

이동통신망에서 저지연 상향링크 전송 기법

배덕현*, 이현석*, 이장원^o

Low Latency Uplink Transmission Scheme in Mobile Communication Networks

Duck-Hyun Bae*, Hyun-Suk Lee*, Jang-Won Lee^o

요약

현재 사용되고 있는 LTE/LTE-A 이동통신망의 성능은 일반적인 무선 통신 서비스를 제공하는데 충분히 높은 대역폭과 낮은 지연시간을 제공하고 있지만, 차세대 이동통신망의 주요 서비스가 될 가상현실, 원격 제어 등의 초저지연 서비스를 지원하기 위해서는 수 ms 수준의 낮은 지연시간이 필요하다. 그러나 LTE/LTE-A 시스템에서의 상향링크 전송은 단말이 전송에 필요한 무선자원을 획득하기 위해 기지국으로부터 자원을 할당받는 스케줄링 승인 과정이 선행되어야 한다. 이 과정은 고정적인 지연시간을 가져오고, 상향링크 전송에서 낮은 지연시간을 달성하는데 걸림돌이 된다. 따라서 본 논문에서는 이러한 스케줄링 승인 과정으로 인해 발생하는 지연시간을 줄이기 위해 새로운 상향링크 전송 방법인 Cut-in 상향링크 전송방법을 제안한다. 제안하는 상향링크 전송방법의 검증은 위해 모의실험을 수행하였으며, 이 결과를 통하여 제안하는 상향링크 전송방법이 기존 LTE/LTE-A 상향링크 전송 방법보다 낮은 지연시간을 발생시킴을 보인다.

Key Words : LTE/LTE-A, uplink transmission, uplink scheduling, low latency, cellular networks

ABSTRACT

Even though current LTE/LTE-A mobile networks provide enough high data rate and low latency to support conventional wireless services, to support ultra-low delay services, such as virtual reality and remote control, in the next generation mobile communication network, it is required to provide very low delay about several ms. However, in the uplink transmission of the LTE/LTE-A system, the process of scheduling grant is required to obtain uplink resources for uplink transmission from the eNB. The process of granting uplink resources from eNB brings additional fixed latency, which is one of the critical obstacles to achieve low delay in uplink transmissions. Thus, in this paper, we propose a novel uplink transmission scheme called Cut-in uplink transmission, to reduce uplink latency. We provide the performance of the proposed uplink transmission scheme through simulations and show the proposed uplink transmission scheme provides lower uplink transmission delay than conventional uplink transmission scheme in LTE/LTE-A mobile networks.

※ 본 연구는 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 정보통신기술진흥센터의 지원(No.B0717-16-0024, IoT 환경에서 Massive connectivity를 위한 5G 기반 저전력, 저복잡도의 전송 및 변조·부호화 원천 기술 개발)과 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(2013R1A2A2A01069053)을 받아 수행되었습니다.

※ 본 연구의 일부는 ICEIC 2017 학회에서 발표되었습니다[1].

◆ First Author : LG Electronics, karlla@yonsei.ac.kr, 학생회원

◦ Corresponding Author : Yonsei University, Department of Electrical and Electronic Engineering, jangwon@yonsei.ac.kr, 종신회원

* Yonsei University, Department of Electrical and Electronic Engineering, hs.lee@yonsei.ac.kr

논문번호 : KICS2016-06-133, Received June 21, 2016; Revised November 10, 2016; Accepted November 10, 2016

I. 서 론

3세대에서 4세대 이동통신망으로 진화하면서, 이동통신망의 성능은 급격하게 발전되었다. 그러나 이를 뛰어넘는 단말 수의 폭발적인 증가와 서비스의 다양화는 이동통신망에 더 높은 성능을 요구하고 있다^[2]. 앞으로 다가올 5세대 이동통신에서는 사람과 사람 사이의 서비스뿐만 아니라, 사람과 사물, 사물과 사물 사이의 서비스를 제공하기 위해 지금보다 낮은 지연 시간과 높은 대역폭이 요구될 것이다. 그 중에서도 증강현실, 가상현실, 원격 제어, 촉각 인터넷 등의 서비스는 빠른 전송속도보다 낮은 지연시간이 서비스 품질 향상에 있어 더 중요하다. 예를 들어, 눈으로 보며 손으로 객체를 조정하는 상황에서 10 ms 이상의 지연 시간은 문제의 소지가 있고, 도로 위의 자동차들을 platooning하거나, 운전 중 차량 안전 서비스, 자유시점 영상서비스를 위해서는 수 ms 정도의 매우 낮은 지연시간이 요구된다^[3,4].

LTE/LTE-A 이동통신에서 낮은 지연시간을 달성하기 위해서는 상향링크 지연시간을 줄이는 것이 중요하다. 상향링크 전송은 하향링크 전송과 다르게 단말이 기지국으로부터 상향링크 전송을 위한 무선자원을 획득하는 과정이 추가적으로 필요하기 때문에 더 긴 지연시간을 가지게 된다. LTE/LTE-A에서는 단말이 무선자원을 획득하기 위해서 지정된 자원 기반의 스케줄링 요청이나, 무선자원의 일부를 경쟁 기반의 무선자원으로 지정하여 랜덤 액세스(random access)를 통해 스케줄링 요청을 하는 방법이 사용된다. 이러한 자원 획득 과정은 추가적인 지연시간을 발생시키고, 초저지연 서비스의 지연시간 요구사항을 충족시키는데 큰 걸림돌이 된다. 기존의 LTE/LTE-A 이동통신에서는 상향링크 자원할당으로 인한 지연시간과 오버헤드를 줄이기 위해 준정적 스케줄링을 하나의 방법으로 제시한다^[5]. 그러나 준정적 스케줄링은 VoIP와 같은 주기적인 특징을 가지는 트래픽에서 효과적이고, 비 주기적이고 간헐적인 상향링크 전송에 적용하기는 어려움이 있다.

상향링크 전송에서 요구되는 지연시간을 줄이기 위해서 여러가지 방법들이 제시되었다. M2M(machine-to-machine) 환경에서는 단말에게 무선자원을 할당하는데 필요한 시간을 줄이기 위해서 비슷한 트래픽 특징을 갖는 단말들을 하나의 클러스터로 형성하여 상향링크 전송을 수행할 것이 예상되는 단말에게 요청이 없더라도 무선자원을 할당하는 방법을 제안되었다^[6]. 이러한 방법은 물리적인 변화(기온, 습도 등)의 변

화로 인접한 단말들이 동시에 통신하게 되는 센서네트워크 등에는 유용하지만 일반 사용자 단말에는 적용하기가 어렵다.

상향링크의 지연시간을 감소시키기 위해서 무선자원을 단말에게 할당하지 않고 단말이 경쟁 기반 방식으로 무선자원을 사용하는 방법도 연구되고 있다^[7,8]. IoT(Internet of Things), M2M 환경과 같이 작은 크기의 트래픽을 사용하는 다수의 단말이 존재하는 경우에는 경쟁 기반 방식이 효과적인 해결책이 될 수 있다. LTE/LTE-A rel. 14에서는 준정적 스케줄링 보다 유연한 자원활용을 가능케 하기 위해 PUSCH(physical uplink shared channel) 자원을 단말 하나가 아닌 여러 단말에게 할당하여 해당 단말들 사이에서 경쟁 기반으로 사용하는 방법을 제시하고 있다^[9]. 이 방법은 HARQ 재전송을 사용하기 위해 기지국에서 추가적인 연산이 필요하고, 기존의 상향링크 전송 방법을 사용하는 단말은 한정된 상향링크 자원을 사용해야 하는 단점이 있다. 경쟁 기반 방식과 유사하게 인지 무선 시스템을 적용한 동적 스펙트럼 접속(DSA, dynamic spectrum access)을 사용하여 낮은 지연시간을 획득하는 방법도 연구되고 있다^[10]. 또한 LTE/LTE-A의 랜덤 액세스 과정에 추가적으로 기회적 간섭정렬 기법을 도입하여 랜덤 액세스의 성공률을 높이거나 preamble에 전송할 데이터를 넣어 함께 보내는 방법 또한 연구되고 있다^[11,12]. 단말이 경쟁 기반으로 무선자원을 사용하는 경우 스케줄링 요청, 상향링크 승인 없이 자원을 사용하여 지연시간을 크게 줄일 수 있다^[13]. 그러나 트래픽 양이 많은 경우에는 동시에 같은 자원에 접속하는 서로 다른 단말들 사이에서 충돌이 발생하여 오히려 더 큰 지연시간이 발생할 수 있으며 높은 전송에러가 발생할 수 있다. 따라서 경쟁 기반 방식의 자원사용을 통한 상향링크 전송 방법은 낮은 지연시간과 낮은 전송에러를 요구하는 서비스에 적용하기는 어렵다.

이 논문에서는 낮은 지연시간을 요구하는 서비스를 위한 새로운 상향링크 전송방법을 제시한다. 제시하는 상향링크 전송 방법은 기존 LTE/LTE-A 이동통신 시스템의 큰 변경 없이 몇 개의 시그널링과 새로운 자원 할당 방법을 추가하는 것으로 기존 방법보다 낮은 지연시간을 획득할 수 있다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2장에서는 LTE/LTE-A의 상향링크 전송 방법과 상향링크 지연시간에 대해 간단하게 알아보고, 이를 바탕으로 3장에서는 제안하는 저지연 상향링크 전송 방법인 Cut-in 상향링크 전송에 대해 설명한다. 4장에서는 시뮬레이션 환경을 설명하고 제안방법과

기존 방법에 대한 성능 시뮬레이션 결과와 분석을 제시하고, 마지막으로 5장에서 결론을 내린다.

II. LTE/LTE-A의 상향링크 전송 절차

본 절에서는 먼저 기존 LTE/LTE-A 시스템에서 기지국(eNB, evolved node B)에 연결된 단말(UE, user equipment)이 상향링크를 수행하는 상황을 설명한다. LTE/LTE-A 시스템에서 상향링크 전송은 일반적으로 스케줄링 요청, 상향링크 승인, 무선 전송의 세 가지의 단계를 거친다. 그림 1은 LTE/LTE-A 시스템에서 상향링크 전송의 한 예를 나타내고 있다. 각 절차에 대해 더 자세한 내용은 3GPP 표준 문서 TS 36.300^[4]에 서술되어 있다.

상향링크 전송에 필요한 첫 번째 단계는 스케줄링 요청 단계이다. 이는 단말이 기지국에게 상향링크 전송을 할 것 나타내는 스케줄링 요청 메시지를 보내 기지국이 상향링크 무선자원의 스케줄링에 해당 단말을 포함시킬 수 있도록 하는 과정이다. 스케줄링 요청 메시지를 보내는데 사용되는 무선 자원인 상향링크 요청 자원은 단말이 망에 접속할 때 기지국이 단말에게 지정하는 무선자원으로 1부터 80 서브프레임 사이의 주기를 갖는다. 만약 단말이 망에 접속하는 과정에서 스케줄링 요청 자원을 획득하지 못했다면, 랜덤 액세스 자원을 통해 스케줄링 요청 메시지를 전달할 수 있다.

상향링크 승인 단계에서 단말은 기지국으로부터 사용자 데이터의 상향링크 전송을 위한 무선자원을 할당받는다. 기지국은 스케줄링 요청 과정에서 획득한 단말정보로 단말에게 PUSCH(physical uplink shared

channel) 자원의 일부를 할당한다. 할당된 무선자원의 정보(자원위치, MCS 수준 등)는 상향링크 승인 메시지에 담겨 PDCCH(physical downlink control channel)을 통해 단말에게 전달된다.

무선 전송단계는 단말이 상향링크 승인 과정에서 얻은 자원할당 정보를 활용하여 실제로 사용자 데이터를 단말에서 기지국으로 PUSCH를 통하여 보내는 단계이다.

LTE/LTE-A에서 각 동작은 서브프레임 단위로 일어난다. 1 서브프레임은 1 ms의 시간길이를 갖는다. 전체 상향링크 전송에 발생하는 지연시간을 $latency_{TOTAL}$ 이라고 할 때, 그 값을 다음의 식 (1)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 latency_{TOTAL} &= latency_{SR} + latency_{GRANT} \\
 &\quad + latency_{TX} \\
 &= 8 + \frac{P}{2} (ms)
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

$latency_{SR}$ 은 스케줄링 요청 과정에서 발생하는 지연시간으로 스케줄링 요청 주기가 P 일 때, 평균 $P/2$ 의 크기를 갖는다. $latency_{GRANT}$ 와 $latency_{TX}$ 는 각각 상향링크 승인 과정과 무선 전송 과정에서 발생하는 지연시간의 크기로 HARQ 재전송의 간격을 고려하여 각각 4 ms로 동일한 크기를 갖는다. 따라서 상향링크 전송을 수행하는데 필요한 지연시간은 $8 + P/2$ ms로, 스케줄링 요청 주기 P 가 1에서 80사이의 값을 가지는 것을 고려할 때, 가장 작은 P 에서 평균 8.5 ms의 지연시간을 가지게 된다.

III. Cut-in 상향링크 전송방법

본 절에서는 단말이 상향링크 전송 자원을 할당 받는데 발생하는 지연시간을 감소시키기 위한 Cut-in 상향링크 전송방법을 제안한다. 자원할당으로 인한 지연시간을 줄이기 위해서는 자원을 미리 할당하거나 지속적으로 할당하는 방법이 고려될 수 있다^[5]. 그러나 상향링크 전송의 경우 단말로부터 시작되므로 기지국이 전송의 발생 시점을 특정할 수 없다. 따라서 기지국이 단말에 무선자원을 임의로 할당한다면 무선자원의 낭비가 발생할 수 있다. 만약 기지국이 단말의 상향링크 트래픽의 발생시점을 알 수 있고, 지연 없이 상향링크 자원할당을 할 수 있다고 하더라도, 상향링크 승인 메시지를 사용하는 기존 상향링크 전송 방법에서는 기지국이 4 서브프레임 이내의 무선 자원을

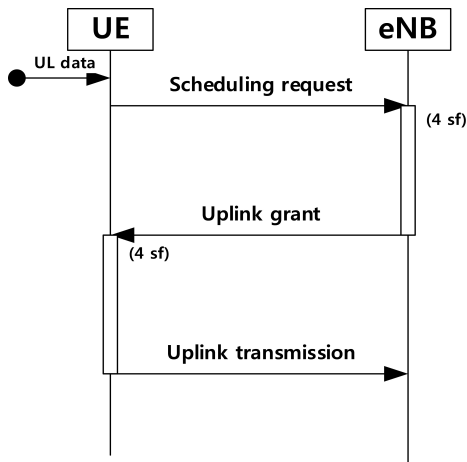


그림 1. LTE/LTE-A의 상향링크 전송 과정
Fig. 1. Uplink transmission procedure of LTE/LTE-A

단말에게 할당할 수 없다. 왜냐하면 단말이 상향링크 승인 수신 이후 4 서브프레임 이후에 무선 전송을 수행하기 때문이다.

본 논문에서는 기지국이 단말의 상향링크 트래픽을 파악하는 순간에 단말에게 4 서브프레임 이내의 자원을 할당할 수 있는 방법인 Cut-in 상향링크 전송방법을 제안하고자 한다. 이를 위해 본 절에서는 Cut-in 상향링크 전송에서 기지국이 자원을 할당하는 방법, Cut-in 상향링크 전송에서 4 서브프레임이내의 자원을 할당받았을 때 다른 단말과의 충돌을 방지하는 방법을 제시하고, 마지막으로 수식을 통해 Cut-in 상향링크 전송방법이 얻을 수 있는 성능에 대해 분석한다.

3.1 상향링크 자원 예약

여기에서는 지속적인 자원할당 방식과 동일한 수준의 지연시간을 보장하면서 자원의 낭비를 줄일 수 있는 상향링크 자원 예약(uplink resource reservation) 개념을 제시한다. 상향링크 자원 예약이란 단말이 상향링크에 사용할 무선 자원을 기지국에게 요청을 통해 미리 할당받는 것으로, 기지국으로부터 상향링크 전송에 사용할 무선 자원 할당 정보를 미리 수신한다. 단말이 상향링크를 수행하는 시점에서는 기지국에게 예약된 자원 사용에 대한 요청만을 보내고 미리 수신한 정보를 통해 별도의 자원 할당 정보를 수신하지 않고 상향링크 전송을 가능하도록 한다. 지속적인 스케줄링 방법과의 가장 큰 차이점은 단말이 자원을 사용하지 않는 경우에 기지국이 예약된 자원을 다른 단말에게 할당할 수 있어 자원의 낭비를 줄일 수 있다는 점이다.

단말이 예약 받은 자원을 사용하기 위한 요청메시지로는 LTE/LTE-A 이동통신 시스템에서 사용되는 스케줄링 요청 메시지 등을 사용할 수 있다. 스케줄링 요청 메시지가 전달되는 PUCCH의 위치는 각 단말이 망에 접속할 때 부여받는 지정된 자원이므로, 스케줄링 요청 메시지가 전달된 무선자원의 위치만으로 기지국은 스케줄링 요청 메시지를 보낸 단말의 신원을 파악하는 것이 가능하다.

그림 2은 단말이 자원을 예약하는 절차를 보여주고 있다. 단말이 RRC 연결에 사용되는 식별자인 C-RNTI를 포함한 상향링크 자원 예약 요청 메시지를 전달하면 기지국은 이에 대한 응답으로 예약가능한 상향링크 자원이 존재 여부를 전달한다. 예약가능한 상향링크 자원이 존재한다면 단말은 상향링크 자원 예약 요청을 보내고 기지국은 그 응답으로 단말에게 상향링크 자원을 할당한다. 위의 과정은 단말이 망에

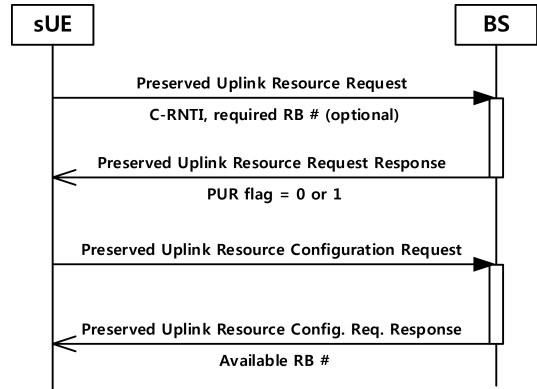


그림 2. 상향링크 자원 예약 절차
Fig. 2. Uplink resource reservation procedure

접속할 때 RRC 연결의 초기 접속과정에서 수행하는 것으로 상향링크 자원을 예약받을 수 있다. 이 과정에서 단말은 스케줄링 요청 자원의 위치와 저지연 서비스를 위한 상향링크 자원 예약 정보, 그리고 이를 사용하기 위한 변조 및 코딩 방법의 종류를 함께 할당받을 수 있다.

상향링크 자원을 예약한 단말은 자신이 사용할 무선자원에 대한 정보를 획득했기 때문에 상향링크 승인메시지를 수신하지 않고도 상향링크 전송을 수행할 수 있다. 상향링크 자원 예약은 단말이 전송시점에 겪는 무선채널의 상태에 따라 그 위치를 변경할 수 없는 지정된 자원 할당 방법이므로 단말이 사용하는 트래픽을 고려하여 일반적인 자원할당보다 낮은 수준의 변조 및 코딩 방법을 사용한다. 상향링크 자원을 예약한 단말에게 상향링크 트래픽이 발생한 경우, 단말은 예약된 자원 사용을 위해 스케줄링 요청 메시지를 전송하고, 기지국으로부터 상향링크 승인 메시지를 수신할 필요 없이 예약받은 상향링크 자원을 사용해 상향링크 전송을 수행함으로써 낮은 지연시간을 획득할 수 있다.

3.2 스케줄링 해제

기지국이 예약된 자원의 스케줄링 요청 메시지를 수신하더라도, 4 서브프레임 이내의 상향링크 자원은 이미 다른 단말에게 스케줄링 되었을 가능성이 있다. 이 경우 단말이 별도의 제어메시지를 수신하지 않고 예약받은 상향링크 자원을 사용해 상향링크 전송을 수행한다면 사전에 할당된 단말과 충돌을 일으켜 두 단말 모두 전송에 실패할 수 있다. 따라서 단말이 4 서브프레임 이내의 예약받은 상향링크 자원을 사용하기 위해서는 단말간의 충돌을 방지하는 추가적인 절

차가 필요하다. 이 절에서는 상향링크 자원을 예약 받은 단말이 사전에 할당된 단말과 충돌하기 전에 기지국이 사전에 할당된 단말의 전송을 뒤로 미룸으로써 단말간의 충돌을 피할 수 있는 스케줄링 해제 절차에 대해 설명한다.

저지연 서비스를 위해 제안하는 상향링크 전송을 사용하는 단말 sUE가 상향링크 전송을 수행하려고 한다면, sUE는 먼저 기지국으로 스케줄링 요청을 전송한다. 스케줄링 요청 전송 후 sUE는 스케줄링 요청에 대한 응답을 수신하지 않고 일정 시간 이후에 예약된 상향링크 자원을 통해 상향링크 전송을 수행할 수 있다. 이 시간동안 기지국은 해당 자원이 다른 일반 단말 tUE에게 스케줄링이 되어있다면 tUE의 전송을 뒤로 미루어, sUE가 다른 단말과 충돌하지 않도록 한다. 기지국이 tUE의 전송을 뒤로 미루는데 필요한 시간을 K 라고 하고 sUE가 스케줄링 요청을 전달한 시간을 T 라고 할 때, sUE가 충돌없이 상향링크 전송을 수행할 수 있는 시점은 $T+K$ 가 된다.

tUE가 sUE가 예약받은 상향링크 자원에 사전에 할당된 경우, 기지국은 해당 단말과 sUE 사이의 충돌을 방지하기 위해 tUE에게 PDCCH를 통해 스케줄링 해제 요청 메시지를 전달한다. 스케줄링 해제 요청 메시지는 상향링크 승인과는 반대로 단말이 획득한 상향링크 자원 할당을 강제로 취소하는 제어 메시지이다. 스케줄링 해제 요청메시지에는 단말이 해제해야할 상향링크 자원의 위치가 포함되어야 하므로, 상향링크 승인 또는 하향링크 자원할당에 사용되는 DCI(downlink control information) 포맷을 차용하여 전달할 수 있다. 스케줄링 해제 메시지를 수신한 tUE는 상향링크 전송을 취소하게 되고, 해당 무선자원은 sUE를 위해 비워지며 이를 통해 sUE가 tUE보다 우선적으로 상향링크 전송을 수행하는 것이 가능하게 된다.

sUE가 스케줄링 요청 후 상향링크 전송을 수행하는데 필요한 시간은 K 이다. 시간 K 는 식 (2)와 같이 기지국이 스케줄링 해제 요청을 전달하는 시간 K' 과 스케줄링 해제 요청을 수신한 tUE가 전송을 취소하는데 걸리는 시간 α 의 합으로 표현할 수 있다. K' 과 α 의 시간 길이에 대해서는 차후에 설명하도록 한다.

$$K = K' + \alpha \quad (2)$$

그림 3은 전체 Cut-in 상향링크 과정을 나타내고 있다. 상향링크 자원을 예약 받은 sUE가 시간 T 에 스케줄링 요청을 전달했다면, 기지국은 $T+K'$ 에 tUE

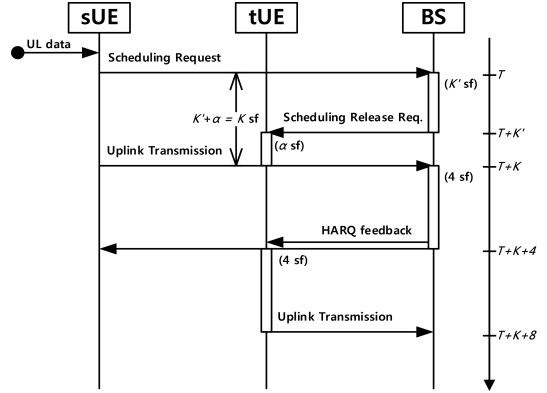


그림 3. Cut-in 상향링크 전송절차
Fig. 3. Cut-in uplink transmission procedure

에게 스케줄링 해제 요청 메시지를 전달한다. tUE는 시간 $T+K'+\alpha$ 에 상향링크 전송을 취소하게 되고, sUE는 충돌없이 상향링크 전송을 수행할 수 있다. 따라서 Cut-in 상향링크 전송의 지연시간은 스케줄링 요청 자원의 주기를 P 라고 할 때 $K+P/2$ 라고 할 수 있다.

제안된 방법의 지연시간 구성 요소인 K' 과 α 의 시간 길이는 사용하는 무선망의 물리적인 하드웨어 특성과 큰 연관이 있다. 무선망의 기술적인 특징에 따라 차이는 있을 수 있으나, 일반적으로 bit-level의 데이터를 sample-level로 인코딩하는데 걸리는 시간보다 sample-level로 수신한 데이터를 bit-level로 디코딩하는데 더 많은 시간이 필요하다. 무선망의 하드웨어를 소프트웨어로 에뮬레이션 하는 오픈소스 단체인 OpenAirInterface는 LTE/LTE-A 상황에서 수신한 무선 데이터를 디코딩 하는데 인코딩 대비 두배 가량의 시간이 필요한 것으로 여기고 있다^[6]. LTE/LTE-A의 HARQ 동작 사이의 시간 간격은 4 ms 이므로 무선 전송에 걸리는 TTI(transmit time interval) 1 ms를 고려하면 3 ms의 베이스 밴드 프로세싱 시간동안 인코딩과 디코딩과정이 수행 되어야 한다. 제조사에 따라 차이가 있으나, 일반적인 LTE/LTE-A 기지국이 인코딩과 디코딩을 전부 수행하는데 약 2.3-2.6 ms의 시간이 소요된다^[7]. 기지국이 기존의 상향링크 승인 메시지를 보내는 데에는 각 단말의 채널추정과 이를 고려한 기지국의 상향링크 스케줄링 과정이 필요한 반면, 강제 스케줄링 해제 요청 메시지를 전달하는 데에는 과거의 스케줄링 정보만이 필요하다. 따라서 강제 스케줄링 해제 메시지를 전송하기 위해서는 기존의 상향링크 승인 메시지보다 더 적은 시간이 소요될 것이라고 가정할 수 있다. 기존의 상향링크 전송방법에서

기지국이 스케줄링 요청을 확인하고 상향링크 승인 메시지를 전송하는데 4 서브프레임의 시간이 필요하다. 따라서 기본적으로 $K' \leq 4$ 라고 할 수 있다. 시간 K' 는 기지국이 스케줄링 요청 메시지를 해석하고 이에 대한 응답을 인코딩하여 PDDCH로 보내는데 걸리는 시간이라고 할 수 있다. 스케줄링 요청 메시지의 경우 2절의 스케줄링 요청 과정에서 설명한 바와 같이 전송 그 자체로 의미를 가지므로, 이를 해석하는데 Turbo code decoding 혹은 modulation과 같은 디코딩 과정이 필요하지 않다. 따라서 전체 베이스 밴드 프로세싱 시간의 약 2/3을 차지하는 디코딩 과정을 생략할 수 있다. 따라서 스케줄링 요청에 한정했을 때, K' 의 시간 간격은 2 ms로 줄어든다. 시간 α 는 tUE가 스케줄링 해제 요청 메시지를 해석하고 전송을 취소할 수 있는 시간 간격을 의미한다. 먼저 스케줄링 해제 메시지는 PDCCH를 통해 전달된다. 서브프레임 안에서 PDCCH는 일반적인 데이터 전송 채널인 PDSCH보다 시간적으로 앞에 위치하므로, PDSCH보다 먼저 처리될 수 있다. 또한 PDCCH는 해당 서브프레임의 PDSCH의 정보를 담고 있으므로, PDSCH의 디코딩은 우선적으로 PDCCH의 디코딩을 수행해야만 할 수 있다. PDSCH의 변조 및 코딩방법은 PDCCH보다 더 복잡하기 때문에, 주어진 디코딩 시간 안에 모든 채널을 디코딩하기 위해서 PDCCH의 디코딩은 PDSCH의 디코딩보다 우선되어 처리되어야 한다. PDCCH의 디코딩을 완료한 후 스케줄링 해제 메시지를 확인하고 전송할 RF데이터를 버리는 것에는 별도의 시간이 소요되지 않기 때문에, 시간은 PDDCH의 디코딩 시간에 크게 연관이 있다. PDCCH를 디코딩하는데 PDSCH와 동일한 시간이 걸린다고 가정하더라도, 적어도 주어진 디코딩 시간의 절반보다 작은 시간 안에 PDCCH를 디코딩 할 수 있어야 한다. 이를 고려하면 α 의 시간간격은 1 ms로 줄어든다. 그러므로 시간 간격 K 는 3 ms로 줄어들 수 있다.

표 1은 기존기술과 제안기술의 스케줄링 요청부터 상향링크 전송까지 걸리는 시간(SR-to-Tx), 자원 할당 방법 상향링크 자원 예약을 사용하지 않는 다른 단말 tUE에 발생할 수 있는 추가적인 지연시간을 비교하고 있다. 표 1에서 제안하는 상향링크 전송방법은 기존 상향링크 전송방법 대비 절반 수준의 SR-to-Tx 지연시간을 갖는다. 또 상향링크 자원 예약에 의해 전송을 취소당한 tUE는 기지국으로부터 재전송을 위한 상향링크 자원 정보를 NACK 메시지로 수신하고 다시 전송을 수행하는데 8 ms의 시간이 필요하다. 따라서 제안하는 상향링크 전송방법을 사용하는 단말은 확률적

표 1. 기존 상향링크 방법과 제안하는 방법과의 비교
Table 1. Comparison of proposed scheme and conventional scheme

Component	Proposed scheme	Conventional scheme
SR to Tx	K ms ($3 \leq K \leq 5$)	8 ms
Scheduling	Deterministic	Dynamic
Additional latency to conventional UE	8 ms	0 ms

으로 다른 단말에게 8 ms의 추가적인 지연시간을 부여할 수 있다.

IV. 모의실험

Cut-in 상향링크 방법을 사용하는 단말은 상향링크 전송 시 고정된 변조 및 코딩 방법으로 예약 가능한 상향링크 자원을 사용하고, 기존 단말의 전송을 뒤로 미루고 우선적으로 전송한다. 따라서 사용하는 변조 및 코딩 방법에 따라 다른 상향링크 지연시간을 획득할 수 있고, Cut-in 상향링크 전송을 사용하는 단말의 수와 해당 단말들에 발생하는 저지연 트래픽의 양에 따라서 기존 단말에 미치는 영향이 달라질 수 있다. 이러한 성능 변화와 기존 단말에 미치는 영향을 확인하기 위해서 실험을 설계하고 수행하였다. 먼저 동일한 시스템 상황에서 저지연 서비스를 이용하는 단말 그룹이 제안하는 상향링크 방법을 사용한 경우와 사용하지 않는 경우에 대해 지연시간의 변화에 대해 관찰한다. 다음으로는 제안하는 상향링크 전송방법을 사용하는 단말이 증가함에 따라 제안하는 기술을 사용하는 단말과 기존 단말의 지연시간에 어떤 영향이 발생하는지 확인한다.

4.1 모의실험 모델

모의실험 환경으로 하나의 셀에 하나의 기지국과 다수의 단말이 존재하는 상황을 가정하였다. 셀의 반경은 500 m이고, 단말은 셀 범위 안에서 균일한 분포를 갖는다. 단말은 저지연 서비스를 사용하는 sUE, 일반적인 서비스를 사용하는 tUE의 두 종류가 존재한다. sUE는 상향링크 전송을 위해 제안된 Cut-in 상향링크 전송방법 또는 기존 상향링크 전송방법을 사용하고 tUE는 기존 상향링크 전송방법을 사용한다.

실제 LTE/LTE-A 시스템의 상향링크 전송의 최소 자원할당 단위는 1 RBP(resource block pair)이고, 하

나의 단말은 하나의 서브프레임에서 주파수 축으로 연속된 RBP만을 할당받을 수 있다. 본 실험에서 상향링크 전송이 필요한 단말은 한번에 두개의 RBP를 할당받는다 고 가정하였다. 제안하는 상향링크 전송에서 sUE는 스케줄링 요청 전송 후 고정된 자원을 사용하기 때문에, 하나의 서브프레임에서 스케줄링 요청을 전송하는 sUE의 수는 사용 가능한 RBP의 수에 제한된다.

sUE와 tUE는 각각 지연시간에 민감한 서비스와 지연시간에 둔감한 서비스를 사용하는 단말이므로, sUE는 interactive real-time 트래픽인 게이밍 트래픽 모델의 상향링크 트래픽을 발생하였고, 패킷 크기는 최대 극단값 분포를 사용하였다^[16]. 게이밍 트래픽의 inter-arrival time d 는 기본적으로 40 ms의 고정된 값으로 하였다^[17]. tUE는 웹 브라우저를 위한 HTTP request를 전달하는 상향링크 트래픽을 발생시킨다고 가정하고 HTTP request의 크기는 정규 로그 분포 모델을 사용하였다^[18,19]. 실제 시스템에서 스케줄링 요

청 주기는 1 ms부터 80 ms까지의 길이를 가질 수 있고, 1 ms, 2 ms의 주기는 저지연 전송을 위해 사용된다. 본 실험에서 sUE는 2 ms, tUE는 8 ms의 스케줄링 요청 주기를 가지는 것으로 가정하였다. 본 실험에서 말하는 지연시간은 트래픽 모델에서 발생한 패킷이 전송 버퍼에 들어간 시점부터 기지국으로부터 전송 성공에 대한 응답을 받기까지의 시간이다. 하나의 패킷은 여러개의 전송블록으로 나누어 전송될 수 있기 때문에 지연시간은 최초 전송블록이 전송된 시점부터 모든 전송블록에 대한 ACK 응답이 도착하기까지의 시간이라고 할 수 있다.

단말과 기지국 사이의 채널변화는 8개의 경로를 가지는 Rayleigh fading을 Clarke 모델을 통해 구현하였다. 기존 상향링크 전송 방법에서 기지국이 단말에게 무선자원을 할당하는 경우, 기지국은 단말의 비트 에러율을 고려하여 단말이 사용할 변조 및 코딩 방법을 결정하였다^[20]. 제안하는 상향링크 전송의 경우, 단말이 망에 접속할 때 예약 가능한 상향링크 자원과 전송에 사용될 변조 및 코딩 방법을 미리 할당 받는다. 예약 가능한 상향링크 자원을 사용하는 모든 단말들은 16QAM을 사용하는 MCS 14를 할당 받는 것으로 가정하였다^[21]. 전송 블록의 에러율은 MIESM 방식을 통해 도출하였다^[22,23]. 그 외의 실험 파라미터들은 표 2에 나타내었다.

표 2. 시뮬레이션 파라미터
Table 2. Simulation parameters

Component	Value
Cell radius	500 m
Bandwidth	10 MHz
Number of UEs N_{UE}	50 - 100
Number of sUE N_{sUE}	0 - 50
Fading model	Rayleigh fading
Pathloss Model	$128.1 + 37.6 * \log_{10}(d(\text{km}))$ dB ^[24]
Minimum coupling loss	70 dB
UE Tx power	24 dBm
eNB noise figure	2 dB
Noise power	121.45 dBm/RB ^[24]
Other cell interference	5.5 dB ^[25]
SR period for sUE	2 ms
SR period of tUE	8 ms
HARQ	Non-adaptive synchronous HARQ
Maximum HARQ retransmission	4
Velocity of UE	5 m/s
K'	2 subframe
α	1 subframe
sUE traffic generation model	Gaming traffic ^[18]
Gaming traffic inter-arrival time d	25, 30, 35, 40, 45 ms
tUE traffic generation model	Web-browsing traffic ^[18,19]
Simulation length	120000 subframe

4.2 모의실험 결과

본 논문에서 제안하는 상향링크 전송 방법의 성능과 그 영향을 알아보기 위해 먼저 sUE가 제안하는 상향링크 전송 방법을 사용하는 경우와 기존 상향링크 전송 방법을 사용하는 경우를 비교하고, 기존 상향링크 전송방법을 사용하는 단말이 존재하는 상황에서 제안하는 상향링크 전송 방법을 사용한 sUE의 수를 점차 늘려가면서 tUE의 지연시간 변화를 관찰하였다.

그림 4는 50개의 sUE가 기존 상향링크 전송 방법을 사용하는 경우와 제안하는 상향링크 전송 방법을 사용하는 경우의 지연시간 분포를 나타낸 것이다. 제안 기술을 사용하는 경우 지연시간은 평균 8.16ms의 길이를 가지고, 기존 기술을 사용하는 경우에는 평균 13.15 ms의 지연시간을 가진다. 모든 sUE가 제안하는 상향링크 전송을 사용하는 경우 더 낮은 지연시간을 획득할 수 있음을 볼 수 있다.

제안 기술의 지연시간 분포 중 대부분을 차지하는 7 ms부터 8 ms 사이의 구간은 단말이 스케줄링 요청 자원을 기다리는데서 발생한다. 제안 기술과 기존 기술의 지연시간 분포에서 나타나는 편평한 부분은 재

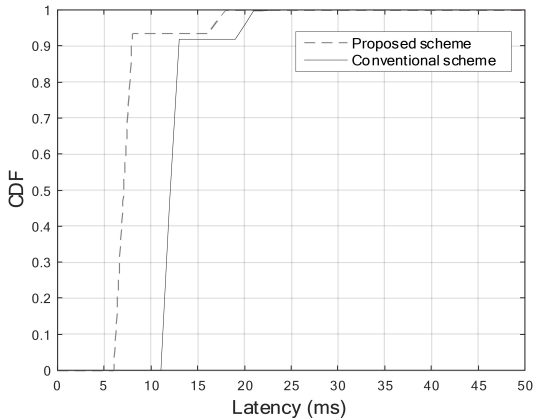


그림 4. 기존기술과 제안기술의 지연시간 분포($N_{sUE} = 50, d = 40ms$)
 Fig. 4. Latency distributions of proposed scheme and conventional scheme($N_{sUE} = 50, d = 40ms$)

전송에 의한 지연시간과 패킷이 여러 개의 전송블록으로 나누어 전송되면서 발생하는 고정된 지연시간에 의해 발생한다. 위에서 설명한 것처럼, 제안하는 전송 방법은 기존과 다르게 채널 품질과 관계없이 고정된 변조 및 코딩방법을 사용한다. 따라서 이 값에 따라서 제안하는 전송 방법의 지연시간은 달라질 수 있다. 너무 낮은 수준의 변조 및 코딩방법을 사용하는 경우 전송에 성공하더라도 두 개 이상의 전송블록을 사용하게 되어 더 큰 지연시간을 갖게 되고 고수준의 변조 및 코딩방법을 사용하게 될 경우 채널 상황에 따라 높은 블록에러율을 얻을 수 있다. 따라서 시스템 관점에서 너무 낮은 채널 품질의 단말은 선택적으로 제안 기술을 적용하거나 적절한 수준의 변조 및 코딩방법을 제시하는 것이 중요하다.

그림 5는 제안 기술을 사용하는 경우에 sUE의 유무에 따른 tUE 지연시간 분포와 기존 기술을 사용하

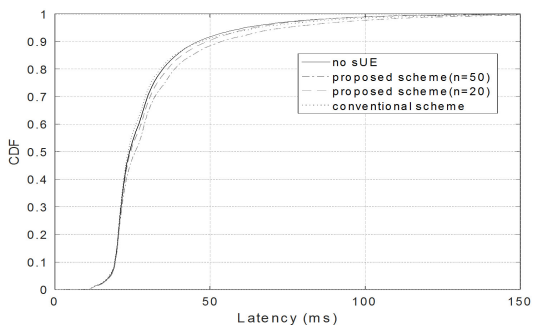


그림 5. sUE 수에 따른 tUE의 지연시간 분포 ($d = 40ms$)
 Fig. 5. Latency distribution according to number of sUE ($d = 40ms$)

는 경우 tUE의 지연시간을 나타내고 있다. sUE가 존재하지 않는 경우, tUE는 아무런 방해 없이 상향링크 전송을 수행하므로 가장 낮은 지연시간 분포를 갖는다. 기존 전송 방법을 사용하는 망에 sUE가 존재하는 경우, tUE의 전송이 기지국의 스케줄러에 의해서 미뤄지거나, 최적의 상향링크 전송 채널을 획득하지 못하는 경우가 발생하기 때문에 더 높은 지연시간을 가진다. 제안하는 전송 방법을 사용하는 경우, 스케줄러에 의한 지연은 발생하지 않지만 sUE가 전송하는 과정에서 기지국이 tUE의 전송을 뒤로 미뤄 기존 전송 방법보다 지연 시간이 더욱 증가하는 것을 확인할 수 있다. 망에 50개의 sUE가 있을 때, 기존 전송방법을 사용하는 경우 tUE의 평균 지연시간은 30.17 ms에서 30.38 ms로 0.21 ms만큼 증가하였지만, 제안하는 전송방법을 사용하는 경우 30.17 ms에서 33.19 ms로 3 ms 만큼 기존 전송방법보다 더 증가하였다. 망에 20개의 sUE가 있는 경우에는 50개의 sUE가 존재하는 경우보다 지연시간의 증가량이 작은 것을 볼 수 있다. 지연시간 증가는 sUE의 전송에 의한 기지국의 스케줄링 해제 요청에 의해 발생하므로, sUE의 전송량이나 수에 따라 tUE의 지연시간의 증가량은 달라질 수 있다.

표 3은 가로로는 sUE의 수가 증가함에 따라, 세로로는 sUE에 발생하는 게이밍 트래픽의 주기 d 에 따라 나타나는 tUE와 sUE의 평균 지연시간을 보이고 있다. 표 3에서 sUE의 수가 늘어나고, sUE에 발생하는 트래픽의 주기가 감소함에 따라 tUE의 평균지연시간이 늘어나는 양상이 나타나고, d 가 25의 값을 갖는 경우 11.2%까지 tUE의 상향링크 지연시간이 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 sUE의 수가 많고 sUE의 전송이 빈번할수록 tUE에 할당되었던 상향링크 자원에 sUE가 전송하는 경우가 많아지기 때문이다. sUE의 수나 적거나 d 가 낮은 경우에 tUE의 평균지연시간은 d 나 sUE의 수에 민감하지 않은 것으로 나타난다. 이는 스케줄링 해체에 의한 각 전송블록의 추가 지연시간이 패킷 전체의 지연시간에 직접적으로 영향을 미치지 못하기 때문이다. 주어진 트래픽 모델에서 tUE의 전송패킷은 최소 두개 이상의 전송블록으로 나누어지게 되고, 패킷의 크기가 더 크거나 낮은 변조 및 코딩 방법을 사용하는 경우에는 더 많은 수의 전송블록으로 나누어진다. 지연시간은 패킷의 모든 전송블록이 도달하기까지의 시간이므로, 가장 마지막에 도달하는 전송블록에 스케줄링 해제가 발생하지 않으면 스케줄링 해제로 인한 지연시간의 증가가 잘 나타나지 않는다. 제안하는 상향링크 전송방법에서 sUE는 서로

표 3. sUE의 수와 트래픽 모델에 따른 제안기술의 상향링크 지연시간
 Table 3. Uplink Latency of proposed scheme according to number of sUE and traffic model

		N_{sUE}	0	10	20	30	40	50
Average Latency								
$d = 25$	sUE proposed scheme	-	8.16 ms	8.16 ms	8.16 ms	8.16 ms	8.16 ms	8.16 ms
	tUE proposed scheme	30.17 ms	31.58 ms	32.11 ms	34.2 ms	33.67 ms	34.93 ms	34.93 ms
	sUE conventional scheme	-	13.15 ms	13.16 ms	13.15 ms	13.16 ms	13.16 ms	13.15 ms
	tUE conventional scheme	30.17 ms	30.46 ms	29.94 ms	30.96 ms	29.95 ms	30.51 ms	30.51 ms
$d = 30$	sUE proposed scheme	-	8.15 ms	8.16 ms	8.16 ms	8.17 ms	8.17 ms	8.15 ms
	tUE proposed scheme	30.17 ms	32.10 ms	33.52 ms	33.8 ms	34.36 ms	33.86 ms	33.86 ms
	sUE conventional scheme	-	13.13 ms	13.16 ms	13.15 ms	13.17 ms	13.17 ms	13.14 ms
	tUE conventional scheme	30.17 ms	31.16 ms	31.69 ms	31.17 ms	31.12 ms	30.21 ms	30.21 ms
$d = 35$	sUE proposed scheme	-	8.16 ms	8.16 ms	8.16 ms	8.16 ms	8.16 ms	8.16 ms
	tUE proposed scheme	30.17 ms	32.14 ms	32.21 ms	32.70 ms	33.60 ms	32.72 ms	32.72 ms
	sUE conventional scheme	-	13.15 ms	13.16 ms	13.15 ms	13.16 ms	13.16 ms	13.16 ms
	tUE conventional scheme	30.17 ms	31.31 ms	30.61 ms	30.45 ms	30.80 ms	29.86 ms	29.86 ms
$d = 40$	sUE proposed scheme	-	8.15 ms	8.17 ms	8.16 ms	8.17 ms	8.17 ms	8.16 ms
	tUE proposed scheme	30.17 ms	31.21 ms	31.03 ms	30.39 ms	32.51 ms	33.19 ms	33.19 ms
	sUE conventional scheme	-	13.13 ms	13.16 ms	13.15 ms	13.17 ms	13.17 ms	13.15 ms
	tUE conventional scheme	30.17 ms	30.38 ms	29.70 ms	28.67 ms	30.26 ms	30.38 ms	30.38 ms
$d = 45$	sUE proposed scheme	-	8.16 ms	8.16 ms	8.16 ms	8.16 ms	8.16 ms	8.16 ms
	tUE proposed scheme	30.17 ms	32.08 ms	31.09 ms	31.68 ms	32.23 ms	32.94 ms	32.94 ms
	sUE conventional scheme	-	13.14 ms	13.15 ms	13.15 ms	13.16 ms	13.16 ms	13.16 ms
	tUE conventional scheme	30.17 ms	31.39 ms	29.86 ms	30.03 ms	30.14 ms	30.48 ms	30.48 ms

다른 고정된 위치의 무선자원을 사용하게 되므로, sUE의 수나 트래픽 모델에 상관없이 sUE의 상향링크 지연시간은 거의 동일한 값을 가진다.

V. 결론

본 논문에서는 현재 사용되는 LTE/LTE-A 이동통신 시스템의 상향링크 지연시간을 상향링크 전송 절차에 따라 분석하였으며, 상향링크 지연시간을 감소시킬 수 있는 새로운 상향링크 전송 방법에 대해 연구하였다. 그리고 기존 LTE/LTE-A 상향링크 전송이 가지는 한계점인 스케줄링 요청과 상향링크 승인이 가지는 고정된 지연시간을 줄이기 위해서 고정된 자원을 단말에게 할당하여 지연시간을 감소시키는 예약된 상향링크 자원이라는 개념을 제시한다. 예약된 상향링크 자원은 고정된 무선자원을 할당 받으면서도 이를 필요에 따라(on-demand) 사용함으로써 자원의 낭비를 줄일 수 있다. 또한 예약된 자원을 보다 효과적으로 활용하기 위한 Cut-in 상향링크 전송방법을 제안하였

다. Cut-in 상향링크 전송방법은 지연시간에 둔감한 서비스를 이용하는 단말의 무선자원 할당을 임시로 해제함으로써, 지연시간에 민감한 서비스를 이용하는 단말이 해당 자원을 이용하여 전송할 수 있도록 한다. 예약된 상향링크 자원과 Cut-in 상향링크 전송방법을 적용한 상향링크 전송 방법이 기존 상향링크 전송방법에 비해 어느 정도의 지연시간을 감소시킬 수 있는지 알아보고, 또한 다른 단말에게 미치는 영향을 파악하기 위해 모의실험을 설계하고 수행하였다.

References

- [1] D.-H. Bae, H.-S. Lee, and J.-W. Lee, "Low latency uplink transmission," in *Proc. Int. Conf. Electron. Inform. Commun. (ICEIC)*, 2017.
- [2] Huawei, *5G : A technology vision*, Huawei, White paper, pp. 1 - 16, 2013.
- [3] G. Fettweis, "The tactile internet: Applications

- and challenges,” *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 9, no. 1, pp. 64-70, Mar. 2014.
- [4] H. S. Seo, J. S. Jung, and S. S. Lee, “Scenario and network performance evaluation for a do not pass warning service based on vehicle-to-vehicle communications,” *J. KICS*, vol. 38, no. 3, pp. 227-232, Mar. 2013.
- [5] 3GPP, *Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); medium access control (MAC) protocol specification*, TS 36.321, Sept. 2014.
- [6] J. Brown and J. Khan, “A predictive resource allocation algorithm in the LTE uplink for event based M2M applications,” *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 14, no. 12, pp. 2433-2446, Dec. 2015.
- [7] K. D. Lee, S. Kim, and B. Yi, “Throughput comparison of random access methods for M2M service over LTE networks,” in *Proc. IEEE Globecom Workshops (IEEE GC Wkshps)*, pp. 373-377, 2011.
- [8] K. Au, L. Zhang, H. Nikopour, E. Yi, and A. Bayesteh, “Uplink contention-based SCMA for 5G radio access,” in *Proc. IEEE Globecom Workshops (IEEE GC Wkshps)*, pp. 900-905, 2014.
- [9] 3GPP, *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Study on latency reduction techniques for LTE* (Release 14), TR 36.881, Jun. 2016.
- [10] H. Tran, M. Hasegawa, Y. Murata, and H. Harada, “Representation of user satisfaction and fairness evaluation for user-centric dynamic spectrum access,” in *Proc. IEEE Int. Symp. Personal, Indoor, Mobile Radio Commun. (IEEE PIMRC)*, pp. 838-842, May 2009.
- [11] S. W. Jeon and W. Y. Shin, “Dynamic opportunistic interference alignment for random-access small-cell networks,” *J. KICS*, vol. 39, no. 11, pp. 675-681, Nov. 2014.
- [12] Y. Chen and W. Wang, “Machine-to-machine communication in LTE-A,” in *Proc. IEEE Veh. Technol. Conf. (IEEE VTC-Fall)*, pp. 1-4, Sept. 2010.
- [13] K. Zhou, N. Nikaein, R. Knopp, and C. Bonnet, “Contention based access for machine-type communications over LTE,” in *Proc. IEEE Veh. Technol. Conf. (IEEE VTC-Spring)*, pp. 1-5, May 2012.
- [14] 3GPP, *Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA) and evolved universal terrestrial radio access network (E-UTRAN); overall description; stage 2*, TS 36.300, Sept. 2015.
- [15] Y. S. Lee, J. S. Lee, J. S. Lim, H. W. Park, and H. J. Noh, “Multiple slot reservation for rapid data traffic transmission in the satellite random access channel,” *J. KICS*, vol. 40, no. 10, Oct. 2015.
- [16] N. Nikaein, R. Knopp, F. Kaltenberger, L. Gauthier, C. Bonnet, D. Nussbaum, and R. Ghaddab, “OpenAirInterface 4G: an open LTE network in a PC,” in *Proc. Int. Conf. Mobile Comput. Netw. (MobiCom)*, Sept. 2014.
- [17] I. Alyafawi, E. Schiller, T. Braun, D. Dimitrova, A. Gomes, and N. Nikaein, “Critical issues of centralized and cloudified LTE-FDD radio access networks,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun. (IEEE ICC)*, pp. 5523-5528, June 2015.
- [18] NGMN Alliance, *NGMN radio access performance evaluation methodology*, NGMN, White paper, pp. 1-37, Jan. 2008.
- [19] H. K. Choi and J. O. Limb, “A behavioral model of web traffic,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Network Protocols (IEEE ICNP)*, pp. 327-334, Oct. 1999.
- [20] G. Piro, N. Baldo, and M. Miozzo, “An LTE module for the Ns-3 network simulator,” in *ICST SimuTools*, pp. 415-422, 2011.
- [21] 3GPP, *Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); Physical layer procedures*, TS 36.213, May 2014.
- [22] K. Ramadas and R. Jain, *Wimax system evaluation methodology*, Wimax Forum, White paper, 2007.
- [23] M. Taranez, T. Blazek, T. Kropfpreiter, M. Muller, S. Schwarz, and M. Rupp, “Runtime precoding: Enabling multipoint transmission in

LTE-Advanced system-level simulations,” *IEEE Access*, vol. 3, pp. 725-736, Jun. 2015.

- [24] 3GPP, *Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); Further advancements for E-UTRA physical layer aspects*, TS 36.814, May 2010
- [25] H. Holma, and A. Toskala, *LTE for UMTS: Evolution to LTE-advanced.*, John Wiley & Sons, 2011.

배 덕 현 (Duck-Hyun Bae)



2013년 8월 : 중앙대학교 전자전 기공학부 졸업
2016년 2월 : 연세대학교 전기전자공학과 석사
2016년 3월~현재 : LG 전자 연구원

<관심분야> 전자공학, 통신공학, 이동통신표준

이 장 원 (Jang-Won Lee)



1994년 2월 : 연세대학교 전기전자공학과 학사
1996년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사
2004년 8월 : Dept. of ECE Purdue University 박사
2004년 9월~2005년 8월: Dept.

of EE Princeton University 박사 후 연구원
2005년 9월~현재 : 연세대학교 전기전자공학부 조교수/부교수/교수
<관심분야> 통신망 자원 할당, 통신망 최적화, 통신망 성능 분석

이 현 석 (Hyun-Suk Lee)



2012년 2월 : 연세대학교 전기전자공학과 학사
2012년 3월~현재 : 연세대학교 전기전자공학과 박사과정
<관심분야> 무선 통신 네트워크, 모바일 클라우드 컴퓨팅