

비면허 대역의 3GPP 5G 사이드링크를 위한 채널 접속 기술 개요

조 익 현*, 정 소 연*, 최 수 한°

An Overview of Channel Access Technologies for 3GPP 5G Sidelink in Unlicensed Bands

Ik-hyun Cho*, So-yeon Jung*, Su-han Choi°

요 약

본 논문은 단말기 간 직접통신인 사이드링크를 비면허 대역에서 운용하기 위해서 3GPP 표준화된 Sidelink-Unlicensed(SL-U)의 채널 접속 기술에 대해 기술한다. SL-U에서 채널 접속 기술은 단말기가 비면허 대역에서 채널 사용 권한을 차지하는 기술로서 매우 중요한 요소이다. 해당 권한을 가진 단말기만 채널을 사용할 수 있기 때문에 채널 내에서 발생할 수 있는 충돌을 완화시키고, 비면허 대역에서의 여러 기술 및 단말기들 간의 공존이 가능해진다. 따라서, 본 논문에서는 채널 사용 권한의 생성과 공유되는 과정을 기술하고, 그에 따른 도입 배경과 설계 과정을 상세하게 설명한다.

키워드 : 3GPP, 채널 접속, 채널 점유 시간, 사이드링크, SL-U, 비면허 대역

Key Words : 3GPP, Channel Access, Channel Occupancy Time, Sidelink, SL-U, Unlicensed Spectrum

ABSTRACT

This paper describes the channel access technology for Sidelink-unlicensed (SL-U), standardized in 3GPP (the 3rd Generation Partnership Project) to operate a sidelink, which is direct communications between terminals, in unlicensed bands. The channel access technology for SL-U is an essential technology by which a terminal occupies a channel usage authority in the unlicensed band. Since only the device having the corresponding authority can use the channel, a collision that may occur within the channel is mitigated, and the coexistence between various technologies and devices in the unlicensed band becomes possible. Therefore, in this paper, the creation and sharing of the channel usage authority, and the background of the introduction and the design process accordingly is explained in detail.

※ 이 논문은 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2024-003949 20, (세부1) 6G 플렉서블 모바일 광액세스 시스템 기술 개발)

♦ First Author : Dankook Univ., Department of AI-based Convergence, 32174315@dankook.ac.kr, 학생회원

° Corresponding Author : Dankook Univ., Department of Mobile Systems Engineering, suhanc@dankook.ac.kr, 정회원

* Dankook Univ., Department of Computer Science and Engineering, jungsy@dankook.ac.kr, 학생회원

논문번호 : 202408-173-B-RN, Received August 13, 2024; Revised October 18, 2024; Accepted October 23, 2024

I. 서 론

2012년, 미국 연방통신위원회(Federal Communications Commission)는 자연 재해나 악의적인 공격으로 인해 기지국이 작동하지 않을 때도 공공의 안전을 위해 기본적인 통신을 유지할 수 있는 네트워크의 필요성을 강조했다.^[1] 이러한 요구에 따라 3GPP는 기지국을 거치지 않고, 단말기 간에 직접 데이터를 전송할 수 있는 D2D (Device-to-Device) 통신을 도입했다. 사이드링크(Sidelink)는 이러한 단말기 간의 통신 시나리오에서 단말기 간의 링크에 대한 명칭이다. 이는 기지국에서 단말기로의 통신을 위한 하향링크(DownLink), 단말기에서 기지국으로의 통신을 위한 상향링크(UpLink)와 비슷하게 바로 옆에 있는 단말기와 직접 통신을 한다는 의미를 갖는다.

사이드링크는 3GPP에서 LTE(Long Term Evolution)-Advanced 표준화 과정인 Release 12에서 처음 고려되었으며, 초기에는 공공안전(Public Safety)을 주요한 사용 사례로 표준 규격이 만들어졌다. 이후 3GPP에서 C-V2X(Cellular Vehicle-to-everything) 기술 표준화가 진행되면서 차량 간 직접통신인 V2V(Vehicle-to-Vehicle) 통신 시나리오를 위해 기존의 D2D 통신 기술을 적용하였다. 5G 이동통신 기술을 처음 포함하는 Release 15 표준 규격에는 사이드링크 지원이 포함되지 않았으나, Release 16에서 NR 기반의 V2X(Vehicle-to-everything) 통신을 지원하기 위하여 NR 사이드링크 통신이 표준화되었다.^[2]

<그림 1>과 같이, Release 18 이전에는 V2X 어플리케이션(application)이 고용량의 트래픽(traffic)을 송수신하는 시나리오(scenario)가 많지 않았기 때문에 사이드링크는 주로 전력 소비나 안정성에 대한 성능 향상이 꾸준히 이루어져 왔다. 하지만, Release 18 표준화 작업부터는 사이드링크를 AR(Augmented Reality) / VR(Virtual Reality)과 같은 어플리케이션에 활용하기 위해 새로운 요구 사항을 인식하였고, 매우 낮은 지연 시간과 수 Gbps의 데이터 속도를 지원하는 사이드링크의 개발을 위해 노력하였다. 3GPP는 추가적인 대역에서의 사이드링크 운용을 도입함으로써 위의 목표를 이루려 하였고, 그 결과, 비면허 대역에서 운용되는 사이드링크인 Sidelink-Unclicensed (SL-U)가 Release 18에서 도입되었다. 이러한 SL-U는 높은 처리량을 바탕으로, 위치 계산, IIoT(Industrial Internet of Things)를 중심으로 한 eMBB(enhanced Mobile BroadBand) 기능을 사용하는 네트워크 제어 서비스에서 다양하게 사용될 전망이며, XR(eXtended Reality)을 이용한 게임이

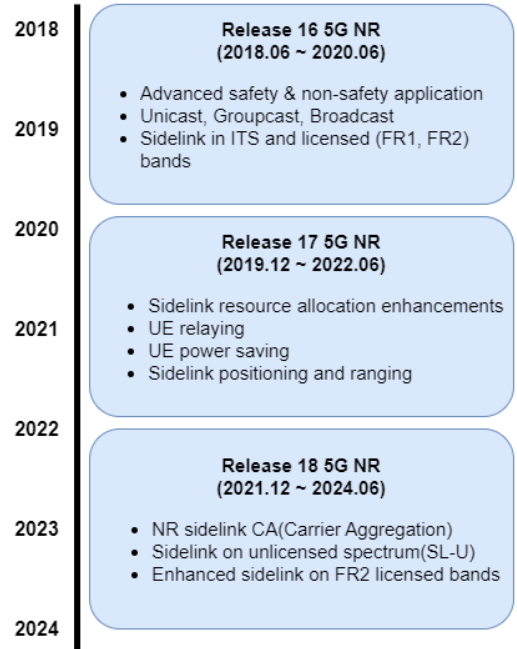


그림 1. 5G NR Release의 연대표
Fig. 1. Timeline of 5G NR Release

나, 차량 내 통신, 주거용 게이트웨이와 같은 상업적 사례가 대표적인 예이다.^[3]

SL-U는 기존 NR 사이드링크의 기능에 대해서 특정 개선 사항을 가지고 있지 않아, 기능적으로는 매우 유사하다. 하지만, 기존 3GPP Release 16과 Release 17에서 NR 사이드링크는 ITS(Intelligent Transportation System) 대역과 FR(Frequency Range) 1, FR 2의 면허 대역에서 운용될 수 있었고, 주로 FR 1 면허 대역에서의 운용을 중심으로 설계되었다. 이후, Release 18에서 SL-U 기술이 표준화되면서, 비면허 대역에서의 사이드링크 운용이 가능하였다. 이는 이전 사이드링크에 비해 더 넓은 대역을 활용할 수 있는 발판이 되었고, 사이드링크의 성능 향상으로 이어졌다.

<그림 2>는 비면허 대역에서 운용될 수 있는 여러 RAT(Radio Access Technology)의 스펙트럼 공존 시나리오를 보여준다.^[4] <그림 2>에서 볼 수 있듯이, SL-U는 mode 1에서 발생하는 Uu 링크의 운용에 대해서만 면허 대역으로 제한되고, 그 외의 PC5 링크는 비면허 대역으로 구성이 가능하다. 만약, Uu 링크가 비면허 대역으로도 운용이 가능하다면, SL mode 1 운용이 비면허 대역에서 standalone으로 지원되어 더 많은 시나리오가 지원될 수 있다. 하지만, “Release 18 Sidelink Evolution WI(Work Item)”에 사이드링크와 관련된 많

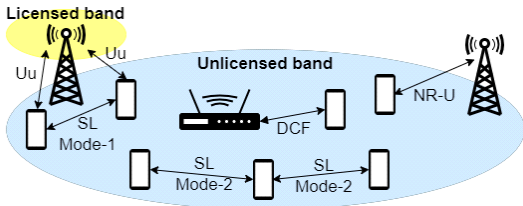


그림 2. 비면허 대역에서의 공존 시나리오
Fig. 2. Scenario of coexistence in unlicensed spectrum

은 기술적 강화가 포함되었고, WI의 TU(Time Unit)을 고려하여 표준화 작업량을 축소할 필요가 있었다. 이것의 일환으로 비면허 대역에서 SL mode 1으로 운용에 필요한 Uu 링크는 면허 대역으로 제한되었다.

추가로, 위의 WI에는 FR 2 면허 대역에서 운용되는 강화된 사이드링크가 포함되었다. 3GPP는 FR 2에서의 사이드링크 연구 상태를 고려했을 때, FR 1에 해당하는 비면허대역에서의 운용에 집중하는 것이 적합하다고 판단하였다. 그 결과, Release 18에서의 SL-U는 n46과 n96/102에서만 운용되도록 설계되었다.^[5]

비면허 대역은 최대 전송 전력과 같은 특정한 제약 조건을 충족한다면 누구나 비용 지불 없이 사용이 가능하다.^[7] 이러한 특징 덕분에 매우 저렴한 가격으로 가용 대역폭을 늘려 데이터 전송 속도와 처리량을 증가시킬 수 있지만, 동시에 주파수 자원 충돌과 간섭 문제가 빈번하게 발생할 수 있다. 특히, 비면허 대역은 IEEE(Institute of Electrical and Electronics Engineers)의 802.11ax와 3GPP의 NR-Unlicensed(이하 NR-U)와 같은 서로 다른 시스템에 의해 공유되고 있기 때문에, SL-U는 비면허 대역에서 여러 시스템과 공존하기 위하여 사이드링크 전송 전에 채널 사용 가능 여부를 판단할 수 있는 정교한 채널 접속(Channel Access) 기술이 필수적이다.

SL-U의 채널 접속은 NR-U의 채널 접속을 바탕으로 설계되었다. NR-U의 채널 접속은 IEEE의 802.11ax 시스템과 같이 비면허 대역을 사용하는 다른 기술과의 공존을 고려해 설계되었기 때문에 다른 시스템과의 공정한 채널 경쟁을 보장할 수 있으며, 이러한 특징은 SL-U의 채널 접속의 가이드라인으로써 적절하였다. 하지만, NR-U는 기지국과 단말 간의 통신을 기반으로 설계된 기술인 반면, SL-U는 단말과 단말 간의 통신을 기반으로 설계된 기술이다. 또한, 셀 커버리지 외부에서의 통신도 지원하는 사이드링크의 특수성으로 인해 SL-U는 NR-U와 차별화되는 독자적인 채널 접속 기술이 필요하다.

본 논문은 3GPP 5G 표준 규격 중 SL-U의 채널 접속

기술에 관련된 내용을 중점적으로 기술한다. SL-U 기술에서 핵심이 되는 부분 중 하나는 단말기가 스스로 채널의 유휴(Idle) 여부를 판단하여, 채널 사용권을 획득하는 과정인 채널 접속 절차(Channel access procedure)에 있다. 따라서, 본 논문은 사이드링크 단말기가 비면허 대역에서 진행하는 채널 점유 과정에 대해서 표준 내용을 분석하고, 사이드링크 단말기의 채널 접속

표 1. 약어 목록
Table 1. List of Acronyms

Acronym	Definition
3GPP	3rd Generation Partnership Project
ACK	Acknowledgement
AR	Augmented Reality
C-V2X	Cellular Vehicle-to-everything
CAPC	Channel Access Priority Class
CCA	Clear Channel Assessment
COT	Channel Occupancy Time
CW	Contention Window
D2D	Device-to-Device
eMBB	enhanced Mobile BroadBand
FR	Frequency Range
HARQ	Hybrid Automatic Repeat reQuest
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IIoT	Industrial Internet of Things
ITS	Intelligent Transportation System
LBT	Listen-Before-Talk
LTE	Long Term Evolution
MCOT	Maximum COT
NACK	Negative Acknowledgement
NR	New Radio
NR-U	NR on unlicensed band
PSCCH	Physical Sidelink Control Channel
PSFCH	Physical Sidelink Feedback Channel
PSSCH	Physical Sidelink Shared Channel
RAT	Radio Access Technology
RRC	Radio Resource Control
S-SSB	Sidelink-Synchronization Signal Block
SL	Sidelink
SL-U	Sidelink on unlicensed band
TU	Time Unit
V2V	Vehicle-to-Vehicle
V2X	Vehicle-to-everything
WI	Work Item
XR	eXtended Reality

절차에 대해 상세하게 설명한다.

본 논문의 이후 부분은 다음과 같은 내용으로 구성된다. II 장에서 절대적인 채널 사용 권한을 얻는 방법인 Type 1 SL 채널 접속 절차에 대한 내용을 설명한다. III 장에서는 비교적 짧은 감지 기간을 통해 채널에 대한 접속성을 높일 수 있는 Type 2 SL 채널 접속 절차에 대해 설명한다. 이후 IV 장에서는 단말기가 여러 채널에 대해서 동시에 접속하는 다중 채널 접속 방식에 대해 설명하고, V 장에서 본 논문의 결론 및 후속 연구에 대해 기술한다.

II. Type 1 SL 채널 접속

Type 1 SL 채널 접속은 단말기가 채널에 대한 접속 권한을 얻기 위한 첫번째 방법으로 COT(Channel Occupancy Time)를 처음으로 개시하기 위해 진행되는 절차이다. 여기서 COT는 한 단말기가 비면허 대역의 자원을 점유하여 안정적으로 자신의 패킷을 전송할 수 있는 시간 구간을 말하며, 채널을 사용할 수 있는 권한을 뜻하기도 한다. 이 채널 접속은 S-SSB(Sidelink Synchronization Signal Block)와 PSFCH(Physical Sidelink Feedback Channel)를 비롯한 모든 SL 전송에 대해서 적용될 수 있으며, 해당 채널 접속을 성공한 단말기는 COT 개시자(initiator)로써 개시한 COT에 대한 많은 권한을 가지게 된다.

해당 채널 접속은 카운터(counter)를 이용한 LBT(Listen-Before-Talk)를 기반으로 이루어져 있으며, 이때 카운터는 트래픽의 우선 순위와 CW(Contention Window)에 따라 값이 랜덤하게 달라지는 특징을 가지고 있다. 이하 섹션에서는 SL-U에서 진행되는 Type 1 채널 접속의 구체적인 절차와 상황에 따른 CW 크기 조절 방법을 소개하고, 그에 대한 설계 배경을 기술한다.

2.1 Type 1 SL 채널 접속 절차

Type 1 SL 채널 접속 절차는 <그림 3>의 순서도와 같다. Type 1 채널 접속을 시도하는 단말기는 $16\mu\text{s}$ 동안 채널이 유힘(idle)할 때까지 대기한다. 여기서 채널이 유힘하다는 것은 채널에서 일정 임계치 이상의 에너지가 감지되지 않았다는 것으로 정의될 수 있으며, 임계치는 단말기의 종류와 규제에 따라 달라진다.^[8]

채널 접속을 시도하는 첫 단계로 $16\mu\text{s}$ 동안 진행되는 채널 감지 이후, 단말기는 $9\mu\text{s}$ 로 이루어진 $(m + N)$ 개의 슬롯(slot)들에 대하여 CCA(Clear Channel Assessment)를 수행한다. CCA는 $9\mu\text{s}$ 슬롯 동안 최소

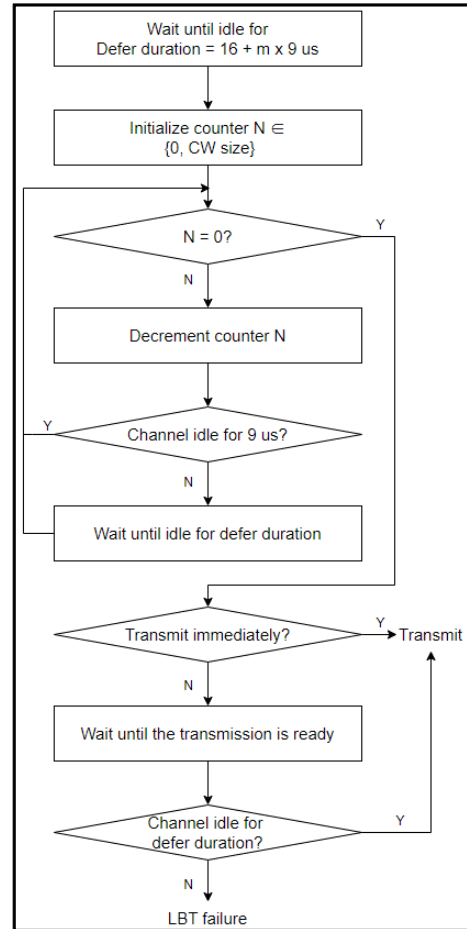


그림 3. Type 1 SL 채널 접속 절차 순서도
Fig. 3. Flowchart of Type 1 SL channel access

$4\mu\text{s}$ 에서 측정된 에너지가 임계치 미만인 경우를 유힘 상태로 간주한다. m 값은 3GPP에서 정의한 4개의 CAPC(Channel Access Priority Class)에 따라 값이 고정되어 있다. 3GPP는 앞 문단에서 언급한 $16\mu\text{s}$ 의 감지와 이 m 개의 $9\mu\text{s}$ 를 합쳐 “defer duration”으로 정의한다. Defer duration은 한 노드(node)의 COT가 종료된 후 채널 감지 시 최소 대기시간을 의미하며, 수신된 데이터에 대한 반응으로써 전송되는 다른 노드의 ACK(Acknowledgement) 또는 NACK(Negative Acknowledgement) 신호와의 충돌 외에도 다른 RAT와의 충돌을 회피하기 위한 최소한의 시간을 제공하기 위한 목적으로 사용된다.^[9]

반면, 카운터 N 값은 단말기에 할당된 초기 CW 크기 이하의 값 중 하나로 랜덤하게 설정된다. 이는 채널 접속을 시도하는 여러 노드에게 서로 다른 감지 시간을 부여하여 여러 노드가 동시에 시작하는 전송으로 인해

생기는 충돌을 줄이기 위한 목적을 가지고 설계되었다.

단말기는 Defer duration 동안의 유휴 여부를 판단하여, 채널이 유휴하다고 판단한 경우에 N 값을 단말기에 할당된 초기 CW 크기 내에서 랜덤하게 설정한다. 하나의 9 μ s 슬롯에 대해 CCA를 수행하여, 채널이 유휴한 경우엔 N 값을 1씩 줄인다. 그렇지 않은 경우, 추가적인 defer duration 동안의 감지가 필요하다. 이러한 과정의 반복을 통해 초읽기(countdown)가 완료되면, 단말기는 전송 준비가 끝난 경우에 전송을 시작할 수 있다.

하지만, 카운터가 0이 되는 순간은 채널의 혼잡도에 따라 달라지기 때문에, 카운터가 0이 되는 순간에 즉시 전송을 시작할 수 없는 상황도 존재한다. 이는 카운터가 0이 되는 순간과 단말기가 예약한 자원 사이의 간격이 생길 수 있다는 것을 의미하며, 이 간격동안 다른 노드에 의해서 채널이 이미 점유되었을 가능성이 생기게 된다.

이미 점유된 채널에서 전송을 진행하게 되는 경우, 전송 간의 충돌이 발생할 수 있다. 이를 대비하기 위해 단말기는 카운터가 0이 되는 순간에 전송을 시작할 수 없는 경우, 전송 직전에 추가적인 LBT를 수행한다. 해당 LBT에서 채널이 유휴하다고 판단된 경우에 전송을 시작할 수 있는 반면, 채널이 사용 중이라고 판단된 경우엔 해당 채널 접속이 실패한 것으로 선언되어 위의 절차가 다시 시작되어야 한다. 여기서 추가적인 LBT가 진행되는 시간은 Defer duration과 같다. 위의 과정을 모두 마치고 전송을 시작하게 되는 단말기는 COT 개시자로서 COT를 획득할 수 있게 된다.

2.2 Contention Window 조절 방식

앞에서 언급하였듯이, CW의 크기는 Type 1 SL 채널 접속 절차의 전체적인 기간에 영향을 준다. 이는 채널 점유에 대한 경쟁력을 조절할 수 있는 장치이다. 예를 들어 전체적인 감지 기간이 길어지면 감지 기간이 비교적 짧은 단말기가 채널을 점유할 수 있어, 경쟁 심각도를 조절할 수 있는 효과를 기대할 수 있었다.

일반적으로 CW의 크기는 가장 최근에 진행된 Reference duration동안 수신된 HARQ (Hybrid Automatic Repeat reQuest) ACK/NACK 신호에 기반하여 조절된다. Reference duration은 <그림 4>와 같이 PSSCH(Physical Sidelink Shared Channel)가 포함된 전송을 위해 COT를 개시하는 단말기가 전송을 진행한 후, 수신 단말기로부터 해당 전송에 대한 피드백(feedback)이 PSFCH(Physical Sidelink Feedback Channel)을 통해 처음으로 도착한 슬롯까지의 시간을

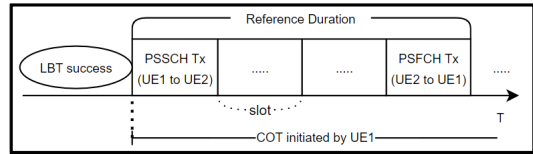


그림 4. Reference duration 예시
Fig. 4. Example of Reference Duration.

의미한다.

이와 같이 Reference duration은 COT의 초반 단계에서 일어나는 피드백을 알 수 있는 구간으로 정의되었다. 이는 단말기의 채널 점유 성공 여부를 통해서만 CW의 크기를 조절하기 위해서이다. 예를 들어, <그림 4>에서 UE 2가 UE 1에게 NACK를 전송한 경우, 해당 NACK는 다른 노드와의 충돌로 인한 리포트일 수 있다. 반대로, ACK가 전송된 경우, 해당 채널은 UE 1이 정상적으로 점유했다는 것을 의미한다. 앞서 언급했듯이, CW는 채널의 경쟁 심각도를 조절하는 역할을 한다. 따라서, 이후의 리포트는 다른 노드와의 충돌로 인한 결과가 아니기 때문에, CW의 크기에 영향을 주는 Reference duration에 포함되지 않는다.

CW의 크기는 CAPC(Channel Access Priority Class)에 많은 영향을 받는다. CAPC에 따라 CW 크기의 최솟값과 최댓값이 달라지며, 지원되는 CW 크기의 후보도 달라진다. CAPC에 대한 구체적인 내용은 섹션 2.3에서 기술한다.

기존 사이드링크에서는 전송 방식에 따라 HARQ 피드백 리포트에서 차이가 있었다. 이 차이점으로 인해 서로 다른 세 가지의 CW 크기 조절 방식이 도입되었다.^[8] 일반적으로 CW 크기는 채널 접속을 시도했을 때, 채널 접속 성공 여부에 따라 조정된다. 채널 접속에 성공할 경우엔 채널의 경쟁 심각도가 극심하지 않은 것으로 간주하여 채널에 대한 접속을 더 공격적으로 시도한다. 실패할 경우엔 채널의 경쟁 심각도를 고려하여 채널 접속을 수비적으로 시도하는 것을 기본으로 한다.

- 1) 방식 1: 가장 기본적인 CW 크기 조절 방법이며, NR-U 하향링크(downlink)의 CW 크기 조절 방식과 유사하다. 수신된 각각의 피드백에 대하여 NACK인 경우, CW 크기는 주어진 CAPC의 최대 CW 크기(이하 CW_{max})를 넘지 않는 선에서 허용되는 다음 CW 크기로 조정된다. 반대로 ACK의 경우, CW 크기가 주어진 CAPC의 최소 CW 크기(이하 CW_{min})로 초기화 된다. 이 방식은 전송이 Unicast 형태로 전송되며, 2nd-stage SCI (Sidelink Control Information)의 HARQ 피드백 지시자 필드가 “enable”로 설정되었을 때 사용된다.

- 2) 방식 2: 사이드링크 Groupcast 옵션(option) 2에서 사용되는 방식이다. 이 전송 방식은 모든 수신 단말기가 ACK/NACK 피드백을 전송하는 방식이며, 이 방식에 대해서는 ACK가 전송된 비율 M/P에 따라 CW 크기를 조절한다. 여기서 M은 수신된 ACK의 개수이고, P는 피드백을 보내기로 예정된 단말기의 개수가 된다. 이 비율은 RRC(Radio Resource Control)에서 설정한 기준점보다 작을 경우엔 CW 크기를 CW_{max} 를 넘지 않는 선에서 허용되는 다음 CW 크기로 조정되는 반면, 기준점보다 높거나 같은 경우엔 CW 크기를 CW_{min} 으로 초기화 시킨다. 기준점은 10부터 100까지의 자연수로 설정될 수 있으며, 단위는 백분율(%)이 된다.
- 3) 방식 3: 사이드링크는 PSCCH(Physical Sidelink Control Channel)/PSSCH에 대한 HARQ 피드백이 비활성화된 상태에서 TB (Transport Block) 전송을 지원한다. 이러한 전송 방식은 피드백을 기반으로 두고 있는 Reference duration이 정의될 수 없기 때문에 앞서 언급한 CW 크기 조절 방식 1, 2와는 다른 CW 크기 조절 방식이 요구되기 때문에 다음과 같은 방식을 사용한다. 단말기는 전송하고자 하는 데이터의 CAPC를 확인한다. 이후, 단말기는 이전에 수행된 사이드링크 전송 중 동일한 CAPC인 전송에 주목한다. 그 중 가장 최근에 사용된 CW 크기를 Type 1 SL 채널 접속의 초기 CW 크기로 설정한다. 만약, 동일한 CAPC의 전송 이력이 없는 경우, 단말기는 초기 CW 크기를 CW_{min} 으로 설정한다. 이후 단말기가 동일한 CW 크기를 통해 Type 1 SL 채널 접속을 X번 수행 시, CW 크기는 CW_{max} 를 초과하지 않는 선에서 허용되는 다음 CW 크기로 조정된다. 여기서 X 값은 {1, 8, 16, 32, 'infinity'} 중 하나로 설정될 수 있다. 이 방식은 다른 방식들과는 다르게 채널의 경쟁 심각도를 조절하는 것에 무게를 두지 않는다. 이 방식의 설계 목적은 단말기의 CW의 크기를 고정하지 않음으로써 다른 RATs와의 채널 점유 경쟁에서 공정성을 부여하는 것에 있다.

모든 CW 크기 조절 방식은 공통적으로 CW 크기가 CW_{max} 인 상태에서 K번 Type 1 SL 채널 접속을 시도하면, CW 크기가 CW_{min} 값으로 초기화 된다. K 값은 CAPC와 상관없이 {1, 2, ..., 8} 중 하나의 값으로 설정될 수 있으며, 이를 통해 비면허 대역에서의 채널 접속에 대한 경쟁이 조금 더 공평하게 이루어 질 수 있다.

추가적으로, 기존 사이드링크에서 지원된 전송한 TB에 대해서 NACK 피드백만 전송되는 Groupcast 옵션

1은 송신 단말기가 보낸 데이터에 대해 수신 단말기의 디코딩(decoding) 성공 여부의 판단이 매우 어렵다. 이러한 특징으로 인해 해당 전송 방식에 대한 CW 조절 방식에 대해 3GPP에서 많은 논의를 하였지만, 최종적인 합의를 이루지 못하였다. 따라서, Release 18 SL-U는 Groupcast 옵션 1을 지원하지 않는다.^[10]

2.3 채널 접속 우선순위 클래스(class)

SL-U에서는 NR-U와 마찬가지로 전송할 패킷의 우선순위에 따라 MAC(Medium Access Control) 파라미터(parameter)를 정의한다. 3GPP는 이러한 우선순위를 CAPC로 구분하였으며, CAPC는 <표 2>과 같이 총 4개의 클래스로 구분된다.

CAPC는 높은 우선순위의 트래픽이 더 작은 CW 크기 및 감지 시간을 가짐으로써 더 쉬운 채널 접속이 가능하도록 설계되었고, 주요 파라미터로는 섹션 2.1에서 언급하였던 Defer duration에 포함되는 m 값, CW 크기의 최솟값 및 최댓값, 채널 접속에 성공하였을 때 유지되는 COT의 지속시간(이하 MCOT: Maximum COT) 등이 포함된다. 특히, 클래스 3 또는 4의 경우 특정 조건에 따라 MCOT를 10ms로 연장하는 것이 가능하다. 이는 단말기가 COT를 획득하기 전에 더 많은 양의 데이터를 전송할 수 있도록 단말기를 구성함으로써 SL-U의 성능을 향상시키는 결과를 이끌어냈다.^[11]

NR-U에서는 전송 방향에 따라 하향링크와 상향링크가 서로 다른 CAPC 표를 사용하였지만, SL-U는 서로 다른 CAPC 표를 동적으로 사용할 때 높아질 복잡도를 우려하여 NR-U의 상향링크 CAPC 표 하나만을 채택하였다. 이 중 상향링크 CAPC 표를 적용한 이유는 크게 두가지가 있다.

상향링크 CAPC 테이블은 COT를 개시할 때 사용되는 채널 접속이 비교적 더 길게 진행되어 안정적인 채널 접속이 가능하기 때문에 충돌 문제에 대해서 이점이 있을 것으로 판단하였다. 또한, 하나의 단말기에서 NR-U의 상향링크와 사이드링크 전송의 공존을 위해서는 하나의 CAPC 표로 통일하는 것이 필요할 것이라고 예상

표 2. SL-U의 CAPC 표
Table 2. CAPC table in SL-U

CAPC	m	MCOT	Allowed CW size
1	2	2 ms	{3, 7}
2	2	4 ms	{7, 15}
3	3	6 [10] ms	{15, 31, 63, 127, 255, 511, 1023}
4	7	6 [10] ms	{15, 31, 63, 127, 255, 511, 1023}

되었다. 따라서, 3GPP는 SL-U에서 NR-U의 상향링크 CAPC 표를 채택하는 것으로 합의하였다.^[12]

III. Type 2 SL 채널 접속

Type 1 SL 채널 접속은 COT를 개시하기 위해 수행된다. COT 개시자는 COT 동안 단독으로 전송을 진행하는 것도 가능하지만, 다른 노드가 전송을 하도록 COT를 넘겨주는 것, 즉, COT 공유도 가능하다. 이때 COT를 다른 노드로 넘겨주기 위해 진행하는 채널 접속이 Type 2 SL 채널 접속이다. Type 2 SL 채널 접속을 수행하는 단말기는 비교적 짧은 감지 기간으로 채널 사용 권한을 얻을 수 있으며, 이는 COT의 효율적인 운용을 가능하게 해준다. 이번 섹션에서는 Type 2 SL 채널 접속 절차와 종류에 대해 기술하며, 추가적으로 위의 채널 접속을 운용하기 위해서 SCI(Sidelink Control Information)에 새롭게 추가된 사항을 분석한다.

3.1 Type 2 SL 접속의 3가지 종류

SL-U에서 Type 2 SL 채널 접속은 <그림 5>과 같이 하나의 COT 내에서 두 개 이상의 단말기가 COT를 공유하면서 전송 간의 간격을 따라 Type 2A, 2B, 2C로 나뉜다.^[8] <그림 5>에서는 UE1의 COT 동안 UE 2가 해당 COT 내에 짧게 전송하는 상황을 나타낸 것이다.

본 논문에서는 이러한 두 전송 간의 간격을 “갭(gap)”이라고 부르며, NR에서 정의된 Type 2 SL 채널 접속의 종류는 다음과 같다.

- 1) Type 2A: 갭이 $25\mu\text{s}$ 이상일 때, 공유 받는 단말기는 적어도 $25\mu\text{s}$ 동안 채널 사용 가능 여부를 판단 후 SL 전송이 가능하다.
- 2) Type 2B: 갭이 $16\mu\text{s}$ 일 때, 공유 받는 단말기는 $16\mu\text{s}$ 동안 채널의 사용 가능 여부를 판단한 후 SL 전송이 가능하다.
- 3) Type 2C: 갭이 $16\mu\text{s}$ 이하임과 동시에 COT를 공유 받는 단말기의 전송 기간이 $584\mu\text{s}$ 를 초과하지 않는다면 채널 감지없이 SL 전송을 수행한다.

앞서 언급하였듯이, 일반적으로 Type 2 SL 채널 접속은 이미 개시된 COT가 다른 단말기와 공유될 때 해

당 COT 내부에서 수행된다. 하지만, 이례적으로 COT 외부, 즉, 공유되는 COT 없이도 일부 전송에 대해서 Type 2A 채널 접속이 허용된다. 이는 NR-U에서 빠른 초기 접속(initial access)을 가능하게 하기 위해 SSB와 같은 주요 정보의 전송을 포함하는 discovery burst의 전송에 대해 일부 제한 범위 내에서 Type 2A 채널 접속을 허용하는 것에서 유래되었다. 이와 같은 특수한 채널 접속을 이용하기 위해선 의무 주기(duty cycle)가 1/20 이하이면서, 총 전송 지속 시간이 1ms 이하가 되도록 제한되었다.

사이드링크에서 S-SSB 전송 주기는 160ms로 고정되어 있으며, 각각의 S-SSB는 시간 영역에서 1개의 슬롯만 차지하기 때문에 위의 제한 사항을 충족시킬 수 있었다. 따라서, 3GPP는 SL-U에서도 위와 같은 특수한 상황에 대한 채널 접속을 허용하는 것으로 결정하였다.^[13]

3.2 UE-to-UE COT 공유

SL-U는 COT를 개시한 단말기(이하: 개시자)가 다른 단말기에게 COT를 공유하는 UE-to-UE (UE: User Equipment) COT 공유를 지원한다. COT 공유는 개시자가 운용 중인 채널을 COT 개시자를 포함한 둘 이상의 단말들이 채널을 사용할 수 있는 권한을 허가하는 행위이다. 개시자의 SL 전송이 끝나면, 개시자로부터 COT 공유가 허가된 단말기는 Type 2 SL 채널 접속을 수행하여 채널 점유를 시도하는 것으로 그 절차가 이루어져 있다. 이때 권한을 받을 수 있는 단말기를 Responding UE라고 부르며, Responding UE는 Destination ID와 Additional ID를 통해 결정될 수 있다.

Responding UE는 공유된 COT에서 S-SSB, PSFCH, PSCCH 및 PSSCH 전송이 가능하다. S-SSB 전송은 Broadcast 방식으로 전송되어 COT를 공유 받을 수 있다. PSFCH 전송의 경우, 적어도 하나 이상의 개시자를 향한 PSFCH 전송이 포함될 경우, COT를 공유 받도록 제한하였다. 이는 NR-U에서 어떤 노드가 개시자가 아닌 다른 노드로의 전송을 위해 COT를 공유 받는 이중 COT 공유를 지원하지 않기 때문에 NR-U와 규격적으로 일치시키기 위한 장치이다.

PSCCH 및 PSSCH 전송은 Unicast와 Groupcast (또는 Broadcast) 두 가지 상황으로 나누어 볼 수 있다. 먼저 Unicast 전송 방식의 경우, Responding UE의 Source ID와 Destination ID가 각각 개시자의 Destination ID와 Source ID와 일치하는 경우에 COT를 공유 받을 수 있다. Groupcast 및 Broadcast 전송

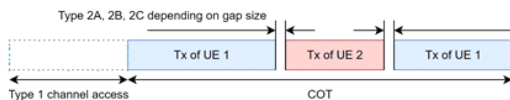


그림 5. Type 2 SL 채널 접속 예시
Fig. 5. Example of Type 2 SL channel access

방식의 경우, Responding UE의 Destination ID와 개시자의 Groupcast 및 Broadcast 전송의 Destination ID가 일치하는 경우에 COT 공유를 통한 전송이 가능하다.

개시자는 Responding UE의 PSSCH 및 PSCCH 전송을 위해서 Source ID와 Destination ID가 포함된 Additional ID를 추가적으로 전송할 수 있다. 이는 Unicast, Groupcast와 Broadcast에서 활용될 수 있으며, Additional ID와 Responding UE 전송 ID가 일치할 경우에도 COT를 공유 받을 수 있다.

사이드링크 자원 할당 mode 2 (Sidelink Resource Allocation Mode 2) 시스템에서는 자원에 대한 예약 정보를 개시자와 Responding UE 모두가 알 수 있고, 개시자는 예약 정보를 통해 Responding UE에게 COT 공유 여부를 결정할 수 있다. 이를 바탕으로 개시자는 Additional ID를 COT 내에서 전송할 단말기로 설정하여, COT를 공유 받을 수 있는 Responding UE의 후보를 확장할 수 있다. 예를 들어, <그림 6>와 같이 UE 1이 COT를 개시하여 UE 2에게 SL 전송을 한다고 가정하였을 때, 해당 전송에서 Source ID = UE 1, Destination ID = UE 2로 설정된다. 만약 Additional ID가 존재하지 않는다면, UE 3는 전송 ID가 일치하지 않아 COT를 공유 받을 수 없다. 하지만, Additional ID의 도입을 통해 해당 ID를 UE 3로 설정한다면, UE 3는 COT를 공유 받을 수 있게 된다.^[14] 이는 공유되는 COT의 효율 증가시키는 효과를 가져올 수 있었다.

추가적으로, COT 공유가 수행될 때는 Responding UE의 CAPC 값이 개시자의 CAPC 값보다 높아서는 안된다는 것을 원칙으로 한다. 이는 후순위의 트래픽이 선순위의 트래픽에 의존하여 채널에 접속하는 것을 방지하기 위함이며, 어떠한 예외사항도 없다.

3.3 COT 공유 정보

COT 공유 정보(SI: Sharing Information)은 COT를 공유하는 데 필요한 정보들을 말하며, 효율적인 스펙트럼(spectrum)의 활용 및 조정을 도와주는 중요한 정보이다. 해당 정보들은 잠재적인 Responding UE가 공유된 COT 내에서의 전송 여부를 판단할 수 있도록 빠른 디코딩이 요구되며, 높은 신뢰도가 보장되어야 한다. 따라서, 3GPP는 SL-U에서의 COT SI를 SCI에 담아 전송

하도록 설계하였고, 이는 단계별 SCI에 포함될 수 있는 정보들이 추가되는 배경이 되었다.

기존 SCI는 사이드링크에서 수신기가 송신기로부터의 전송을 디코딩하기 위해 필요한 정보들이 담겨 있었다. SCI는 1st-stage SCI와 2nd-stage SCI로 나뉘며, 각각 PSCCH와 PSSCH를 통해 전송될 수 있다. 각각의 특징을 살펴보면, 1st-stage SCI는 주로 PSSCH의 복조 및 탐지에 필요한 정보들과 단말기가 예약한 자원에 대한 정보가 포함되어 있다. 이 1st-stage SCI는 모든 단말기가 채널 사용 여부를 알 수 있도록 하기 위해 모든 단말기가 수신 및 디코딩이 가능하다는 특징이 있다. 반면, 2nd-stage SCI는 전송에 대한 실제 사이드링크 데이터를 수신하는 단말이나 단말이 포함된 그룹(group)에만 해당하는 제어 정보들이 주를 이룬다. 이러한 배경 속에서 3GPP는 1st-stage SCI에 많은 양의 페이로드(payload)가 부여될 때, PSSCH에 대한 복조와 탐지 성능이 저하되는 것을 우려하였다. 따라서, 1st-stage SCI에 COT SI indication(1 bit)만을 추가하여, 2nd-stage SCI의 COT SI 제공 여부를 responding UE를 비롯한 주변 단말들에게 알린다. 또한 COT SI는 2nd-stage SCI를 통해 전달되도록 설계함으로써 1st-stage SCI에 많은 양의 부과되는 것을 방지하였다.

COT 공유를 위해서 2nd-stage SCI에 추가적으로 포함될 정보는 아래와 같다.^[15]

- COT 개시자의 CAPC 단계
- 전송 방식 (cast type)
- Additional ID
- 남은 COT 기간

개시된 COT의 CAPC가 포함된 이유는 섹션 3.2에서 언급하였듯이 개시자의 CAPC 값보다 높은 CAPC 값을 가진 사이드링크 단말기를 COT 공유 대상에서 제외시킬 목적으로 포함되었다. 마찬가지로, 섹션 3.2에서 소개된 Additional ID도 해당 SCI에 포함되며, 전송 방식은 Responding UE의 전송 방식을 가리킨다. 또한, 공유된 COT의 남은 기간을 알려주는 필드가 포함된다.

IV. SL의 다중 채널 접속

앞서 설명한 채널 접속 절차는 20MHz 한 개를 사용하여 SL-U를 운용하는 것을 가정한다. 이는 많은 규제 요구 사항이 전체 스펙트럼을 20MHz 채널로 나누기 때문에 매우 합리적인 시나리오이다. 하지만, 특정 상업적 사용 사례를 위해 SL-U에서는 높은 데이터 속도를

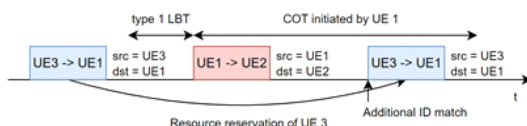


그림 6. Additional ID를 이용한 COT 공유 예시

Fig. 6. Example of COT sharing with Additional ID

요구한다.^[6] 이를 만족시키기 위해 3GPP는 하나의 단말기가 한 개 이상의 채널에서 SL-U를 운용하기 위해 다중 채널 접속(multi-channel access)을 도입하였다. 다중 채널 접속이란 단말기에서 동일한 슬롯 내에서 하나 이상의 채널에 대한 사이드링크 전송을 위해 여러 비면허 대역에 동시 접속하는 것을 의미하여, 이는 더 넓은 대역에서의 전송을 통해 더 높은 데이터 속도를 이끌어 낼 수 있다.

SL-U의 다중 채널 접속 방식은 NR-U의 하향링크와 상향링크에 지원되는 다중 채널 접속 방식을 바탕으로 설계되었다. 다만, NR-U에서는 하향링크와 상향링크라는 개념으로 두 절차가 나뉘지만, SL-U에서는 전송하려는 사이드링크 전송에 따라 절차가 구분된다.^[16] 이 섹션에서는 SL-U에서 사용되는 다중 채널 접속 방식 각각의 장단점 및 절차를 소개하고, 각 방식은 어떤 사이드링크 전송을 지원하는 지에 대해 구체적으로 기술한다. 참고로, Type 1 SL 채널 접속 절차가 적용되는 채널에만 다중 채널 접속 절차가 적용되는 것을 미리 언급한다.

4.1 사이드링크 전송에 대한 다중 채널 접속

일반적으로 사이드링크 전송에 대한 다중 채널 접속은 NR-U의 상향링크 다중 채널 접속을 바탕으로 설계되었다. 따라서, NR-U 상향링크 다중 채널 전송과 비슷하게 사이드링크 단말기가 사이드링크 전송을 의도한 모든 채널에 대해서 채널 접속을 성공하였을 때, 사이드링크 전송이 가능하다. 만약 해당 채널 중 하나라도 채널 접속에 실패할 경우, 단말기는 어떠한 채널에 대해서도 전송을 시작할 수 없다. 이러한 방식은 자원의 유동적인 활용이 어렵다는 단점이 있지만, 단말기의 입장에서는 비교적 쉬운 구현과 절차로 인해 복잡도를 낮출 수 있다는 장점이 있다.^[12] 특히, 기존 사이드링크에서 하나의 단말기로부터 동시에 여러 PSSCH 및 PSSCH의 전송을 지원하지 않기 때문에 3GPP는 위의 접속 방식을 사이드링크 전송에 대한 다중 채널 접속 방식으로 채택하였다.

해당 방식에서 단말기는 여러 채널에 대해 동시에 접속하기 위해, 전송이 예약된 채널들 중 하나를 랜덤하게 Primary channel로 설정한다. 단말기는 Primary channel에 대해서는 Type 1 채널 접속을 수행하지만, 이외의 채널에 대해서는 전송 직전에 Type 2A 채널 접속을 수행하게 된다. 여기서 어떤 채널에 대해서 하나라도 채널 접속에 실패할 경우, 모든 채널에서 사이드링크 전송이 불가능하다. 이때, Primary channel은 1초에 한번 이상 재설정 할 수 없으며, CW 크기에 대해서는

각각의 채널에 대해서 독립적으로 적용된다.

4.2 PSFCH 및 S-SSB 전송에 대한 다중 채널 접속

섹션 4.1에서 언급한 NR-U의 상향링크를 기반으로 설계된 사이드링크 다중 채널 접속 방식은 S-SSB, PSFCH, PSSCH 및 PSSCH를 비롯한 모든 사이드링크 전송에 대해서 적용이 가능하지만, PSSCH 및 PSSCH 전송을 주 목적으로 한다. 반면, 이번 섹션에서 언급될 다중 채널 접속 방식은 NR-U의 하향링크 다중 채널 접속 방식을 기반으로 설계됐으며, PSFCH와 S-SSB(-only) 전송에 대해서 적용될 수 있다.

하향링크 기반의 다중 채널 접속 방식은 Type A와 Type B 방식으로 나뉜다. Type A는 각각의 채널에 대해 단말기가 Type 1 SL 채널 접속을 수행하는 방식으로 이루어져 있으며, 채널 접속에 성공한 채널에서는 PSFCH 혹은 S-SSB 전송이 가능하다. 따라서, 각 채널에 대한 LBT 결과를 통해 채널 접속을 하여, 채널을 효율적으로 사용할 수 있다.

반면, Type B는 하나의 Primary channel에 대해 Type 1 SL 채널 접속을 수행하며, Primary channel에서의 전송이 시작되기 전에 이외의 채널에 대해서는 최소 25 μ s의 감지가 수행된다. 이때, Primary channel에서 LBT를 실패할 경우, 어떠한 채널에 대해서도 전송을 할 수 없다. 하지만, Primary channel에서 LBT를 성공한 경우, Primary channel과 25 μ s 이상의 감지에서 채널 접속에 성공한 채널에 한해서 다중 채널 접속이 가능하다. 이는 에너지 탐지에 소비되는 전력을 줄일 수 있으며, 채널 접속에 성공할 확률을 높일 수 있다. 이러한 장단점을 고려하여, 단말기는 구현에 따라 Type A와 Type B 중 하나를 적용할 수 있다.

SL-U에서 위의 다중 채널 접속 방식을 도입한 이유는 PSFCH 관점에서 LBT 실패로 인해서 전송이 불가능한 경우에 PSSCH 전송 대기시간이 증가하므로, 여러 채널에서 PSFCH 전송에 대해서 더 많은 기회를 제공하는 것에 있다. 뿐만 아니라, PSFCH는 각각의 채널에 대해서 독립적으로 전송될 수 있기 때문에, 3GPP는 채널 각각의 LBT 성공 여부에 따라 채널에 접속하는 NR-U의 하향링크 기반의 다중 채널 접속을 적용하는 것이 효율적이라고 판단하였다.^[17]

V. 결 론

본 논문은 3GPP 표준 기술 중 하나인 SL-U에서 사용하는 채널 접속 방식에 대해서 설명하였다. 특히, 비

면허 대역에서 기지국과 단말기 간 통신 기술인 기존의 NR-U의 채널 접속 방식과 비교하였을 때, 달라진 점에 주목하였다. SL-U는 NR-U의 채널 접속을 바탕으로 설계되었지만 SL-U를 사용하는 주체가 단말기이기 때문에 다양한 측면에서 NR-U와 다른 부분이 고려되어 표준에 반영되었다. 본 논문은 SL-U 기술의 도입 과정에서 많은 부분을 차지하고 있는 채널 접속에 대해서 중점적으로 다뤘지만 SL-U의 또 다른 핵심 부분인 물리 채널(Physical Channel)에 대한 자세한 내용을 포함하지 않았다.

후속 연구에서는 SL-U의 물리 채널에 대해 자세히 분석하고 기술함으로써 본 논문의 내용과 더불어 3GPP의 SL-U 표준 기술에 대해 정확하고 폭넓게 이해할 수 있는 좋은 참고 문헌이 될 수 있을 것으로 기대한다.

References

- [1] S.-Y. Lien, et al., "3GPP NR sidelink transmissions toward 5G V2X," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 35368-35382, Feb. 2020. (<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2973706>)
- [2] M. H. C. Garcia, et al., "A tutorial on 5G NR V2X communications," in *IEEE Commun. Surv. & Tuts.*, vol. 23, no. 3, pp. 1972-2026, Feb. 2021. (<https://doi.org/10.1109/COMST.2021.3057017>)
- [3] K. Ganesan, "5G Advanced: Sidelink evolution," in *IEEE Commun. Standards Mag.*, vol. 7, no. 1, pp. 58-63, Mar. 2023. (<https://doi.org/10.1109/MCOMSTD.0007.2200057>)
- [4] V. Weerackody, H. Yin, and S. Roy, "NR sidelink mode 2 in unlicensed bands: throughput model & validation," in *IEEE Trans. Commun.*, Jul. 2024. (<https://doi.org/10.1109/TCOMM.2024.3435554>)
- [5] ZTE, Saneships, "RP-213391, discussion on Rel-18 sidelink enhancements," 3GPP TSG RAN Meeting #94-e, Dec. 2021.
- [6] 3GPP, "RP-212704, New WID on further enhancements for NR sidelink," 3GPP TSG RAN Meeting #94e, Dec. 2021.
- [7] 손영욱, 김성원, 최성현, "2.4 / 5 GHz 비면허 대역 무선랜 통신 기술," *KICS Information & Communication Magazine - Open Lecture Series*, vol. 33, no. 12, pp. 10-18, Nov. 2016.
- [8] 3GPP, *Technical Specification, 37.213, Physical layer procedures for shared spectrum channel access*, v18.2.0, 2024.
- [9] E. Dahlman, S. Parkvall, and J. Skold, *5G NR: The next generation wireless access technology*, 2nd Ed., 2021. (<https://doi.org/10.1016/C2019-0-04564-5>)
- [10] Moderator (OPPO), "R1-2312254, FL summary for AI 8.2.1.1: SL-U channel access mechanism (EOM)," 3GPP TSG RAN WG1 #115, Nov. 2023.
- [11] Nokia, Nokia Shanghai Bell, "R1-2302289, On channel access mechanism for SL-U," 3GPP TSG RAN WG1 #112bis-e, Apr. 2023.
- [12] Moderator (OPPO), "R1-2210293, FL summary for AI 8.2.1.1: SL-U channel access mechanism (EOM)," 3GPP TSG RAN WG1 #110bis-e, Oct. 2022.
- [13] Moderator (OPPO), "R1-2212686, FL summary for AI 8.2.1.1: SL-U channel access mechanism (EOM)," 3GPP TSG RAN WG1 #111, Nov. 2022.
- [14] Huawei, HiSilicon, "R1-2302353, channel access mechanism and resource allocation for sidelink operation over unlicensed spectrum," 3GPP TSG-RAN WG1 Meeting #112bis-e, Apr. 2023.
- [15] 3GPP, *Technical Specification, 38.212, Multiplexing and channel coding*, v18.2.0, 2024.
- [16] Moderator (OPPO), "R1-2312254, FL summary for AI 8.2.1.1: SL-U channel access mechanism (EOM)," 3GPP TSG RAN WG1 #112bis-e, Apr. 2023.
- [17] WILUS Inc, "R1-2303832, Discussion on channel access mechanism for SL on unlicensed spectrum," 3GPP TSG RAN WG1 #112bis-e, Apr. 2023.

조 익 현 (Ik-hyun Cho)



2023년 2월 : 단국대학교 모바일
시스템공학과 졸업
2023년 3월~현재 : 단국대학교
인공지능 융합학과 석사과정
<관심분야> 이동통신, 무선통신,
비면허대역, V2X, Sidelink

정 소 연 (So-yeon Jung)



2021년 2월 : 단국대학교 모바일
시스템공학과 졸업
2024년 2월 : 단국대학교 컴퓨터
학과 석사
<관심분야> 이동통신, 통신이론,
무선통신, 비면허대역

최 수 한 (Su-han Choi)



1994년 2월 : 한양대학교 전자통
신공학과 공학사
1996년 2월 : 한양대학교 전자통
신공학과 공학석사
2006년 8월 : Univ. of Michigan,
Ann Arbor 공학박사
1996년 2월~1996년 12월 : 삼성
종합기술원 주임연구원
1997년 1월~2010년 8월 : 삼성전자 책임연구원
2010년 9월~2016년 8월 : 단국대학교 모바일시스템공
학과 조교수
2016년 9월~2022년 8월 : 단국대학교 모바일시스템공
학과 부교수
2022년 9월~현재 : 단국대학교 모바일시스템공학과
교수
<관심분야> 통신이론, 정보이론, 이동통신, 3GPP 표준,
해상 및 수중 네트워크 등