ETRI

2018
Electronics and
Telecommunications
Trends

이동통신기반 Industrial IoT 기술 동향

Technical Trend and Challenging Issues for Cellular-Based Industrial IoT

Ⅰ. 서론
Ⅱ. Industrial IoT 서비스 표준화 동향
Ⅲ. 공장 자동화 기반 Industrial IoT 성능 요구사항
Ⅳ. Industrial IoT 요구 기술
Ⅴ. 결론

김원익 (W.I. Kim, woniks@etri.re.kr) 미래이동통신연구본부 책임연구원
김은아 (E.A. Kim, eakim@etri.re.kr) 미래이동통신연구본부 책임연구원
고영조 (Y.J. Ko, koyj@etri.re.kr) 미래이동통신연구본부 책임연구원
송재수 (J.S. Song, heretic@etri.re.kr) 미래이동통신연구본부 책임연구원
윤찬호 (C.H. Yoon, chyoon@etri.re.kr) 미래이동통신연구본부 선임연구원
문성현 (S.H. Moon, sh.moon@etri.re.kr) 미래이동통신연구본부 선임연구원
김철순 (C.S. Kim, cs.kim@etri.re.kr) 미래이동통신연구본부 선임연구원
백승권 (S.K. Baek, skback@etri.re.kr) 미래이동통신연구본부 책임연구원/PL

Mobile cellular technology is evolving to accommodate a variety of vertical services, expanding the application from human-to-human communication to the Internet of Things(IoT). In particular, the fourth industrial revolution, bringing in a new vision in future smart factory, necessitates a new paradigm shift in wireless communication. Low latency and high reliability is a key issue in wireless applications for industrial IoT such as factory automation. In this paper, we review the recent progress in 5G URLLC (Ultra-Reliable Low Latency Communication) and discuss use cases, requirements, challenging technical issues, and potential solutions to support wireless factory automation such as discrete automation and process automation.

* DOI: 10.22648/ETRI.2018.J.330506

* 본 연구는 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기술진흥센터의 지원을 받아 수행된 연구임[No.2017-0-00724, 셀룰러 기반 산업 자동화 시스템 구축을 위한 5G 성능 한계 극복 저지연, 고신뢰, 초연결 통합 핵심기술 개발].

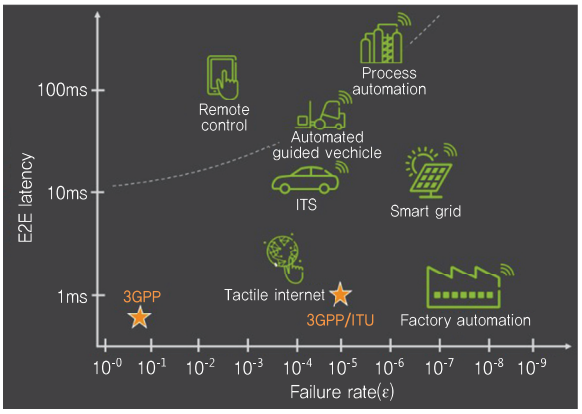
© 2018 한국전자통신연구원

Ⅰ. 서론

4G에서 5G로의 이동통신 진화는 기존 모바일 브로드밴드 서비스뿐만 아니라 저지연 및 고신뢰, 초연결을 요구하는 새로운 어플리케이션과 비즈니스 모델에 의해 주도될 것이다. 현재 5G 이동통신은 서비스 대상을 사람에서 사물로 확장하고 다양한 분야의 타 산업과 연계를 통해 관련 시장을 확대해 나가는 추세이며, 이러한 기술 정책적 기조는 5G 이후의(B5G: Beyond 5G) 이동통신에서도 지속될 것으로 전망된다.

5G 이동통신의 개발 목표는 모바일 네트워크의 광대역 기능을 더욱 증대시키는 것뿐만 아니라 제조, 자동차, 농업, 에너지 등과 같은 새로운 서비스 및 산업을 지원할 수 있는 혁신적인 통신 인프라를 제공하는 것이다. 이를 위해, 5G 기술은 버티컬 산업(Vertical industry) 도메인의 도전적인 요구사항들을 적극 수용하면서, 통신 인프라의 변화를 통해 산업의 생산성/수익성을 크게 개선할 수 있는 자동화(Automation) 중심의 산업용 사물인터넷(IIoT: Industrial IoT)에 대한 연구가 빠르게 진행되고 있다[1], [2]. 특히, 시장 파급력이 높은 공장 자동화, 스마트그리드, 지능형 교통시스템과 같은 임무지향적(Mission-critical) 산업들은 (그림 1)에서 보여주는 바와 같이 유선 인프라 수준의 초고신뢰 저지연 통신(URLLC: Ultra Reliable Low Latency Communications) 성능을 요구하기 때문에, 5G 및 그 이후의(B5G) 이동통신은 이러한 요구사항을 만족시키기 위한 새로운 기술들이 반영될 것으로 예상된다.

이에 따라, 우리는 본 논문을 통해 버티컬 산업의 IIoT 요구사항을 고찰하고 URLLC를 위해 제시된 5G 기술 이슈들과 향후 예상되는 미래 기술 이슈들을 살펴봄으로써, 셀룰러 기술의 IIoT 시장 진입 가능성을 가늠하고자 한다. 본 논문은 (그림 1)에서 제시하는 다양한 IIoT 서비스 응용 분야들 중, 4차 산업혁명을 발현할 수 있는 최적의 분야이자 URLLC 측면에서 가장 엄격한



(그림 1) 초고신뢰 저지연 통신(URLLC) 요구사항과 산업용 사물인터넷(IIoT) 시나리오

[출처] Reprinted from Ericsson, https://www.ericsson.com/en

요구 조건(1ms 수준의 전송지연 시간 내에 10^{-9} 수준의 전송 실패율을 보장)을 갖는 스마트 팩토리 분야의 공장 자동화(Factory automation) 시나리오에 중점을 두어 기술한다.

우선, 현재 공장 자동화에서 사용되고 있는 기존 무선 기술들이 갖는 문제점을 분석하고 이동통신 기술로의 대체 가능성을 살펴본다. 최근 WirelessHART 및 ISA 100.11a, 산업용 WLAN 등의 무선 기술이 공장 어플리케이션에 특화하여 개발되었으며, 이 외에도 독자적인(Proprietary) 무선 솔루션이 다양한 공장 응용 프로그램에 사용되고 있다. 이러한 공장 자동화용 무선 기술은 유선 통신 시스템에 비해 구축 및 유지 보수 비용이 낮고 유연성(Flexibility) 및 확장성(Extendibility) 옵션이 뛰어나 그동안 많은 관심을 받아왔다. 그럼에도 불구하고, 기존 무선 기술은 전통적으로 덜 엄격한 요구사항을 갖는 진단(Diagnostics) 및 개루프 제어(Open-loop control) 애플리케이션에만 제한적으로 사용되고 있다. 그 이유는 현재 운용되고 있는 공장 자동화용 무선 기술들이 비면허 주파수 대역 사용에 따른 간섭 문제 및 기술적 한계 등으로 인하여 실시간 자동화 어플리케이션에서 요구하는 엄격한 결정론적 통신(Deterministic communication)을 제공하지 못하기 때문이다. 반면 5G로 대표되는 3GPP

의 셀룰러 기술은 면허 대역에서 운용되는 고유한 장점과 목표 지연 시간 내 데이터의 전달을 보장할 수 있는 공장 자동화 어플리케이션에 최적화된 무선 연결성을 제공할 수 있다는 장점이 있다. 또한, 기존 공장 자동화용 무선 기술들은 글로벌 솔루션이 부족하여 여러 제조업체의 디바이스 간의 상호 운용이 어렵다. 그러나 5G 이동통신은 서비스의 종류에 따라 주파수 및 네트워크 자원을 선택적으로 이용할 수 있게 유연한 구조를 채택하고 있어서 공장 자동화용 글로벌 단일 무선 표준으로 인정을 받을 수 있는 가능성이 매우 높다[3], [4].

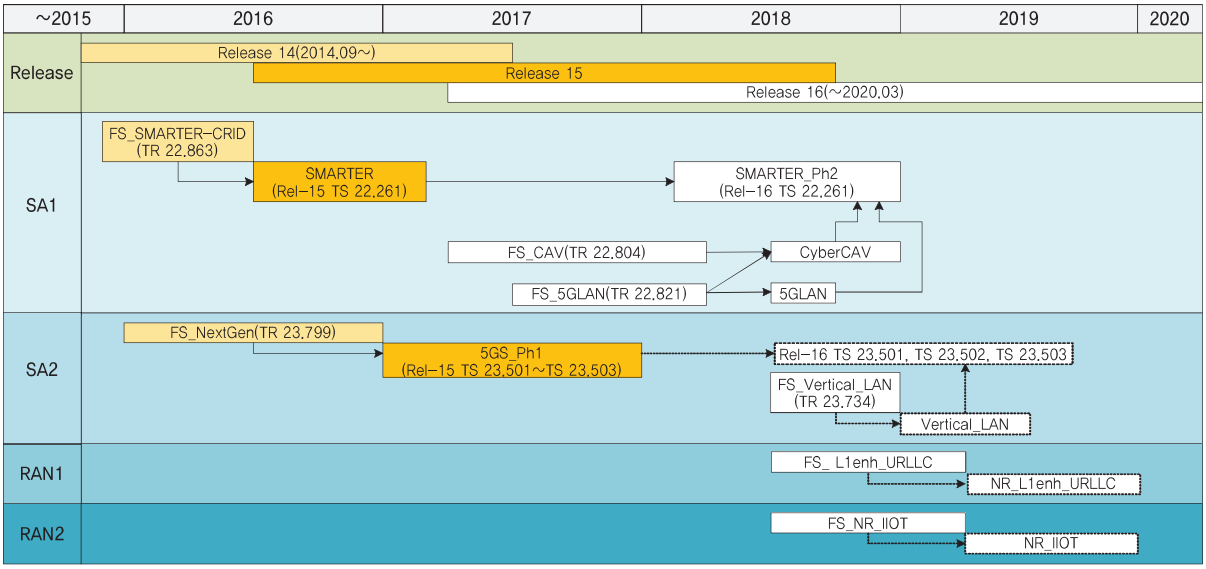
본 논문의 나머지 부분은 공장 자동화를 위한 IIoT 서비스 시나리오 및 요구사항을 3GPP 표준화 관점에서 분석하고, 공장 자동화 IIoT를 위해 5G가 고려하고 있는 요소 기술 동향과 향후 요구될 것으로 예상되는 미래 공장(Factory of Future)의 성능 요구사항까지 지원할 수 있는 요소 기술들을 소개한다.

II. Industrial IoT 서비스 표준화 동향

본 장에서는 3GPP 5G의 IIoT 관련 표준화 진행 상황을 소개하고 SA1/SA2에서 고려하는 5G IIoT를 위한 서비스 시나리오, 성능 요구사항 및 시스템 아키텍처의 개선 방향을 기술한다.

1. 3GPP 5G-IIoT 표준화 개요

3GPP의 5G 표준화 연구는 (그림 2)와 같이 Rel-14부터 Rel-16까지 세 단계의 순차적인 릴리즈(Releases)를 통해 진행된다. Rel-14에서는 5G 서비스 이용 사례, 운영 시나리오, 성능 요구사항 및 요소 기술의 타당성 연구에 대한 기술보고서(TR: Technical Report)를 작성하고, Rel-15와 Rel-16에서 각각 1단계 및 2단계 기술규격(TS: Technical Specification)을 개발한다. 5G 표준 기술은 크게 LTE-Advanced Pro의 진화 기술과 5G를 위한 신규 무선접속 기술인 NR(New Radio)로 구분할 수 있는데, 1단계 기술규격은 NR과 LTE 간의 이중 연결(Dual-connectivity) 방식에 근간하여 동작하는 Non-standalone 표준을 2017년 12월에, NR의 단독 운용을 위한 standalone 표준은 2018년 6월에 최종 완료하였다[5]. 현재는 Rel-16 2단계 기술규격을 개발 중이며, 여기에서는 5G의 기술 고도화 및 5G를 기반으로 한 타 산업과의 융합 서비스(예: 스마트 팩토리, 자율주



(그림 2) 3GPP 5G IIoT 관련 표준화 일정 및 현황

행 자동차, 스마트그리드 등) 지원을 목표로 무선접속망과 핵심망 기능의 특화 표준이 예상된다[6].

2. 3GPP SA1/SA2 표준화 동향

IIoT는 5G의 세 가지 주요 서비스 시나리오인 초고속 광대역 이동통신(eMBB), 초고신뢰 저지연 통신(URLLC), 대규모 사물인터넷 연결(mMTC) 중에서 초고신뢰 저지연 통신(URLLC) 서비스의 대표적 이용 사례이다. 3GPP SA1에서는 Rel-15 TS 22.261을 통해 IIoT를 포괄한 URLLC 서비스 시나리오와 성능 요구사항을 〈표 1〉과 같이 정의하였다[2], [7].

또한, Rel-15에서 다루지 못한 더욱 엄격한 요구사항을 필요로 하는 이용 사례 지원을 위한 본격적인 IIoT 표준화는 (그림 2)에서와 같이 Rel-16에서 각 WG별로 진행 중에 있다. 가장 상위레벨에서의 서비스 요구사항을 정의하는 SA1은 FS_CAV 및 FS_5GLAN 에 대한 기술보고서를 완료한 후 기술규격 개발을 시작하였으며, SA2는 IIoT 지원을 위한 네트워크 구조 및 기능 정의를 위한 기술보고서 작업을 2018년 6월 SA 총회 승인을 통해 시작하였다[8].

IIoT에 관련된 각 표준 연구 항목에 대한 WG별 표준화 작업 내용은 다음과 같다. 산업 도메인에서의 자동화 통신 지원을 위해 5G 시스템에 대한 요구사항을 도출하는 FS_CAV는 자동화 통신에 대한 이용 사례를 9개의 산업군 즉, 철도 자동화, 빌딩 자동화, 미래 공장(스마트 팩토리), 스마트 리빙-헬스케어, 스마트 시티, 배전(스마트그리드), 중앙집중식 발전, 프로그램 제작 및 특별 이벤트(PMSE: Programme Making and Special Events), 스마트 농업으로 나누어 각각에 대한 이용 사례 및 요구사항을 도출하고, 이러한 산업 도메인에 대한 통합 서비스 성능 요구사항 식별을 위해 아래와 같이 트래픽 클래스를 세 가지 형태로 정의하였다[1].

- 전송의 적시성과 주기성에 엄격한 요구사항을 가진 결정론적 주기적 통신(Deterministic Periodic Communication).
- 전송의 적시성을 요구하며 비주기적 송신 이벤트를 지원하는 결정론적 비주기적 통신(Deterministic Aperiodic Communication).
- 주기적 및 비주기적 비실시간 트래픽을 모두 포함하는 비결정론적 통신(Non-Deterministic Com-munication).

〈표 2〉는 위의 세 가지 트래픽 클래스 중 결정론적 주기적 통신 트래픽에 대한 성능 요구사항으로, 9개의 산업군 중 스마트 팩토리의 모션제어시스템이 서비스 가용도(Availability) 및 종단 간 통신 지연시간(E2E

〈표 1〉 3GPP Rel-15의 URLLC 성능 요구사항

Scenario	Max allowed E2E latency	Reliability	User experienced data rate	Traffic density	Connection density
Discrete automation	10ms	99.99%	10Mbps	1Tbps/km^2	10^5/km^2
process automation - remote control	60ms	99.999%	1Mbps upto ~ 100Mbps	100Gbps/km^2	10^3/km^2
process automation - monitoring	60ms	99.99%	1Mbps	10Gbps/km^2	10^4/km^2
electricity distribution - medium voltage	40ms	99.99%	10Mbps	10Gbps/km^2	10^3/lm^2
electricity distribution - high voltage	5ms	99.999%	10Mbps	100Gbps/km^2	10^3/km^2
ITS - infrastructure backhaul	30ms	99.999%	10Mbps	10Gbps/km^2	10^3/km^2

© 2018. 3GPP™ TSs and TRs are the property of ARIB, ATIS, CCSA, ETSI, TSDSI, TIA and TIC who jointly own the copyright in them. They are subject to further modifications and are therefore provided to you "as is" for information purposes only. Further use is strictly prohibited.

〈표 2〉 결정론적 주기적 통신 서비스 성능 요구사항

Scenario	Availability(%)	E2E latency(ms)	Message size(byte)	Transfer Interval(ms)	# of UEs
철도 자동화 – MTTC 서비스와 CCTV 공존	〉99.999	〈 Transfer Interval	200	100	2
미래 공장 – 모션 제어	99.9999~ 99.999999	〈 Transfer Interval	20~50	0.5~2	≤100
미래 공장 – C2C 통신 (모션 서브시스템)	99.9999~ 99.999999	〈 Transfer Interval	≤1k	≥ 4	≤10
미래 공장 – 안전기능을 가진 모바일제어패널	〉99.9999	〈 Transfer Interval	40~150k	1~500	≤100
미래 공장 – 모바일 로봇					
배전 – 차동 보호 어플리케이션					

© 2018. 3GPP™ TSs and TRs are the property of ARIB, ATIS, CCSA, ETSI, TSDSI, TIA and TIC who jointly own the copyright in them. They are subject to further modifications and are therefore provided to you "as is" for information purposes only. Further use is strictly prohibited.

latency) 측면에서 가장 엄격한 요구사항을 제시함을 알 수 있다.

모션제어시스템을 구성하는 일부 센서 및 액추에이터는 5G 시스템과 연결되지 않을 수도 있기 때문에, 5G 시스템의 구성 요소는 기존 유선 산업용 이더넷(Ethernet) 시스템의 구성 요소와 통합 및 상호작용이 요구된다[9]. 산업용 이더넷은 일반적으로 이더넷 데이터 링크 계층에서 동작하기 때문에, 5G 네트워크는 이더넷 프레임을 전송할 수 있어야 하며 브로드캐스트 패킷도 처리할 수 있어야 한다. 또한, 단일 모션제어시스템의 이더넷 장치는 가상 LAN(IEEE 802.1Q)을 사용하여 물리적으로 동일한 이더넷 망에서 가상의 분리된 망을 구성할 수 있으므로 5G 시스템은 가상 LAN을 지원하고 인식해야 한다. 5G 시스템과 산업용 이더넷의 통합을 위해, 3GPP에서는 5G 시스템에 5G LAN-type 서비스를 지원하는 FS_5GLAN 연구를 진행하였다. 산업 자동화 환경에서의 5G LAN-type 서비스 제공은 공장에 설치된 기존 WLAN/고정-LAN의 활용도를 극대화시킬 수 있을 뿐만 아니라, 기존 WLAN/고정-LAN을 대체할 수 있는 새로운 LAN 기술이 될 수도 있다.

IIoT 서비스 지원을 위해 5G 시스템에 필요한 또 다른 요구사항은 서로 독립적인 UE 클럭들(Clocks)을 조정하여 맞춰주는 클럭 동기화 통신 서비스 제공이다. 예를 들어, 산업용 이더넷과 5G 시스템에 여러 모션제어 장치(Motion controller)가 연결된 경우, 최대 300 개의 모션제어 장치들은 1μsec 이하의 동기화 클럭 동시성이 요구된다. 이와 같이 장치 간의 정확한 시각 동기화를 위해 5G 시스템은 IEEE 1588 PTP(Precision Time Protocol) 메시지 처리 및 전송을 지원한다.

위에서 기술한 SA1 FS_CAV 및 FS_5GLAN에서의 연구 결과들은 2018년 6월 시작된 산업 도메인에서의 사이버 물리 제어 응용 프로그램 지원을 위한 서비스 요구사항(CyberCAV) Stage 1 기술규격 작업의 토대가 될 것이다.

2018년 12월까지 진행될 SA2의 FS_Vertical_LAN 연구는 산업 도메인에서 제어 응용프로그램의 Stage 1 서비스 요구사항을 충족시키기 위해 필요한 5G 시스템 아키텍처를 연구하는 것으로, SA1 FS_CAV와 FS_5GLAN의 Stage 2 작업으로 볼 수 있다. 산업 도메인을 위한 5G 시스템 아키텍처에 대한 주요 연구 이슈는 아래와 같다.

- 산업용 제어의 이용 사례와 TSN(Time Sensitive Networking) 지원을 가능하게 하는 기술.
- 보안 요구사항 지원에 필요한 아키텍처 개선.
- 5G LAN 서비스를 지원하는 5G 시스템 개선.

- 3rd party의 기능 이용(예: type-a[1]/type-b[2] 네트워크 커버리지 영역의 지리적 위치 정보 등)을 위한 API 기반 서비스 노출(Service exposure) 개선.
- 버티컬 서비스 요구사항 충족을 위한 새로운 KPI(예: 5QI) 지원을 가능하게 하는 기술.
- Type-b 네트워크 지원.
- Type-a 네트워크 지원 및 공중망과 type-a 네트워크간 연동 및 로밍.

2018년 12월까지 이들 각각의 주요 연구 이슈에 대한 다양한 솔루션 개발이 완료되면, 이를 기반으로 Rel-16 기술규격 작업이 2019년에 본격화될 전망이다[10].

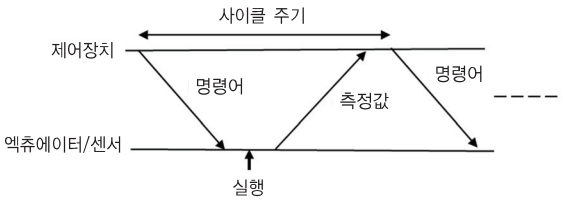
Ⅲ. 공장 자동화 기반 Industrial IoT 성능 요구사항

본 장에서는 서비스 가용도(Availability) 및 통신 지연시간(Laency), 전송 신뢰도(Reliability) 측면에서 가장 엄격한 요구 조건을 갖는 공장 자동화 기반 스마트 팩토리 산업의 모션제어(Moion control) 시나리오에 대해 설명하고, 한국전자통신연구원(ETRI)에서 3GPP SA1 표준과 ETSI/IEC에서 제시하는 요구사항을 토대로 새롭게 정의한 모션제어 시나리오에 대한 목표 성능 요구사항을 소개한다[11].

1. 폐루프 제어 시스템 운용 절차

모션제어 시나리오의 성능 요구사항을 설명하기에 앞서, 다음과 같은 공장 자동화를 위한 폐루프 제어(Closed-loop control)의 특성과 절차에 대한 이해가 필요하다.

공장 자동화 제어는 제어 장치(Controller)와 센서



(그림 3) 공장자동화 폐루프 제어의 반복 과정

(Sensor) 및 엑츄에이터(Actuator) 사이의 통신을 통해 이루어진다. 공장 자동화 제어에 사용되는 통신 패킷은 비교적 그 길이가 짧은 반면 주기적으로 발생하고 시간적으로 매우 짧은 주기를 갖는 실시간 패킷 전달을 요구한다. 공장 자동화 제어에 일반적으로 사용되는 폐루프 제어(Closed-loop control) 과정은 (그림 3)에서와 같이 제어 장치에서 엑츄에이터로의 명령어(Set points) 전달, 엑츄에이터에 의한 명령 실행(Act), 그리고 명령 실행 후 센서에 의한 측정(Sense) 및 측정값(Actual values)의 제어 장치로의 보고가 순차적으로 발생하는 하나의 사이클을 이루고 이것이 연속적으로 반복되는 과정이다.

무선 통신 측면에서, 제어 장치는 기지국과 유선으로 연결되어 있으며, 센서 및 엑츄에이터는 무선 송수신을 위한 단말 기능을 포함한다. 따라서 제어 장치로부터 엑츄에이터로의 전송은 하향링크(DL), 센서로부터 제어 장치로의 전송은 상향링크(UL)에 해당한다.

2. 모션제어를 위한 IIoT 성능 지표

폐루프 제어(Closed-loop control) 기반의 모션제어 시나리오를 위한 이동통신 측면의 성능 지표는 크게 5가지, 사이클 타임(Cycle time), 지연시간(Latency), 사이클 트래픽 지터(Cycle traffic jitter), 동기화(Synchronicity), 그리고 신뢰도(Reliability)로 정의한다.

- 사이클 타임: (그림 3)과 같이 제어 장치와 센서/엑츄에이터 사이의 응용 계층 트랜잭션 시간으로 무선 구간에서의 모든 하위 계층 처리 및 지연시간을 포함.

1) Type-a 네트워크: 이동통신공중망인 PLMN과의 서비스 연속성 및 로밍이 가능한 사설 3GPP 네트워크
2) Type-b 네트워크: 이동통신공중망인 PLMN과의 상호작용이 없는 독립된 3GPP 네트워크

- 지연시간: 송신 측과 수신 측이 상호 동기를 맞춘 상태에서, 송신 측의 계층 2(L2)에서 수신 측의 계층 2(L2)까지 성공적으로 패킷을 전송하는데 소요되는 시간.
- 사이클 트래픽 지터: 이상적인 기준 사이클 타임으로부터의 시간 변위로서, 정보 데이터가 기준 시간보다 얼마나 빨리 혹은 늦게 전송되는가를 표현하는 값.
- 동기화: 모든 디바이스들(제어 장치, 센서, 엑츄에이터)이 어플리케이션 레벨에서 정보 동시성을 이루기 위한 시각(μs) 정밀도.
- 신뢰도: 요구되는 지연시간 경계(Latency bound) 내에서, 데이터를 송신 측에서 수신 측으로 성공적으로 전송할 확률(통상적으로 정량화된 값으로, 물리계층(PHY)에서는 1-BLER을 의미하고 프로토콜 스택의 상위계층에서는 1-PER을 의미).

3. 모션제어를 위한 IIoT 성능 요구사항

〈표 3〉은 위의 5가지 성능 지표를 고려하여 모션제어 시나리오에서의 결정론적 주기적 통신 성능 요구사항을 정의한다. 모션제어 시나리오의 상세 어플리케이션은 머신-툴(Machine tool), 패키징 머신(Packaging machine), 그리고 프린팅 머신(Printing machine)으로 크게 3가지가 있다. 일반적으로 공장은 실내(In-house) 형태이며 그 공장 내부에는 제품을 처리하고 이동시키는 생산 라인과 각각의 공정 구분을 위한 차단막(Wall partitioning)이 존재할 수 있다. 이러한 차단막은 무선의 침투손실(Penetration loss)를 유발하는 요인이 될 수 있기 때문에, 이동통신 기반 IIoT 시스템 설계시 이를 반영하여야 한다.

〈표 3〉에서 제시한 바와 같이, 각각의 상세 어플리케이션들은 생산 제품의 특성 및 운용 시나리오에 따라 목표로 하는 성능 요구사항이 약간씩 다르다. 공장 자동화를 위한 모션제어시스템에서 유선을 무선으로 대체할 수 있는지를 가늠할 수 있는 가장 중요한 지표는 전송 신뢰도(Reliability)이다. 이는 전송 신뢰도 지표를 통해 엄격한 결정론적 통신의 제공 유무를 판단할 수 있기 때문이다. 모션제어 시나리오의 상세 어플리케이션들은 생산 제품의 종류 및 공정 단계에 따라 요구하는 전송 신뢰도는 상이할 수 있고, 또한 향후 미래 공장의 요구 수준은 높아질 수 있다. 따라서 본 모션제어를 위한 IIoT 성능 요구사항에서는 5G에서 B5G로의 시간 순차적인 이동통신 개발 단계(Phase)별로 필히 달성해야 하는 전송 신뢰도를 구분하였다.

〈표 3〉 ETRI 5G IIoT 결정론적 주기적 통신 성능 요구사항

Scenario		Motion control		
Application		Machine tool	Packaging machine	Printing machine
Region of interest (W×L×H) (m^3)		15×15×3	10×5×3	80×80×12
Communications		1:1		1:*N* multicast
Wall	Penetration loss(dB)	6		
	Wall size (W×H) (m^2)	10×3	5×3	60×12
Traffic	Msg. size (bytes)	50	40	20
	Period(ms)	[0.2, 2]		
Cycle time(ms)		〈0.5	〈1	〈2
Latency(ms)		〈0.2	〈0.45	〈0.95
Cyclic traffic jitter		〈50% of cycle time		
Synchronicity(μs)		〈1		
Reliability(1-BLER)		$1-10^{-7}$ (Phase 1), $1-10^{-9}$ (Phase 2)		

Ⅳ. Industrial IoT 요구 기술

2018년 6월 3GPP Rel-15의 NR standalone 규격에서 정의한 공장 자동화 시나리오의 URLLC 요구사항은 1~2ms 이하로 제한된 사용자 평면(User plane) 지연시간 내에 $1-10^{-9}$ 수준의 전송 신뢰도(1-BLER)의 달성은 가장 엄격히 요구되는 조건이라 할 수 있다. 본 장

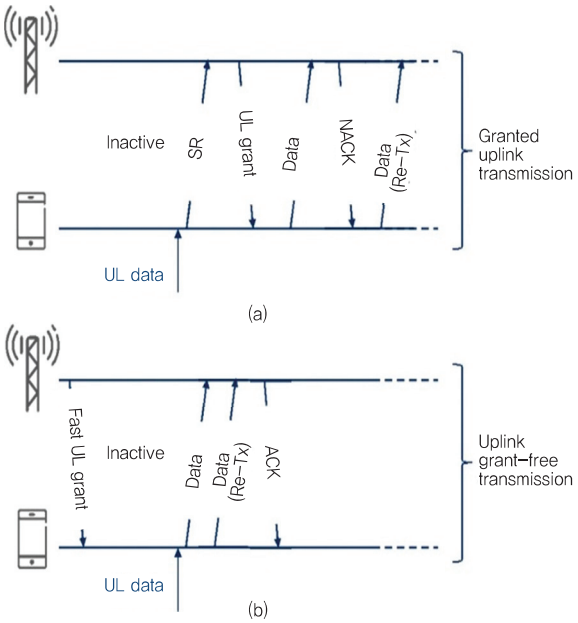
에서는 이러한 공장 자동화 제어를 위한 URLLC 요구 조건을 만족시킬 수 있는 IIoT 핵심 기술로, 3GPP Rel-15의 RAN1 및 RAN2에서 제시하는 표준 기술들과 현재 표준화 이슈는 아니나 향후 표준화가 이루어질 수 있는 새로운 요소 기술들을 간략히 소개한다.

1. 짧은 전송시간 간격(Short TTI)

물리계층 관점에서 짧은 전송시간 간격(Short TTI)은 전송 지연 시간 단축의 핵심 요소이다. NR은 OFDM의 부반송파 간격이나 자원 할당 간격을 조절함으로써 TTI를 단축할 수 있다. 예를 들어, 부반송파 간격 15kHz에 대응되는 슬롯 길이는 1ms인데, 부반송파 간격을 60kHz로 사용할 경우 슬롯 길이를 0.25ms으로 줄일 수 있다. 또한, PDCCH 모니터링 주기와 PDSCH/PUSCH의 전송 구간(Duration)을 1개 슬롯 미만으로 설정함으로써 TTI를 줄일 수 있다. 예를 들어, 자원 할당 사이클이 2개 심볼인 경우 TTI는 슬롯 기반의 스케줄링에 비해 1/7로 단축될 수 있다.

2. 그랜트-프리(Grant-Free) 상향링크 전송

IIoT 상향링크 전송 지연을 줄이는 측면에서, 3GPP 5G NR에서는 상향링크 자원 할당 스케줄링을 그랜트(grant) 방식이 아닌 자원을 미리 할당해 놓고 별도의 기지국 지시 없이 단말이 시간적으로 근접한 자원을 선택하여 전송하는 그랜트-프리(Grant-free) 전송 방식을 표준화하였다 [12]. (그림 4)에서와 같이 단말이 기지국에 전송에 사용할 자원을 요청하고 기지국의 그랜트(Grant)를 수신한 후에 패킷을 전달하는 기존 방식을 탈피하여 단말의 필요에 따라 기지국의 상향링크 자원 할당의 절차 없이 바로 전송함으로써 시간 지연을 줄일 수 있다. 또한 IIoT 트래픽은 작은 크기의 패킷을 일정한 주기를 가지고 반복적으로 송수신하기 때문에 시그널링 오버헤드를 줄이고 연결성을 높이는 측면에서도 매우 유리하다.



(그림 4) (a)기존 상향링크 전송 절차와 (b)그랜트-프리 전송 절차

[출처] Printed from Ericsson, https://www.ericsson.com/en

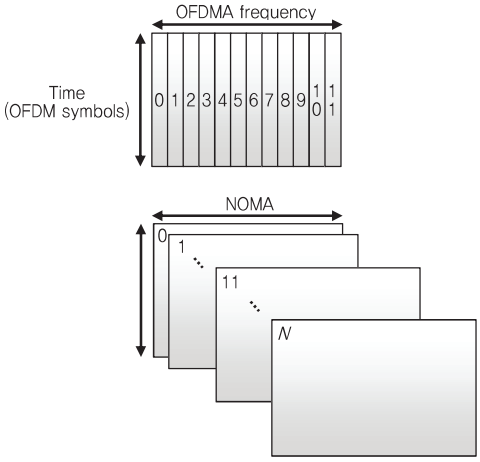
3. URLLC와 eMBB의 공존

5G NR 규격에서는 URLLC와 eMBB를 동적으로 다중화하여 독립적으로 지원할 수도 있지만, 스펙트럼 효율 개선을 위한 URLLC와 eMBB의 공존 기술 역시 지원한다. 일례로, 기지국이 eMBB 데이터를 할당한 이후에 URLLC 트래픽이 발생하는 경우, URLLC 트래픽에 더 높은 우선 순위를 적용하고 eMBB 스케줄링 영역의 일부를 URLLC 전송을 위해 사용할 수 있다. 이러한 우선순위를 적용한다면, eMBB 데이터를 수신하는 단말은 URLLC 데이터 때문에 eMBB 데이터를 정상적으로 복호할 수 없다. NR 규격(Rel-15)에 따르면, 기지국이 이러한 하향링크의 할당 패턴(Preemption indicator)을 단말 그룹에 전송하여 eMBB 데이터를 수신하고자 하는 단말들이 HARQ 동작에 적절히 반영하거나, 또는 기지국이 특정한 단말에게 전송블록보다 더 작은 단위에 해당하는 부호 블록(Code block group)의 단위로 송수신할 수 있도록 DCI의 일부 필드를 추가할 수 있다.

4. 비-직교 다중 접속(Non-Orthogonal Multiple Access)

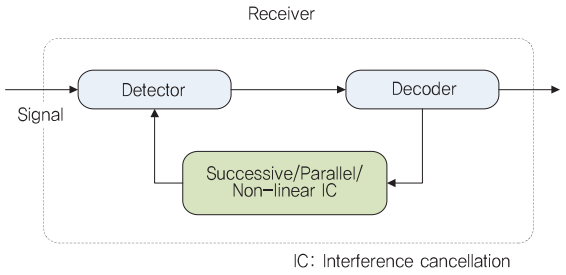
IIoT 트래픽 빈도가 높은 환경에서 최대한 다수의 디바이스들이 동시다발적인 통신을 할 수 있고, 요구되는 지연 시간 내에 전송 신뢰도를 일정 수준까지 보장할 수 있는 즉, 초연결-저지연-고신뢰를 모두 달성할 수 있는 상향링크 다중화(Multiplexing) 기술이 요구된다. 다중화 방식은 기존의 OFDMA와 같은 직교 방식과 최근에 각광을 받고 있는 비-직교 방식을 선정할 수 있다.

먼저, 직교 방식은 동시에 접속되어 있는 디바이스들의 접속 링크는 직교성이 보장되기 때문에, 간섭은 타 셀(Cell)의 상향링크 신호로 국한되므로 전송 신뢰도 측면에서 유리하다. 또한, 직교성이 보장되는 신호이기 때문에 저복잡도의 구현이 가능하다. 상향링크 신호 간의 직교성을 보장하기 위한 디바이스별 독립적인 자원 분배가 이루어지지만, (그림 5)와 같이 상향링크에 할당된 자원은 다중화되는 디바이스 수만큼 반비례하여 제공된다. 따라서 디바이스의 수가 증가할수록 각 디바이스들을 위해 상향링크에 할당될 수 있는 자원량은 줄어들게 된다. 디바이스에 할당되는 자원이 줄어들게 되면, 무선 통신의 전송 신뢰도가 하락할 수 있으며, 또한 동시에



(그림 5) 직교와 비-직교 다중화 방식의 time 및 frequency 자원 분배 방식 차이

[출처] Printed from Ericsson, https://www.ericsson.com/en



(그림 6) 비-직교 다중화 방식의 신호 검출을 위한 반복적 간섭 제거 방식 블록 다이어그램

많은 상향링크를 지원하기 위해 지연 시간이 더 요구되는 상황이 발생할 수 있다.

반면 비-직교 전송은 디바이스의 수에 관계없이 디바이스가 다중화를 위해 주어진 대역폭을 모두 활용하여 상향링크 자원을 할당받아 패킷을 전송하는 방식이다. 단, 상향링크 신호 간의 직교성은 보장되지 않기 때문에 상향링크 간의 간섭은 존재한다. 비-직교 전송은 (그림 6)과 같이 수신기에서 간섭 제거 기술을 통해 비-직교 방식의 상향링크 간섭을 극복함으로써 직교 방식에 비해 높은 연결 밀도를 유지할 수 있다. 또한 수신기 방식이 단일 사용자 복호(Single user decoding) 기반이 아닌 벡터 형태의 ML(Maximum Likelihood)을 기반으로 송신 신호를 추정하는 방식이라면, 비-직교 방식이더라도 신뢰도가 대폭 향상될 수 있다. 그리고 비-직교 방식은 직교 방식보다 자원을 많이 할당받기 때문에, 지연 시간을 줄이는 측면에서 더 유리하다.

5. 저지연 TDD 프레임 구조

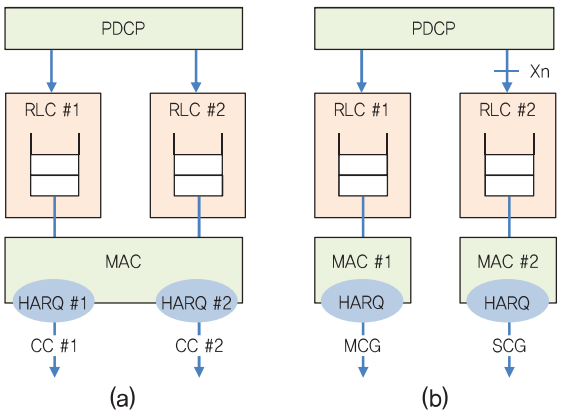
TDD 시스템은 FDD에 비해 상대적으로 긴 프레임 정렬 시간(하향링크/상향링크 대기 시간)을 가지므로 기본적으로 저지연 전송에 불리하다. NR은 주파수 범위의 확장으로 TDD 대역의 비중이 매우 높아졌는데, 상술한 단점을 극복하고자 슬롯 구조의 높은 유연성을 제공한다. 즉, 한 슬롯에서 하향링크 및 상향링크 파트가 1개 심볼 정밀도(Granularity)로 배치될 수 있고, 슬롯 구조의 반복 주기와 기준 부반송파 간격이 다양한 값으로 설

정될 수 있다. 따라서 매 슬롯마다 하향링크 및 상향링크 전송이 가능하고, 이는 URLLC를 위해 다양한 용도로 활용될 수 있다.

6. 패킷 중복 전송(Packet Duplication)

URLLC 요구사항을 지원하기 위해 상위계층(L2)에서 고려되는 기술은 패킷 중복(Packet duplication) 전송 방식이 있다 [12]. 패킷 중복 전송 기술은 UE에서 2개의 독립적인 PDCP 경로(Path)를 설정하고 PDCP에서 동일한 패킷을 두 경로로 전송함으로써 하나의 경로에서 패킷 유실(packet loss)이 발생하더라도 다른 경로로부터 패킷을 성공적으로 수신하도록 하는 일종의 선택 다이버시티(Selection diversity) 방식의 기술이다.

패킷 중복 전송 기술은 (그림 7)과 같이 경로 토폴로지에 따라 이중 연결성(DC) 방식과 캐리어 집성(CA) 방식으로 구분한다. DC의 경우는 MCG와 SCG를 통해서 두 개의 경로가 설정되며 CA의 경우는 각 컴포넌트 캐리어(Component carrier)별로 경로가 설정된다. 5G 표준에서는 패킷 중복 전송 기술을 적용하는데 있어서 DC와 CA를 모두 고려하고 있으나, DC의 경우 MCG와 SCG간 인터페이스(Xn)에 따른 추가적인 시간 지연이 존재하기 때문에 IIoT와 같은 수 ms 이하로 제한된 저지연 서비스를 지원하기에는 적합하지 않을 수도 있다.



(그림 7) 패킷 중복(PD) 전송 방식: (a) carrier aggregation, (b) dual connectivity

7. 고신뢰 채널 코딩(Channel Coding)

IIoT 요구사항 중 목표로 하는 BLER 범위까지 부호화 이득을 충분히 취할 수 있기 위해서는 채널 코딩 기술에 대한 진화가 요구된다. 대개 ML(Maximum Likelihood) 복호의 근사화된 복호 알고리듬을 적용하는 터보(Turbo) 부호, LDPC 부호 등은 SNR 증가에 따라 BLER 오류 마루(Error floor)가 발생하는 문제점이 있다. 적어도 목표 BLER 수준까지는 오류 마루가 발생하지 않으면서 부호화 이득이 높은 채널 코드를 사용하는 것이 바람직하다. 특히 수신 측에서 패킷의 복호에 따른 지연을 최소화하기 위해, 부호어(Codeword) 블록 전체가 완전히 수신되기 전에 즉, 수신하는 도중에 수신된 일부 신호를 사용하여 복호 수행이 가능하도록 채널 코딩을 설계하는 것이 필요하다.

8. HARQ 지연 감소(HARQ Latency Reduction)

기존 이동통신에서 사용하는 HARQ 방식은 타겟 BLER을 비교적 높게 정하여(약 10% 오류 확률) 전송한 후 패킷에 대한 수신 성공 여부인 ACK/NACK 응답을 받아 NACK의 경우에만 재전송을 수행하는 방식이다. 이와 같은 방식은 자원의 이용 효율을 높여 쓰루풋(throughput)을 증대시키는 역할을 하지만 공장 자동화를 위한 URLLC와 같이 매우 짧은 지연 시간 내에 매우 높은 신뢰도를 요구하는 통신에는 적합하지 않다. 제한된 시간 내에 보다 많은 에너지를 전송에 사용하기 위해, 기존 HARQ와 같이 첫 번째 전송 및 재전송이 시간적으로 이격된 방식보다는 시간적으로 연속하여 전송하고 기지국의 ACK 신호를 받으면 전송을 중단하는 방식에 대한 연구가 필요하다.

9. 분산형 안테나(Distributed Antenna)

전송 신뢰도 달성에 있어서 가장 큰 걸림돌은 무선 채널의 품질이다. 높은 신뢰도를 보장하기 위해서는 무선 채널의 품질이 타겟 BLER을 만족할 수 있는 수준으로

유지되어야 한다. 이를 위해 기지국의 송신 및 수신 안테나로부터 충분히 근접한 지역에 제어 장치 및 디바이스들(센서와 엑츄에이터)이 위치하도록 하여 충분한 신호 세기를 보장하여야 한다. 디바이스들이 산재한 공장 환경에서는 위치에 관계없이 충분한 신호 세기를 보장하기 위해 분산형 안테나의 도입을 고려해야 한다.

10. 주파수-공간 다이버시티(Diversity)

무선 채널의 안정화를 위해 주파수-시간-공간 도메인을 활용한 다이버시티(Diversity) 기법을 사용할 수 있다. 전송에 사용되는 자원이 경험하는 무선 채널의 주파수-시간-공간적 경로를 최대한 다중화함으로써 페이딩에 의한 무선채널 품질의 변화폭을 줄일 수 있다. URLLC 통신에서는 시간적 제약으로 인해 시간 도메인의 다이버시티 이득을 얻는 것은 어렵지만 분산형 주파수 할당, 다중 송수신 사이트 및 다중 안테나 활용으로 주파수 및 공간 다이버시티 이득을 얻을 수 있다. 특히, 수신 측은 수신 안테나의 수를 증가시켜 경로 다이버시티 뿐만 아니라 프로세싱 이득을 통해 추가적으로 SNR을 높일 수 있는 장점이 있다. 참고문헌 [14]의 (그림 2)는 레일리 페이딩(Rayleigh fading) 채널에서 다양한 안테나 구성 형태에 따라 10^{-9} 수준의 BLER을 만족시키기 위해 요구되는 SNR의 변화를 나타낸 것으로, 다이버시티 오더(Order)의 증가에 따라 요구 SNR이 감소함을 보여준다. 챠트의 가로축은 n개의 송신 안테나와 m개의 수신 안테나를 나타내는 $n \times m$을 의미한다. [14]에서 제시한 실험 조건하에서, 송신 및 수신 안테나의 수를 각각 나타내는 $n \times m$이 1×1일 경우 요구 SNR은 90dB에 달하지만 8×2의 경우는 11dB, 2×8의 경우는 2.7dB로 요구 SNR이 크게 감소함을 알 수 있다.

11. 채널 품질(CSI) 추정

모든 무선 링크들이 목표로 하는 QoS를 보장하면서 저지연 및 고신뢰도 요구 조건을 만족하기 위해서는 적절한 링크 적응(Link adaptation)을 실시해야 한다. 대부분의 공장 자동화 페루프 제어의 경우, 미리 알려진 디바이스들에 대해 정해진 주기성과 패킷 크기를 갖는 트래픽이 발생하므로 이를 고려한 효과적 채널 품질 추정이 가능하다. 기지국의 채널 품질 추정을 위해, 단말이 하향링크에 대한 주기적 CQI 피드백, 상향링크를 위한 주기적 SRS 전송이 가능하다. TDD의 경우는 단말의 SRS 전송으로부터 하향링크-상향링크 채널 상호성(Channel reciprocity)을 활용하여 하향링크 채널을 추정할 수 있다.

12. 기타

5G NR Rel-15 규격은 데이터 채널의 전송 신뢰도를 향상시키기 위해 BLER 10^{-5}을 위한 새로운 CQI 및 MCS이 테이블을 도입하였고, 하향링크 제어 채널에도 CCE 집성 레벨 16을 추가로 지원함으로써 커버리지 및 수신 성능을 개선하였다. 향후에는 하향링크 제어 채널의 추가적인 성능 개선을 위해 컴팩트(compact) DCI, PDCCH 반복 전송 기술 등이 논의될 예정이다. 통신 구조 변화를 통한 저지연 달성 방법으로 기지국을 경유하지 않는 디바이스 간 직접 통신의 적용을 고려할 수 있다. 디바이스 간 직접 통신 기술은 기지국 경유에 따르는 시간 손실을 줄일 수 있고 패킷 전송에 사용 가능한 에너지를 증가시킬 수 있는 장점이 있다.

V. 결론

현재 실험적 연구 단계에 있는 산업용 사물인터넷(IIoT) 기술은 각 기관 및 기구별로 국제 단일 표준을 개발하기 위한 경쟁에 돌입하였다. 상용 이동통신에 있어서 가장 영향력 있는 국제 표준 기구인 3GPP에서도 5G 이동통신을 버티컬 산업 자동화 서비스에 대한 통신 인프라로의 역할 수행을 위해 표준 기술을 개발 중에 있다. 이는 3GPP 기술을 공급하는 업체 및 사업자에게 새

로운 비즈니스의 기회를 제공할 것이다.

본 논문에서는 공장 자동화 시나리오에 대한 엄격한 통신 요구사항을 제시하고 5G 및 그 이후(B5G) 이동통신 기술의 적용 가능성을 논의하였다. 현시점의 공장 자동화와 같은 임무지향적 애플리케이션 요구사항은 현재 연구 개발 중인 5G 이동통신 기술을 일부 수정함으로써 충족될 수 있을지 모른다. 그러나 미래 공장을 위한 자동화 요구 수준은 기술의 진화 속도보다 훨씬 더 빨리 높아질 것으로 예상된다. 현재의 5G 표준 기술의 진화 로드맵보다 한발 앞서 미래 B5G 표준에 반영될 수 있는 도전적이고 혁신적인 기술 연구 개발이 필요하다.

용어해설

스마트 팩토리 제품의 기획, 설계, 생산, 유통 및 판매 등 전 생산 과정을 ICT 기술로 통합하여 최소 비용과 시간으로 고객맞춤형 제품을 생산하는 공장을 의미.

공장 자동화 제품의 제조를 위해 설계에서부터 생산의 제어시스템, 로봇이나 컴퓨터를 이용한 생산설비 등을 조화롭게 사용하여 사람의 개입을 최소화하고 기계나 컴퓨터에 의해 자동화한 일괄 생산 시스템을 의미.

Type-a 네트워크 이동통신 공중망인 PLMN과의 서비스 연속성 및 로밍이 가능한 사설 3GPP 네트워크.

Type-b 네트워크 이동통신 공중망인 PLMN과의 상호작용이 없는 독립된 3GPP 네트워크.

약어 정리

3GPP	3rd Generation Partnership Project
5G	5th Generation
5G-ACIA	5G Alliance for Connected Industries and Automation
5QI	5G QoS Identifier
B5G	Beyond 5th Generation
BLER	Block Error Rate
CCE	Control Channel Element
CE	Control Element
CQI	Channel Quality Information
DC	Dual Connectivity
DCI	Downlink Control Information
DRB	Data Radio Bearer
eMBB	enhanced Mobile Broadband
FS_5GLAN	Study on LAN Support in 5G
FS_CAV	Study on Communication for Automation in Vertical Domains
HARQ	Hybrid Automatic Repeat Request
IIoT	Industrial IoT
ITS	Intelligent Transport Systems
KPI	Key Performance Indicator
LAN	Local Area Network
LDPC	Low-Density Parity-Check
LTE	Long Term Evolution
MCG	Master Cell Group
MCS	Modulation and Coding Scheme
mMTC	massive Machine Type Communications
NOMA	Non-Orthogonal Multiple Access
NR	New Radio
OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
PDCCH	Physical Downlink Control Channel
PDCP	Packet Data Convergence Protocol
PDSCH	Physical Downlink Shared Channel
PMSE	Programme Making and Special Events
PUSCH	Physical Uplink Shared Channel
PTP	Precision Time Protocol
QoS	Quality of Service
RAN	Radio Access Network
RRC	Radio Resource Control
SA	Service and System aspects
SCG	Secondary Cell Group
SNR	Signal to Noise Ratio
SINR	Signal to Interference plus Noise Ratio
SR	Scheduling Request
SRS	Sounding Reference Signals
TDD	Time Division Duplex
TR	Technical Report
TS	Technical Specification
TSN	Time Sensitive Networking
TTI	Transmission Time Interval
URLLC	Ultra Reliable Low Latency Communications
VLAN	Virtual LAN
WG	Working Group

참고문헌

[1] 3GPP TR 22.804, “Study on Communication for Auto-

mation in Vertical Domains," V16.0.0, 2018.

[2] 3GPP TS 22.261, "Service requirements for the 5G system; Stage 1," V15.5.0, 2018.

[3] S. A. Ashraf et al., "Ultra-Reliable and low-Latency Communication for Wireless Factory Automation: From LTE to 5G," *IEEE Int. Conf. Emerg. Technol. Factory Autom. (ETFA)*, Berlin, Germany, Sept. 6-9, 2016, pp. 1-5.

[4] B. Holfeld et al., "Wireless Communication for Factory Automation: An Opportunity for LTE and 5G Systems," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 6, June 2016, pp. 36-43.

[5] 한국정보통신기술협회, "5세대 이동통신(5G), 3GPP 글로벌 표준최종확정," 보도자료, 2018.06.14.

[6] 윤영우, "Rel-15 5G NR 표준화 동향 및 요소 기술," *TTA Journal*, 175호, 2018, pp. 35-50.

[7] 3GPP TR 38.913, "Study on Scenarios and Requirements for Next Generation Access Technology," V15.0.0, June 2018.

[8] 3GPP Work Plan, "Work Plan 3GPP version July 10th 2018." Available: http://www.3gpp.org/ftp/Information/WORK_PLAN/Work_plan_3gpp_180710.zip

[9] 3GPP TR 22.821, "Feasibility Study on LAN Support in 5G", V16.0.0, June 2018.

[10] SP-180507, "New SID: 5GS Enhanced Support of Vertical and LAN Services," 3GPP SA #80, Available: http://www.3gpp.org/ftp/tsg_sa/TSG_SA/TSGS_80/Docs/SP-180507.zip

[11] ETRI 미래이동통신연구본부, "B5G 기반 IIoT 고신뢰, 초연결 핵심 기술 요구사항 정의서," TDP, July 2018.

[12] 3GPP TS 38.300, "NR and NG-RAN Overall Description; Stage2," v15.2.0, June 2018.

[13] R2-1711407, "Data duplication in NR," RAN WG2 #99-bis, Prague, Czech Rep., Oct. 2017

[14] N.A. Johansson et al., "Radio Access for Ultra-Reliable and Low-Latency 5G Communications," *IEEE Int. Conf. Commun. Workshop*, London, UK, June 8-12, 2015, pp. 1184-1189.