

SK텔레콤 6G 백서

5G Lessons Learned 및 6G 핵심 요구사항,
6G 네트워크 기술 진화 방향, 6G 스펙트럼



ICT Infra
Version 1.0 (2023년 8월)

Copyright© 2023 SK Telecom. All Rights Reserved.

SK 텔레콤 6G 백서

5G Lessons Learned 및 6G 핵심 요구사항,
6G 네트워크 기술 진화 방향, 6G 스펙트럼

ICT Infra

VERSION 1.0 (2023 년 8 월)

목 차

[Executive Summary].....	4
1. 들어가는 말.....	5
2. 5G Lessons Learned.....	6
3. 2030 유망 서비스 전망과 기술 동향.....	9
4. 6G 글로벌 동향.....	10
4.1 국외 동향.....	11
4.2 국내 동향.....	12
5. 6G 핵심 요구사항.....	13
5.1 6G 킬러 서비스 연계 진화.....	13
5.2 6G 비전.....	15
5.3 심플한 아키텍처 옵션 정의.....	16
6. 6G 네트워크 기술 진화 방향.....	18
6.1 기술 진화 전망.....	18
6.2 AI-native 네트워크.....	20
6.3 Green-native 네트워크.....	24
6.4 양자 보안 네트워크.....	28
6.5 무선 진화 기술.....	30
6.6 오픈랜.....	32
6.7 코어망.....	34
6.8 전송망.....	37
6.9 상공망.....	38
7. 6G 스펙트럼.....	40
7.1 6G 주파수 발굴.....	41
7.2 6G 후보주파수 투과특성.....	42
8. 6G 예상 일정.....	45
9. 맺음말.....	46
References.....	47
Abbreviations.....	48

[Executive Summary]

[정의]

- 6G 는 세계 최초 5G 상용화에서 배운 레슨을 바탕으로 2030 년경 도래할 서비스·단말 진화와 이동통신 진화가 융합하는 시기의 통신·서비스를 통칭

[5G Lessons Learned]

- 6G 는 달성 가능한 목표 설정과 시장·소비자와의 지속적인 소통이 필요함
- 6G 킬러 서비스 발굴, 신규 주파수 발굴, 개방형 인터페이스(예. 오픈랜) 활성화, 심플한 아키텍처 옵션 등 6G 생태계 전체의 노력이 요구됨

[2030 유망 서비스 전망과 기술 동향]

- 6G 통신·인공지능·센싱 기술을 바탕으로 자율주행·UAM·XR·홀로그램·디지털 트윈 서비스가 논의 중이며, 6G 킬러 서비스 및 디바이스 발굴이 필수
- 6G 초기 연구 단계임에도 주요 국가 및 기업은 이미 6G 연구 개발에 착수, 기술 포럼 및 백서 발간 등을 통해 6G 비전 및 연구 성과를 제시 중

[6G 핵심 요구사항]

- 6G 프레임워크 권고서는 사용 시나리오와 주요 성능 지표를 정의하였으며, 최대 전송 속도 등 일부 지표는 기술 성능 요구 문서에서 구체화 계획 중
- 6G 전용 상품 및 서비스 발굴, 심플한 아키텍처 옵션, 커버리지 감소 극복 기술, 사용자 경험 제고를 위한 단말 발열 및 전력소모 절감 기술 필수

[6G 네트워크 기술 진화 방향]

- ▲AI-native ▲Green-native ▲양자 보안 네트워크 ▲무선 진화 기술 ▲오픈랜 ▲코어망 ▲전송망 ▲상공망에서의 기술 진화 전망

[6G 스펙트럼]

- 6G 는 신규 대역 발굴과 기존 대역의 6G 활용 연구가 병행되어야 하며 고주파 전파 특성 연구, 경로손실 측정 등을 통해 6G 기술 요구사항 반영 필요

[6G 예상 일정]

- ITU 는 2023 년 6G 프레임워크 권고서를 완성하였고 2030 년 표준 승인 예정이며, 3GPP 는 2028 년 표준 완성, 2030 년 전후 상용화 예상

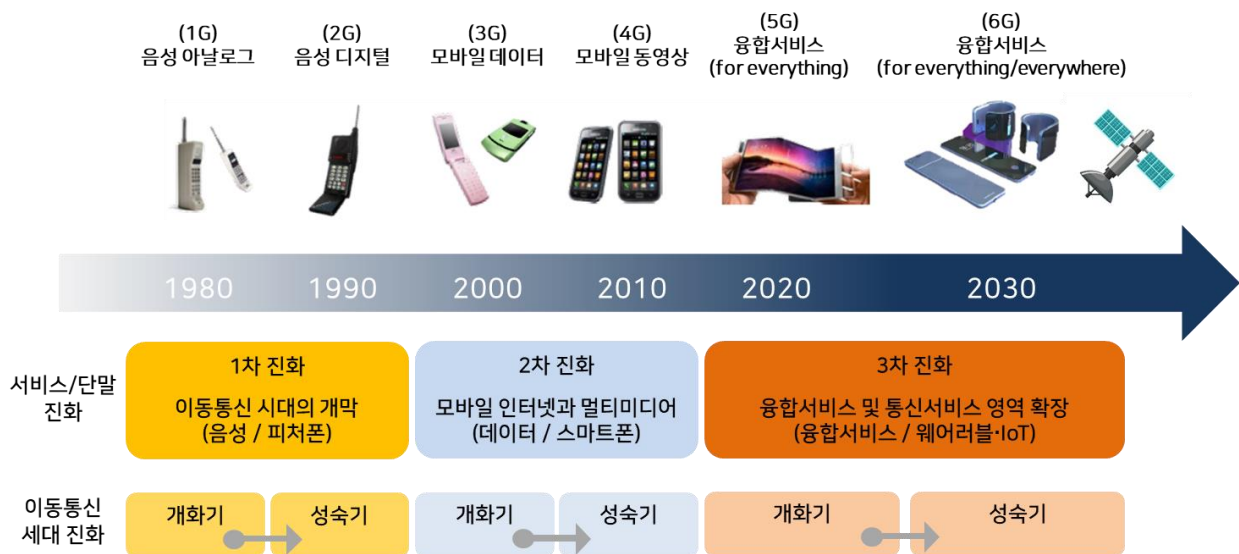
[맺음말]

- SK 텔레콤은 국내외 산·학·연 6G 파트너와 적극적인 협업을 통해 6G 기술 개발을 선도하여, 대한민국이 글로벌 ICT 선두 국가로 발돋움하는데 기여하고자 함

1. 들어가는 말

과거를 돌아보면 새로운 서비스에 대한 요구와 이를 뒷받침할 제반 산업의 발전이 함께 보조를 맞추어 진행되었을 때 이동통신의 발전은 서비스와 제반 산업의 발전을 더욱 가속화하는 촉매가 되었으며, 이는 이동통신의 새로운 세대로의 진화를 이끄는 동인으로 작용하는 선순환이 이루어져 왔다. 대략 10 년을 주기로 새로운 세대로 진화를 거듭하고 있는 이동통신의 역사는 이러한 선순환의 관계를 잘 보여주고 있다.

우리나라가 세계최초로 상용화한 CDMA 는 이동통신 대중화의 시대적 요구에 부응하면서 폭발적인 성장의 시발점이 되었으며, 이후 찾아온 유선 인터넷의 성장은 곧바로 세계 어느 곳에서도 손안의 인터넷 서비스를 갈망하는 동인이 되어 3G 로의 이동통신 진화가 자연스럽게 이어질 수 있었다. 스마트폰 품팩터, 특히 카메라, AP 등의 발전과 함께 콘텐츠 생산과 소비의 주체가 더 이상 별개가 아닌 프로슈머 트렌드를 등에 업고 유튜브로 대표되는 멀티 미디어 시장의 급성장은 수많은 온라인 동영상 서비스(OTT)를 끌어들이며 넓은 대역폭의 이동통신 서비스를 자연스럽게 요구하면서 4G LTE 가 이동통신을 성숙기로 이끌 수 있는 바탕이 되었다.



[그림 1] 서비스/단말과 이동통신 진화 연계성

2019 년 세계 최초의 5G 서비스가 상용화된 이후 5G 서비스를 더욱 고도화하기 위하여 5G-어드밴스드 기술에 대한 표준화가 이미 진행 중이다. 5G 는 LTE 대비 더 넓은 대역폭과 더 빨라진 실시간성을 기반으로 새로운 서비스를 지원할 수 있는 것으로 기대되지만, 지난 세대의 이동통신 진화 시기에 경험했던 서비스 혁신에는 미치지 못하는 부분이 어느 정도 있는 것도 사실이다. 이는 일정 수준 이상에 도달한 산업의 발전 속도가 완만해지는 현상이 이동통신 기술에도 동일하게 해당된다는 점도 있지만, 지난 LTE 진화의

동인이 되어 준 새로운 서비스에 대한 요구와 제반 산업 발전과의 보조가 미흡했던 점도 일정 부분 기인한 것으로 보인다.

본 백서에서는 5G 세계최초 상용화 이후에 경험한 여러 레슨들을 먼저 반추하여 본 후 2030 년 경 도입이 예상되는 6G 시대에 활용이 예상되는 여러 서비스들 중에서 당사에서 관심있게 보고 있는 서비스를 통해 6G 이동통신이 제공하고자 하는 서비스를 제시한다. 이러한 서비스들이 6G 이동통신과 상호 보완적으로 선순환 관계를 갖도록 5G 레슨들을 고려한 6G 의 주요 요구사항과 미래 네트워크 진화 방향에 대한 당사의 시각을 제시한다. 또한, 이동통신의 혈관과도 같은 핵심 자산인 주파수에 대한 표준화 동향과 당사의 의견을 제시하여 이동통신 표준화 기관을 비롯한 이해관계자들간 컨센서스가 모아지기를 기대한다.

2. 5G Lessons Learned

UN 산하의 국제 표준화기구인 ITU-R 에서 2015 년 9 월 발간한 5G 비전 권고서[1]를 신호탄으로 2019 년 상용화를 시작한 5G 서비스는 당초 비전 권고서에서 제시한 여러 사용 시나리오(Usage Scenarios)와 성능(Capabilities) 목표를 달성해 가고 있으나, 상용화 이후 4 년여가 경과한 현재 아직 달성하지 못한 부분에 대한 점검을 통해 6G 서비스를 준비해 나갈 필요가 있다.

Visionary 한 다양한 서비스 전망했으나 킬러 서비스 미흡

5G 도입을 준비하고 있던 당시에 도 자율주행, 도심항공교통(UAM), 확장현실(XR), 홀로그램, 디지털 트윈과 같은 서비스에 대한 기대가 있었지만 현재까지 예상에 비해 실제로 서비스 활성화로 이어지지 못하는 사례가 많다. 이는 5G 기술만으로 미래를 바꿀 수 있다는 장밋빛 전망은 아니었는지, 서비스를 구성하는 제반 환경에 대한 준비가 함께 될 수 있는지, 조금 더 객관적인 시각에서 살펴 보았다면 일반 대중과 사회가 5G 를 바라보는 기대수준과의 괴리가 크지 않았을 것이다.

5G 비전 권고서에서 제시한 사용 시나리오에 포함된 여러 서비스 예시 중 여전히 상용화가 되지 않고 있거나 활성화되지 않은 대표적 서비스들로는 3 차원(3D) Video, UHD 스트리밍, AR/VR, 자율주행, 원격 수술 등이 있고, 이들 대부분이 현재의 5G 기술 성능 부족의 단일 요인이 아닌 기기의 폼팩터 제약, 기기 및 서비스 기술 미성숙, 낮거나 부재 수준의 시장수요, 정책/규제 문제 등 여러가지 요인들이 복합적으로 작용된 결과임을 알 수 있다.

이에 6G 시대에 혁신적 서비스들이 성공적으로 정착하기 위해서는 6G 기술과 함께 앞서 언급한 제반 환경들이 보조를 맞추어 준비되도록 생태계의 모든 참여자들이 함께 노력해야 할 것이다.

5G 비전 권고서와 고객 기대치와의 간극

5G 비전 권고서에서 제시한 사용 시나리오와 성능 목표는 장기적으로 달성하고자 하는 비전 목표이지만 상용화 초기부터 5G 성능과 이를 토대로 하는 혁신 서비스에 대한 기대수준을 과도하게 높일 수 있는 오해가 유발되었다. 이러한 오해가 6G에서 되풀이 되지 않도록 6G의 여러 사용 시나리오를 고려하여 도달 가능한 목표 설정은 물론 일반 대중에게 정확한 소통을 하는 방안을 함께 고민해야 할 것이다.

특히, 5G 성능의 아이콘으로 여겨졌던 최대 속도 20Gbps 관련한 이슈 제기가 있었다. 3G에서 LTE로 발전하면서 무선접속기술이 WCDMA에서 OFDMA로 진화하고, 주파수 집성기술(CA) 등을 통해 3G에 비해 월등히 넓은 주파수 대역폭의 운영이 가능해 졌으며, 다중안테나 시스템 기술이 상용화되는 등 이전 세대에 비하여 비약적인 전송 속도의 증가를 경험할 수 있게 되었다. 이처럼 LTE로의 도약을 혁신적(Revolutionary) 발전으로 볼 수 있었다면, 5G는 LTE와 동일한 무선접속기술, 주파수 집성기술, 다중안테나 시스템 기술을 근간으로 해당 기술들에 대한 성능 보완, 개선이 반영되는 진화적(Evolutionary) 발전으로 비견됨을 감안할 때, LTE에서 보여준 전송 속도 증가를 5G에서 바로 재현하는 데에는 어려움이 있었다.

더욱이, 5G 상용화 초기 단계에서는 시장에서 소비자와의 기술적 인식 차이가 더 드러나기도 하였다. 5G 조기 상용화가 추진되었지만, 5G는 주파수 특성상 전국망 구축을 위해서는 LTE 대비 더 많은 기지국 장비 구축이 필요하여 비용적, 시간적으로 더 많은 노력이 요구되었다. SK텔레콤은 구축 기간 단축 및 커버리지 확보를 위해 많은 노력을 기울였지만, 고객들은 단기간에 LTE와 동일 수준의 커버리지 구축을 원하였다.

위에서 언급한 바와 같이 5G를 바라보는 부정적인 시선이 있지만, 5G의 긍정적인 부분도 분명히 존재한다. 스마트폰의 확산, 모바일 동영상 서비스의 폭발적인 성장으로 고객들의 무선 데이터 사용량이 폭증함에 따라 LTE 주파수 포화 예상 시점이 빨라졌음에도 불구하고 당사는 선제적 5G 신규 주파수 확보 및 전국망 구축을 통해 안정적인 서비스를 제공할 수 있었다. 현재 5G의 GB당 요금은 LTE 대비 70% 이상 저렴하여, 5G 고객들은 LTE 고객 대비 50% 이상 더 많은 데이터를 활용하는 경향이 나타나고 있다. 또한, 5G로부터의 레슨을 통해 학습한 기술적, 경제적 문제점을 해결하고 소비자에게 안정적인 품질의

서비스를 제공하기 위해 6G에서는 이동통신 사업자의 주도 하에 많은 노력을 기울이고 있다.

다양한 주파수 대역 및 기술 성숙도 고려 필요

6G는 5G의 초광대역(eMBB), 초고신뢰/초저지연(URLLC), 초연결(mMTC) 등 3가지 사용 시나리오보다 더 많은 사용 시나리오들이 논의되고 있으며, 이를 지원하기 위해 상위 중대역 및 서브 테라헤르츠 대역을 포함하여 더욱 다양한 주파수 대역이 활용될 것으로 예상된다. 따라서, 높은 주파수 대역의 열악한 전파특성을 보완하는 무선 기술이 무엇보다 우선적으로 준비되어야 하며, 넓은 주파수 대역을 사용함으로써 수반되는 네트워크 시스템과 단말 디바이스의 높은 전력소모와 발열을 낮출 수 있도록 부품, 소자에서부터 시스템 단위까지 전반적인 기술 혁신이 요구된다.

또한, 가상화와 개방화의 트렌드에 발맞춰 이동통신 네트워크에도 변화가 일어나고 있으며, 코어망에서는 이미 클라우드 기반의 가상화와 개방형 구조로의 전환이 상당 부분 이루어졌다. 하지만, 이동통신망에서 높은 CAPEX와 OPEX 비중을 갖는 무선접속망(RAN)에서는 이러한 기술 도입이 미진한 상황이다. 가상화와 개방화를 표방하는 오픈랜(Open RAN)은 새로운 무선 기술과 서비스의 기민(Agile)한 개발과 적용을 가능하게 하고, 기존 Walled garden 식의 기지국 장비 생태계에서 칩셋, 서버 업체, 독립 소프트웨어 제공업체(ISV) 및 중소형 기지국 무선 신호 처리 장치(RU) 개발업체 등의 열린 참여를 가능하게 한다. 이는 개방형 인터페이스를 6G의 표준 규격에 반영해야만 활성화 될 것이다.

한편, 이동통신 기술 규격의 사실 표준화 기구인 3GPP는 첫 5G 규격인 Rel-15 제정 시, LTE망을 중심망으로 5G NR을 연결하거나, 5G NR 단독으로 네트워크를 구성하는 등의 다양한 이동통신 사업자들의 5G 네트워크 구축 요구사항을 만족시키고자 7개의 네트워크 아키텍처 옵션을 제시하였으며, 각 옵션별 파생형 옵션까지 생겨남으로 표준 규격의 파편화와 시스템 개발 일정 지연 가능성을 야기하였다. 6G에서는 5G보다 더욱 증가할 것으로 예상되는 주파수 범위(FR)를 고려할 때, 이동통신 사업자들의 네트워크 구축 요구사항은 더욱 다양화될 것이다. 5G 아키텍처 옵션 파편화의 부작용을 되풀이하지 않기 위해서는 가장 높은 빈도로 예상되는 핵심적인 6G 아키텍처 옵션으로 집중해야 하며 이를 위해서 이동통신 사업자 연합인 세계 이동통신 사업자협회(GSMA), 차세대 모바일 네트워크 얼라이언스(NGMN) 등의 기구들을 통한 사전 조율 노력을 기울여야 할 것이다.

3. 2030 유망 서비스 전망과 기술 동향

6G 시대에는 5G의 eMBB, URLLC, mMTC 기술 특성을 한층 진화 시키면서 인공지능과 센서 융합 기술을 통신에 접목함과 동시에 한층 발전된 디바이스 성능과 혁신적인 폼팩터, 서비스 기술의 발전에 힘입어 5G 기술로는 충분히 구현하기 어려웠던 서비스들이 가능해지고 더욱 다양한 새로운 서비스들이 등장할 것으로 예상된다.

5G의 시작과 함께 본격화된 스마트시티/스마트팩토리/스마트오피스 등은 서비스의 완성도 제고와 함께 고도화가 진행될 것이며, 서비스 개념과 목표는 제시되었지만 기술 한계로 도입되지 못했던 서비스들이 본격적으로 제공될 것이다. 당사에서는 이러한 서비스들 중에서 라이프 스타일의 혁신을 가져올 것으로 기대되는 서비스들을 관심있게 지켜보고 있다. 특히, AI/ML 기반의 지능화와 센서 융합 기반의 디지털화를 통해 일상 생활에서 마주했던 시간과 공간의 제약을 완화시켜 지금까지는 양립하기 어려웠던 개인의 삶의 질과 사회의 생산성을 함께 높여줄 수 있는 서비스들이 그 대표적인 예이다.

시간과 공간의 제약을 완화시키는 서비스를 통한 라이프 스타일 혁신

시공간의 제약 완화를 통한 라이프 스타일의 혁신을 가져올 대표적인 서비스들로 자율주행, UAM, XR, 홀로그램, 디지털 트윈 등을 주목하고 있으며, 앞서 언급한 6G 통신기술과 접목된 인공지능과 센싱 기술의 발전은 이들 서비스의 성공을 견인하는 근간이 될 것이다. 각 서비스들은 제반 연관 산업 영역과 여타 관련 기술의 발전이 수반될 때 실제 성공적인 라이프 스타일 혁신의 경험이 고객에게 제공될 수 있을 것으로 예상된다.



[그림 2] 2030 유망 서비스 전망

자율주행은 자율주행차가 이동하는 도중에 수집되는 대규모 센서 데이터의 처리와 분석, 경로 최적화 등 인공지능 기반의 자율주행 알고리즘과 초고속 대역폭과 낮은 지연시간의 6G 통신이 모두 갖춰질 때 Level 4 수준의 완전 자율주행이 가능해지고, 보다 안전한 드라이빙 경험과 주행 중 업무, 휴식, 인포테인먼트 등 탑승자에게 시간과 공간의 자유를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

UAM 은 도시 공간에서 차세대 교통수단으로 주목받고 있는 분야로, 자율주행에서 요구되는 센싱, 인공지능 및 6G 의 초고속 대역폭과 낮은 지연시간 특성과 함께 도심 상공에서의 비행체 관제, 비행체간 통신, 군집비행 등에 필요한 통신망 연결을 위한 상공망, 위성 연계 통신 기술 등이 모두 접목될 때, 본격적으로 서비스 확산이 가능해져 탑승자의 시간적, 공간적 제약을 크게 완화시켜 줄 것으로 전망된다.

XR 은 가상현실(VR), 증강현실(AR), 혼합현실(MR)을 모두 포함하는 개념으로, 6G 시대에는 착용성과 사용 편의성이 강화된 폼팩터의 디바이스 기술을 바탕으로 초고속 대역폭과 낮은 지연시간으로 인해 고화질, 고해상도, 360 도 동영상 및 초고화질 3D 이미지 전송 등이 가능해져 현장 방문이나 실물을 직접 접촉하지 않으면서도 실제와 유사한 작업 환경의 제공이 가능해 질 것이다.

홀로그램 및 디지털 트윈은 초고속 대역폭과 낮은 지연시간의 6G 기술을 바탕으로 고화질, 고해상도의 3D 홀로그램을 실시간으로 전송 및 처리하거나 물리적인 제품이나 프로세스를 센서 융합을 통해 실시간으로 디지털 환경으로 옮겨 직접 회의 장소 방문이나 실제 작업 환경 구축 및 실물 목업을 제작, 수정하는 등의 시공간적 비용을 최소화해 줄 것으로 예상된다.

더불어, 위성 및 다양한 비행체를 매개로 하는 상공망 통신 등의 비지상망(NTN)이 지상망과 유기적으로 연계됨으로써 더욱 촘촘해진 네트워크 커버리지 확보가 가능해짐으로써 언제, 어디서나 6G 서비스를 안정적으로 제공하는 것을 목표로 하고 있다.

이러한 서비스들은 개인과 사회의 라이프 스타일의 혁신은 물론, 산업 생태계 전반의 발전과 선순환을 일으키고, ESG 효과 제고 및 제반 사회적 비용 저감에도 기여할 것으로 기대된다.

4. 6G 글로벌 동향

6G 는 5G 의 핵심 성능 지표인 초고속, 초저지연, 초연결성의 범주를 뛰어넘어 인공지능, 센싱, 위성통신, 상공망 등 파괴적 혁신 기술과의 융합을 통한 차별화된 비전을 추구하고

있다. 특히 인공지능의 경우, OpenAI 의 ChatGPT, SK 텔레콤의 에이닷과 같이 급성장한 인공지능 기술을 활용한 차세대 네트워크 구축 및 서비스 실현을 목표로 하고 있다. 이를 위해 각국 정부, 제조사 및 사업자와 학계 등 다양한 분야에서 많은 투자와 논의가 활발히 진행중이다[2]. 비록 6G 표준화는 초기 단계이지만, 주요 국가 및 기업은 이미 6G 연구 개발에 착수하였으며, 기술 포럼 및 백서 발간 등을 통해 6G 비전 및 연구 성과를 제시하고 있다[3]. 이에 본 장에서는 2023 년 7 월 현재까지의 글로벌 6G 정책 및 기술 동향을 국가별로 분석하고자 한다[4].

4.1 국외 동향

미국: 6G 주도권 확보를 위해, 경제/안보 '동맹국' 중심 연합 형성

미국통신산업협회(ATIS)는 자국의 6G 주도권 확보를 위해 2022 년 2 월 6G 연구 동맹인 넥스트 G 얼라이언스(NGA)를 설립했다[5]. 다음 세대 통신 연구를 위한 이 민간 협의체에는 대학과 이동통신사(Verizon, AT&T, T-Mobile 등), 단말 및 네트워크 장비 제조사(Qualcomm, 삼성, Nokia, Apple 등), 오픈 랜 장비 제조사(HPE, Dell 등), 소프트웨어 및 플랫폼 회사(Microsoft, Google) 등 미국 내 다양한 글로벌 기업이 미국 중심의 6G 기술 리더십, 비전, 로드맵 수립을 위해 참여 중이며 그 일환으로 NGA 는 2022 년 6G 비전 백서 'Next G Alliance: Roadmap to 6G'를 발표하였다[6]. 또한 미국 주도하에 6G 심포지엄을 결성, 매년 봄과 가을에 행사를 개최하고 있으며, 그 규모와 파트너십을 확대하는 중이다. 또한 일본의 비욘드 5G 추진 컨소시엄(B5GPC), EU 의 6G 스마트 네트워크 및 서비스 산업 협회(6G-IA), 그리고 국내 5G 포럼(現 6G 포럼)과 MOU 를 체결하였다.

중국: 정부 주도 6G 이동 및 위성 통신 기술 고속·대규모 R&D 투자

중국은 2017 년부터 6G 관련 연구를 시작하며 과학기술부의 주도로 대규모의 공격적인 6G 국책연구를 진행하고 있다[7]. 일례로 해당 부처는 2019 년부터 2027 년까지 약 5,800 억원 규모의 6G 연구 과제를 추진중이다. 과학기술부 소속 정보통신연구원은 산하에 6G 추진단인 '국제이동통신(IMT)-2030'을 설립하며 2030 년까지 6G 상용화를 목표로 6G 통신 인프라 핵심기술 연구에 착수하였다. 빠르고 공격적인 정부 주도의 투자로 국가별 6G 특허 점유율에서 2 위인 미국(35%)과 3 위인 일본(10%)을 제치고 1 위(40%)로 조사되었다.

2017 년부터 6G 연구를 시작한 Huawei 는 2030 년 기업 및 소비자를 위한 6G 제품을 출시하고 향후 몇 년 내로 5.5G 와 6G 를 동시에 정의하겠다고 선언했다. 2022 년 4 월 주최한 스마트월드 2030 포럼을 통해 자사의 6G 인프라 비전을 강조하였다. 또한

Huawei 는 총 3 개의 통신 실험용 저궤도 연구 위성을 발사하며 6G 위성 통신 연구에도 힘쓰고 있다.

일본: 5G 에서의 경험을 바탕으로 글로벌 B5G/6G 전략 및 목표 수립

일본은 한국, 미국, 중국 등 주요국에 비해 5G 에서 뒤쳐진 이동통신 분야 경쟁력을 회복하고 6G 에서 경쟁 우위 선점을 위해, 2030 년 기술 전망을 바탕으로 6G 종합전략인 '비욘드 5G 추진 전략' 을 발표했다. 먼저, 미국과의 공동 투자 계획을 발표하고(약 45 억불) 일본 총무성과 핀란드 정부간 6G 통신 기술 협약을 체결하는 등(약 20 억불) 타국가와의 기술 협력에 집중하는 한편, 자국 내에서는 'B5GPC'를 발족하고 지재권과 표준화를 전담하는 '비욘드 5G 신경영 전략센터'를 설립하여 속도감 있는 6G 도입과 상용화를 추진하고 있다. B5GPC 는 도쿄대, NTT DOCOMO, KDDI, SoftBank, Rakuten Mobile 등 이동통신 관련 주요 업체가 모두 참여 중이며 5G 모바일 추진 포럼(5GMF), 테스트베드 구성과 관련된 비욘드 5G R&D 추진 플랫폼 등과 연계하여 활동하고 있다[8]. 또한, 민간에서는 Sony 와 Toyota 가 구상에 참여하고 NTT 의 주도로 설립된 IOWN 글로벌 포럼을 통해 광 기술 기반의 차세대 네트워크를 구현하기 위한 기술 협의를 진행중이다.

EU: EU 및 각국 정부 재정을 활용한 대학 중심 6G 연구 개발 및 기초 연구 중

EU 에서는 특히 핀란드 오울루 대학 주도로 2018 년부터 6G 플래그십을 설립하여 매년 6G 국제회의인 'Wireless Summit'을 개최하고 있다. 오울루 대학, 알토 대학, 핀란드 기술연구센터, Nokia 등 기업 간 협업체인 6G 플래그십을 구성하여 테라헤르츠 대역을 필두로 다양한 6G 연구개발을 진행중이다. EU 내, 또다른 민간 중심 6G 이동통신 연구개발 그룹으로는 Hexa-X 프로젝트가 있다. Hexa-X 프로젝트는 EU 와 Ericsson, Nokia, Orange 를 비롯한 여러 유럽 통신 회사 참여하는 대규모 민간 프로젝트다[9]. 이 프로젝트는 6G 기술에 대한 비전을 정의하고 무선 연결, 에너지 효율성 및 보안과 같은 분야에서 주요 연구 과제를 발굴하는 것을 목표로 한다. Hexa-X 는 2030 년을 목표로 6G 표준기술과 비전, 핵심 서비스 모델을 개발한다는 목표다.

4.2 국내 동향

산·학·연 합동 6G R&D 추진을 통한 세계 최초 6G 상용화 목표

앞서 살펴본 국가들의 6G 전략과 더불어 국내의 6G 연구 동향을 소개하고자 한다. 대한민국은 2020 년 8 월 과학기술정보통신부를 중심으로 6G 시대를 위한 미래 이동통신 R&D 추진 전략을 발표하며 2021 년에서 2025 년까지 5 년간 1,917 억 원을 투입하여 6G

핵심 기술을 개발한다는 계획을 수립하였다. 올해는 6G 상용화 시점을 기존 계획에서 2년 앞당긴 2028년을 목표로 K-네트워크 2030 전략을 발표하였다. 현재 6,253억원 규모의 R&D 예비타당성조사 절차를 진행중이며, 정부는 지속적인 지원을 통해 6G 표준특허의 국가 점유율을 30% 이상으로 끌어올릴 계획이다.

정부 뿐만 아니라 국내 산·학·연 역시 6G 준비에 한창이다. 2013년 5G 기술 선도를 위해 출범했던 산·학·연 합동 포럼인 5G 포럼은 지난 2023년 5월 10주년 기념식 및 정기총회를 개최, 6G 상용화 준비를 본격적으로 수행하기 위해 '6G 포럼'이란 명칭으로 새롭게 출범하였다. 산·학·연 44개사 전문가 150여명이 참가한 6G 포럼은 국내 산·학·연의 6G 협력 관련 구심점이 되는 한편, 타 산업과 통신이 융합된 신규 서비스 개발의 촉매 역할을 수행할 계획이다. 삼성전자는 2019년 통신 연구 전담 조직인 차세대 통신 연구 센터를 발족하며 6G 연구팀을 설립하였고, 2020년과 2022년 각각 6G 백서와 6G 주파수 백서를 발간하여 기술 인사이트를 공유하였다. LG 전자는 독일 프라운호퍼 연구소, 한국과학기술원, 한국표준과학연구원, Keysight 등과 6G 핵심기술 R&D 협력 벨트를 구축, 원천기술 확보에 주력하고 있다. SK 텔레콤은 6G 후보 주파수 대상 재구성 가능한 지능형 표면(RIS) 적용 유리 기술 개발에 성공하며 6G 시대를 준비하고 있다. 대외적으로는 일본 NTT DOCOMO와 함께 6G 공통 요구사항 백서[10] 및 5G 기지국 전력절감을 위한 기술 백서[11]를 발간하기도 했다. 또한, 이동통신 사업자 주도의 글로벌 얼라이언스인 NGMN이 최근 공개한 '6G 요구사항 및 설계 고려사항 (6G Requirements and Design Considerations)'[12] 백서에도 국내 이동통신 사업자 중 유일하게 참여하는 등 6G 초기 생태계 구성에 앞장서고 있다.

5. 6G 핵심 요구사항

앞서 2장에서 5G 상용화 경험을 통한 레슨을 간략히 살펴본 바 있다. 본 장에서는 앞서 살펴본 5G 레슨에 기반하여 6G 시대에 예상되는 사용 시나리오와 서비스를 실현하기 위한 SK 텔레콤의 6G 핵심 요구사항을 제시하고자 한다.

5.1 6G 킬러 서비스 연계 진화

ITU-R은 5G 비전 권고서 발간을 통해 5G의 사용 시나리오로 초광대역 통신 서비스(eMBB), 초저지연 통신 서비스(URLLC), 대규모 사물 통신(mMTC) 3가지를 예상하여 제시한 바 있다. LTE의 성공 요인이었던 광대역 서비스로의 확장에 대한 높은 기대 수준이 5G로 이어졌으며, 이를 반영하여 5G 규격을 정의하는 3GPP에서는 5G의 첫 규격인 Rel-15에서 초광대역 통신 서비스 제공을 위한 기술 위주로 규격을 정의하였다. 이후 Rel-

16 부터는 초저지연 통신 서비스와 대규모 사물 통신 서비스 등 타 산업 융합서비스 지원을 위한 기술들을 포함하도록 규격 범위가 확장되었다.

하지만, 5G 상용화 이후 4 년이 경과한 현 시점에서 다소 아쉬운 점도 존재한다. 5G 기술의 활용은 대부분 초광대역 서비스 위주로 머물러 있으며, 폼팩터 제약, 기기 및 서비스 기술 미성숙, 낮거나 부재한 수준의 시장수요, 정책/규제 문제와 같은 여러 기술 외적인 요인들이 복잡하게 작용하여 저지연 통신 서비스, 대규모 사물 통신 서비스와 같은 LTE 와 차별화된 5G 만의 대표 서비스가 활성화되지 못하고 있다.

돌아보면 LTE 의 폭발적인 시장 성장은 모바일 동영상이라는 킬러 서비스가 있었기에 가능했다. 이는 3G 에서는 불가능했던 모바일 동영상 서비스가 LTE 에서의 비약적인 무선 속도 증대로 가능하게 되었다는 점과 더불어 아이폰으로 대표되는 스마트폰이라는 새로운 소비자 디바이스 출현이 모바일 혁명을 촉진시키는 촉매제로 작용하였다.

5G 에서도 초광대역 서비스를 위한 무선 속도 증대 노력이 이어졌다. 고객 체감 속도를 극대화하기 위해 SK 텔레콤은 비자립형(NSA) 구조(옵션 3x)를 도입하여 기존의 LTE 속도와 새로운 5G 대역에서의 속도를 결합할 수 있는 구조로 네트워크 진화를 진행하였다. 하지만, 현재 활성화 되었거나 시장의 수요가 많은 서비스들의 요구사항은 LTE 에서도 상당 부분 충족되어 5G 도입으로 인한 새로운 시장 개척 및 활성화가 아직까지는 미진한 상황이다.

또한, 디바이스 진화 관점에서는 스마트폰 이후 AR/VR 서비스를 위한 웨어러블 디바이스가 출시되었지만 장시간 착용시 불편감과 사용 편의성 등 디바이스 폼팩터 자체의 한계가 해당 서비스 확산에 걸림돌로 작용하고 있다.

6G 킬러 서비스 발굴 및 연계 진화 필요

따라서, 6G 도입으로 인한 연관 산업 활성화 및 시너지를 위해서는 기술 개발을 통한 단순한 네트워크 인프라 측면의 성능 향상 뿐만이 아니라 라이프 스타일의 혁신과 같은 고객의 관심사에 주목하고, 인공지능과 센싱 기술 등 미래 기술과의 융합 및 시너지를 모색하여 이동통신 서비스의 패러다임 변화를 추구함으로써 6G 에서만 체감할 수 있는 전용 상품 및 서비스를 발굴할 수 있도록 관련 생태계의 모든 참여자들이 함께 고민해야 한다.

그리고 XR, UAM, 자율주행차, 홀로그래픽 워치 등 신규 디바이스 타입의 출현이 6G 만의 상품 및 서비스 확산을 일으킬 수 있으므로 관련 산업의 기술 발전 동향을 모니터링하고 이를 지원하기 위한 네트워크 인프라를 준비해야 한다.

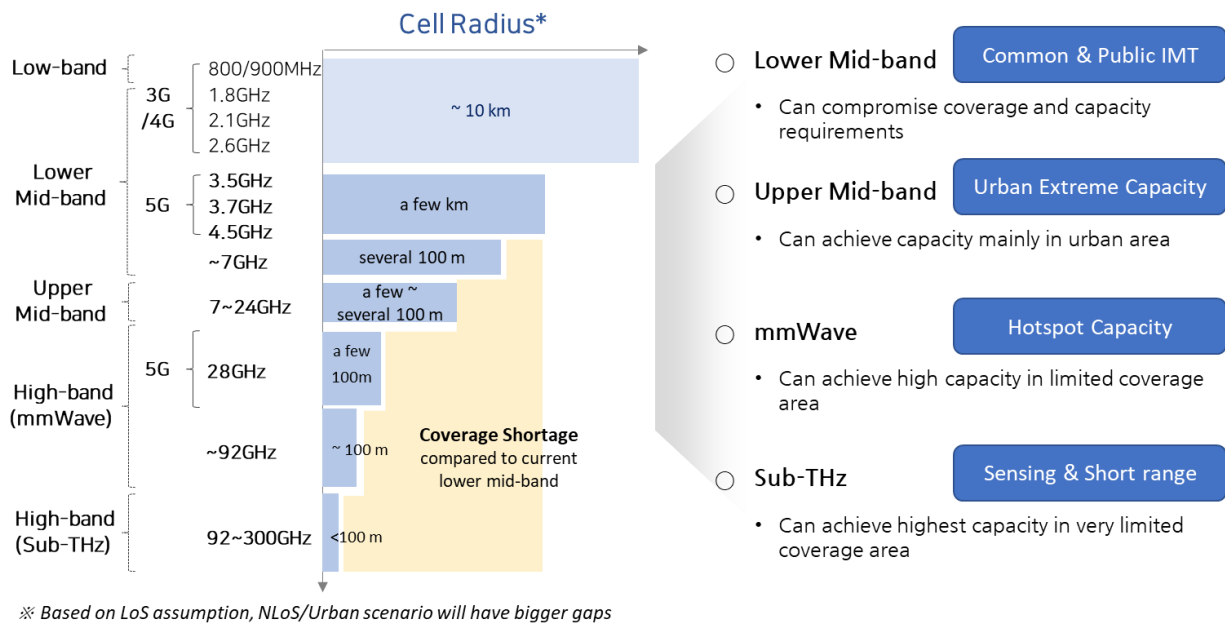
5.2 6G 비전

ITU-R 산하 이동통신 표준화 작업반(WP 5D)에서는 새로운 이동통신 세대로 진화할 때마다 차세대 이동통신의 비전과 요구사항을 정의하고 이를 만족하는 후보 기술을 국제 표준으로 승인하는 업무를 담당하고 있다. WP 5D에서는 권고서 발간을 통해 차세대 이동통신의 비전을 제시하는데, 해당 기술의 사용 시나리오와 목표 성능을 통해 기술 성숙기에 도달하고자 하는 비전을 제시해왔다.

6G에서는 5G에서처럼 기대수준을 과도하게 높일 수 있는 오해가 유발되지 않도록 해야 한다.

이를 위해 첫째로, WP 5D에서는 2023년 6월 제 44차 회의에서 6G 비전 권고서를 승인하였으며, 6G 비전 권고서로 호칭하고 있는 문서를 6G 프레임워크 권고서로 호칭할 예정이다. 6G 비전에서 제시한 목표들이 자칫 일반 대중들에게는 6G 도입과 함께 바로 실현될 수 있을 것이라는 오해를 불러일으키지 않도록 하는 것이 필요하기 때문이다.

둘째로, 2024년부터 기술 성능 요구사항에 대한 구체화 작업이 진행될 예정인데, 기존에 고정 값으로 제시되었던 지표별 성능 목표를 다양한 주파수 대역 및 구축 시나리오를 고려하여 단일 수치가 아닌 범위로 제시하는 방안을 고려해볼 수 있다. 6G에서는 기존 IMT 지정 대역 포화에 따라 다양한 주파수 대역이 사용될 것으로 예상되며, 주파수 대역에 따른 구축 시나리오도 다양할 것으로 생각된다. 예를 들면, 저대역은 외곽 지역에서의 효율적인 커버리지 제공, 중대역은 도심 지역에서의 용량 제공, 고대역은 근거리 핫스팟 용량 및 센싱 용도로 사용될 것이다. 주파수 대역이 올라갈수록 넓은 대역폭 확보가 용이하며 달성 가능한 최대 전송 속도도 그에 비례해 증가하는 반면 커버리지는 경로 손실 증가에 의해 줄어든다. 특히, 건물이 많은 도심 지역의 경우 전파의 회절 특성으로 인해 커버리지 확보가 더욱 어려워진다.



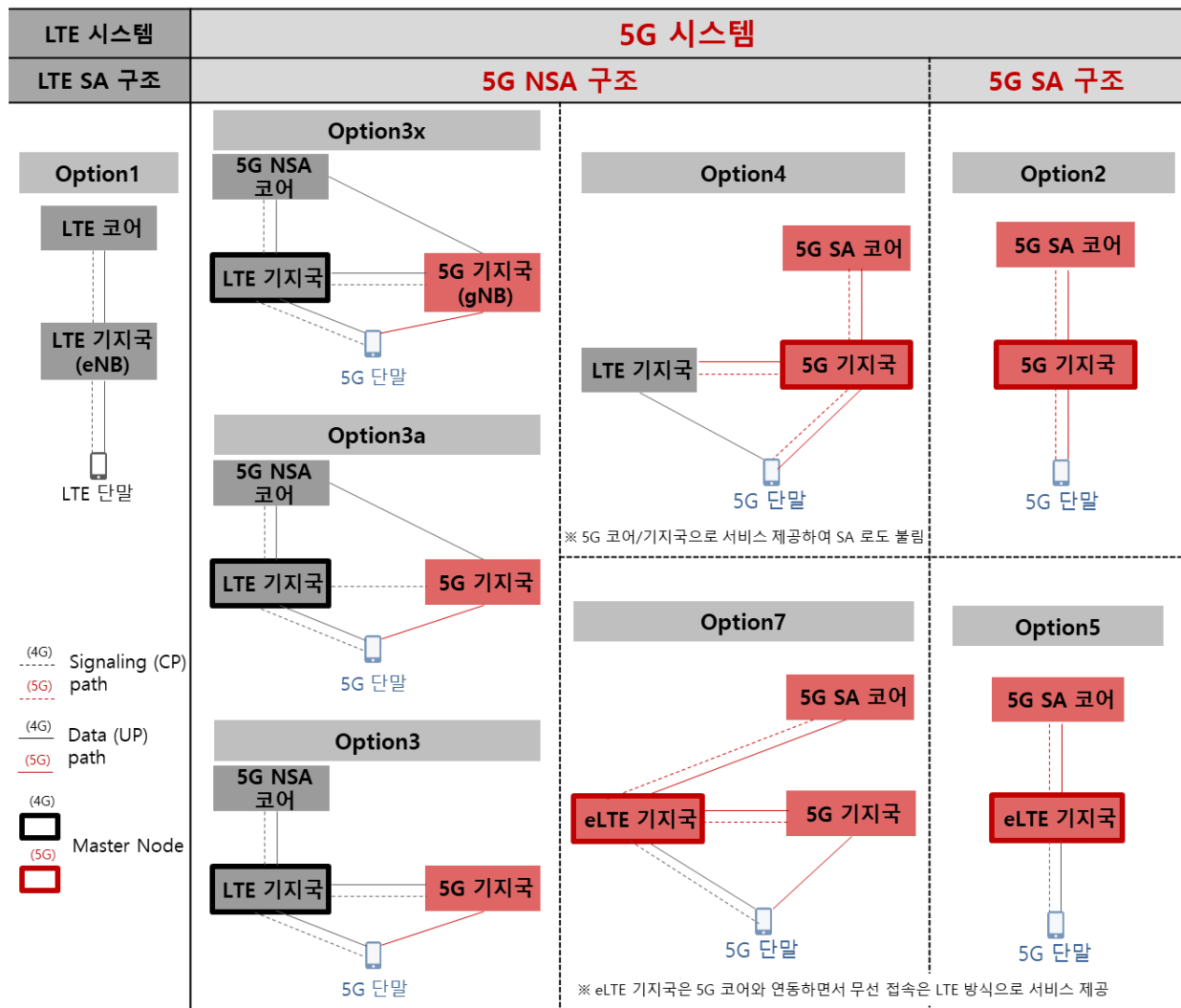
[그림 3] 주파수 대역별 구축 시나리오

마지막으로, 성능 목표는 비록 달성 가능한 최대 목표로 설정하는 것임을 감안하더라도 허황된 수치가 아닌 현실적으로 도달 가능한 수치로 설정해야 한다. 예를 들면, 6G에 대한 논의가 처음 시작되었을 당시에는 서브 테라헤르츠 기술과 함께 최대 전송 속도 1Tbps가 거론된 바 있다. 하지만, 실제 6G 이동통신으로 사용될 것으로 예상되는 주파수 대역 및 확보 가능한 대역폭을 고려하여 최대 속도 목표를 설정하는 것이 필요하다.

SK 텔레콤은 지속적으로 위와 같은 의견들을 표준화 및 관련 포럼 단체에 제안해왔다. 2023년 6월 개최된 WP 5D 제 44차 회의에서 신규 권고서 초안(DNR)으로 승인된 6G 권고서에 일부 반영되었으나, 최대 전송 속도 등 일부 주요 지표별 성능 목표는 2024년부터 진행될 기술성능 요구사항 단계에서 결정될 예정이다.

5.3 심플한 아키텍처 옵션 정의

5G가 도입될 당시 이동통신 기술 규격의 사실 표준화 기구인 3GPP에서는 이동통신 사업자마다 도입 목적 및 인프라 여건이 다양함을 고려하여 5G 자립형 구조(SA) 및 기존 구축된 LTE를 활용하는 NSA 구조 등 다양한 아키텍처 옵션들이 논의되었고, 각 옵션별 파생형 옵션까지 정의되었다. 3GPP에서는 이 중 NSA 옵션 3를 Early Drop을 통해 2017년 12월에 가장 먼저 규격화되었고, 이후 순차적으로 SA 옵션 2가 2018년 6월에, 그리고 옵션 4가 2019년 3월에 Late Drop을 통해 규격화되었다.



[그림 4] 5G 아키텍처 옵션

당사는 안정적인 호접속과 이동성을 지원하는 5G NSA 옵션 3 구조를 채택하여 5G 상용 서비스를 시작하였다. 특히, 향후 5G 인프라 확장과 SA 망 진화에 용이하고, LTE와 5G로의 트래픽을 제어할 수 있는 옵션 3x 구조를 채택하였다. 음성서비스는 전국망 커버리지를 갖춘 안정적인 LTE 기반으로 동작하며, 데이터는 LTE와 5G를 동시에 이용하여 체감 속도를 높일 수 있다.

eMBB 외 URLLC, mMTC 서비스를 추가로 지원하기 위해서는 SA로의 망 진화가 필요하다. 현재의 NSA 구조에서 SA 구조로 진화할 경우 고려해야 할 점 중 하나는 안정적인 호 접속 및 이동성, 체감 속도, 음성 서비스 등의 서비스 품질을 기존과 동등 이상 수준으로 유지해야 한다는 점이다.

SK 텔레콤은 SA 옵션 2 개발을 완료하여 5G 단독으로 호 처리, 데이터, 음성 서비스를 제공하고, 네트워크 슬라이싱 기능을 개발하여 슬라이스 별 5G 코어 선택 및 무선자원 차등/격리 기술을 개발하여 5G 서비스별 차별화된 서비스 품질(QoS)을 제공할 수 있다.

하지만, SA 옵션 2는 데이터 서비스를 위해서는 5G와 LTE를 동시에 이용할 수 없는 구조이기에 기존의 NSA 구조에 비해 체감 속도가 저하되는 문제점이 있다. 따라서, 당사는 SA 옵션 중 NSA 옵션 3x 구조에서 도입된 이중 연결(DC) 동작을 그대로 적용하여 5G와 LTE가 함께 사용자 트래픽을 전송함으로써 체감 속도도 동등 수준으로 유지할 수 있는 옵션 4를 고려하고 있다. 하지만, SA 구조 관련 글로벌 생태계는 아직 옵션 2 위주로 형성되어 있으며, 옵션 4에 대한 기지국/단말 제조사의 개발 계획은 아직 미정인 상황이다.

앞서 기술한 바와 같이 3GPP에서는 여러 Drop을 통해 다수의 아키텍처 옵션을 정의하였지만, 이는 결과적으로 표준 규격의 파편화를 불러오고 시스템 개발 일정을 지연시키는 상황을 초래하였다.

기존망을 고려한 심플한 6G 아키텍처 옵션 정의 필요

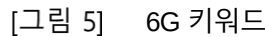
ITU-R에서는 기존에 IMT 용도로 할당된 주파수 대역의 포화로 상위 중대역(7-24 GHz) 등 IMT를 위한 새로운 주파수 발굴이 진행 중이며, 주파수 회수 및 재배치를 통한 기존 IMT 용도 주파수 대역의 활용까지 고려하면 6G에서 사용될 주파수 대역은 더욱 다양해질 것이 확실시된다. 또한, 6G 도입 시 기존 서비스(2G~5G)와의 공존 및 효율적인 연동을 고려해야 하며, 기존 서비스 종료 시 효율적인 망 진화가 가능한 아키텍처 설계가 필요하다. 이동통신 사업자마다 상이한 이전 세대 서비스 유지 기간 및 종료 계획을 고려하였을 때 네트워크 구축 요구사항은 더욱 다양화될 것으로 예상할 수 있다.

따라서, 6G에서도 5G 아키텍처 옵션 파편화의 부작용이 되풀이 될 가능성이 있으며, 이를 방지하기 위해서는 가장 높은 빈도로 예상되는 핵심적인 6G 아키텍처 옵션에 집중하여 규격화 작업이 이루어져야 한다. 또한, 6G 도입 시 고객 체감 속도를 포함한 서비스 품질이 기존 서비스 대비 동등 이상 수준으로 유지할 수 있는 아키텍처 설계가 필요하다. 이를 위해서는 대역간 주파수 결합 기술(CA, DC), 보다 효율적인 주파수 공유(Spectrum Sharing) 기술 등 서비스 품질을 최대치로 끌어올리고 세대간 공존 및 진화가 가능한 기술 개발 및 표준화가 필요하다.

6. 6G 네트워크 기술 진화 방향

6.1 기술 진화 전망

6G 시대 활용이 예상되는 네트워크 전 영역 및 개별 영역의 기술로 인공지능, 위성 등이 광범위하게 논의되고 있으며, 아래에 주요 키워드를 정리하였다. [그림 5, 표 1]



No	Keyword	Description
1	Aerial Network	상공망
2	AI-based Air Interface	AI 기반 무선 인터페이스
3	AI-based RAN Automation	AI 기반 RAN 자동화
4	AI-based RAN Operation	AI 기반 RAN 운용
5	AI/ML	인공지능/머신러닝
6	AI-native	전체 프로세스에의 AI 적용
7	All Photonics Network (APN)	올 포토닉스 네트워크
8	Ambient IoT	앰비언트 사물인터넷
9	Beamforming	빔포밍
10	Cloud-native	클라우드 네이티브
11	Direct-to-cell	위성-스마트폰 직접 통신
12	Energy Harvesting	에너지 하베스팅
13	Evolved Service Based Architecture (eSBA)	진화된 서비스 기반 아키텍처
14	Extreme massive MIMO (E-mMIMO)	초대규모 MIMO
15	Green-native	그린 네이티브
16	Low band RF	저대역 RF 진화 기술
17	Low Earth Orbit (LEO)	인공위성 저궤도
18	Lower Mid-band RF	하위 중대역 RF 진화 기술
19	Micro Service Architecture (MSA)	마이크로 서비스 구조
20	Network Energy Saving (NES)	네트워크 에너지 절감

21	Non-Terrestrial Network (NTN)	비지상 네트워크
22	Network Data Analytics Function (NWDAF)	네트워크 데이터 분석 기능
23	On-device AI	온 디바이스 AI
24	Open RAN	개방형 RAN
25	Packet Optical Transport Network (POTN)	패킷 광 전송 네트워크
26	Photonics Electronics Convergence	광전자 융합
27	Post-Quantum Cryptography (PQC)	양자 내성 암호
28	Quantum Key Distribution (QKD)	양자 키 분배
29	Quantum Random Number Generation (QRNG)	양자 난수 생성 기술
30	Reconfigurable Intelligent Surface (RIS)	재구성가능한 지능형 표면
31	Satellite Communication	위성 통신
32	Sensing	센싱 기술
33	Software-defined Networking (SDN)	소프트웨어 정의 네트워킹
34	Solid-State Battery	전고체 배터리
35	Spectrum Sharing	스펙트럼 공유
36	UE Assistance Information (UAI)	단말 보조 정보
37	Upper Mid-band	상위 중대역
38	Urban Air Mobility (UAM)	도심 항공 모빌리티
39	Zero Touch	제로 터치
40	Zero Trust	제로 트러스트

SK 텔레콤의 6G 네트워크에는 인공지능, 전력절감, 양자 보안 등의 메가트렌드가 네트워크 전 영역에 걸쳐 보편화되어 확산될 것이며, 무선접속망, 코어망, 전송망, 상공망 등 각 네트워크 영역별로 특화된 기술들이 적용되어 진화가 될 것으로 전망된다. 각 기술에 대한 설명은 이어지는 장에서 살펴 보겠다.

6.2 AI-native 네트워크

ChatGPT를 위시한 생성형 인공지능 기술에 대한 관심이 급속히 커지면서 인공지능이 많은 영역에서 혁신을 일으키고 그동안 해결하기 힘든 난제를 해결하는 돌파구 역할을 할 것으로 기대되고 있다. 6G에도 인공지능 기술이 핵심 요소 기술로 논의되고 있으며, 당사는 무선접속망, 코어망 및 단말에 인공지능 기술을 융합한 연구 개발 활동을 진행하고 있다.

무선접속망

AI-based RAN 기술은 AI 적용 영역 및 방식에 따라 크게 3 가지 형태로 구분할 수 있다.

AI/ML for	Characteristics	Use Cases
RAN Automation (OAM)	1. Data Collection: BS statistics, OAM info for other NW nodes* <i>* unified OAM system is required for E2E optimization</i> 2. AI Training: located in OAM (Online/Offline) 3. AI Inference: located in OAM	1. Energy Saving: cell/antenna on/off 2. Cell Shaping: beam shaping for each environments 3. And more
RAN Operation (>L1)	1. Data Collection: local BS, UE measurement*, neighboring BS* <i>* via implementation based or standard Xn interface (for multi-vendor interoperability)</i> 2. AI Training: located in OAM or BS (Online/Offline) 3. AI Inference: located in BS	1. Energy Saving: cell/antenna on/off 2. Load Balancing: steering UE among multi-bands 3. Mobility Mgmt.: minimizing call drops 4. Link Adaptation: faster outer loop convergence 5. And more
Air Interface (L1, PHY)	1. Data Collection: local BS/UE 2. AI Training: OAM/BS (Offline) or BS/UE (Online) 3. AI Inference: located in BS and/or UE	1. CSI Compression 2. Beam Management 3. Positioning Accuracy Enhancement 4. And more...

[그림 6] 데이터 수집, AI 학습, 추론 위치 및 방식에 따른 AI-based RAN 기술 구분

먼저 운용, 관리, 유지보수(OAM) 서버에서 기지국 통계 기반으로 AI 학습(Training) 및 추론(Inference)을 모두 수행하는 AI-based RAN Automation 이 있다. 사용 사례별 필요한 만큼 연산 능력이 확보가 쉬운 클라우드 서버에서 데이터 획득/학습/추론을 모두 수행하기에 구현은 쉽지만, 운용 전문가가 종단간(E2E) 네트워크 상황을 보면서 관제하는 것 대비 확실한 성능 이득을 얻기 위해서는 기지국 뿐만 아니라 코어망, 전송망 등 연관된 모든 네트워크 장비들의 통계 및 운용 데이터를 통합해 AI 기반으로 관리/분석 할 수 있게 하는 것이 중요하다. SK 텔레콤의 경우 LTE 부터 150 개 이상의 OSS 시스템을 통합한 TANGO 를 구현하였으며, 이를 기반으로 기지국 전력 절감 기능 운용을 자동화하고 있다.

다음으로 기지국 장비(CU/DU)에서 기지국 내부 정보, 단말 보고 및 인접 기지국 제공 정보 등의 데이터를 기반으로 목적하는 KPI 를 최대화하기 위한 최적의 동작을 수행하는 AI-based RAN Operation 이 있다. 제한된 기지국 연산 능력으로 인해 AI 모델은 외부 서버에서 오프라인 학습 완료하여 기지국에 탑재되고, 실시간 입력 정보에 기반하여 추론만 수행하는 방식이 우선적으로 상용화되고 있으며, SK 텔레콤은 기지국 Link Adaptation 에 AI 기술을 적용하여 약전계에서 10% 속도 개선을 확인한 바 있다. 또한 모두 기지국 내부 동작 개선으로 규격 지원이 없이도 구현 가능하나, AI 모델 수명주기관리(LCM)를 포함한 OAM, 5G 코어망(5GC), 차세대 무선접속망(NG-RAN) 등 다른 네트워크 노드와의 연동 동작 및 멀티 벤더 상호 연동성 등을 고려하여, 3GPP 에서는 셀과 안테나의 on/off 를 통한 에너지 절감, 다중 대역간 단말(UE) 로드 밸런싱 및 호 절단 최소화를 위한 이동성 관리 등의 사용 사례에 대해 필요 시그널링을 규격 기반으로 정의하는 Rel-18 'AI/ML for NG-RAN' 작업 과제(WI)를 승인하고 표준화를 진행 중이다.

추후 6G에서는 AI 반도체 탑재를 포함한 기지국 연산능력 증대를 통해 온라인 학습도 가능해 질 것으로 전망된다.

마지막으로 기지국 – 단말 간 무선 송/수신을 수행하는 물리 계층에 AI 기술을 적용하는 AI-based Air Interface 가 있다. 기지국 – 단말간 정해진 절차 및 메시지로 수행해야하는 동작들로 AI 기술 적용 위해서는 규격 추가/변경이 필수적이다. 이에 3GPP에서는 CSI 압축, 빔 관리 및 측위 정확도 향상 등의 사용사례를 고려하여 Rel-18에서 'AI/ML for Air Interface' 연구 과제(SI)를 승인하여 논의를 진행 중이며, Rel-19 및 6G에서 추가 구체화 될 것으로 예상된다.

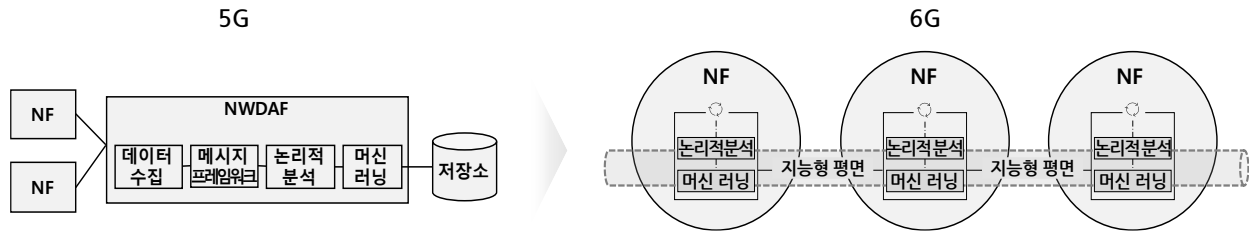
코어망

5G 코어가 LTE와 두드러진 차이점 중의 하나는 처음으로 머신러닝 기반의 인공지능 기술이 도입되었다는 점이다. 3GPP에서는 5G SA에 지능적이고 자율적인 네트워크 운영 및 서비스 관리를 위해 AI 기반 네트워크 데이터를 분석하는 네트워크 데이터 분석 기능(NWDAF)을 정의하였다. NWDAF는 데이터 수집, 메시지 프레임워크, 논리적 분석, 머신 러닝, 저장소를 담당하는 5가지 세부 구성요소를 가지고 있다.

이를 통해서 NWDAF는 5G 코어 시스템에서 데이터를 수집하고, 트렌드를 분석하고 머신러닝 기반으로 미래 예측을 수행하는 서비스를 제공한다. 다만 수집, 수백개의 네트워크 기능(NF)에서 데이터 수집을 수행하기에 제한적이며, 이로 인해서 수행할 수 있는 분석 서비스에도 한계를 가진다.

6G 코어는 NF마다 NWDAF 서비스가 내재화되어 초분산 AI 구조가 될 것이다. 논리적 분석과 머신 러닝 구성요소, 이들 2개는 NF마다 필수 구성요소로 배치될 것이며, NF들간의 연동을 통해서 지능형 평면을 구성할 것이다. 데이터 수집, 메시지 처리, 저장소 기능은 NF가 자체적으로 수행한다.

이를 통해서 지능형 평면에 모든 네트워크 계층의 정보가 수집되고, 분석 및 추론에 활용되며 AI 기반 데이터 학습은 전체 네트워크 영역에서 초저지연으로 수행될 것이다. 또한, AI 기반 분석 및 추론 결과도 지능형 평면을 통해서 공유되어 고신뢰성을 확보하며, 정적으로 관리되던 파라미터, 네트워크 구성 정보들이 동적으로 자동설정 및 최적화된다. SK 텔레콤은 가입자가 이동함에 따라 동적으로 페이징(paging) 영역을 예측하는 로컬 NWDAF 기술을 개발하는 데 성공하여 페이징 신호 메시지를 대폭 절감하였으며, 이러한 로컬 NWDAF와 협동하여 중앙집중적으로 데이터 분석 및 모델링을 수행하는 센트럴 NWDAF를 설계하고 있다.



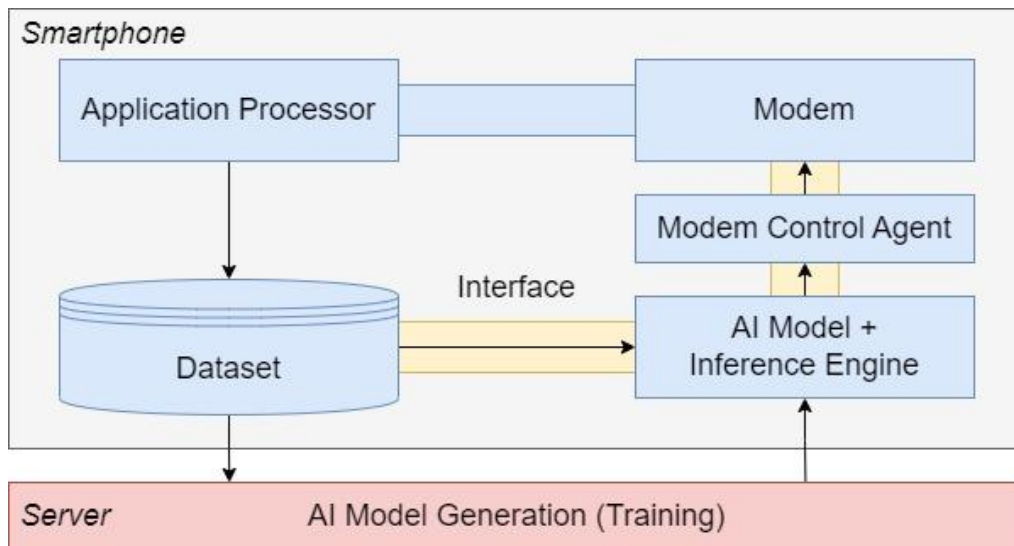
[그림 7] 5G에서의 NWDAF와 6G 코어에서 AI-native NF 구조

디바이스

AI 기술을 지원하는 반도체의 컴퓨팅 성능과 집적도, 전력소모가 개선 되면서 스마트폰과 같은 모바일 디바이스에 AI를 적용하기에 우호적인 환경이 조성되고 있다. 즉, 모바일에 최적화된 CPU/GPU의 연산 능력이 크게 향상되고, AI 연산 전용 NPU도 모바일 디바이스에 기본적으로 탑재되는 경향이 확산되고 있다. 또한, 서버 대신 모바일 디바이스를 대상으로 한 AI 경량화 기술이 발달하면서 스마트폰에서도 복잡한 AI 모델을 실시간으로 처리할 수 있게 되었다.

이에 당사는 스마트폰에서 수집되는 각종 데이터를 활용하여 고객의 체감 품질을 향상시킬 수 있는 On-device AI 기술을 개발 중이다. 이동통신 네트워크에서 스마트폰은 고객과의 접점을 형성하고 있으며 기지국이 파악하기 어려운 정보의 원천이기도 하다. 따라서 스마트폰 스스로 현재의 상태를 바탕으로 앞으로의 소비 전력, 발열, 고객이 사용하는 서비스나 어플리케이션 등의 사용 패턴 등을 예측한 후 기지국에게 이에 최적화된 단말의 설정을 요청하는 동작이 유용할 것으로 판단하고 있다.

일례로 스마트폰은 AI를 활용하여 트래픽 패턴을 분석 및 예측하고 이를 소비 전력 최적화에 활용할 수 있다. 보통 단말은 RRC Connected 상태에서 데이터 송수신을 수행하고 더 이상 송수신할 데이터가 존재하지 않을 경우 정해진 UE Inactivity Timer 동안 RRC Connected 상태를 유지한 후 RRC Idle 상태로 전환한다. 만약 트래픽 발생 여부와 트래픽 특성을 AI를 활용하여 보다 더 정확하게 예측할 수 있다면 Timer에 기반한 고정적인 방식 대신 유연하고 전력 효율적으로 RRC Idle 상태로 전환하여 단말의 소비 전력 최적화에 기여할 수 있다. 당사는 이를 위한 데이터 수집부터 분석, 학습, 추론, 검증 등 일련의 과정을 단말에 구현하여 표준 규격상 또는 제조사의 하드웨어나 부품단위에서 적용하는 소모전력 절감 기술과 더불어 트래픽이나 고객의 서비스/어플리케이션 사용 상황에 최적화된 지능화된 형태로 구현할 계획이다.



[그림 8] On-device AI 동작 블록 다이어그램

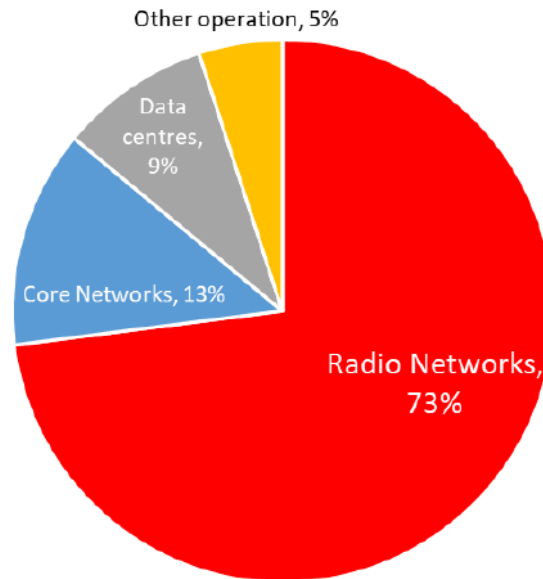
고객에게 직접적으로 체감되는 소모전력 절감 뿐만 아니라 성능 향상을 위한 빔포밍 기술에도 AI 접목이 가능하다. 향후 6G에서 5G 대비 높은 주파수 대역을 활용할 경우 통신에 사용되는 빔 폭은 더욱 좁아지고 개수는 더욱 많아질 것이다. 따라서 정교한 빔 관리를 위해서는 실시간으로 변하는 빔의 정확한 도래각(AoA) 및 송수신 빔 Pair 등에 대한 사전 예측이 필요하다. 일반적으로 도래각 예측을 위해서는 RF 및 라이다(LiDAR), 레이더(RADAR), 위성 항법 시스템(GPS) 등 센서 정보를 활용한다. 또한 UAM, NTN 과 같은 상공망 서비스를 위해서는 3 차원 위치 정보까지 필요하다. 따라서 복잡한 데이터의 학습에 기반하여 판단을 수행하는 AI 가 서비스와 네트워크 특성에 맞는 지능화된 빔포밍 동작 기술의 최적의 방안이 될 수 있고 당사는 관련 적용 기술을 지속적으로 연구할 예정이다.

6.3 Green-native 네트워크

기후 변화는 전세계적인 화두로써 모든 산업 현장에서 탄소 배출량 절감을 위한 노력이 진행되고 있으며, 이동통신 사업자도 예외는 아니다. 전세계 이동통신 사업자들이 탄소 중립 목표를 달성하기 위해 다양한 활동을 이어가고 있으며, 이동통신망 설계에 있어 전 영역에서 에너지 효율성이 중요한 고려사항으로 주목받고 있다.

무선접속망

아래 그림은 무선접속망, 코어망, 데이터센터, 기타 구성 요소 별로 전력 소모를 분석한 결과로 기지국에서 소모하는 전력이 전체 소모 전력의 73%를 차지하고 있다는 것을 알 수 있다. 즉 기지국 전력절감은 네트워크 전력 효율을 개선하는데 가장 중요한 영역이다.



[그림 9] 모바일 네트워크 전력소모 분석 [13]

특히 LTE RU 대비 8~16 배 많은 Tx/Rx 안테나와 5~10 배 많은 주파수 대역, 높은 전송 출력으로 인해 5G RU 는 LTE RU 대비 2~4 배 더 많은 소모전력을 보이고 있다. 더구나 가용한 주파수 부족으로 점점 더 높은 주파수 대역을 사용함에 따라 전파 감쇄 극복을 위해 단위 면적당 설치되는 RU 개수가 증가하고 있어, RU 전력 소모 절감은 차세대 이동통신 기술 설계 시 반드시 고려해야 하는 KPI 이다.

이에 3GPP Rel-18 에서도 Network Energy Saving 작업 과제가 승인되어 기지국 소모 전력 절감을 위한 5G 규격 개선이 진행되고 있다. 구체적으로 에너지 절감 이득을 시뮬레이션하기 위해, 기지국의 송수신 상태, 상대적 소모전력 값과 상태 천이에 필요한 시간 및 에너지를 고려하여 에너지 소모를 모델링하였다[14]. 이러한 모델링을 기반으로 시간, 주파수, 공간, 전력의 4 개 범주에서 성능을 최적화 하면서 전력소모를 감소 시킬 수 있는 다양한 기법들이 논의되고 있으며, 6G 는 기존 5G 와 호환성 유지 이슈가 없으므로 규격 측면에서 좀더 에너지 효율성이 높은 설계가 도입될 것으로 전망 된다.

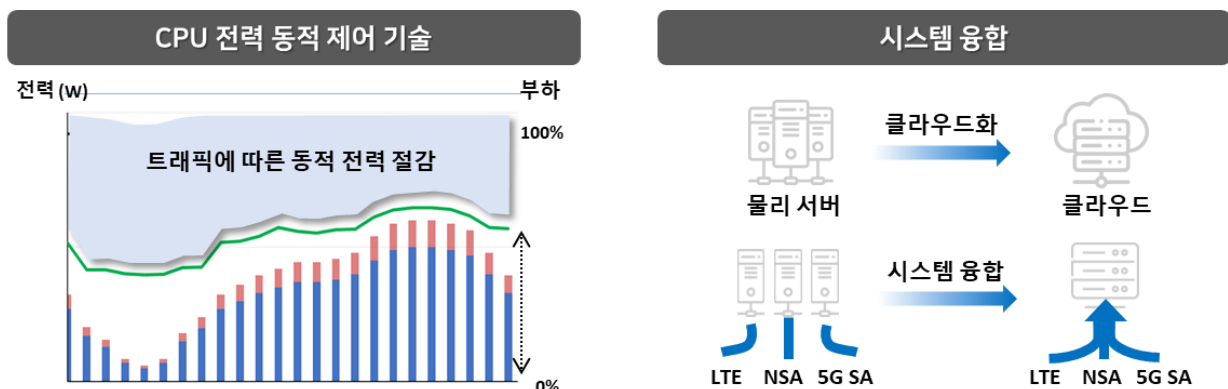
다만 이와 같은 규격 개선 외에도 i) 초기 개발 단계에서부터 저전력 소자/부품 개발/적용, RF 프론트엔드 저전력 설계 등 하드웨어 측면, ii) Micro/Antenna/Deep/Cell Sleep 등 소프트웨어 기반의 전력 소모 절감 기능 개발, iii) AI 를 접목한 효율적인 소프트웨어 기반 전력소모 절감 기능 운용 등 기지국 장비 설계, 개발, 운용의 전체 주기 모두에서 기지국 전력 소모 절감을 적극적으로 이끌어내는 전방위적인 접근이 필요하다.

이를 위해 SK 텔레콤은 제조사와 이동통신 사업자간 초기 제품 하드웨어 설계 단계부터 저전력 기지국 장비 개발을 위한 협력을 진행하기 위한 가이드라인을 제시하기 위해 별도의 백서를 발간하였다[15]. 특히 장비 성능을 높일수록 소모 전력이 크게 상승하므로

성능 차이를 고려한 소모전력 평가 지표(P-index), 이를 활용한 소모 전력 모니터링 방법, 신규 장비 도입 프로세스를 제시하였다. 현재 SK 텔레콤은 신규 5G 기지국 장비 도입 시 P-index 를 핵심 평가 지표에 포함하여 장비 개발을 진행 중이며, 6G 에서도 지속 적용 및 개선 예정이다.

코어망

5G에서는 기술의 진화에 초점이 맞춰져, 장비 설계 및 제조에 있어서 환경 및 생태계를 충분히 고려하지 못했다. 6G는 사용하는 모든 소프트웨어 및 하드웨어의 전력 리소스를 상황에 맞게 동적으로 제어할 수 있는 기능을 적용하여 패킷 손실, 지연 발생 등의 고객 서비스 품질 저하 없이 소모전력을 절감하는 방향으로 진화한다. 또한 기존에 운용하던 물리 서버들의 클라우드화와 LTE/NSA/SA 시스템들의 융합화로 자원을 절감할 수 있는 방안도 함께 고려될 것이다. 마지막으로 전력 자체를 적게 사용하기 위해 기존 대비 저전력, 고성능의 하드웨어 부품(CPU, FPGA, GPU, Memory, NIC, Fan, PSU 등) 사용도 고려될 것이다. SK 텔레콤은 서비스 품질 저하 없는 실시간 트래픽 양에 따른 CPU 동적전력 제어하는 기술을 개발하여 상용화 계획 중이며, 전력절감을 위해 다양한 소프트웨어 및 하드웨어 제어 기술을 지속 고도화 중이다.



[그림 10] Green-native 코어망 사례

디바이스

단말의 소비 전력 절감 기술 역시 ESG 및 고객의 서비스 사용 시간 확대 측면에서 매우 중요하다. 5G는 LTE 대비 높은 주파수 및 넓은 대역폭을 활용하고, LTE 및 NR에 동시에 접속하는 DC 구조를 갖는 등 단말의 소비 전력 증가를 초래할 수 있는 여러 요소를 갖고 있다. 반면, 단말의 배터리 용량은 LTE와 큰 차이가 없고, 프로토콜 측면에서도 LTE와 유사한 불연속 수신(DRX) 동작 외에는 아직 특별한 기술이 상용화되지 않은 상태이다.

따라서 향후 6G 에서 유의미한 수준의 단말 소비 전력 절감을 달성하기 위해서는 現 단말 동작의 문제점 분석에 기반한 기술 개발이 필요하다.

일반적으로 단말의 소비 전력은 단말에 필요 이상으로 과도한 Capability 를 할당한 상태에서 데이터를 송수신할 때 낭비된다. 예를 들어 20 MHz 및 2x2 MIMO 로 충분한 서비스를 100 MHz 및 4x4 MIMO 로 받는 경우이다. 이러한 점을 개선하기 위해 기지국이 각 단말의 상황을 고려하여 최적 설정을 수행하기 위한 각종 단말 보조 정보(UAI) 동작이 Rel-16 이후의 규격에 도입되었다. 즉, 단말은 자신이 선호하는 CA/DC, 대역폭 파트(BWP), MIMO, DRX, 무선 자원 제어(RRC) 관련 설정을 기지국에게 알려주고, 기지국은 이를 기반으로 단말의 소비 전력 절감에 유리한 설정을 수행하는 것이다. 당사는 앞으로 UAI 동작 메커니즘을 보다 적극적으로 활용하여 단말의 상황을 고려한 기지국과의 소비전력 절감 세부 동작을 구현하여 적용할 예정이다.

또한, Rel-16 이후 규격에서 웨이크업 신호(WUS)에 대한 논의가 계속 진행되고 있다. WUS 는 기지국이 단말에게 트래픽 상황에 따라서 미리 정해진 DRX On 구간 동안 실제로 Wake-up 할 것인지 아니면 이를 무시하고 Sleep 할 것인지 지시하는 제어 신호이다. 당사는 WUS 에 대한 성능과 기대효과를 규명하여 적용할 계획이다.

IoT 에서는 기능 축소(RedCap)와 같은 IoT 경량화 기술 이외 Ambient IoT(수동형 IoT)에 대한 논의가 진행되고 있다. Ambient IoT 는 배터리를 탑재하지 않은 바코드 가격 수준의 IoT 기기가 이동통신 커버리지 내에서 전자기파를 에너지로 바꾸는 후방 산란 방식으로 수 kbps 수준의 통신을 수행하는 기술이다. Ambient IoT 와 함께 에너지 하베스팅(Energy Harvesting) 기술에 대한 관심도 높아지고 있다. 이는 RF 기반의 무선 충전 방식 등을 활용하여 IoT 기기가 외부로부터 전력을 공급받아 동작하는 기술을 의미한다. IoT 기기의 Zero Energy 화를 추구하는 움직임 속에서 당사는 기술 구현 가능성과 미래 사업 수요를 고려하여 경량화가 필요한 각종 IoT 기기, 스마트 워치 등에 적합한 에너지 하베스팅 기술 개발을 연구할 예정이다.

이와는 별개로 배터리 기술 자체의 한계를 뛰어넘기 위한 노력들도 계속되고 있는데 그 중 대표적인 기술이 전고체 배터리 기술이다. 현존하는 리튬이온 배터리 기술의 근간은 유지하되 전해질(액체)을 고체로 바꿔 전해질 유출로 인한 안전사고 발생 위험을 줄이고 분리막 제거를 통한 부피, 무게 감소를 통한 배터리 형태 다양화, 경량화와 이에 따른 지속성과 친환경도 촉진할 있을 것으로 전망된다. 아직 연구 단계이며 상용화까지 몇 년에서 몇 십 년이 걸릴 수 있지만 당사는 지속적으로 관련기술을 모니터링하여 모바일 기기에 최적화된 신소재 기반 차세대 배터리에 대한 요구사항을 구체화해 나갈 예정이다.

6.4 양자 보안 네트워크

양자의 특성을 활용하여 초고속 병렬 연산이 가능한 양자 컴퓨팅 기술이 등장하면서 해킹으로 인한 대규모 개인 정보 유출 사고 등 사회적으로 심각한 피해를 주는 사이버 범죄가 급증하고 있다. 정보보안과 개인 정보 보호는 ESG 경영이 강조될수록 그 중요성이 더욱 부각되고 있으며, 이에 SK 텔레콤도 이동통신 네트워크 보안 강화를 위한 노력에 만전을 기하고 있다.

양자 컴퓨터의 연산 능력으로도 뚫을 수 없는 보안 기술을 의미하는 양자 보안이라는 개념이 등장하였으며, 양자 보안 주요 기술로는 양자키분배(QKD)와 양자내성암호(PQC)가 있다. QKD 기술은 양자의 민감한 특성을 활용해 제 3 자의 탈취 시도를 무력화하는 암호키를 만들어 송신자와 수신자에게 동시에 나눠주는 기술로 하드웨어 기반이다. 수학적 복잡성이 아닌 물리적 자연현상에 기반을 두고 있으므로 보안성이 뛰어나지만, 전용 하드웨어 장비가 필요하며 광자가 가지는 민감성으로 인해 장거리 통신이 어렵다는 단점이 있다. 반면, PQC 기술은 양자 컴퓨터의 빠른 소인수분해 연산 능력으로 기존 수학적 암호체계가 해킹될 우려를 막기 위해, 더 복잡한 수학 알고리즘을 기반으로 양자 컴퓨터가 풀어내는데 오랜 시간이 걸리도록 하는 암호화 방식이며, 키 분배 뿐만이 아닌 사용자 인증 등 암호 통신을 위해 필요한 모든 기능을 제공한다. 별도의 장비 없이도 소프트웨어만으로도 구현이 가능하고 확장성도 뛰어나다는 평가를 받고 있다.

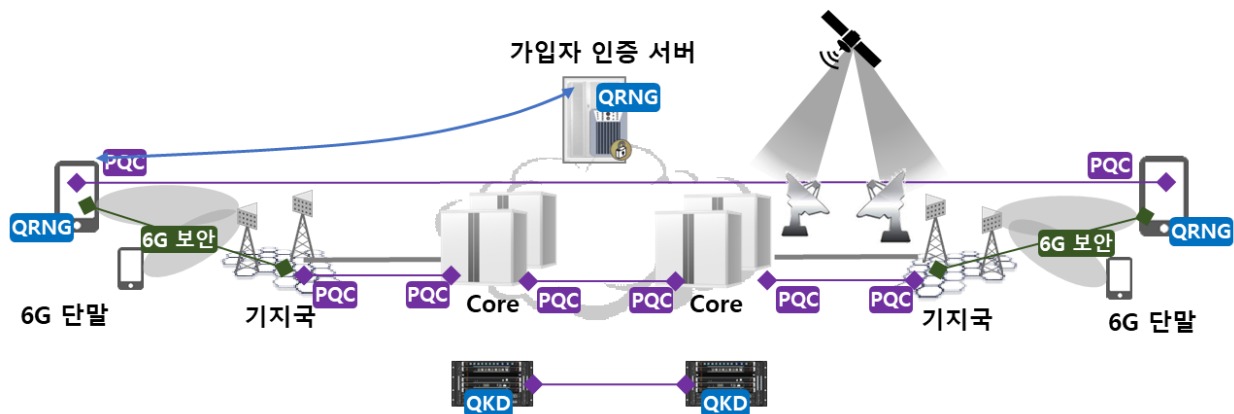
초고도로 지능화될 6G 시대에도 네트워크 및 데이터 보안, 개인정보보호 같은 요소가 더욱 중요해질 것으로 보고 있으며, 이에 6G 는 고객의 안전을 위해 제로 트러스트(Zero-Trust)를 기반으로 한 견고한 구조로 설계되어야 할 것이다. SK 텔레콤은 전송망, 코어망, 단말 영역에 걸쳐 양자 보안 기술을 일부 상용화하였으며, 앞으로도 안전한 6G 네트워크 진화를 위한 기술 개발을 진행할 예정이다.

전송망

전송망은 양자 컴퓨팅 시대에도 종단간 각 광회선별로 높은 보안성을 보장할 수 있도록 PQC 기술을 적용한 전송암호화 기능을 제공하여야 한다. 또한, 양자 컴퓨터로 공격을 받드시 막아내야 하는 중요한 인프라에 대해서는 QKD 기술도 적용할 수 있어야 한다. 보안을 극대화하기 위해서 QKD 기술을 통한 키 분배 경로와 PQC 기술을 통한 키 분배 경로를 분리하고, QKD 장치로부터 받은 양자키와 PQC 모듈로부터 받은 대칭 암호키를 Hybrid 하여 암호화할 수 있어야 한다. QKD 기술과 PQC 기술은 상호 보완적인 기술로, 미래 양자 컴퓨터의 발전으로 PQC 시스템에 위협이 될 수 있더라도 QKD 망(QKDN)을

통해서 원천적으로 보안을 유지할 수 있다. 또한, 재난 발생으로 여러 경로의 QKDN 이 공격을 받는 경우, QKDN 이 복구 되기 전까지 임시적이거나 PQC 기술이 보안을 유지할 수 있도록 도움을 줄 수 있다.

이를 위해 진화된 6G 전송망의 예상도는 아래 그림과 같다. 양자암호 위성망과 연동할 경우 글로벌 연합 QKDN 으로 구성되며, QKDN 구성이 어려운 라스트 마일에서는 최소한 PQC 기반의 키 분배를 통해서 무선접속망과 서버/클라우드를 포함한 종단간 양자암호 보안 서비스를 제공할 수 있어야 한다.



[그림 11] 양자 기술 기반 6G 예상도

이를 위해 서로 다른 제조사 장비간, 통신사 간, 그리고 국가 간 양자암호통신망을 연동하여 통합 운용 및 제어가 가능하도록 양자암호통신망 소프트웨어 정의 네트워킹(Q-SDN), QKDN Federation 과 같은 양자암호통신망 통합 기술 을 단계적으로 개발하고 있다. 이와 관련해서 SK 텔레콤이 2020 년 8 월에 ETSI 표준화 단체에 제안한 양자암호통신망 관리 규격 표준이 2021 년 12 월 승인되었고, 2023 년 4 월에는 국가 시험망에서 실증 완료하였다. 통신사 내의 양자암호통신망 뿐 아니라 통신사 간, 국가 간 글로벌 양자암호통신 서비스를 제공하기 위한 종단간 양자 보안 기술 개발과 표준화를 지속 추진할 계획이다.

디바이스

차세대 디바이스 보안은 1) 이동통신망 보안, 2) 하드웨어 보안, 3) 펌웨어 및 소프트웨어 보안, 4) 어플리케이션 및 서비스 보안 영역으로 나눌 수 있다.

이동통신망 보안은 가입자의 이동통신망 접속 및 망내 전송정보에 대한 암호화와 무결성을 보장하는 영역으로, 양자 컴퓨터 공격에 의한 해킹이 우려되는 RSA/타원곡선암호(ECC) 알고리즘이 사용되는 인증 및 키 동의(AKA) 및 Identity Privacy 영역에 PQC 기술을 적용하여 보안을 강화하고, Non-3GPP 망에서의 인증을 포괄하는

형태로의 진화가 예상된다. 당사는 망 접속 보안을 담당하는 가입자 인증 모듈(SIM)에 PQC 알고리즘을 구현하여 활용할 계획이다.

하드웨어 보안은 기존에 소프트웨어로 구현된 아이디, 난수의 생성과 저장 및 보안 연산을 보안 소자로 대체하여 디바이스 보안을 강화하는 영역으로, SIM 카드에 양자 기반 암호화 및 키 교환 알고리즘을 구현한 양자보안 SIM 과 QKD 및 무결성을 강화하는 양자난수생성기(QRNG), QKD 소자 기술을 적용할 예정이다.

펌웨어 및 소프트웨어 보안은 디바이스의 펌웨어와 적재된 어플리케이션에 암호화 및 무결성을 보장하여 위변조 및 해킹을 방지하는 영역으로, 이를 위해 하드웨어 보안 소자 및 PQC 기술을 활용하여 단말 생애 주기 전반에 대한 보안 강화를 추진해 나갈 계획이다.

마지막으로, 어플리케이션 및 서비스 보안은 디바이스에 적재된 사용자 어플리케이션과 서비스 서버 또는 버티컬 기업 대 기업(B2B) 사업자 서버 간의 E2E 데이터 전송 보안을 제공하는 영역으로, 이를 위해서 SIM 과 운영체제(OS)에 적용된 양자 기술을 통해 서드파티 서비스 제공자를 위한 독립된 서비스 보안 및 통합관리가 가능하도록 관련 기술 개발 및 OS사와 협력 계획이다.

6.5 무선 진화 기술

E-mMIMO

E-mMIMO 는 5G 에서 중점적으로 연구된 거대 MIMO(mMIMO)의 진화형이다. MIMO 는 다중 입출력 안테나를 사용하는 무선 전송 기술이다. 기지국과 단말기에 다수의 안테나를 사용하여 1) 공간 다이버시티 이득, 2) 공간 다중화 이득, 3) 빔포밍 이득을 가질 수 있다. 6G 의 E-mMIMO 는 5G 의 mMIMO 로부터의 단순한 트랜시버(TRX) 개수의 증가를 의미하는 것이 아닌 전송 레이어 수의 효과적인 증가와, 기존에 해결하지 못한 MIMO 의 미제를 해결하는 두가지 방향으로 발전해 나갈 것이다. 대표적인 미해결 분야는 무선 단말의 이동성과 채널 페이딩 환경을 보장할 끊임 없는 빔포밍 기술, 주파수 분할 송수신(FDD) 전송 시 MIMO 적용 문제, 다중 셀 및 셀 경계에서의 파일럿 신호 교란 문제, 채널 추정을 위한 참조 신호 및 시스템 최적화, 하이브리드 빔포밍 문제, 무선 접근 제어 단계에서의 레이어 제어 문제 등이 있다. 이러한 개선 사항은 5G 상용화 전부터 많은 논의가 있었지만, 본격적인 해결 방안 마련과 상용화 적용은 6G 에서 비로소 가능할 것으로 보인다. 또한 밀리미터 대역과 테라헤르츠 대역 등의 초고주파 활용과 NTN 등 새로운 도메인에서의 무선 전송을 위해서, 다중 사용자 및 3D 빔포밍을 지원하는 E-mMIMO 기술은 더욱더 중요성이 강조될 것으로 예상된다.

RIS

RIS 는 전파의 물리적인 특성(반사, 투과, 회절, 산란, 흡수 등)을 활용하여 비-가시 경로(NLoS) 영역의 수신 전력 증가, 또는 물체의 전파 투과율 증가를 통한 실외-실내(O2I) 커버리지 증가 등을 도모하기 위한 새로운 무선 전송 기술이다. 기존 통신 시스템에서는 대기중으로 방사되는 송신 신호는 주변 환경과 송수신기의 물리적인 위치에 의해 그 통신 채널의 특성이 수동적으로 결정되었다. RIS 는 전파의 반사율, 투과율, 흡수율 등을 조절하여 이러한 수동적 채널 환경을 기존에 비해 이동통신 성능 측면에서 유리하도록 능동적으로 개선할 수 있다. 따라서 전파 음영지역의 전송을 위해 송신 전력을 증가하거나 기지국을 증설하는 대신, 전파(Wave)의 전파(Propagation) 환경을 지능적으로 개선하여 수신 신호를 증가시키는 방식으로 전체 시스템의 에너지 절감 및 효율화를 가져올 수 있다. 또한 기존 통신이 가시경로 확보에 유리한 실외 환경에 중점을 둔 것에 비해, 6G 는 상대적으로 사무실, 지하철, 공연장, 경기장, 쇼핑몰 등 대규모 수요가 실내에 밀집되어 있는 공간적인 특수성을 갖는 새로운 사용 시나리오를 반영해야 한다. 이 경우 RIS 는 새롭게 도입될 6G 사용 시나리오 별로 세분화된 무선 채널 환경의 개선 솔루션을 제공할 수 있기 때문에 6G 에 활용가치가 높은 기술이 될 것으로 기대된다.

저대역/하위 중대역 RF

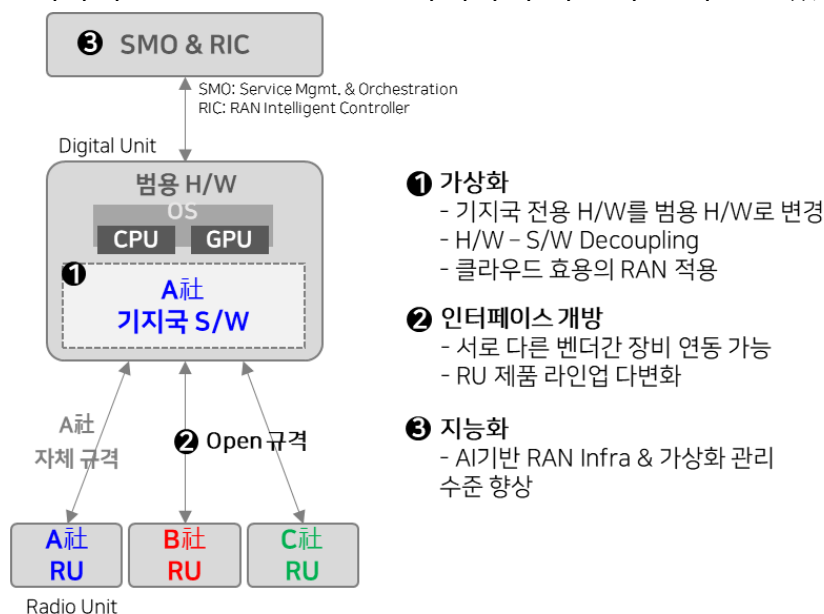
저대역 또는 하위 중대역 RF 는 최근 6G 후보 대역으로 주목을 받고 있는 상위 중대역의 7 GHz 이상 대역이 아닌 7 GHz 이하에서 채널 용량을 증가시킬 수 있는 RF 기술을 총칭한다. 이미 활발하게 사용되고 있는 저대역의 RF 기술을 6G 에서 재조명해야 하는 이유는 기존 통신의 진화 과정에서 그 답을 찾을 수 있다. 통신 기술의 발전 및 통신 세대의 변화의 목적은 근본적으로 이전 세대 대비 증가한 채널 용량 확보를 통한 안정적인 무선 통신 서비스의 제공이었다. 이를 위해 통신 세대 별로 새로운 무선 기술이 개발되고 시스템의 복잡성도 증가하였지만, 본질적으로는 신규 주파수 발굴을 통한 통신 대역폭 증가가 주요했다. 하지만 근래의 5G 28 GHz 대역의 도입 과정에서 알 수 있듯이 통신 시스템에 적용이 쉬운 저대역 대비 밀리미터 대역으로의 통신 대역폭의 확장은 주파수의 본질적인 특성 상 활용에 많은 어려움을 겪고 있다. 반면 기존 2G, 3G 서비스의 일몰과 함께 남겨진 유휴 주파수는 6G 의 유망한 후보기술들을 적용하면 기존 대비 높은 채널 용량을 달성할 수 있는 여력이 존재한다. 하지만 저대역 활용 역시 많은 과제를 직면하고 있다. 예를 들어, 국가와 지역별로 파편화된 서비스를 제공하고 있는 대역의 지정학적 한계를 극복하거나, 저대역의 증가된 파장 길이를 고려한 기지국과 단말의 물리적인 안테나 설계방법, 또는 주변 간섭을 줄이면서 MIMO 기술과 융합할 수 있는 공간 다중화 기술 적용 방법 등이 저대역 RF 가 해결해야할 과제다. 구체적으로는 하드웨어 분야 중 안테나, 전력 증폭기(PA),

저잡음 증폭기(LNA), 필터, 믹서, 위상 고정 루프(PLL) 등 RF 단에서 현재의 기술 한계를 통합적인 아키텍처 설계를 통해, 저대역에서의 채널 용량 개선 방안 및 6G에서의 활용 방안에 대해 제조사와 이동통신사, 정부 간 지속적 논의가 필요하다.

6.6 오픈랜

최근 미국, 일본을 비롯한 주요 국가들은 안보, 공급망 다양화 및 자국 산업 보호 등의 이유로 정부 주도의 오픈랜 기술 개발 및 도입을 적극 추진하고 있다. 미국은 자국 산업 활성화를 위해 15 억불 규모의 오픈랜 기술개발 기금을 조성하였으며, 일본은 오픈랜 장비 도입 시 세제 혜택을 부여하고 자국 제조사 5G 기술 개발 지원을 위한 700 억엔 편성을, 한국 정부 또한 오픈랜 인더스트리 얼라이언스(ORIA) 설립을 통해 국내 오픈랜 생태계 활성화 및 오픈랜 도입을 적극 독려하고 있다.

오픈랜은 기지국의 하드웨어와 소프트웨어를 가상화 기술을 통해 분리하고, 장비간 인터페이스 표준화를 통해 서로 다른 제조사의 장비가 연동될 수 있도록 한 무선접속망 구조이다. 가상화를 통해 데이터센터 등에서 사용되는 범용 서버를 기지국에 활용할 수 있으며, Scale in/out 과 같은 가상화 특화 기능의 이점이 무선접속망에 적용될 수 있다. DU와 RU 사이의 프론트홀 구간 인터페이스 표준화는 서로 다른 제조사의 DU와 RU 간 연동을 통해 RU 라인업 다변화 및 유연한 망 구축을 가능하게 한다. 이외에도 AI/ML 기술을 접목하여 망 관리를 효율화하고 성능을 최적화하기 위한 지능화 기술에 대한 논의도 최근 활발히 이루어지고 있다. 전세계 주요 이동통신 사업자들은 폐쇄적 무선접속망 생태계로 인한 특정 제조사 종속성으로부터 탈피하고, 앞서 언급한 기대효과들을 고려하여 오픈랜 도입을 검토하거나 구축을 추진해오고 있다.



[그림 12] 오픈랜 개념 및 기대 효과

당사는 2019 년 4 월, 가상화 CU 를 활용하여 세계 최초로 5G 서비스를 상용화하였으며, 5G 인빌딩 장비를 위한 프론트홀 인터페이스 공통 규격을 정의하고 주장비 제조사들의 DU 와 국내 중소 제조사들의 RU 를 연동하여 2019 년 8 월부터 5G 인빌딩 서비스를 제공하는 등 오픈랜 도입을 추진해왔다. 다만, 5G 최초 상용화 시점 대비 다소 늦은 개방형 프론트홀 인터페이스에 대한 표준화와 기술적 한계로 인한 가상화 DU 의 성능 및 용량 제약, 제조사들의 소극적인 오픈랜 정책 등으로 인해 오픈랜 시장이 크게 활성화되지는 못한 상황이다.

하지만 최근 CPU 연산성능 향상과 전용 가속기를 비롯한 신규 하드웨어 구조 도입으로 가상화 DU 와 기존 DU 간 성능의 간극이 점진적으로 줄어들고 있으며, O-RAN 얼라이언스로 촉발된 오픈랜 생태계 형성 및 개방형 프론트홀 인터페이스에 대한 적극적인 표준화로 오픈랜의 상용화 사례가 등장하고 있다. 미국의 Verizon 은 가상화 오픈랜 기반으로 5G 를 상용화하였으며, 일본의 NTT DOCOMO 는 개방형 프론트홀 인터페이스 기반으로 서로 다른 제조사의 DU 와 RU 장비를 상호 연동하여 5G 서비스를 제공하고 있다. 유럽의 Vodafone 또한 2030 년까지 유럽 권역의 30%를 오픈랜으로 구축한다는 계획하에 오픈랜 구축 지역을 확장해 나가고 있다. 당사 또한 오픈랜 기술 발전 및 생태계 성장에 발맞춰 다양한 연구개발 및 실증활동을 이어오고 있다. 다수 제조사와의 오픈랜 가상화 기지국 시험 성과를 MWC 2022 를 통해 공개하였으며, 2023 년에는 국내 최초로 실제 상용환경에서 실증한 바 있다. 국내 연구기관 및 제조사, 글로벌 IT 기업들과 협력하여 2022 년 가을 O-RAN PlugFest 를 성공적으로 주최하고, RAN 지능형 컨트롤러(RIC) 기반 트래픽 분산 기술 실증, 오픈랜 기반 인빌딩 실증망을 구축하는 등 다방면의 활동을 통해 오픈랜의 상용 가능성을 엿보고 있다.

이와 같은 흐름에 따라 6G 에서는 상용화 초기부터 오픈랜이 도입될 것으로 예상된다. 오픈랜 관련 최대 표준화 단체인 O-RAN 얼라이언스에서는 2022 년 6 월, 6G 오픈랜을 연구하고 준비하기 위한 차세대 연구그룹(nGRG)을 구성하였으며, 5 개의 연구분과(RS)를 조직하여 6G 오픈랜의 요구사항, 구조, 지능화, 보안, 차세대 연구 플랫폼에 대한 연구를 진행해오고 있다.

당사는 통신 장비 시장 생태계 확장, 유연한 망 구축, IT 기반 지능화와 클라우드화, 총소유비용(TCO) 절감 등을 위해 오픈랜은 6G 도입 초기부터 지원되어야 하는 핵심 구조로 보고 있으며, 이를 위해 이동통신 사업자와 제조사간의 협력을 통해 관련 표준화 기관에서 6G 초기 규격부터 프론트홀을 포함한 주요 인터페이스에 대한 표준 규격을 반영하는 것이 중요하며, 서로 다른 제조사 장비 간의 연동으로 인한 성능 손실 및 개발 소요 기간을 최소화할 수 있는 검증 프로세스 도입이 필요하다. 또한, 셀 용량, 소모전력

등 TCO 관점에서 오픈랜 기지국이 기존 기지국 대비 동등이상 수준이 될 수 있도록 가상화 기술의 성숙 및 하드웨어 발전이 수반되어야 한다. 더불어 국내 오픈랜 생태계 활성화를 위한 각종 지원책을 통해 6G 오픈랜 시대를 대비하고 선도해 나갈 수 있어야 한다.

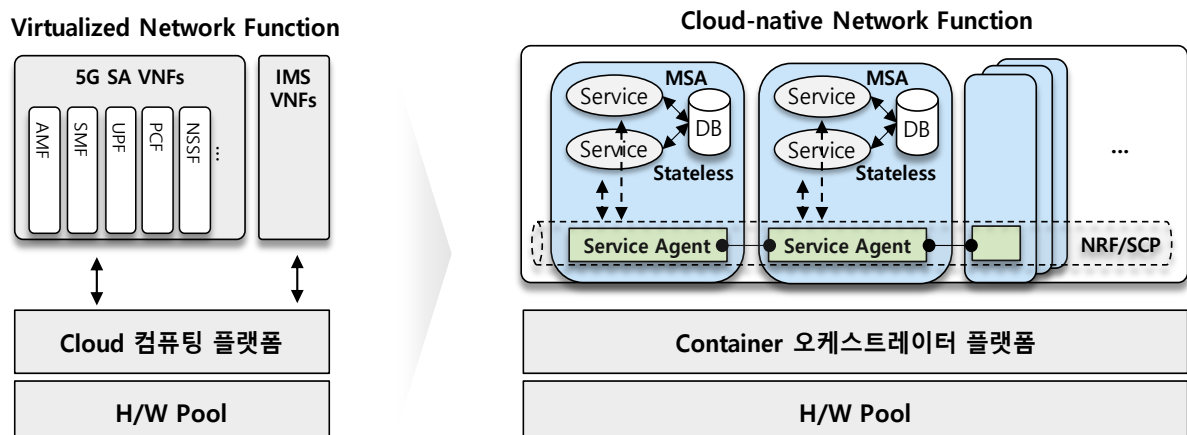
이를 위해 당사는 오픈랜이 6G의 기본 구조로 반영될 수 있도록 주요 플레이어들과 긴밀히 협력하며 관련 생태계를 선도해 나가고 있다. O-RAN 얼라이언스 nGRG 내 요구사항 연구분과(RS-01)의 공동의장으로 활동하며 오픈랜이 6G의 필수 요구사항으로 반영될 수 있도록 힘쓰고 있으며, NGMN의 6G 백서[12] 발간 작업에 참여하여 6G 오픈 인터페이스 적기 표준화 중요성을, NTT DOCOMO와의 6G 기술 백서[11] 공동 발간을 통해 6G 오픈랜 표준 및 장비 생태계 활성화에 대한 요구사항을 역설했다. 또한, 제조사와의 협력을 통해 오픈랜의 상용망 적용이 가능하도록 성능 및 TCO 관점에서의 기술 개발을 진행 중이다. 당사는 5G에서의 오픈랜 R&D 및 실증 경험을 바탕으로 6G에서는 도입 초기부터 오픈랜이 지원될 수 있도록 생태계 내의 다양한 플레이어들과의 협력 및 연구활동을 이어갈 예정이다.

6.7 코어망

6G 코어망은 앞에서 설명한 AI-native, Green-native 뿐만 아니라 Cloud-native 방식으로 설계될 것이며, 어떤 경우에도 고객 체감 품질 저하가 발생하지 않는 강한(Robust and Resilient) 코어망으로 만들어 나갈 예정이다.

Cloud-native

5G 코어망에서 네트워크 기능 가상화(NFV) 기술을 이용하여 물리적 하드웨어 리소스의 격리를 통해 가상 네트워크 기능(VNF) 기반 서비스들을 개발, 배포 및 상용화를 하였다면, 6G 코어망에서는 추상화 기술까지 제거하여 Cloud-native 네트워크 기능(CNF) 기반으로 더욱 더 세분화된 서비스들로 재설계가 된 코어망으로 진화할 예정이다.

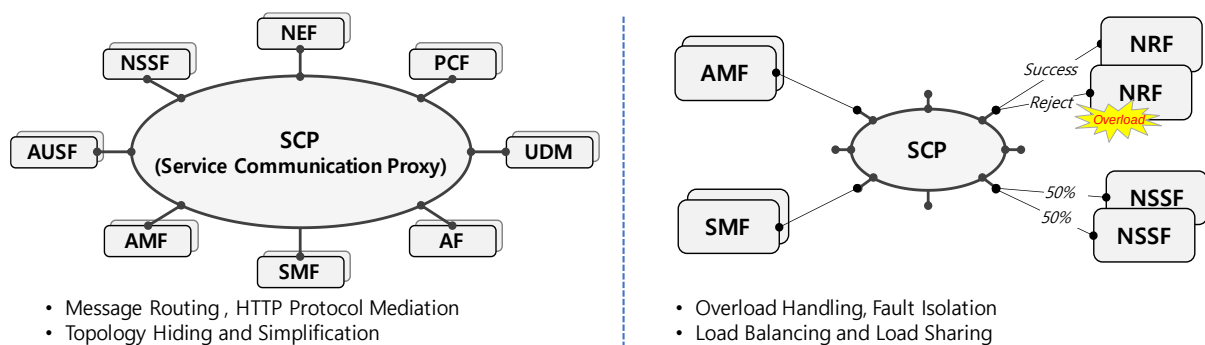


[그림 13] 6G의 Cloud-native 진화 방향

Cloud-native 코어망의 기반이 되는 CNF의 철학은 소프트웨어를 더 작고, 관리하기 쉬운 마이크로 서비스 단위로 분해하는 마이크로 서비스 아키텍처(MSA) 구조로 개발하는 것이다. MSA를 통해 서비스들의 LCM 유연성 증대, 배포 가속 및 장애 시 서비스 영향도와 장애 복구 시간이 줄어들고, 개발 및 상용화 시간도 단축된다. 하지만, 이를 위해서는 마이크로 서비스 간의 연동을 쉽게 할 수 있는 연동 구조가 반드시 필요하다.

5G 코어망 도입 시 가장 큰 변화는 NF 간 서비스 기반 인터페이스(SBI)를 통해 연동하는 구조를 도입한 것이다. 이러한 SBI 연동 방식이 더욱 확대되고 있으며, 6G에서는 SBI를 더욱 더 확장하여, 단말부터 코어망 구간, 기지국부터 코어망 구간 등 모든 인터페이스가 하이퍼 텍스트 전송 프로토콜(HTTP)v2 또는 빠른 UDP 인터넷 연결(QUIC) 기반 HTTPv3 프로토콜로 통일될 수 있으며, 이를 지탱해주는 '고도화된 서비스 기반 아키텍처(eSBA)'로 진화될 수 있다.

Evolved SBA 방식의 연동 구조에서 NF는 NF의 본질적인 기능인 단말/기지국 간의 인증/등록, 이동성/세션 관리 및 패킷 처리 등 이동통신 본연의 호 처리 기능에 집중하며, 서비스 품질을 책임지는 다중화, 과부하 제어, 로드 밸런싱, 시그널/데이터 메시지 송수신 처리 및 라우팅 등의 역할은 서비스 메쉬 기술이 수행할 수 있다. 이 기술은 5G에서의 서비스 통신 프록시(SCP)로 일부 규격화가 되었으나, 앞서 설명한 모든 NF들의 통일된 인터페이스, MSA, 품질 중심으로 재설계가 필요하며, 분산된 서비스 메쉬 구조 기반 하에 6G 코어망은 서비스가 중심이 되는 인프라가 될 것이다.



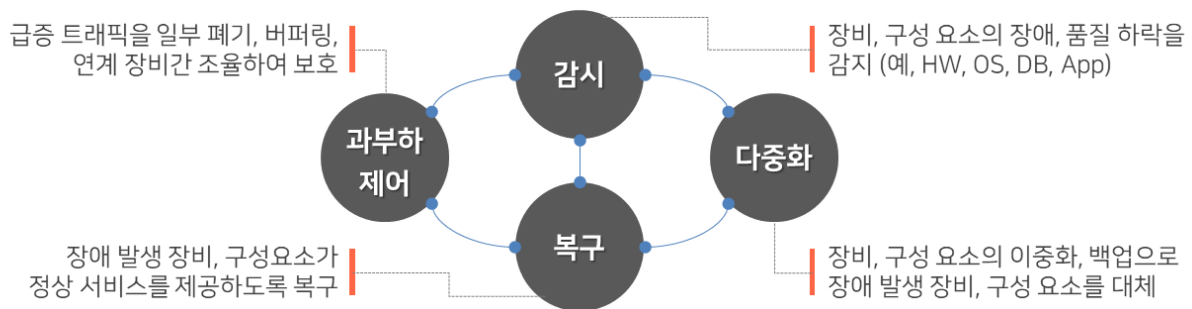
[그림 14] SCP에 의한 Evolved SBA 방식의 연동구조

Robust and Resilient Core

5G까지는 주요 기능들이 호 처리 중심으로 설계되었기 때문에, 프로세스는 살아 있지만 실제로는 제대로 동작하지 않는 문제가 발생할 수 있었다. 하지만, 6G에서 스마트 팩토리, 자율주행 등의 서비스는 약간의 품질 저하로도 심각한 사고로 이어질 수 있기 때문에 어떤

상황에서도 고객 체감 품질 저하가 일어나지 않는 강한(Robust and Resilient) 코어망이 요구된다.

SK 텔레콤은 감시 측면에서는 망 접속 성공, 실패에 대한 관리 뿐만 아니라 지연, 지터, 패킷 유실 등 고객이 체감할 수 있는 모든 세부 지표까지 감시가 가능하고, 행업(hang-up), 과부하 등 어떠한 문제 발생시에도 즉시 조치, 복구할 수 있는 구조로 6G 코어망을 진화시킬 것이다. 구체적으로는 서비스 무중단 작업 및 조치를 지원하는 NF Set 의 고도화, 지연/지터 등의 품질 변화에 따라 장비를 다시 선택하여 최상의 품질을 제공하는 기능, AI/ML 기술 적용을 통한 장애 사전 감지, 조치 기능 등의 기술들을 개발할 예정이다.



[그림 15] Robust and Resilient Core 개념도

장애에 대한 자동 조치, 복구 기능은 NF 뿐만 아니라 하드웨어 인프라에도 동일하게 적용되어야 한다. NF 기반이 되는 하드웨어 종류, 벤더가 다양하기 때문에 구축 및 조치에 많은 시간이 필요하고 운용 어려움이 있을 수 있다. 이를 해결하기 위해 이기종 하드웨어에 대한 일괄 설정, 백업 및 복원, 장애 시 격리 및 네트워크 우회, 실시간 모니터링 등의 기술을 개발할 예정이다.

또한, 인프라와 NF 에 대한 작업 및 조치는 상당부분 자동으로 진행되도록 할 것이다. 5G 까지는 사람이 하는 일을 기계가 자동화하는 방식의 개선이었다면, 6G 에서는 설계단계부터 기계가 기계의 일을 자동 처리하는 방식으로 구현될 것이다. 이를 통해 과거에는 작업 및 조치를 위해 많은 유지보수 인력이 투입되었으나 6G 에서는 최소한의 인력 개입으로 신속한 시스템 구축 및 배포, 구성 최적화, 장애 복구 자동화 등의 시스템 운영이 가능해질 것이다. 또한, 운영 및 유지보수 인력은 최소의 개입으로 제로 터치 방식의 운용이 가능하고 대응 시간이 최소화되어, 고객에 대한 전반적인 서비스 품질이 개선될 것으로 기대된다.

6.8 전송망

5G 대용량 트래픽을 처리하기 위해서 백홀망과 기간망 구간에 100Gbps/200Gbps 광전송 기술이 상용망에 대세가 되었다. 6G 에서도 트래픽 대용량화 추세는 지속될 것으로 전망되며, 대용량 전송을 위해 프론트홀 구간까지 포함한 100Gbps~3.2Tbps 코히어런트 광전송 기술이 확산될 것으로 예상된다.

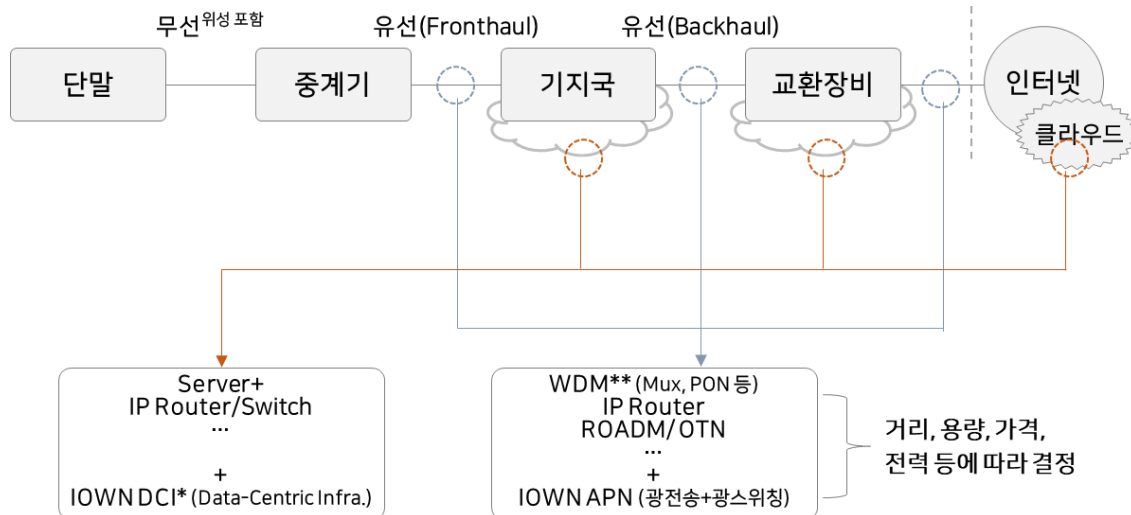
이에 나아가서 기존 C-band 대역(1530-1565nm)의 외에도 대역폭 요구사항을 충족하기 위해 몇몇 망 사업자들은 L-band 대역(1565-1625nm)으로 확장하여 파장 분할 다중화(WDM) 기술을 적용하기 시작하였다. 대역폭 요구사항이 높아지는 6G에서는 C-band 및 L-band 대역 뿐만 아니라 O-band, S-band 등 타 대역까지 포함하는 Ultra-wideband WDM 기술도 후보로 논의될 것이다.

또한, Optical 네트워크와 Packet 네트워크의 통합 트렌드에 따른 통합 장비들이 상용 출시되고 있으며, 패킷 광 전송망(POTN) 중심의 Layer 통합 전송 기술로 지속 진화될 것으로 예상된다. 이에 따라, 기존 수용 중인 인프라와 신규 인프라의 공존으로 복잡해진 전송망을 효율적으로 운용하기 위한 소프트웨어 정의 네트워크(SDN) 기반 오픈 플랫폼(Infrastructure Orchestration)의 중요성은 더욱 높아지고 있으며, 당사의 SDN 플랫폼은 재구성 가능한 광 결합 분기 장치(ROADM), 광 전송망(OTN), 패킷 전송망(PTN), 인터넷 프로토콜(IP) 라우터를 모두 수용하고 있어 Layer 를 통합한 POTN 의 공통 데이터 모델링 기술과 통합 운용 및 제어 기반 기술을 확보하고 있다.

전송망의 저지연, 대용량에 대한 요구조건과 함께 최근에는 에너지 절감도 중요한 요소가 되었다. 전송망 에너지 효율을 극대화하기 위해서는 기존 전송/무선 인프라의 혁신이 필요한데, 이를 위한 핵심 기술 중 하나는 초고속 대용량, 소형화, 저전력소비를 위해 광소자와 전자소자를 융합한 광전자융합 기술이다.

IOWN 은 이러한 최첨단 광자 기술과 정보 처리 기술을 기반으로 하는 차세대 통신 인프라로, IOWN 글로벌 포럼에서는 전력 효율을 100 배 증가시키고, 전송용량은 125 배, 종단 간 지연은 1/200 로 줄이는 것을 목표로 하는 IOWN Vision 2030[16]을 발표한 바 있다.

전송 용량을 늘리면서도 전송망 내에서 광전 변환을 최소화하여 종단간 광전송 서비스를 제공하기 위한 올 포토닉스 네트워크(APN)와 데이터 센터 간 분산 컴퓨팅 및 네트워킹에 광전 변환을 최소화하는 데이터 중심 인프라(DCI)가 IOWN 의 주요 인프라이다.



[그림 16] 네트워크 구조 및 IOWN 적용 구간

IOWN 에서도 APN, DCI 와 같은 인프라를 자동화하고 관리하기 위한 SDN 기반 오픈 플랫폼은 필수 요소이다. IOWN 에서 SDN 기반 오픈 플랫폼은 인프라 리소스를 설정하며 스케줄에 따라 자동으로 리소스 자원을 할당하여 자동으로 리소스 최적화를 수행한다. 오픈 APN 컨트롤러 에서는 해당 구역 내 종단간 광 최적 경로와 동적 전송 속도를 할당한다.

당사는 2022 년 8 월 IOWN 글로벌 포럼에 가입하여 태스크 포스(TF) 활동 중이며, 중계기-기지국 간 프론트홀 차세대 APN 기술과 기지국-교환장비 구간 개방형 APN 기술의 실증을 추진 중이다.

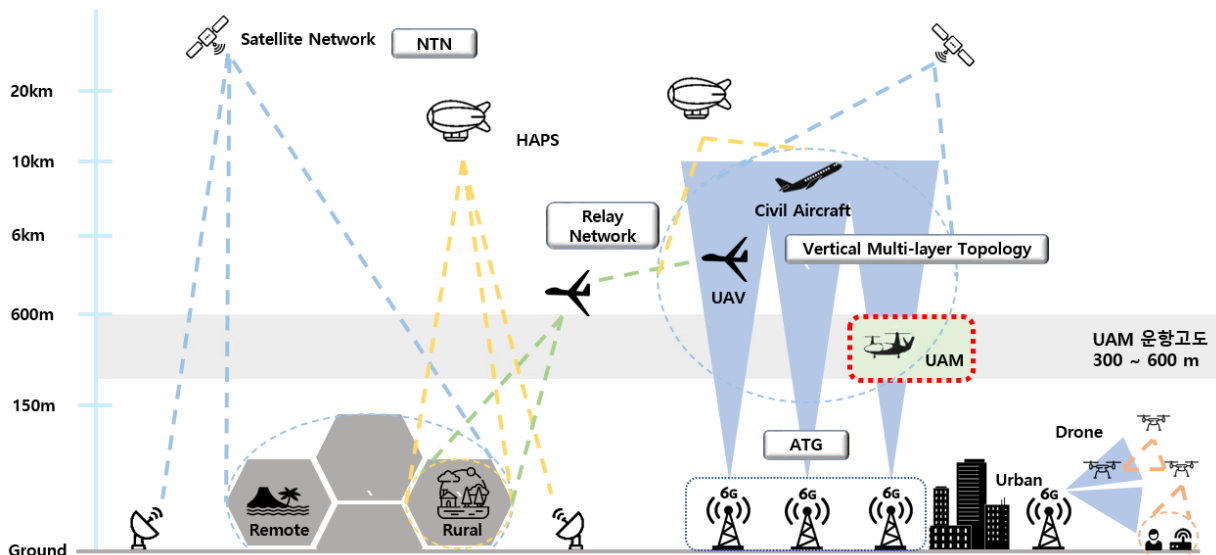
이처럼 6G 전송망에서 필요한 초고속 대용량 전송, 저지연, 유연성 및 에너지 절감에 대한 요구조건을 만족시키기 위해 패킷 네트워크와 광 네트워크 장비 통합을 통해 인프라를 단순화하면서, 동시에 광 전송 효율을 높이고 패킷 스위칭을 최소화하여 저전력 소비를 실현할 수 있는 APN 인프라를 구축할 예정이다. 당사는 앞으로 여러 APN 과 DCI 로 구성된 인프라에 대한 통합적인 광 네트워킹 서비스, 분산 컴퓨팅 서비스 및 망관리가 가능한 소프트웨어 정의 인프라(SDI) 오픈 플랫폼으로 확장할 예정이다.

6.9 상공망

SK 텔레콤은 2030 년 전후 본격화가 예상되는 6G 상용화 시기에 맞춰 현재 스마트폰 중심의 지상 영역에서 하늘은 물론 해양, 오지 등의 음영 지역까지 데이터 송수신이 가능하도록 서비스 영역을 확장해 나가고 있다. 하늘로 확장된 3 차원 상공 통신 커버리지는 당사가 지향하는 'UAM 종합 서비스 제공자'로서 운항사, 비행체, 기타 이해관계자 및 고객에게 송수신되는 각종 정보를 효율적으로 전달 가능하게 하고, 음영

지역으로 확장된 통신 커버리지는 언제, 어디서나, 그리고 모든 것들과 통신 가능하게 한다는 6G 비전에 부합된다.

이를 위해 진화된 6G 이동통신망은 아래의 그림과 같다. 5G 대비 향상된 성능을 가진 지상망은 기존 스마트폰은 물론 XR 기기 등 다양한 고객 경험을 제공하고, 상향 안테나와 특화 기능이 적용된 상공망은 UAM, 드론, 민항기 등 비행체와의 효율적인 데이터 송수신이 가능하다. 또한, 위성은 통신 링크 간 어떠한 장애물 없이 시야(LoS)가 확보된 원외(Outdoor) 지역에서 통신 서비스를 이용할 수 있도록 해주며, 충분한 수의 저궤도 위성군이 구축되는 6G 시대에서는 고신뢰/저지연 데이터 서비스에도 활용될 것으로 기대된다.



[그림 17] 이동통신망의 상공망 확장

일정 고도 이상의 상공망 통신 서비스를 원활히 제공하기 위해서는 효과적인 망 설계 기술이 반드시 필요하다. 일반적으로 망 설계 기술은 기지국의 형상, 위치, 개수, 안테나 신호 지향 방향 및 패턴, 서비스 지역을 고려하여 기지국 구축 방법을 제공한다. 당사의 상공망 설계 기술은 3GPP 표준 전파 모델[17]과 실측치를 반영하여 상공망 신호 품질을 예측하고, 상향/하향 데이터 속도, 지연 시간, 통신 링크 안정성 등의 다양한 통신 성능 항목을 평가하여 최적의 기지국 구축 방안을 제공한다. 해당 성능 평가는 지상망에 대한 간섭의 영향을 반영하여 지상망의 전송률 저하, 수신 신호 세기 감쇠 등의 부분도 종합적으로 고려하고 있다.

또한, 상공망 통신 서비스를 위해 고려 중인 여러 특화 기술로는 넓은 상공 커버리지 확보 및 대용량 데이터 전송을 위한 빔포밍, 고속이동을 고려한 셀 변경 방법, 서로 다른 데이터의 QoS를 보장하기 위한 네트워크 슬라이싱, 유연한 상향/하향 셀 용량 활용을

위한 동적 시분할 송수신(Dynamic TDD) 및 FDR 등이 있다. 특히, 빔포밍 기술 중 빔 형상 조절과 데이터 송수신 시공간 다중화를 위한 MIMO 활용은 상공망 커버리지 확보에 필수적이며, 3 차원 이동체의 비행 경로를 고려한 효과적인 데이터 전송 셀 변경 및 기지국 협력 기술 역시 통신 서비스 품질을 보장을 위해 중요하다.

6G 시대 위성 통신 서비스는 크게 위성 통신 전용 수신 단말인 VSAT 을 이용한 위성 브로드밴드 서비스, 우리가 사용하고 있는 스마트폰을 활용하는 위성-스마트폰 직접 통신(direct-to-cell) 서비스, 그리고 IoT 기기들을 지원하는 위성 IoT 서비스로 구분된다. 이 중, 위성-스마트폰 직접 통신은 단말(칩셋)이 주도하는 직접 통신과 위성이 주도하는 직접 통신으로 구분 지을 수 있다.

단말(칩셋) 주도 위성-스마트폰 직접 통신은 위성 통신 기능이 새롭게 추가된 스마트폰 단말(칩셋)을 이용하여 기존에 구축된 저궤도 위성군과 통신하는 방식이다. 단말(칩셋) 주도 위성-스마트폰 직접 통신의 예로는 Globalstar 위성을 활용하는 Apple iPhone 14 시리즈, 베이더우 위성을 활용하는 Huawei Mate 50 시리즈 등이 있다. 이러한 통신 방식은 새로운 단말 출시에 맞추어 조기 상용화가 가능하다는 장점이 있지만, 활용하는 위성 성능의 한계로 인해 응급구조 메시지 송수신 정도의 저속, 저용량 서비스만 가능하다는 단점이 있다.

반면, 위성 주도 위성-스마트폰 직접 통신은 새로운 위성군을 발사하여 기존 또는 신규 스마트폰과 통신하는 방식으로 음성 인터넷 프로토콜(VoIP), 데이터 통신과 같은 서비스를 제공할 수 있다는 장점이 있다. 물론 신규 위성군 구축을 위한 비용과 시간이 필요하다는 단점이 있지만, 진화된 위성 시스템을 활용하면 전파 지연 및 도플러 효과를 효과적으로 보상할 수 있으며 더 넓은 위성 커버리지 확보도 가능해지기 때문에 6G 상공망 지원을 위해서는 진화된 위성 시스템이 필수적이다. 당사는 이러한 위성 주도 위성-스마트폰 직접 통신에 집중하고 있으며, 다양한 글로벌 위성 사업자들과 적극적으로 협업 중이다.

7. 6G 스펙트럼

5G 시대에 들어서며 다양해진 사용 시나리오들과 높아진 서비스 QoS 를 충족하기 위해 처음으로 IMT 스펙트럼을 2 개의 FR 로 구분하여 확장하였는데, FR1 은 450 MHz – 5,000 MHz, FR2 는 24,250 MHz – 52,600 MHz 대역으로 정의되어 있다. 각 국가별 기존 3G, LTE 주파수 이용 현황과 5G 서비스 용도가 상이하여 5G 주파수 대역은 각 국의 주파수 정책과 연계하여 할당이 되며, 국내에서는 휴대전화 등 범용 이동통신 서비스를 위하여 FR1 에서

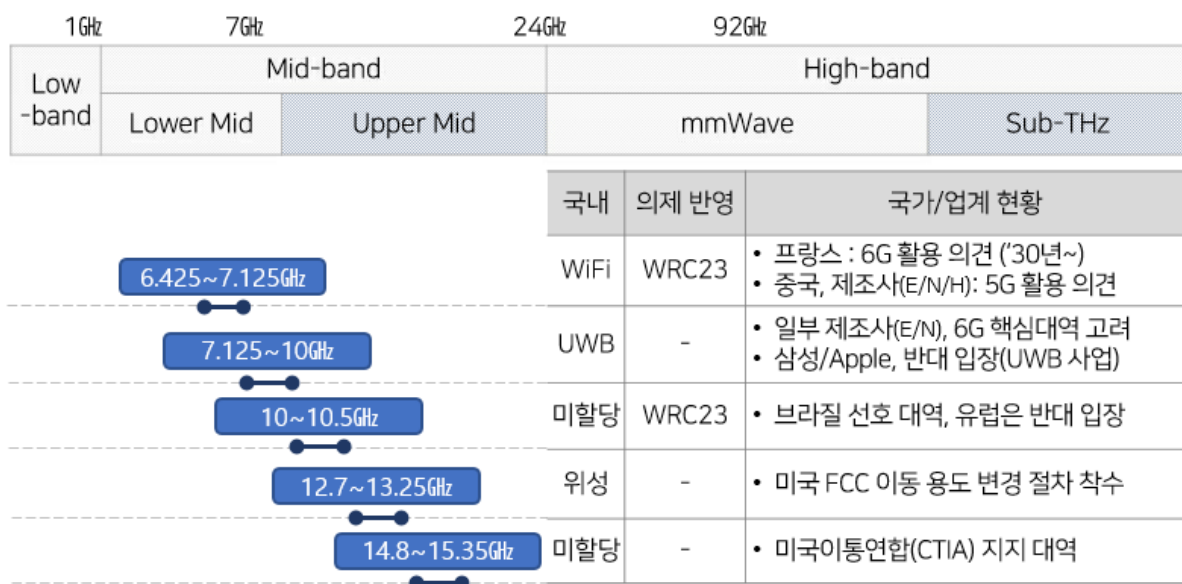
3.5 GHz 대역이 할당되었고, 초광대역, 초저지연 성능이 요구되는 서비스를 위하여 FR2 에서 28 GHz 대역의 스펙트럼이 할당되었다.

다만, 당초 예상에 비하여 Biz. Case 발굴 및 시장 환경 조성이 미진하고 28 GHz 대역의 열악한 전파전파 특성 극복을 위한 무선기술 진화 및 구현의 미흡으로 고주파대역 스펙트럼 사용이 활성화되지 못했다.

6G 는 5G 보다 더욱 확장된 사용 시나리오들을 수용하기 위해 중대역(1~24 GHz)은 물론, FR2 밀리미터 대역을 포함한 보다 높은 고대역(24~92 GHz)와 서브 테라헤르츠 대역(92~300 GHz) 등을 추가적으로 고려하고 있으며, 2023 년 11 월에 개최되는 세계전파통신회의(WRC-23)에서 6G 후보 주파수 대역들이 의제로 상정되어 2027 년 세계전파통신회의(WRC-27)에서 확정될 예정이다.

7.1 6G 주파수 발굴

최근 세계적으로 이동통신업계에서는 여러 6G 후보 주파수 대역 중 기지국 커버리지와 용량을 균형적으로 확보 가능한 상위 중대역(7~24 GHz) 중 전파전파 특성이 상대적으로 좋은 7~15 GHz 대역과, 초광대역폭 확보가 가능하여 초정밀 센싱 등의 응용이 가능한 서브 테라헤르츠 대역을 주목하고 있다.



[그림 18] 중대역 주요 관심 대역 별 현황

하지만, 7 GHz 이상의 상위 중대역에서 IMT 이외 위성, 초광대역(UWB), 북대서양 조약 기구(NATO) 등 타 서비스들이 여러 대역에 걸쳐 이미 존재하며, ITU-R 에서 국제 무선 주파수 관리를 위해 구분한 3 개 지역별 이해관계가 상이하여 신규 IMT 대역의 발굴에

어려움이 있는 것도 사실이다. 또한, 5G 로부터의 레슨에서 고찰한 바와 같이, 높은 주파수 대역의 열악한 전파특성을 보상하기 위한 RF 기술과 기지국의 투자 가용성의 제약을 고려하여 기존 이동통신망에서 사용중인 저대역 및 하위 중대역 활용을 적극 검토해야 할 것이다.

신규 대역 발굴과 더불어 기존 이동통신 주파수 대역의 6G 용도 재활용 연구

이미 전세계 주요 이동통신 사업자들은 3G 와 LTE 주파수를 5G 로 사용하기 위한 회수 및 재배치를 하거나 동일대역 주파수 공유기술(Spectrum Sharing)을 활용하여 중대역 및 밀리미터 대역과 CA, DC 를 통해 5G 네트워크를 비용효율적으로 빠르게 구축해 나가고 있는데, 이것은 6G 주파수 발굴의 어려움을 완화해 줄 좋은 사례가 될 수 있다.

당사에서는 WRC-27 에서 결정이 될 6G 신규 후보 주파수로 4-10 GHz 대역을 검토하고 있는데, 이는 효율적인 커버리지 구축과 기지국 용량 확보가 가능한 주파수 특성을 최대한 활용하여 6G 상용화 시작 단계에서부터 기본적인 서비스 기반 제공을 가능하게 할 대역으로 판단하기 때문이다. 상기 주파수 범위내에서 이미 여러 타 서비스들이 사용중인 상황이므로 기존 서비스와의 공존 및 재배치 방안 연구 등을 통해 사용 가능한 6G 주파수 발굴이 필요하다.

앞서 언급한 여러 주파수 대역들이 6G 에서 원활하게 활용될 수 있도록 다양한 대역의 전파특성을 연구하고 각 대역에 맞는 전파모델, 기지국 시스템, 디바이스 개발 연구가 선행되어야 할 것이다.

7.2 6G 후보주파수 투과특성

당사는 6G 후보 주파수에 대한 선제적 연구를 통해 주파수 대역 별 커버리지/용량 특성을 파악하고 이에 따른 주파수 별 용도를 연구함으로써 6G 초기 단계부터 정교하고 명확한 요구사항을 수립하고자 한다.

6G 후보 대역 중 고주파에서의 높은 전파 투과 손실과 보완 방안

그 첫번째 스텝으로 6G 후보 주파수로 거론되고 있는 다양한 대역 중 상위 중대역 및 서브 테라헤르츠 대역에 대해 시뮬레이션 및 실측 기반 전파 투과특성을 확인하고 5G 상용 주파수와 비교하였다. [표 2]는 전체 실험에서 가정한 세부 주파수 대역을 보여주고 있으며, [표 3]은 각 주파수대역별 투과 및 경로 손실에 대한 시뮬레이션 결과를 보여준다. 투과손실은 공기 상태 대비 일반 유리에서의 손실, 경로손실은 자유공간 경로손실(FSPL)

모델을 가정하여 추정한 수치이며, 주파수대역 별 비교를 위해 3.5 GHz 대역을 기준으로 정규화 되었다. 시뮬레이션 결과로부터 아래와 같은 핵심 메시지를 도출하였다.

- 투과손실 관점 3.5 GHz 대역 대비 7 GHz 대역에서는 0.7 dB(1.17 배) 증가, 10 GHz 대역에서는 1.4 dB(1.38 배) 감소됨
- 투과손실 관점 28 GHz 대역 대비 140 GHz 대역에서 0.8 dB(1.2 배) 증가됨
- 경로손실 포함 손실 합 관점 3.5 GHz 대역 대비 6G 후보주파수 대역의 주파수 특성은 6.4 ~ 33.6 dB(약 4 ~ 2000 배) 열화됨

[표 2] 실험에서 고려된 주파수 대역

구분	주파수대역 (GHz)	대역폭 (MHz)	설명
5G	3.7 ~ 3.8	100	3.5GHz 대역 (Sub-6)
	28.1 ~ 28.9	800	28GHz 대역 (밀리미터)
6G	7.0 ~ 7.1	100	상위 중대역 & 비면허 대역
	10.0 ~ 10.1	100	상위 중대역
	140.0 ~ 140.8	800	서브 테라헤르츠 대역

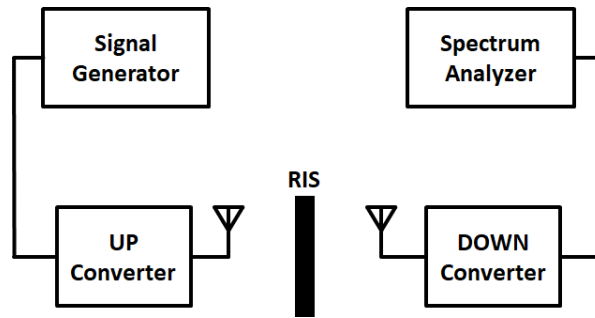
[표 3] 주파수 대역 별 투과 및 경로 손실 시뮬레이션

구분	주파수대역				
	5G		6G		
	3.5 GHz (기준*)	28 GHz	7 GHz	10 GHz	140 GHz
중앙주파수 (GHz)	3.65	28.5	7.05	10.05	140.4
투과손실 (dB)	0	1.1	0.7	-1.4	1.9
경로손실 (dB)	0	17.9	5.7	8.8	31.7
손실합 (dB)	0	19	6.4	7.4	33.6

* 5G 3.5 GHz 대역 기준으로 정규화 되었음

당사는 6G 주파수대역에서 주파수 특성 열화를 완화시키기 위한 하나의 기술로 6G 후보 주파수대역 향 RIS 를 세계 최초 개발 하였다[18]. RIS 는 메타물질 응용의 한 분야로, 전파가 매질을 통과할 때 발생하는 반사, 투과, 흡수의 정도를 조절하여 커버리지를 향상시킬 수 있는 기술이다. 당사는 투과율 개선을 위한 RIS 개발을 먼저 진행하였으며, 1 차 결과를 본 백서에서 제시하고자 한다. 5G 28 GHz 대역, 그리고 6G 후보 주파수 대역 중 10 GHz 및 140 GHz 대역에 대해서 계측장비를 이용하여 매질에 따른 투과 특성 측정을 진행하였으며, 시험의 구성도는 [그림 19], 결과는 [표 4]에 있다. 사용된 매질은 공기, 저방사(Low-E) 유리, 나무, 일반 유리, 일반 유리 향 RIS 이며, 주파수 대역이 높아짐에 따라 전반적으로 투과손실 및 오류벡터크기(EVM) 특성이 열화 되는 것을 확인하였다. 또한, 6G 후보주파수 대역인 10 GHz, 140 GHz 대역 향 RIS 적용 시 일반 유리 대비 투과손실 관점 각각 1.4 dB(1.38 배),

1.2 dB(1.32 배) 성능 개선 확인하였으며, 본 RIS 개발은 프로토타입으로 향후 최적화를 통해 추가 개선할 예정이다.



[그림 19] RIS 시험 구성도

[표 4] 주파수대역에 따른 매질 별 전파특성 측정 결과

주파수대역	측정 지표	매질					RIS 이득 (B - A)
		공기 (기준)	Low-E 유리	나무	일반 유리 (A)	일반 유리 + RIS (B)	
10 GHz	투과손실 (dB)	0	36.8	2.6	3.0	1.6	1.4 dB
	EVM (%)	0.3	4.2	0.41	0.41	0.41	-
28 GHz	투과손실 (dB)	0	40.3	3.7	4.0	2.9	1.1 dB
	EVM (%)	1.51	21.3	1.9	1.83	1.83	-
140 GHz	투과손실 (dB)	0	39.1	33.8	9.3	8.1	1.2 dB
	EVM (%)	2.3	22	11.7	3	2.7	-

Low-E 유리는 유리의 표면에 적외선 반사율이 높은 금속막을 코팅하여 유리의 투명성은 유지하는 동시에 열 손실을 줄여 건축물의 단열 성능을 높이기 위해 사용되는 유리로서 냉난방비 절감 등 ESG 측면에서 장점을 가지고 있지만, [표 4]의 실험 결과에서 볼 수 있듯이 일반 유리 대비 전파의 차단이 심각하다는 단점이 있다. 당사는 RIS의 사용 사례 중 하나로 Low-E 유리 향 RIS 기술 개발을 진행 중이다. Low-E 유리 향 RIS 개발의 목적은 Low-E 유리의 단열 성능은 유지하면서 전파 투과특성을 개선하는 것이며, 각 주파수대역 별 Low-E 유리 향 RIS 적용 시뮬레이션을 수행한 결과가 [표 5]에 있다. Low-E 유리 자체에 대한 투과손실은 시뮬레이션이 어려워 [표 4]의 측정 값에 기반하여 35 dB로 보수적으로 가정하였다. 실험 결과, 고려한 전 주파수 대역에서 약 30 dB 이상의 이득을 가지는 것으로 확인되었으며, 열관류율 측면에서 또한 효과 검증을 하기 위해 방안을 모색하는 중이다.

[표 5] Low-E 유리 향 RIS 적용 시 투과 특성 이득

구분		주파수대역				
		5G		6G		
		3.5 GHz	28 GHz	7 GHz	10 GHz	140 GHz
중앙주파수 (GHz)		3.65	28.5	7.05	10.05	140.4
투과손실 (dB)	공기 (기준)	0	0	0	0	0
	Low-E 유리 (A)	35*				
	Low-E 유리 + RIS (B)	3.3	4.4	3.4	3.3	5.9
RIS 이득 (A - B) [dB]		36.7	30.6	31.6	31.7	29.1

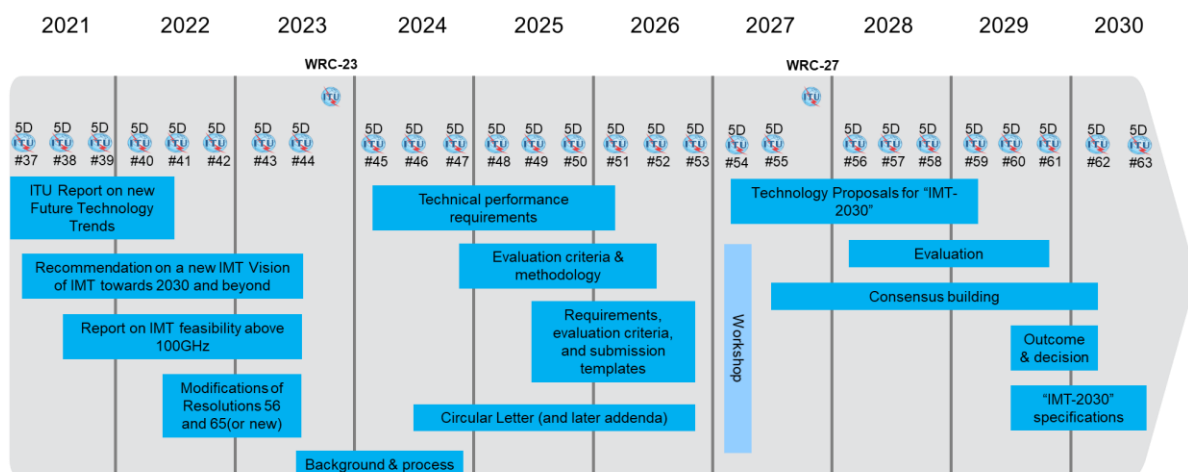
* [표 4] 측정 값 기반 가정하였음

당사는 6G 후보 주파수대역의 투과특성에 대한 연구를 시작으로, 향후 NLoS/LoS 환경에서 경로손실 및 O2I 커버리지에 대한 측정을 통해 6G 후보 주파수대역에서의 전반적인 전파특성 열화 정도를 예측하고 5G 대비 동등 커버리지 성능 확보를 위한 6G 진화 기술의 요구사항을 설계하고자 한다.

8. 6G 예상 일정

현재 ITU-R에서는 차세대 이동통신 표준 제정을 위한 초기 논의가 진행되고 있다. ITU-R 산하 이동통신 표준화 작업반인 WP 5D에서는 6G 표준을 2030년에 승인하는 일정으로 로드맵을 수립하였다. 이에 맞추어 2022년 미래 기술 동향 보고서[19] 발간에 이어 2023년 6월 제 44차 회의에서는 6G 프레임워크(舊 비전) 권고서를 완성하였다. 이후 6G 기술 성능 요구사항과 평가 방법을 정의하고, 6G 후보 기술을 제안 받아 평가한 후 2030년 6월에 최종적으로 6G 표준을 승인할 예정이다.

WP 5D timeline for IMT towards 2030 and beyond



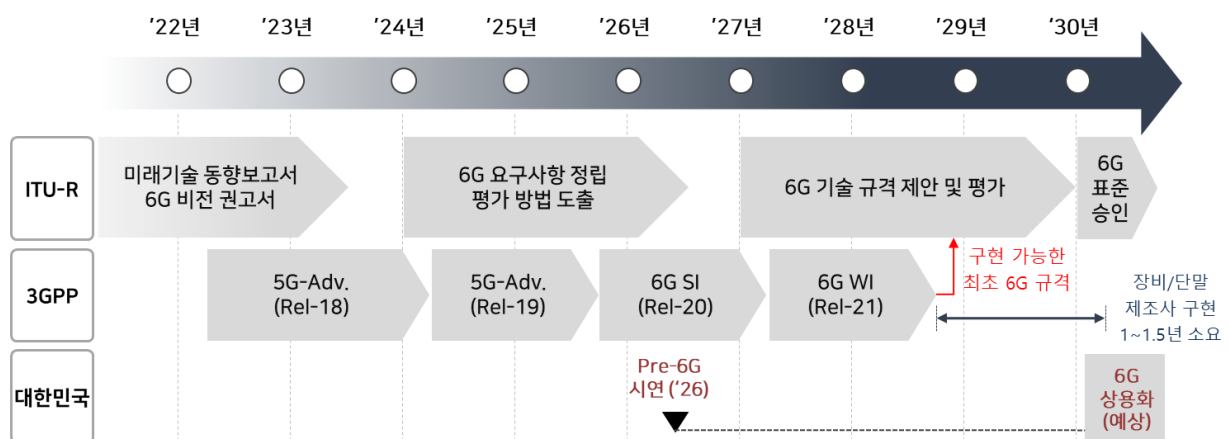
Note 1: Meeting 5D#59 will additionally organize a workshop involving the Proponents and registered IEGs to support the evaluation process
 Note 2: While not expected to change, details may be adjusted if warranted. Content of deliverables to be defined by responsible WP 5D groups

[그림 20] ITU-R WP 5D 6G 표준화 일정 [20]

ITU-R 이 이동통신 규격을 평가하고 승인하는 권한을 갖는다면, 실질적인 이동통신 표준 규격은 사실 표준 단체인 3GPP 에서 작성한다. 현재 3GPP 에서는 5G-어드밴스드 표준화 작업이 진행 중으로, 2024 년 3 월 Rel-18 규격 완료를 목표로 하고 있다.

3GPP 에서는 ITU-R 에서 제시하는 IMT-2030 기술 성능 요구사항을 만족하는 6G 표준 규격을 개발할 예정이다. 2023 년 9 월 개최되는 기술 사양 그룹(TSG) 101 차 회의에서 6G 표준화 일정에 대한 논의를 시작하여 2023 년 12 월 TSG 102 차 회의에서 6G 표준화 일정에 대한 합의가 있을 예정인데, 2028 년 말에 완료될 것으로 예상되는 Rel-21 규격을 ITU-R 에 6G 표준 규격으로 제출하여 국제 표준 규격으로 승인 받는 절차가 진행될 것으로 전망된다.

3GPP 에서 실제 구현 가능한 규격이 완성된 후 장비 및 단말 제조사에서의 상용 제품 개발 기간을 고려하였을 때 2030 년 즈음 6G 상용화가 이루어질 것으로 예상된다.



[그림 21] 6G 표준화 및 상용화 예상 일정

9. 맺음말

국내외 표준화 기구 및 여러 단체에서 6G 논의가 시작됨에 따라 SK 텔레콤도 6G 시대를 준비하고 있다. 이를 위해 세계최초 5G 상용화 이후 4 년여 지난 현 시점에서 먼저 5G 의 명과 암을 돌아보았다. 이를 바탕으로 이동통신 사업자 관점에서의 6G 핵심 요구사항을 제시하였다. 또한, SK 텔레콤이 생각하는 미래 네트워크 진화 방향성을 제시하였다. 마지막으로, 6G 스펙트럼에 대한 표준화 논의 현황과 당사의 방향성을 제시하였다.

SK 텔레콤은 국내외 산·학·연 6G 생태계 파트너들과 협업을 통해 6G 기술 개발을 앞장서 추진하여, 대한민국이 6G 글로벌 선두 국가가 되도록 기여하겠다.

References

- [1] Recommendation ITU-R M.2083-0 – IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond, 2015 년 09 월
- [2] 한국정보통신기술협회(TTA), 차세대 이동통신 표준화 및 준비현황, TTA 저널 205 호, 2023 년 02 월
- [3] 한국정보통신기술협회(TTA), 6G 선점을 위한 레이스: 각국의 동향, TTA 저널 202 호, 2022 년 07 월
- [4] 한국전자통신연구원(ETRI), 선도국의 6G R&D 전략 현황, 기술정책 트렌드, 2022 년 03 월
- [5] NIPA 글로벌 ICT 포털, 미국 ICT 시장동향 2023, 2023 년 03 월
- [6] Next G Alliance, "Next G Alliance Report: Roadmap to 6G", White Paper, 2023 년 02 월
- [7] NIPA 글로벌 ICT 포털, 중국 ICT 시장동향 2023, 2023 년 02 월
- [8] 일본 정보통신연구기구(NICT), Beyond 5G/6G White Paper, 2021 년 08 월
- [9] Hexa-X, "Deliverable D1.1 6G Vision, use cases and key societal values", 2021 년 02 월
- [10] SK Telecom and NTT DOCOMO, "6G Common Requirements", White Paper, 2023 년 02 월
- [11] SK Telecom and NTT DOCOMO, "Green Mobile Network: Energy Saving Efforts by SK Telecom and NTT DOCOMO", White Paper, 2023 년 02 월
- [12] NGMN Alliance, "6G Requirements and Design Considerations", 2023 년 2 월
- [13] GSMA, "Going green: benchmarking the energy efficiency of mobile", 2021 년 6 월
- [14] 3GPP TR 38.864 V18.1.0, "Study on network energy saving for NR (release 18)", 2023 년 3 월
- [15] 5G 포럼, "네트워크 전력 효율: 5G 무선 기지국 상용화시 탄소배출 감소 방안", 이슈리포트 Vol.13, 2022 년 11 월
- [16] IOWN GF, "Vision 2030: A Smarter, Better World for All", 2020 년 7 월
- [17] 3GPP TR 37.777 V15.0.0, "Study on enhanced LTE support for aerial vehicles (Release 15)", 2017 년 12 월
- [18] SK Telecom, "SKT, RIS 기술로 6G 시대 먼저 준비한다", Press Release, 2023 년 02 월
- [19] Report ITU-R M.2516-0 – Future technology trends of terrestrial International Mobile Telecommunications systems towards 2030 and beyond, 2022 년 11 월
- [20] ITU-R, Report on the 41st meeting of Working Party 5D (Geneva, 13-24 June 2022)

Abbreviations

Abbr.	Full Name	Abbr.	Full Name
3GPP	3rd Generation Partnership Project	FR	Frequency Range
3D	Three-dimensional	FSPL	Free Space Path Loss
5GC	5G Core Network	GPS	Global Positioning System
5GMF	5G Mobile communications Promotion Forum	GPU	Graphical Processing Unit
6G IA	6G Smart Networks and Services Industry Association	GSMA	Global System for Mobile Association
AI	Artificial Intelligence	HTTP	Hypertext Transfer Protocol
AKA	Authentication and Key Agreement	ID	Identification
AoA	Angle of Arrival	IMT	International Mobile Telecommunications
APN	All-Photonics Network	IoT	Internet of Things
AR	Augmented Reality	IOWN	Innovative Optical and Wireless Network
ATIS	Alliance for Telecommunications Industry Solutions	IP	Internet Protocol
B2B	Business-to-Business	ISV	Independent Software Providers
B5GPC	Beyond 5G Promotion Consortium	ITU	International Telecommunication Union
BS	Base Station	ITU-R	ITU Radiocommunication Sector
BWP	Bandwidth Part	KPI	Key Performance Index
CA	Carrier Aggregation	LCM	Life Cycle Management
CAPEX	Capital Expenditure	LiDAR	Light Detection And Ranging
CDMA	Code Division Multiple Access	LNA	Low-Noise Amplifier
CNF	Cloud-native Network Function	LoS	Line of Sight
CPU	Central Processing Unit	Low-E	Low-Emissivity
CSI	Channel State Information	LTE	Long Term Evolution
CU	Central Unit	MIMO	Multiple Input Multiple Output
DC	Dual Connectivity	ML	Machine Learning
DCI	Data-Centric Infrastructure	mMIMO	massive MIMO
DNR	Draft New Recommendation	mMTC	massive Machine-Type Communications
DRX	Discontinuous Reception	MR	Mixed Reality
DSS	Dynamic Spectrum Sharing	MSA	Micro Service Architecture
DU	Distributed Unit	NATO	North Atlantic Treaty Organization
E2E	End-to-End	NF	Network Function
ECC	Elliptic Curve Cryptography	NFV	Network Function Virtualization
eMBB	enhanced Mobile BroadBand	NGA	Next G Alliance
E-mMIMO	Extreme massive MIMO	NGMN	Next Generation Mobile Networks
EN-DC	E-UTRAN(LTE)-NR(5G) Dual Connectivity	NG-RAN	Next-Generation RAN
ESG	Environmental, Social, Governance	nGRG	next Generation Research Group
EVM	Error Vector Magnitude	NPU	Neural Processing Unit
FDD	Frequency Division Duplex	NR	New Radio
FDR	Full Duplex Radio	NSA	Non-Standalone
FPGA	Field Programmable Gate Array	NTN	Non-terrestrial Network

NWDAF	Network Data Analytics Function	RU	Radio Unit
O2I	Outdoor-to-Indoor	SA	Standalone
OAM	Operation, Administration, Maintenance	SBA	Service Based Architecture
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing	SBI	Service Based Interface
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access	SCP	Service Communication Proxy
OPEX	Operation Expenditure	SDI	Software-Defined Infrastructure
ORIA	Open RAN Industry Alliance	SDN	Software-Defined Network
OS	Operating System	SI	Study Item
OTN	Optical Transport Network	SIM	Subscriber Identity Module
OTT	Over The Top	SNR	Signal-to-Noise Ratio
PA	Power Amplifier	TANGO	Telco Advanced Next-Generation OSS
P-index	Power consumption evaluation Index	TCO	Total Cost of Ownership
PLL	Phase Locked Loop	TDD	Time Division Duplex
POTN	Packet Optical Transport Network	TF	Task Force
PQC	Post-Quantum Cryptography	TRX	Transceiver
PSU	Power Supply Unit	TSG	Technical Specification Group
PTN	Packet Transport Network	UAI	UE Assistance Information
QKD	Quantum Key Distribution	UAM	Urban Air Mobility
QKDN	QKD Network	UDP	User Datagram Protocol
QoS	Quality of Service	UE	User Equipment
QRNG	Quantum Random Number Generator	UHD	Ultra High Definition
Q-SDN	Quantum-Software Defined Networking	URLLC	Ultra-Reliable and Low Latency Communications
QUIC	Quick UDP Internet Connections	UWB	Ultra-Wideband
RADAR	Radio Detection And Ranging	VNF	Virtual Network Function
RAN	Radio Access Network	VoIP	Voice over Internet Protocol
RedCap	Reduced Capability	VR	Virtual Reality
RF	Radio Frequency	VSAT	Very Small Aperture Terminal
RIC	RAN Intelligent Controller	WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
RIS	Reconfigurable Intelligent Surface	WDM	Wavelength Division Multiplexing
RNG	Random Number Generator	WI	Work Item
ROADM	Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexer	WP 5D	Working Party 5D
RRC	Radio Resource Control	WRC	World Radiocommunication Conferences
RS	Research Stream	WUS	Wake-Up Signal
RSA	Rivest-Shamir-Adleman	XR	eXtended Reality
RTT	Round Trip Time		

