radio Resource Control) idle 단말과 현재 기지국과 연결되어 통신 중인 RRC connected 단말로 나눌 수 있다. RRC connected 단말이 기지국 성능에 영향을 미치기 때문에 특정 사업자의 셀 당 RRC connected 단말에 대한 일주일 통계를 취득하여 분석하였다.

경험적으로 셀 내의 RRC connected 단말은 Lognormal 분포를 따르며, 아래 수식 (7)으로 Lognormal 분포의 파라미터를 구할 수 있다. 구해진 파라미터를 통해 그래프를 그리면 그림 8과 9와 같다. 그림 9에서는 95% 포함하는 것으로 임의 산정하였다.

$$\mu = \ln\left(\frac{m^2}{\sqrt{s^2 + m^2}}\right), \sigma^2 = \sqrt{\ln\left\{1 + \left(\frac{s}{m}\right)^2\right\}} \quad (7)$$

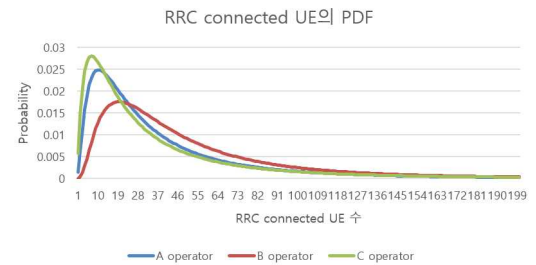


그림 8. 사업자 별 셀 당 RRC connected 단말 분포(PDF)
Fig. 8. Distribution of RRC connected UEs per cell by operator (PDF)

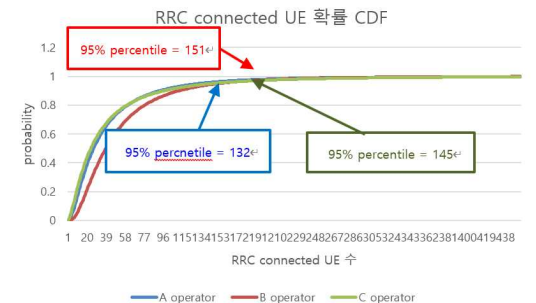


그림 9. 사업자 별 셀 당 RRC connected 단말 분포(CDF)
Fig. 9. Distribution of RRC connected UEs per cell by operator (CDF)

Lognormal 분포로 분석해보면 95% 확률을 만족하는 RRC connected 단말은 150명으로 근사 할 수 있다.

150명의 기준으로 식(6)에서 구한 재정렬 시간의 분포를 구해보면 아래의 분포이고, 95% tile, 99% tile 각각 118ms, 132ms이다.

III. 시뮬레이션

시뮬레이션 수행할 2가지 case를 고려한다. 식(5)에서 구한 핸드오버 interruption time과 식(6)에서 구한 재정렬 시간으로 PDCP 재정렬 타이머 만료 없는 case에 대한 값을 정한다. PDCP 재정렬 타이머 만료 있는 case에 대해서는 핸드오버 interruption time보다 작은 임의의 값으로 시뮬레이션을 진행하였다. 이를 통해 핸드오버 시도 시 재정렬 시간 만료가 없는지 확인하고 시뮬레이션 전 구간 평균 데이터 처리량과 핸드오버 구간 평균 데이터 처리량을 비교한다.

Riverbed Modeler(OPNET)을 통하여 시뮬레이션 검증을 진행하였다. 시뮬레이션 환경은 다음과 같다

표 2. 셀 당 단말수의 따른 핸드오버 interruption time과 PDCP 재정렬 타이머
Table 2. Handover interruption time and PDCP reordering timer according to the number of UEs per cell

| | PDCP 재정렬 시간 만료 없는 case | | | PDCP 재정렬 시간 만료 있는 case | | | |
|---------------------------|------------------------|------|------|------------------------|------|------|------|
| | 단말수 | 150명 | 200명 | 300명 | 150명 | 200명 | 300명 |
| 핸드오버 interruption time(s) | | 0.12 | 0.15 | 0.22 | 0.12 | 0.15 | 0.22 |
| PDCP reordering timer(s) | | 0.14 | 0.17 | 0.25 | 0.1 | 0.15 | 0.2 |

표 3. 시뮬레이션 구성 환경
Table 3. Simulation configuration environment

| | |
|------------------|--|
| Architecture | NSA, LTE FDD 20MHz, NR TDD 4:1 100MHz, 1단말 이동 시험 |
| | LTE-NR EN-DC, LTE 1cell, NR 핸드오버 case |
| | NR CU-DU separate dimension |
| Simulation 시간 | 15초 |
| 핸드오버 timing | 5.5~6.5초 구간 |
| Buffer | Full buffer model |
| Air condition | LOS-NLOS mixed |
| Channel scenario | UMi3D |

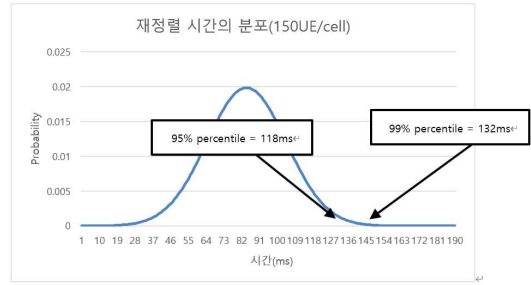


그림 10. 재정렬 시간의 분포(150단말/셀)
Fig. 10. Distribution of reordering time (150 UEs/cell)

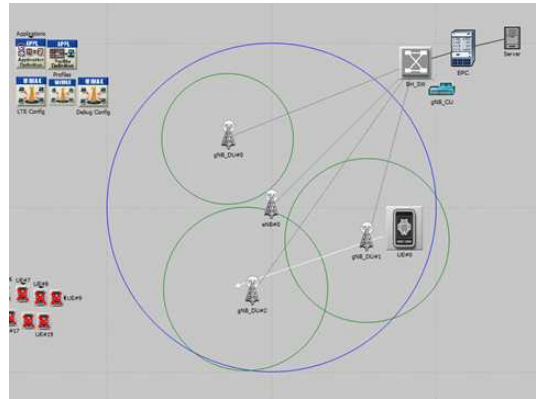


그림 11. 시뮬레이션 구성 환경
Fig. 11. Simulation configuration environment

표 4. 셀 당 단말수의 변화와 PDCP 재정렬 타이머 만료 여부 따른 데이터 처리량
Table 4. Data throughput according to the variation in the number of UEs per cell and whether the PDCP reordering timer expiration

| | PDCP 재정렬 시간 만료 없는 case | | | PDCP 재정렬 시간 만료 있는 case | | | |
|-----------------------------|------------------------|-------|-------|------------------------|----------------|----------------|-----------------|
| | 단말수 | 150명 | 200명 | 300명 | 150명 | 200명 | 300명 |
| 전체 평균 데이터 처리량 (Mbps) | | 637.5 | 637.5 | 635.8 | 634.8 (0.7% ↓) | 626.4 (1.8% ↓) | 632.9 (0.05% ↓) |
| 5.5초~6.5초 평균 데이터 처리량 (Mbps) | | 501.3 | 474.2 | 439.6 | 468.6 (6.7% ↓) | 361.3 (24% ↓) | 425.9 (3.2% ↓) |

시뮬레이션 결과를 보면 PDCP 재정렬 타이머 만료가 있는 case에 대해서 PDCP 재정렬 타이머 만료가 없는 case에 비해 전체 평균 데이터 처리량이 0.05%~1.8% 감소하였다. 특히 핸드오버 수행 구간인 5.5~6.5초 평균 데이터 처리량 비교에서는 PDCP 재정렬 타이머 만료가 있는 case는 PDCP 재정렬 타이

며 만료가 없는 case에 비해 3.2%~24%까지 감소를 보였다.



그림 12. PDCP 재정렬 타이머 만료 없는 case(cell 당 200UE)
Fig. 12. Case without expiration of PDCP reordering timer (200 UEs per cell)

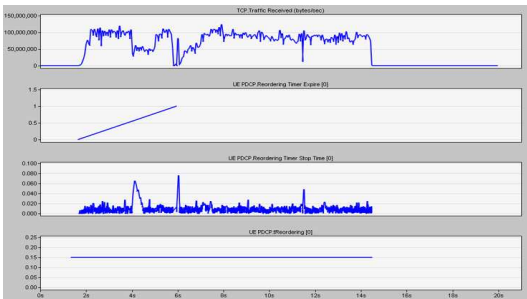


그림 13. PDCP 재정렬 타이머 만료 있는 case(cell 당 200UE))
Fig. 13. Case with expiration of PDCP reordering timer (200 UEs per cell)

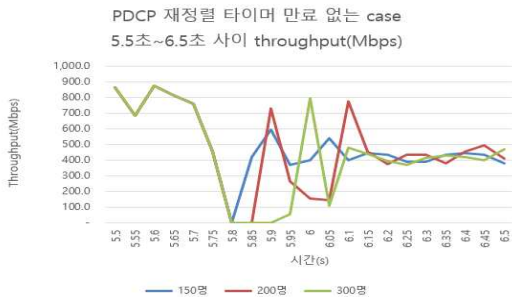


그림 14. PDCP 재정렬 타이머 만료 없는 case의 핸드오버 구간 데이터 처리량
Fig. 14. Data throughput during handover in case without PDCP reordering timer expiration

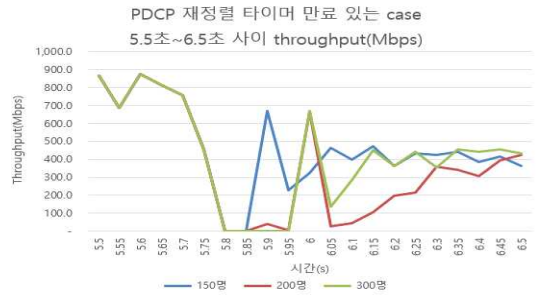


그림 15. PDCP 재정렬 타이머 만료 있는 case의 핸드오버 구간 데이터 처리량
Fig. 15. Data throughput during handover in case with PDCP reordering timer expiration

IV. 결론

본 논문에서는 이중 연결성 환경에서 발생할 수 있는 핸드오버 시점의 PDCP 재정렬 타이머 만료와 TCP 혼잡 윈도우 감소로 인한 데이터 처리량 저하를 실제 단말로그를 통해 문제 확인을 하였고, 셀 당 단말수에 대한 PDCP 재정렬 시간 식으로 표현하여 데이터 처리량 저하를 회피할 수 있는 PDCP 재정렬 시간을 수학적으로 구하였다. 이를 검증하기 위해 이중 연결성 환경에서 각 계층에서 겪을 수 있는 대해 지연 상황을 가정하여 수학적으로 구한 PDCP 재정렬 타이머가 얼마나 데이터 처리량 저하 회피에 도움이 되는지 시뮬레이션으로 확인하였다.

해당 연구에서는 핸드오버 도중 PDCP 재정렬 타이머가 리셋되는 경우에 대해서는 다루지 않았다. 이는 단말 제조사에 따라 구현 방식이 상이하기 때문에 추후에 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각한다.

References

- [1] D. Han, S. Shin, H. Cho, J.-M. Chung, D. Ok, and I. Hwang, "Measurement and stochastic modeling of handover delay and interruption time of smartphone real-time applications on LTE networks," *IEEE Commun. Mag.*, Mar. 2015.
- [2] F. Salah, et al., "Performance analysis of user plane connectivity in the 5G non-standalone deployment," *2018 IEEE GLOBECOM*, Abu Dhabi, United Arab Emirates, Dec. 2018.
- [3] D. Woo, "Split algorithm with a PDCP reordering function for LTE/mmWave dual

connectivity,” M.S. Thesis, SNU, 2018.

- [4] R. P. Antonioli, et al., “User-assisted bearer split control for dual connectivity in multi-RAT 5G networks,” *Wirel. Netw.*, vol. 26, pp. 3675-3685, Mar. 2020.
- [5] Y. Kim, “A study of PDCP reorder time in dual connectivity in multiple wireless heterogeneous base stations,” M.S. Thesis, SKKU, 2021.
- [6] *3GPP NR and NG-RAN Overall description, stage-2*, 3GPP TS 38.300, V15.8.0 Release 15, 2020.
- [7] *3GPP Packet Data Convergence Protocol (PDCP) specification*, 3GPP TS 38.323, V16.3.0, 2021.
- [8] *3GPP Radio Link Control (RLC) protocol specification*, 3GPP TS 38.322, V15.5.0, 2020.
- [9] *3GPP Medium Access Control (MAC) protocol specification*, 3GPP TS 38.321, V16.4.0, 2021.

김 상 호 (Sang-Hyo Kim)



1998년 2월 : 서울대학교 전기공학부 학사
 2000년 2월 : 서울대학교 전기공학부 석사
 2004년 2월 : 서울대학교 전자컴퓨터공학부 박사
 2004년 3월~2005년 7월 : 삼성전자 책임연구원

2006년 8월~2007년 8월 : 박사후 연구원(USC)
 2007년 9월~2011년 9월 : 성균관대학교 정보통신공학부 조교수
 2011년 10월~2017년 2월 : 성균관대학교 정보통신공학부 부교수
 2017년 2월~현재 : 성균관대학교 정보통신공학부 교수
 <관심분야> 오류정정부호, 정보이론, 부호이론, 다중 안테나 시스템

[ORCID:0000-0002-0660-5516]

김 영 균 (Young-Gyun Kim)



2013년 2월 : 성균관대학교 전자공학과 학사
 2014년 1월~현재 : 삼성전자 네트워크 사업부 연구원
 2020년 3월~현재 : 성균관대학교 전자공학과 석사

<관심분야> 전자공학, 네트워크