

6 GHz 비면허 대역에서의 NR-U와 Wi-Fi 간 주파수 공유기술

연구 동향

이 기 훈 · 정 방 철

충남대학교

I. 서 론

초연결 네트워크의 실현을 위한 핵심 IT 인프라로 주목 받는 사물인터넷(Internet-of-Things: IoT), 대규모 사물 통신(massive machine type communications: mMTC) 서비스 등의 부상과 스마트폰, 태블릿, 노트북 등 개인 무선 단말 활용의 증가에 따라 무선 데이터 트래픽 또한 지속해서 급증하면서 주파수 부족 문제가 대두되고 있다^{[1]~[3]}. 특히, 무선 트래픽 증가 추세가 매년 기하급수적으로 증가함에 따라 무선 자원 부족 문제는 앞으로 더욱 심화할 것으로 전망한다^{[4]~[6]}. 4G 이동통신 시스템으로 대표되는 long term evolution advanced (LTE-A)에서는 이와 같은 주파수 부족 문제 해결과 대역폭 증대를 통한 이동통신 시스템의 성능 향상을 위해 기존에 할당된 면허 대역 주파수뿐만 아니라, 5 GHz 비면허 대역에서 LTE 서비스를 운용하는 비면허 대역의 LTE (unlicensed LTE: U-LTE) 기술을 표준화했다^[7].

구체적으로, LTE-A의 캐리어 집성(carrier aggregation)에 기반하여 5 GHz 대역에서 듀티 사이클(duty cycle) 형태로 Wi-Fi 시스템과 주파수를 공유하며 하향링크 트래픽을 전송하는 LTE-unlicensed (LTE-U)의 표준화(Relase (Rel)-12)를 기점으로, Wi-Fi 네트워크의 반송파 감지 다중 접속 및 충돌 회피(carrier sense multiple access with collision avoidance: CSMA/CA) 프로토콜처럼 송신 전 신호 감지(listen-before-talk: LBT) 메커니즘을 기반으로 채널에 접근하는 LTE-licensed assisted access (LAA)를 표준화했다(Rel-13). 나아가 상향링크에서도 LBT를 통해 비면허 대역 주파수를 공유하는 enhanced LAA (eLAA)와 면허 대역의 앵커(anchor) 없이 비면허 대역에서만 LTE를 운용하는 MulteFire가 표준화되었다(Rel-14)^[7]. 현재는 5G 통신시스템 new radio (NR) 기반의 비면허 대역 활용 기술인 NR-unlicensed (NR-U)의 표준화가 Rel-16

에 이어 Rel-17에서 진행되고 있다^{[8][9]}.

한편, 기존 비면허 대역의 대표적인 무선 접속 기술(radio access technology: RAT)인 Wi-Fi 또한 가상/증강현실, 실시간 고화질 스트리밍과 같이 높은 처리량 및 고신뢰, 저지연 등의 고성능 통신서비스를 요구함에 따라 광대역의 비면허 주파수 확보가 요구된다^[10]. 이에 따라 미국 연방통신위원회(Federal Communications Commission: FCC)와 유럽위원회는 6 GHz 대역을 신규 비면허 대역으로 개방할 수 있도록 추진하고 있다. 구체적으로, 유럽은 5.925~6.425 GHz 대역의 500 MHz 대역폭을 FCC는 5.925~7.125 GHz 대역의 1.2 GHz 대역폭을 신규 비면허 주파수로 고려한다^{[11][12]}. 특히, 미국 FCC는 기존 5 GHz 비면허 대역에서 정의한 국가 정보 인프라(unlicensed national information infrastructure: U-NII) 명명법에 기반하여 6 GHz 대역 또한 다음과 같이 4개의 서브 대역을 정의했다: U-NII-5(5.925~6.425 GHz), U-NII-6(6.425~6.525 GHz), U-NII-7(6.525~6.875 GHz), U-NII-8(6.875~7.125 GHz). 6 GHz 비면허 대역에서의 Wi-Fi 표준은 IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6)를 시작으로 802.11be (Wi-Fi 7)에서 지속해서 개발되고 있으며^{[13][14]}, 같은 대역에서 5G NR의 NR-U 또한 운용될 예정이다^[9]. NR-U와 Wi-Fi의 표준화 과정 및 주요 특징을 요약하면 <표 1>과 같다.

6 GHz 비면허 대역은 ‘greenfield’라고 불리며, 이는 기존 5 GHz 대역과 달리 Wi-Fi 또한 기 사용자가 아님을 의미한다. 즉, 6 GHz 대역의 주파수 공유기술은 기존 2.4 및 5 GHz 대역과 다른 양상으로 적용될 가능성이 큼을 시사한다. 또한, U-LTE와 달리 처음부터 Wi-Fi와의 주파수 공유를 염두한 NR-U는 더 유연한 공존 시나리오를 고려할 수 있을 것으로 예상된다. 본 고에서는 기존 5 GHz 대역에서의 주파수 공유 기술에 대해 살펴보고, 6 GHz 비면허 대역에서의 NR-U와 Wi-Fi 간 주파수 공유기술 연구 동향에 대해 알아본다.

이 논문은 2021년도정부(과학기술정보통신부)의 채원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (2019-0-00964, 스펙트럼 쉐어링 지를 통한 기존 무선국 보호 및 주파수 공유기술 개발).

<표 1> Wi-Fi (IEEE 802.11) 및 비면허 대역 기반 이동통신 (3GPP U-LTE, NR-U) 주요 특징^[15]

구분		운용 시나리오	주요 특징
Wi-Fi (IEEE)	802.11n	단독 (비면허 대역)	운용 대역: 2.4, 5 GHz, 최대 채널 대역폭: 40 MHz, MIMO: 최대 4×4 , MU-MIMO: X, 변조 기법: 최대 64-QAM, 채널 접근 기법: CSMA/CA, HARQ: X
	802.11ac		운용 대역: 5 GHz, 최대 채널 대역폭: 160 MHz, MIMO: 최대 8×8 , MU-MIMO: 4, 변조 기법: 최대 256-QAM, 채널 접근 기법: CSMA/CA, HARQ: X
	802.11ax		운용 대역: 2.4, 5, 6 GHz, 최대 채널 대역폭: 160 MHz, MIMO: 최대 8×8 , MU-MIMO: 최대 8, 변조 기법: 최대 1024-QAM, 채널 접근 기법: CSMA/CA, HARQ: O
	802.11be		운용 대역: 2.4, 5, 6 GHz, 최대 채널 대역폭: 320 MHz, MIMO: 최대 16×16 , MU-MIMO: 최대 12, 변조 기법: 최대 4096-QAM, 채널 접근 기법: CSMA/CA, HARQ: O
U-LTE & NR-U (3 GPP)	LTE-U (LTE Rel-12)	캐리어 집성 (면허 대역 + 비면허 대역) 하향링크	운용 대역: 5 GHz, 최대 채널 대역폭: 60 MHz, MIMO: 최대 8×8 , MU-MIMO: 최대 4, 변조 기법: 최대 256-QAM, 채널 접근 기법: duty-cycle, HARQ: O
	LAA (LTE Rel-13)	캐리어 집성 (면허 대역 + 비면허 대역) 하향링크	운용 대역: 5 GHz, 최대 채널 대역폭: 80 MHz, MIMO: 최대 8×8 , MU-MIMO: 최대 8, 변조 기법: 최대 256-QAM, 채널 접근 기법: LBT, HARQ: O
	MulteFire (MulteFire Alliance)	단독 (비면허 대역)	운용 대역: 1.9, 2.4, 5 GHz, 최대 채널 대역폭: 80 MHz, MIMO: 최대 8×8 , MU-MIMO: 최대 8, 변조 기법: 최대 256-QAM, 채널 접근 기법: LBT, HARQ: O
	eLAA (LTE Rel-14)	캐리어 집성 혹은 이중 연결 (면허 대역 + 비면허 대역)	운용 대역: 5 GHz, 최대 채널 대역폭: 80 MHz, MIMO: 최대 8×8 , MU-MIMO: 최대 8, 변조 기법: 최대 256-QAM, 채널 접근 기법: LBT, HARQ: O
	FelAA (LTE Rel-15)		운용 대역: 5 GHz, 최대 채널 대역폭: 100 MHz, MIMO: 최대 8×8 , MU-MIMO: 최대 8, 변조 기법: 최대 256-QAM, 채널 접근 기법: LBT, HARQ: O
	NR-U (NR Rel-17)	캐리어 집성 혹은 이중 연결 (면허 대역 + 비면허 대역) 단독 (비면허 대역)	운용 대역: 2.4, 3.5, 5, 6, 37, 60 GHz, 최대 채널 대역폭: 6.4 GHz, MIMO: 최대 8×8 , MU-MIMO: 최대 12, 변조 기법: 최대 1024-QAM, 채널 접근 기법: LBT, HARQ: O

* 최대 채널 대역폭은 캐리어 집성을 포함하여 구성할 수 있는 채널의 총 대역폭을 의미.

II. NR-U 및 Wi-Fi 7 개요

NR-U는 LTE-LAA의 후속으로써, 매체 접근 제어(media access control: MAC) 메커니즘은 LTE further eLAA(FeLAA)에 근간하지만, 물리(physical: PHY) 계층은 5G NR에 기반하여 파생되었다는 차이가 있다. 한편, 6 GHz 대역에서의 Wi-Fi 운용을 최초로 고려한 802.11ax (Wi-Fi 6E)는 최대 전송률(peak data rate)이 아닌 사용자 체감 전송률(experienced data rate) 향상을 고려한다는 기본적인 특징이 있다. 본 절에서는 NR-U와 802.11be의 대표적인 특징에 대해 간략히 살펴본다.

2-1 NR-U

앞서 언급한 대로 NR-U의 PHY 계층은 5G NR의 PHY에 기반하여 파생되었으며, 이에 따라 기존 LTE보다 향상된 NR의 PHY 프레임워크를 비면허 대역에서 활용할 수 있다. 대표적으로 유연한 수비학(flexible numerology)이 있다^[16]. 이전 LTE에서 15 kHz로 고정하여 운용하던 부반송파 간격(sub-carrier spacing: SCS)을 NR에서는 시스템 요구 성능에 따라 15, 30, 60, 120, 240 kHz로 유연하게 적용할 수 있으며, 이에 따라 같은 대역폭의 채널 내에서도 자원 블록 수 혹은 심볼 시간을 조절할 수 있다. NR-U 또한 PHY에서 이러한 수비학을 활용한다는 점은 LTE-LAA 기술과 대비되는 가장 큰 특징 중 하나이며, <표 2>와 같이 수비학에 따라 다양한 시간 및 주파수 영역 자원 분할이 가능하다. 아울러 NR-U도 면허 대역의 앵커 없이 비면허 대역에서 단독으로 NR 시스템을 운용할 수 있는 MulteFire의 개념을 포함한다.

<표 2> NR-U와 U-LTE (LAA, MulteFire) 시스템 비교^[15]

구분	NR-U	LAA	MulteFire
운용 시나리오	캐리어 집성 혹은 이중 연결(NR/NR-U 또는 LTE/NR-U) 비면허 대역 단독	캐리어 집성 혹은 이중 연결	비면허 대역 단독
운용 대역	2.4, 3.5, 5, 6, 37, 60 GHz	5 GHz	1.9, 2.4, 5 GHz
MAC 프로토콜	LBT	LBT	LBT
시간 영역 자원 분할 단위	OFDM 심볼 당 0.066, 0.033, 0.017, 0.008 ms	서브 프레임 당 1 ms	서브 프레임 당 1 ms
주파수 영역 자원 분할 단위	자원 블록(resource block: RB) 당 180, 260, 720, 1440 kHz	RB 당 180 kHz	RB 당 180 kHz

한편, U-LTE에서는 duty cycle에 기반한 LTE-U보다 LAA와 같이 LBT 기반의 주파수 공유 방법이 더 높은 효율 및 다른 RAT과의 공평성(fairness)을 달성하는 것으로 도출했으며^[17], NR-U 또한 LBT를 MAC의 기반 메커니즘으로 정의했다. 또한, FeLAA 표준부터는 LTE 기지국인 eNodeB (eNB)가 LBT를 통해 채널 점유 후 패킷을 전송하는 경우, 채널 점유 시 전송 시간(channel occupy time: COT) 내에 하향링크에서 상향링크로의 스위칭을 지원한다. 나아가 NR-U에서는 기지국인 gNodeB (gNB)로부터 채널을 점유하여 통신하는 경우, 여러 번의 상향링크 및 하향링크 전송 간 스위칭을 지원하며, NR-U 단말(user equipment: UE)로부터 채널 점유 후 통신을 시작하는 경우 제어 신호 전송을 위해 하향링크로의 스위칭을 지원한다^[18].

2-2 Wi-Fi 7 (802.11be EHT)

비면허 대역에서 운용되는 무선랜(wireless local area network: LAN)의 대표적인 기술인 Wi-Fi는 802.11ax부터 한 COT 내에서 상향링크와 하향링크 전송을 전환하여 통신할 수 있도록 했으며, 다중 사용자 직교 주파수 분할 다중 접속(multi-user orthogonal frequency division multiple access: MU-OFDMA)을 포함했다. 즉, MU-OFDMA를 통해 채널을 여러 자원 유닛(resource unit: RU) 단위로 나누어 다수의 Wi-Fi 단말(station: STA)과 동시에 통신할 수 있다. 또한, 각 STA가 서로 다른 액세스 포인트(access point: AP)로 신호를 전송할 때, 상호 간에 간섭이 크지 않는 경우 동시 전송을 허용하는 공간 재사용(spatial reuse) 기술과 단말의 에너지 효율 향상을 위한 target wake time(TWT) 기술이 포함됐다^[19].

802.11ax의 후속이자 Wi-Fi 7로 불리는 802.11be extremely high throughput(EHT)도 MU-OFDMA, 공간 재사용 및 TWT 등 802.11ax의 기능을 기본적으로 지원한다. 또한, 802.11be는 Wi-Fi 기반의 가상/증강현실, 실시간 게임, 공장 자동화와 같이 더욱 높은 처리량과 고신뢰·저지연 성능을 요구하는 서비스를 지원하기 위해 최대 16×16 의 다중 안테나(multiple-input multiple-output: MIMO) 및 4096-직교 진폭 변조(quadrature amplitude modulation: QAM) 사용과 320 MHz의 채널 할당을 고려한다. 아울러 다중 링크 집성(multi-link aggregation: MLA) 및 다중 AP 조정(multi-AP coordination) 등의 기술을 지원할 것으로 사료된다^{[13],[20]}.

Ⅲ. 6 GHz 비면허 대역의 특징점

서론에서 언급한 대로 6 GHz 비면허 대역은 Wi-Fi 또한 기 사용자가 아니다. 구체적으로, 5 GHz 대역은 “U-LTE가 기운용 중인 Wi-Fi 시스템에 또 다른 Wi-Fi 시스템 하나가 추가될 때보다 성능 열화를 초래해서는 안 된다.”라는 기본 규정을 기반으로 공존해야 한다^[21]. 게다가 기존 2.4 및 5 GHz 비면허 대역의 경우 후속으로 나온 Wi-Fi 시스템 또한 기운용 중인 이전 버전의 Wi-Fi 시스템과의 공존 이슈가 있다. 새로 개방된 6 GHz 대역은 NR-U와 Wi-Fi 모두 기 사용자가 아니므로 이 같은 고려사항이 없다는 것이 특징이다.

한편, 미국을 기준으로 1.2 GHz의 넓은 대역폭 개방은 기본적으로 더욱 높은 처리량과 같은 향상된 통신 성능을 제공할 수 있다. 기존 5 GHz 대역의 가장 넓은 대역폭을 갖는 채널은 320 MHz 하나가 있을 수 있으나, 다수의 노드가 주파수를 공유하는 상황에서 해당 채널의 활용은 실질적으로 불가능하다. 6 GHz 대역의 넓은 대역폭은 7개의 160 MHz 및 3개의 320 MHz 채널을 정의할 수 있으며, 집성을 통한 240 MHz의 채널을 기본적으로 지원한다.

또한, 6 GHz 대역은 기운용되는 Wi-Fi 뿐만 아니라, U-LTE 시스템 또한 없으므로 네트워크 혼잡이 적으며, 기반부터 망을 새로 구축함으로써 상호 간섭을 완화하여 더욱 높은 신호 대 간섭 및 잡음비(signal-to-interference plus noise ratio: SINR)를 제공할 수 있을 것으로 예상된다. 802.11be EHT에서 4096-QAM과 같은 높은 차수의 변조를 적용할 수 있는 것도 이로부터 유도된다^[14].

Ⅳ. 6 GHz 대역에서 기존 시스템과의 주파수 공유

6 GHz 대역에서 NR-U와 Wi-Fi 시스템 간 공존을 고려하기에 앞서 이 대역에서 기운용되던 시스템과의 주파수 공유를 고려할 필요가 있다. 특히, 6 GHz 대역의 일부는 백홀과 같은 고정 통신(U-NII-5, U-NII-7), 고정 위성(U-NII-5), 방송 중계와 같은 모바일 서비스(U-NII-6, U-NII-8) 및 초광대역

〈표 3〉 미국 FCC R&O의 6 GHz 비면허 대역 주파수 공유 기술기준

구분	U-NII-5	U-NII-6	U-NII-7	U-NII-8
주파수 대역	5.925~6.425 GHz	6.425~6.525 GHz	6.525~6.875 GHz	6.875~7.125 GHz
채널 수	20 MHz	24	4	18
	40 MHz	12	1	9
	80 MHz	6	0	4
	160 MHz	3	0	2
규정 및 제약	실내 운용 및 보호구역 이외의 실외 운용을 허가	실내 운용만 허가	실내 운용 및 보호구역 이외의 실외 운용을 허가	실내 운용만 허가
실외 운용 규정	AFC DB와 연결되어 운용 최대 전력: 36 dBm (AP), 30 dBm (client)	X	AFC DB와 연결되어 운용 최대 전력: 36 dBm(AP), 30 dBm(client)	X
실내 운용 규정	최대 전력: 30 dBm (AP), 24 dBm (client) (최대 전력은 effective isotropic radiated power (EIRP)를 의미)			

* 여기서 AP는 6 GHz 비면허 대역에서 동작하는 NR-U의 gNB 및 Wi-Fi의 AP를 모두 포함함.

(ultra wide band: UWB) 시스템(U-NII-6)이 배정되어 있다^[18]. 이에 따라 미국 FCC는 6 GHz 대역에서 기존에 운용되던 시스템과의 원활한 공존을 위해 6 GHz Report&Order (R&O)에서 <표 3>과 같은 주파수 공유 기술기준을 제시했다^[22].

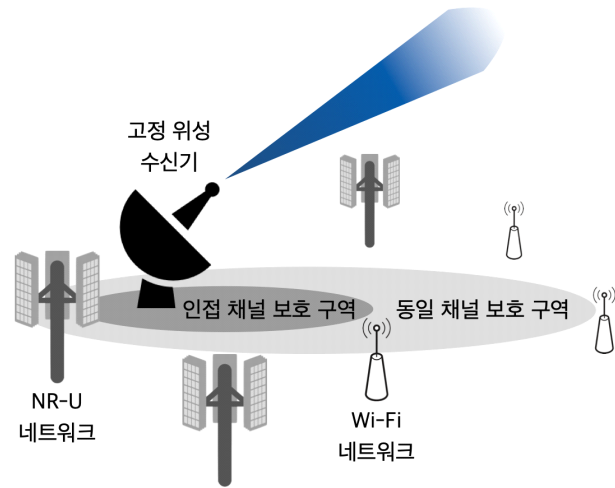
기본적으로 기 사용자의 위치가 고정되어 있지 않은 U-NII-6 및 U-NII-8 대역은 실내 운용만을 허가한다. 한편, U-NII-5 및 U-NII-7 대역에서는 자동 주파수 조정(automated frequency coordination: AFC)을 적용하여 실외에서의 주파수 공유를 허가하며, 이는 해당 대역에서 고정 운용되는 기존 시스템의 정보(database: DB)를 기반으로 기 사용자에게 미치는 간섭을 완화하면서 비면허 주파수를 공유하는 시스템이다.

4-1 보호구역(Exclusive Zone) 기반 주파수 공유기술

FCC 6 GHz R&O는 U-NII-5와 U-NII-7 대역에서 AP의 송신 전력 밀도를 23 dBm/MHz로 규정함과 동시에 기본적으로 해당 대역에서 기존 운용되는 시스템의 수신기에 임계치 이상의 간섭을 미치지 않도록 보호구역을 정의했다. 한 예로 [그림 1]과 같은 고정 위성 수신기의 보호구역을 고려할 수 있다. 이 수신기의 빔 패턴과 AP 혹은 gNB의 송신 전력(effective isotropic radiated power: EIRP) 및 전파 모델 등을 통해 산출되는 수신 신호 세기에 기반하여 동일 채널 간섭 및 인접 채널 간섭에 의한 보호구역을 정의할 수 있다. FCC 6 GHz R&O에서는 이 간섭 임계치를 간섭 대 잡음비(interference-to-noise ratio: INR) -6 dB로 정의한다.

4-2 Automated Frequency Coordination (AFC)

AFC는 U-NII-5와 U-NII-7 대역에서 고정 운용되는 기존 네트워크의 정보(DB)를 기반으로 간섭을 완화하면서 비면허 주파수를 공유하는 시스템이다. 해당 대역에서 운용되는 표준 전력 AP (standard power AP: SPAP)는 AFC DB와 연결되어 자신의 위치 정보를 전달하고, 인접한 고정 통신망의 정보를 기반으로 사용 가능한 채널 및 최대 송신 전력(EIRP)을 할당받는다. 국내에서도 이와 유사하게 비면허 대역 사용자가 DB에 접속하여 기운용되는 네트워크에 간섭을 완화하며, 가용 주파수를 할당받는 Korea frequency coordination (K-FC)의 도입을 계획하고 있다^[23].

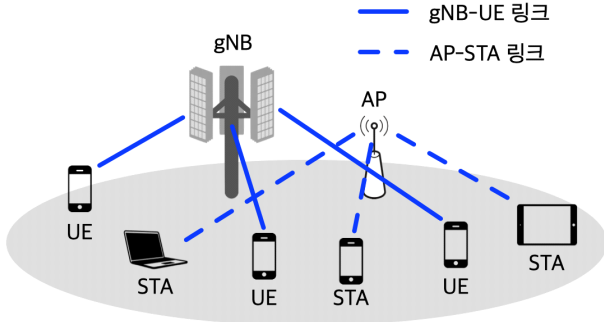


[그림 1] 보호구역 기반 주파수 공유기술 개념도

표준 전력 AP 외에 낮은 송신 전력을 통해 AFC에 접속 없이 운용 가능한 저전력 실내(low power indoor: LPI) AP 및 초저전력(very low power: VLP) 장비가 있다. LPI AP와 해당 AP에 연결된 클라이언트(NR-U의 UE 혹은 Wi-Fi의 STA)는 각각 최대 전력 30 dBm, 24 dBm 및 최대 전력 밀도 5 dBm/MHz, -1 dBm/MHz로 6 GHz 대역 전체에 걸쳐 실내 환경에서 운용될 수 있다. 또한, VLP 장비는 실내외 모든 곳에서의 운용을 허가할 뿐만 아니라, 기 사용자의 보호 영역 내에서도 동작할 수 있다. 여기에는 가상/증강현실, 웨어러블 기기 등의 주요 응용들도 포함되며, 4~14 dBm 수준의 송신 전력($-18 \sim -8$ dBm/MHz)을 허용할 것으로 예상된다^[22].

V. 6 GHz 대역에서 NR-U/Wi-Fi 간 주파수 공유

앞서 서술한 대로 Wi-Fi 시스템은 IEEE 802.11ax부터 6 GHz 대역에서의 운용을 고려하기 시작했으며^[24], 5G NR-U 또한 같은 대역에서의 운용을 포함한다^[9]. 이에 따라 기존 시스템과의 주파수 공유뿐만 아니라, 5 GHz 비면허 대역에서와 마찬가지로 [그림 2]와 같은 NR-U/Wi-Fi 네트워크의 공존 시나리오에 관하여 고려해야 한다. 특히, 두 시스템 간 공평성을 높게 유지하면서 처리량을 최대화하는 주파수 공유기술이 요구되며, 여기에는 MAC 프로토콜과 파라미터, 센싱 메커니즘 등이 포함된다.



[그림 2] NR-U/Wi-Fi 네트워크 간 주파수 공유 시스템 모델

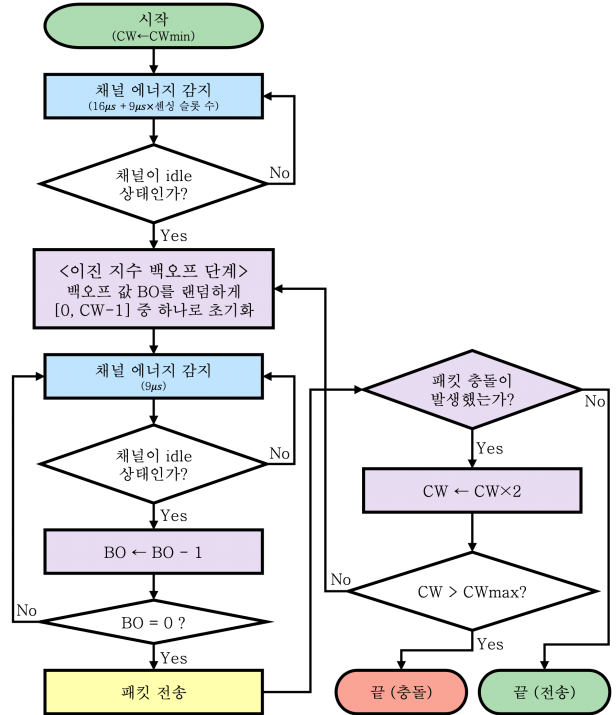
5-1 MAC 프로토콜

앞서 언급한 대로 U-LTE와 Wi-Fi 간 주파수 공유기술은 LTE-LAA 이후로 duty cycle보다 더 높은 공평성을 달성하는 LBT 메커니즘을 기반으로 표준화가 진행되고 있으며, 이는 NR-U에서도 공통적이다. 하지만, NR-U의 LBT 유형(Type)과 LTE-LAA의 LBT 카테고리(category: CAT)는 조금 상이하다. LBT 유형의 서술에 앞서, 기본적으로 NR-U는 Wi-Fi와의 공존 시나리오에서 공평성 향상을 위해 주로 Type 1(CAT4)로 동작하며, 이는 근본적으로 CSMA/CA와 같다.

NR-U LBT Type 1 혹은 Wi-Fi CSMA/CA의 동작 알고리즘은 [그림 3]과 같다. 특히, [그림 3]은 NR-U/Wi-Fi 시스템의 공존 네트워크에서 한 노드(NR-U의 gNB 혹은 UE, Wi-Fi의 AP 혹은 STA)의 MAC 메커니즘을 나타낸다. 구체적으로, 전송할 패킷이 발생한 노드는 채널 사용되고 있는지(busy) 혹은 비어 있는지(idle) 에너지 감지(energy detection: ED)를 통해 일정 시간 센싱(기본 $16\mu s + 9\mu s \times \text{센싱 슬롯 수}$) 후, 채널이 idle 상태면 이진 지수 백오프(binary exponential backoff: BEB) 단계로 진입한다.

BEB 과정의 시작은 우선 0부터 자기 노드에 할당된 초기 경쟁 윈도우(contention window: CW) 미만의 값 중 하나를 랜덤하게 선택하는 과정이며, 본 고에서는 이 값을 백오프(backoff: BO)라고 정의한다. 이후 $9\mu s$ 씩 채널에 ED를 수행하며, 이 과정에서 다른 노드의 채널 점유가 감지되면 BO 값을 줄이지 않으면서(freeze) 채널 감지를 지속한다. 채널이 비어있는 상태로 감지되면 BO 값을 하나씩 줄이고, 이 값이 0이 되면 채널을 점유하고 패킷 전송을 수행한다.

한편, 패킷 전송 후에는 HARQ 과정을 통해 패킷 충돌



[그림 3] LBT Type 1 및 CSMA/CA 프로토콜 동작 순서도

(collision) 혹은 수신 여부를 인지한다. 수신 노드가 정상적으로 수신했으면 [그림 3]의 동작을 마무리하며(끝(전송)), 충돌이 발생했거나 채널 상태로 인해 패킷을 수신하지 못한 경우 CW 값을 두 배 증가시킨 후 이진 지수 백오프 단계 중 BO 값 선택 과정부터 반복한다. 만약 CW 값이 최대값(CW_{max})에 도달한 후에도 전송한 패킷이 한 번 더 충돌을 겪는 경우 CW_{max} 값을 기반으로 BO 값 선택 과정부터 진행하며, 다음 시도에도 충돌이 발생할 때(끝(충돌))는 시작 단계부터 다시 진행한다.

한편, 기존 LTE-LAA에서는 LBT 카테고리를 다음과 같이 분류했다.

- LBT CAT1: $16\mu s$ 동안 채널 센싱 후 채널이 idle 상태면 즉시 전송을 수행함. 이는 통상적으로 ACK 신호 전송처럼 한 COT 내에서 상향링크/하향링크 전환 시에 대기 시간으로 활용됨.
- LBT CAT2: $16\mu s$ 에 한 개의 센싱 슬롯($+9\mu s$)을 추가로 센싱한 후 채널이 idle 상태면 즉시 전송을 수행함. 이는 CAT 3과 4에서 랜덤 백오프 과정이 없는 LBT로 간주

할 수 있음.

- LBT CAT3: 추가 센싱 슬롯과 고정된 경쟁 윈도우 크기 기반의 랜덤 백오프를 포함한 LBT를 수행함.
- LBT CAT4: CSMA/CA와 유사한 형태로 동작하며, CAT 3에서 확장하여 가변 경쟁 윈도우 크기를 기반으로 LBT를 수행함.

NR-U에서는 LBT CAT3가 표준에서 제외되었으며, 유형 별로 다음과 같이 분류된다^[25].

- LBT Type 2C: LBT 없이 즉시 채널을 점유하여 전송함. 단, 채널 점유 시간(COT)은 최대 584 μ s로 정의됨.
- LBT Type 2B: 16 μ s 동안 채널 센싱 후 idle 상태면 패킷을 전송함.
- LBT Type 2A: 25 μ s 동안 채널 센싱 후 idle 상태면 패킷을 전송함.
- LBT Type 1: CSMA/CA와 동일한 과정의 프로토콜로 동작함. 즉, 추가 센싱 슬롯과 랜덤 백오프 및 가변 경쟁 윈도우 크기를 기반으로 LBT를 수행함.

한편, 6 GHz 대역은 기운용 중인 LTE-LAA 혹은 Wi-Fi 네트워크가 없으므로 기반부터 공존 시나리오를 설계할 수 있다. 이에 따라 CSMA/CA 같은 LBT 메커니즘이 아닌 수정된 LBT^[26]나 밀리미터파 대역에서 지향형 LBT에 수신단에서 보조적으로 활용할 수 있는 수신 전 신호 감지(listen-before-receive: LBR)^[27]와 같은 기술도 제안되고 있으나, 여전히 LBT가 기반으로써 적용될 것으로 예상된다.

5-2 MAC 파라미터

NR-U와 Wi-Fi 시스템은 전송할 패킷의 우선순위에 따라 <표 4>와 같이 MAC 파라미터를 정의한다. 주요 파라미터로는 한 노드의 채널 점유가 끝난 후 채널 감지 시 비어있는 경우 최소 대기 시간(16μ s + 9μ s $\times$ 센싱 슬롯 수), 최소 및 최대 경쟁 윈도우 크기(각각 CW_{min} , CW_{max}), 채널 점유 시 전송 시간(COT)이 있다^[28]. NR-U와 Wi-Fi 모두 응용의 요구 사항(quality-of-service: QoS)에 따라 4개 클래스로 나뉘며, 우선순위가 높은 클래스부터 정리하면 NR-U는 1~4, Wi-Fi는 VO(voice), VI(video), BE(besteffort), BK(background)로 나뉜다.

한편, <표 4>에 기반하면, 같은 QoS를 갖는 응용에 따라 동일한 파라미터를 가지므로 채널 접근에 대한 공평성은 비슷하게 유지할 수 있을 것으로 예상된다. 상호 간에 다른 값으로는 COT가 있으며, 채널에 충돌 없이 접근한 단말은 COT 시간 동안 패킷을 안정적으로 전송할 수 있으므로 이 값은 두 시스템 간 공평성 지수에 지배적으로 영향을 야기한다. COT 값으로도 예측할 수 있지만, 실제 모의실험 및 분석을 통해서도 NR-U가 채널을 더 점유하는 결과가 도출됐으며, 이에 두 시스템의 COT를 같게 할당해야 한다는 연구도 있다^{[29],[30]}. 하지만, 단순히 COT만 고려하기보다 PHY 계층 파라미터까지 고려한 보다 면밀한 공평성을 분석할 필요가 있을 것으로 사료된다.

5-3 성능 분석

NR-U/Wi-Fi 네트워크 간 주파수 공유 환경의 성능 분석은 주로 두 시스템의 MAC 프로토콜을 이산 마르코프 체인

<표 4> QoS 우선순위(접근 클래스)에 따른 NR-U/Wi-Fi MAC 프로토콜 파라미터

QoS 우선순위 (접근 클래스)		센싱 슬롯 수		대기 시간 [μ s]			CW_{min}		CW_{max}		채널 점유 시간 (COT) [ms]		
NR-U	Wi-Fi	NR-U		Wi-Fi	NR-U		Wi-Fi	Wi-Fi	NR-U		Wi-Fi	NR-U	
		DL	UL		DL	UL			DL	UL		DL	UL
1	VO	1	2	1	25	34	25	4	4	8	8	2	2.080
2	VI	1	2	1	25	34	25	8	8	16	16	3	4.096
3	BE	3	3	43	43	43	16	16	64	1,024	1,024	DL: 8 or 10 UL: 6 or 10	2.528
4	BK	7	7	79	79	79	16	16	1,024	1,024	1,024	DL: 8 or 10 UL: 6 or 10	2.528

으로 모델링한 후, 각 시스템 혹은 노드의 채널 점유 시간 비율에 기반하여 처리량 및 공평성 분석을 수행한다. 참고문헌 [31]에서는 2차원 마르코프 체인에 기반하여 LAA LBT CAT3과 Wi-Fi 공존 시스템의 하향링크 처리량을 분석했으며, 참고문헌 [32]에서는 3차원 마르코프 모델을 통해 LBT CAT4의 과정을 구현했다. 참고문헌 [33]에서는 이진 백오프 과정을 고려한 LBT CAT4의 성능 분석을 하였으며, 나아가 참고문헌 [34]에서는 최대 백오프 크기와 재송신 횟수를 고려한 LAA/Wi-Fi 공존 네트워크의 성능 분석을 수행했다. 참고문헌 [35]에서는 채널 센싱 과정의 에너지 검출 임계치에 기반한 시스템 처리량을 분석했으며, 참고문헌 [36]에서는 LAA CAT4와 Wi-Fi의 DCF 메커니즘을 고려한 2차원 이산 마르코프 체인 모델을 설계하고 성능 분석을 수행했다. 또한, 참고문헌 [37]과 참고문헌 [38]에서는 LAA CAT4와 Wi-Fi의 우선순위에 따른 MAC 파라미터까지 고려하여 각각 2차원 및 3차원 이산 마르코프 체인에 기반한 처리량 분석을 수행했다. 차후에도 NR-U/Wi-Fi 공존 시나리오의 MAC 프로토콜은 이와 유사한 성능 분석 방법론이 활용될 것으로 사료된다.

VI. 결론 및 향후 발전방향

본 고에서는 6 GHz 비면허 대역의 특징점과 NR-U 및 Wi-Fi 기술 동향, 나아가 6 GHz 대역에서 NR-U와 Wi-Fi 시스템 간 주파수 공유기술의 주요점에 관하여 소개했다. 국내에서도 2020년 10월에 미국과 동일한 6 GHz 비면허 대역의 기술기준을 확정 공개했으며, 효율적인 K-FC 시스템 구축을 비롯한 다양한 내용을 지속해서 논의할 것으로 보인다. 마지막으로, 대표적인 향후 연구 방향 두 가지: 1) 프레임 기반(frame based equipment: FBE) LBT와 부하 기반(load based equipment : LBE) LBT, 2) 채널 감지 메커니즘과 임계치 정의에 관한 내용을 소개하면서 본 고를 마친다.

슬롯형(slotted) ALOHA처럼 동기화와 채널 점유시 일정 프레임 간격 동안 전송하는 FBE LBT 및 순수 ALOHA처럼 동기화 및 프레임 간격 없이 LBT를 수행하는 LBE LBT가 있다. FBE LBT에 기반하여 동작하는 경우, 동기를 맞추어 동작하므로 더 효율적인 간섭 완화 기술 등을 통해 시스템

성능을 향상할 수 있다. 하지만, 이를 위해 네트워크 내의 모든 비면허 단말에 시간 동기화가 요구되며, LBE LBT와 공존하는 경우 채널 점유 비율이 비교적 낮다는 문제가 있다. 현재 Wi-Fi는 LBE LBT로 동작하며, NR-U는 Wi-Fi가 확실히 없다고 보장되는 환경에서 FBE LBT를 통해 동작할 수 있다. 하지만, 효율성을 고려했을 때, 6 GHz 대역에서는 두 시스템 모두 FBE LBT로 동작하는 것을 고려해볼 수 있을 것으로 사료된다.

또한, 채널 감지 메커니즘으로는 프리앰플 감지(preamble detection: PD)와 현재 활용되는 ED가 있다. ED는 낮은 복잡도를 가지며, 공간 재사용 기술과 활용하기 좋다는 장점이 있지만, 채널을 지속해서 감지해야 하므로 전력 소모가 PD보다 크고 숨겨진 노드 문제에 취약하다는 단점이 있다. 또한, PD는 프리앰플 검파를 통해 채널을 점유한 노드의 COT를 알 수 있으며, 이를 통해 나머지 시간에 대해 감지를 수행하지 않음으로써 전력 효율을 향상할 수 있고, 낮은 임계치에 대해서도 안정적이라는 장점이 있다. 하지만, 그만큼 복잡도가 높고 노출된 노드 문제에 약하다는 단점이 있다. 결론적으로 각 방법의 장단점을 고려한 효율적인 채널 감지 방법의 선정이 필요하며, 각 방법에 대해 적절한 임계치를 정의하는 것 또한 고려할 필요가 있다.

참 고 문 헌

- [1] F. Tariq, M. R. A. Khandaker, K. K. Wong, M. A. Imran, M. Bennis, and M. Debbah, "A speculative study on 6G", *IEEE Wireless Commun*, vol. 27, no. 4, pp. 118-125, Aug. 2020.
- [2] S. Lee, J. Yoon, and B. C. Jung, "A cooperative phase-steering technique with on-off power control for spectrum sharing-based wireless sensor networks", *Sensors*, vol. 20, no. 7, pp. 1942(1-11), Mar. 2020.
- [3] H. S. Jang, B. C. Jung, T. Q. S. Quek, and D. K. Sung, "Resource-hopping based grant-free multiple access for 6G-enabled massive IoT networks", *IEEE Internet Things J.*, Mar. 2021 (early access article).
- [4] D. H. Kim, J. Youn, and B. C. Jung, "Opportunistic inter-

- ference alignment for spectrum sharing between radar and communication systems", *Sensors*, vol. 20, no. 17, pp. 4868 (1-13), Aug. 2020.
- [5] J. B. Seo, B. C. Jung, and H. Jin, "Modeling and online adaptation of ALOHA for low power wide area networks (LPWAN)", *IEEE Internet Things J.*, Apr. 2021 (early access article).
- [6] S. H. Chae, T. Kim, and B. C. Jung, "Distributed opportunistic scheduling with interference-mitigation antenna selection for ultra-dense D2D networks", *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 10, no. 5, pp. 1113-1117, May 2021.
- [7] Y. Huang, Y. Chen, Y. T. Hou, W. Lou, and J. H. Reed, "Recent advances of LTE/WiFi coexistence in unlicensed spectrum", *IEEE Netw.*, vol. 32, no. 2, pp. 107-113, Mar.-Apr. 2018.
- [8] *Technical Specification Group Radio Access Network; Study on NR-based access to unlicensed spectrum (Release 16)* Standard 3GPP TR 38.889, Dec. 2018.
- [9] *Technical Specification Group Radio Access Network; Feasibility Study on 6 GHz for LTE and NR in Licensed and Unlicensed Operations (Release 17)* Standard 3 GPP TR 37.890, Jun. 2021.
- [10] 엄중선, 김봉수, 박승근, "6 GHz 대역 비면허 주파수 공유 기술 및 기술기준", 한국통신학회지(정보와통신), 37(11), pp. 77-86, Oct. 2020.
- [11] European Commission. (Dec. 2017). *Mandate to CEPT to Study Feasibility and Identify Harmonized Technical Conditions for Wireless Access Systems Including Radio Local Area Networks in the 5925-6425 MHz Band for the Provision of Wireless Broadband Services*. Accessed: Sept. 20, 2021. [Online]. Available: http://ec.europa.eu/newsroom/dae/document.cfm?doc_id=50343
- [12] FCC. (Oct. 2018). *Notice of Proposed Rulemaking; In the Matter of Unlicensed Use of the 6 GHz band (ET Docket No. 18-295); Expanding Flexible Use in Mid-Band Spectrum Between 3.7 and 24 GHz (GN Docket No. 17-183)*. Accessed: Sept. 20, 2021. [Online]. Available: <https://docs.fcc.gov/public/attachments/FCC-18-147A1.pdf>
- [13] A. Garcia-Rodriguez, D. López-Pérez, L. Galati-Giordano, and G. Geraci, "IEEE 802.11be: Wi-Fi 7 strikes back", *IEEE Commun. Mag.*, vol. 59, no. 4, pp. 102-108, Apr. 2021.
- [14] G. Naik, J. M. Park, J. Ashdown, and W. Lehr, "Next generation Wi-Fi and 5G NR-U in the 6 GHz bands: Opportunities and challenges", *IEEE Access*, vol. 8, pp. 153027-153056, Aug. 2020.
- [15] S. Lagen, L. Giupponi, S. Goyal, N. Patriciello, B. Bojović, A. Demir, and M. Beluri, "New radio beam-based access to unlicensed spectrum: Design challenges and solutions", *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 22, no. 1, pp. 8-37, 1st Quart. 2020.
- [16] S. Parkvall, E. Dahlman, A. Furuskar, and M. Frenne, "NR : The new 5G radio access technology", *IEEE Commun. Standards Mag.*, vol. 1, no. 4, pp. 24-30, Dec. 2017.
- [17] B. Bojović, L. Giupponi, Z. Ali, and M. Miozzo, "Evaluating unlicensed LTE technologies: LAA vs LTE-U", *IEEE Access*, vol. 7, pp. 89714-89751, Jul. 2019.
- [18] M. Hirzallah, M. Krunz, B. Kecicioglu, and B. Hamzeh, "5G new radio unlicensed: Challenges and evaluation", *IEEE Trans. Cogn. Commun. Netw.*, Dec. 2020 (early access article).
- [19] E. Khorov, A. Kiryanov, A. Lyakhov, and G. Bianchi, "A tutorial on IEEE 802.11ax high efficiency WLANs", *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 21, no. 1, pp. 197-216, 1st Quart. 2019.
- [20] R. J. Yu, M. Gan, and D. S. Yang. (May 2019). *IEEE 802.11-19/0754: 11be Peak Data Rate Analysis*. Contribution to the IEEE TGbe.
- [21] *Technical Specification Group Radio Access Network; Study on Licensed-Assisted Access to Unlicensed Spectrum (Release 13)* Standard 3GPP TR 36.889, Jun. 2016.
- [22] FCC. (Apr. 2020). *Report and Order and Further Notice of Proposed Rulemaking; In the Matter of Unlicensed Use of the 6 GHz Band (ET Docket No. 18-295); Expanding*

- Flexible Use in Mid-Band Spectrum between 3.7 and 24 GHz (GN Docket No. 17-183)*. Accessed: Sept. 20, 2021. [Online]. Available: <https://docs.fcc.gov/public/attachments/FCC-20-51A1.pdf>
- [23] 과학기술정보통신부 (Dec. 2019). 5G+ 스펙트럼 플랜. Accessed: Sept. 20, 2021. [Online]. Available: <https://www.msit.go.kr/SYNAP/skin/doc.html?fn=4bcc5f87544148dad0ba683d6fb2d8e&rs=/SYNAP/sn3hcv/result/>
- [24] *Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications; Amendment 1: Enhancements for High Efficiency WLAN*, Standard IEEE P802.11ax/D6.0, Nov. 2019.
- [25] *Technical Specification Group Radio Access Network; Physical layer procedures for shared spectrum channel access (Release 16)* Standard 3GPP TS 37.213, Jun. 2021.
- [26] H. Song, Q. Cui, Y. Gu, G. L. Stüber, Y. Li, Z. Fei, and C. Guo, "Cooperative LBT design and effective capacity analysis for 5G NR ultra dense networks in unlicensed spectrum", *IEEE Access*, vol. 7, pp. 50265-50279, Apr. 2019.
- [27] S. Lagen and L. Giupponi, "Listen before receive for coexistence in unlicensed mmWave bands", in *Proc. 2018 IEEE Wireless Commun. Netw. Conf. (WCNC)*, Barcelona, Spain, Apr. 2018, pp. 1-6.
- [28] 조민근, 이기훈, 배재원, 정방철, "NR-U Wi-Fi 와 공존환경에서 전송률 및 공평성 성능분석", 한국통신학회 학술대회논문집, Feb. 2021.
- [29] K. -H. Kim, L. Li, E. Perahia, D. Stanley, S. Strickland, and C. Vlachou, "LAA/Wi-Fi coexistence evaluations with commercial hardware", presented at the P802.11 Coexistence SC Workshop, Jul. 2019.
- [30] M. Ghosh, V. Sathya, M. Iqbal, M. Mehmoush, and S. Roy, "Coexistence of LTE-LAA and Wi-Fi: Analysis, simulation and experiments", presented at the P802.11 Coexistence SC Workshop, Jul. 2019.
- [31] C. Chen, R. Ratasuk, and A. Ghosh, "Downlink performance analysis of LTE and WiFi coexistence in unlicensed bands with a simple listen-before-talk scheme", in *Proc. IEEE 81st Veh. Technol. Conf.*, Glasgow, UK, May 2015, pp. 1-5.
- [32] J. Xiao, J. Zheng, L. Chu, and Q. Ren, "Performance modeling and analysis of LAA LBT category-4 procedure", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 68, no. 10, pp. 10045-10055, Oct. 2019.
- [33] Y. Gao, X. Chu, and J. Zhang, "Performance analysis of LAA and WiFi coexistence in unlicensed spectrum based on markov chain", in *Proc. IEEE Global Commun. Conf.*, Washington, DC, USA, Dec. 2016, pp. 1-6.
- [34] X. Yan, H. Tian, and C. Qin, "A Markov-based modelling with dynamic contention window adaptation for LAA and WiFi coexistence", in *Proc. IEEE 85th Veh. Technol. Conf.*, Sydney, Australia, Jun. 2015, pp. 1-6.
- [35] M. Mehmoush, V. Sathya, S. Roy, and M. Ghosh, "Analytical modeling of Wi-Fi and LTE-LAA coexistence: Throughput and impact of energy detection threshold", *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 26, no. 4, pp. 1990-2003, Aug. 2018.
- [36] E. Pei and J. Jiang, "Performance analysis of licensed-assisted access to unlicensed spectrum in LTE Release 13", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 68, no. 2, pp. 1446-1458, Feb. 2019.
- [37] Y. Gao and S. Roy, "Achieving proportional fairness for LTE-LAA and Wi-Fi coexistence in unlicensed spectrum", *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 19, no. 5, pp. 3390-3404, May 2020.
- [38] J. Zheng, J. Xiao, Q. Ren, and Y. Zhang, "Performance modeling of an LTE LAA and WiFi coexistence system using the LAA category-4 LBT procedure and 802.11e EDCA mechanism", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 69, no. 6, pp. 6603-6618, Jun. 2020.

≡ 필자소개 ≡

이 기 훈



2018년 8월: 충남대학교 전자공학과 (공학사)
2018년 9월~현재: 충남대학교 전자공학과 석박
사통합과정
[주 관심분야] 무선통신, 통계적 신호 처리, 알고리
즘, 최적화.

정 방 철



2002년 2월: 아주대학교 전자공학부 (공학사)
2004년 8월: 한국과학기술원 전자전산학과 (공학
석사)
2008년 2월: 한국과학기술원 전자전산학과 (공학
박사)
2008년 3월~2010년 3월: 한국과학기술원 IT융합
연구소 팀장

2010년 3월~2014년 2월: 국립경상대학교 정보통신공학과 조교수
2014년 3월~2015년 8월: 국립경상대학교 정보통신공학과 부교수
2015년 9월~현재: 충남대학교 전자공학과 정교수
[주 관심분야] 무선통신, 통계적 신호 처리, 정보이론, 압축센싱, 이동통
신, 주파수 공유.