

논문 2024-61-1-2

OPC UA 미들웨어를 탑재한 5G 이동통신 단말 개발 및 지능형 공장환경을 위한 검증

(Development of 5G Mobile Terminals Equipped with OPC UA Middleware and Verification for Smart Factory Environment)

김 규 빈*, 김 세 훈***, 이 주 연***, 김 재 흥*, 정 진 곤**

(Kyubin Kim, Sehoon Kim, Ju-Yeon Lee, Jaehong Kim, and Jingon Joung[©])

요 약

본 연구에서는 지능형 공장 구현을 위해 국제 산업용 표준 프로토콜 OPC UA (open platform communications unified architecture) 미들웨어를 탑재한 5G sub-6 GHz 지원 단말과 5G millimeter wave (mmWave) 지원 단말을 제작하고 그 성능을 검증하였다. 이를 위해 먼저 5G 이동통신 단말 소프트웨어 플랫폼을 설계하였고, 지능형 공장 내 서로 다른 장비 사이 통신을 지원하기 위한 OPC UA 미들웨어와 중앙서버를 구현하였다. 마지막으로 5G 이동통신 단말 하드웨어를 제작하여 설계한 소프트웨어 플랫폼 및 OPC UA 미들웨어를 탑재 후, 실험을 통해 설계한 5G 이동통신 단말 성능을 검증하였다. 실험 결과, 5G sub-6 GHz 지원 단말 최대 전송 속도는 1.3 Gbps (bit per second), BLER (block error rate)는 3.34%을 나타내며, 데이터 처리 속도는 101 TPS (transaction per second)임을 확인하였다.

Abstract

This study examines 5G sub-6 GHz and millimeter wave (mmWave) band frequency support terminals equipped with open platform communication unified architecture (OPC UA) middleware which is an international industry standard protocol. To this end, we first implement each part of the software platform in the 5G mobile communication terminals. Next, an OPC UA middleware and a central server are implemented to support communication among the various 5G devices in the smart factory. Finally, all the designed software platforms and OPC UA middleware are embedded into the manufactured 5G communication terminal hardware, and the performance of the terminals is evaluated through the experiments. As a result, the maximum transmission rate, reliability, and data processing speed of the 5G sub-6 GHz band support terminal shows 1.3 Gbps, 3.34% BLER (block error rate), and 101 TPS (transaction per second).

Keywords : 5G, Smart factory, OPC UA, Mobile terminals

I. 서 론

최근 4차 산업혁명 핵심 기술인 인공지능 (AI: artificial intelligent), 사물인터넷 (IoT: Internet of

Things), 빅데이터, 및 5G 통신 기술이 빠르게 발전하고 있으며, 이를 활용한 지능형 공장에 관한 연구가 활발하다^[1-3]. 지능형 공장은 기존 제조 공장 자동화를 넘어 공장 내 다양한 장비들 사이 데이터 교환이 가능한

*학생회원, **정회원, 중앙대학교 전자전기공학부(Department of Electrical and Electronics Engineering, Chung-Ang University)

***비회원, 올래디오 주식회사(allRadio Co., Ltd.)

© Corresponding Author(E-mail : jgjoung@cau.ac.kr)

※ 이 논문은 과학기술정보통신부의 재원으로 정보통신기획평가원 지원(2022-0-00635, 28GHz 대역/특화망 대역/NR-U 대역을 지원하는 5G 산업용 단말 기술 개발, 100%)을 받아 수행된 연구임.

Received : November 21, 2023

Revised : December 2, 2023

Accepted : December 18, 2023

새로운 제조 시설로 기존 제조 공장 대비 생산성을 높이면서 관리 비용을 최소화할 수 있는 장점이 있다^[4].

이러한 지능형 공장을 실시간으로 분석하고 제어하기 위해선 5G 이동통신 기술을 활용한 가상 현실 시스템(CPS: cyber physical system)이 필요하다^[5]. CPS는 물리적인 동작을 컴퓨팅 및 통신 인프라와 연결할 수 있도록 하는 자동화 시스템이며, 대표적인 예시로 디지털 트윈과 메타버스가 있다^[6]. CPS를 활용한 지능형 공장을 구축하면, 사용자는 공장 가동 전 시뮬레이션을 통해 제조 현장에서 발생할 수 있는 문제를 미리 확인하고 대처할 수 있다. 또한, 공장 가동 중에 생산량 데이터 등을 실시간으로 확인하여 생산 단가 최적화를 위한 필요 사항을 빠르게 파악해 생산 공장 효율성을 증가시킬 수 있다^[7-9]. 이러한 이유로 최근 개방형 개인화 제조 서비스 플랫폼(FaaS: Factory as a Service)를 위해 소형 지능형 공장에 디지털 트윈을 적용하는 연구와^[10] 지식 기반 디지털 트윈을 포함한 스마트 제조 시설 연구가 진행되었다^[11].

디지털 트윈과 같은 CPS에 필요한 5G 이동통신 기술은 사용하는 주파수 대역이 크게 두 가지로 나누어진다. 5G 주파수 대역은 6 GHz 이하 대역에서 서비스를 제공하는 5G sub-6 GHz 대역과 28 GHz 대역 근방에서 서비스를 제공하는 5G millimeter wave(mmWave) 대역으로 나눌 수 있다. 두 주파수 대역은 모두 다음과 같은 상용망과 특화망 대역을 포함한다. 5G 상용망은 통신사업자 대상 Public 5G Network이며 사용하는 주파수 대역은 N78 Band 3.3~3.8 GHz와 N257 Band 26.5~28.9 GHz이다. 특화망은 특정 기업 혹은 기관이 직접 망을 구축하는 Private 5G Network이며, 사용하는 주파수 대역은 N79 Band 4.72~4.82 GHz와 N261 Band 28.9~29.5 GHz이다. 이 중, 특화망은 특정 건물 또는 지역에 특화된 서비스를 제공하는 통신 방식이며, IIoT(industrial Internet of Things) 분야에서 널리 활용되고 있다. 따라서, 다양한 장비들 사이 원활한 데이터 통신을 수행하는 지능형 공장은 5G 주파수 대역 특성상 상용망과 특화망을 모두 지원하는 5G sub-6 GHz 및 mmWave 대역 5G 이동통신 단말이 필요하다.

5G 이동통신 기반 CPS 기술로 지능형 공장을 구현하기 위해서는 지능형 공장 장비들 사이 자유로운 데이터 교환이 이루어져야 한다. 하지만, 현재 국내 제조업 공장에서 사용하는 PLC(programmable logic controller) 및 기타 장비들은 제조사 별로 다양한 프로토콜과 비표준 통신 체계를 사용하기 때문에 장비 사이

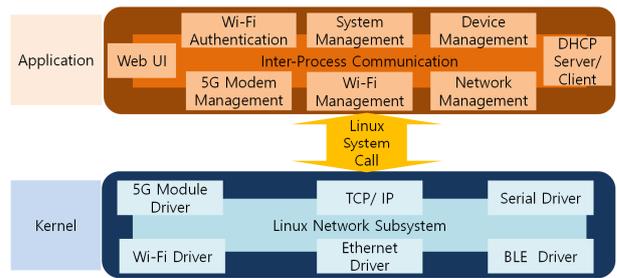


그림 1. 5G sub-6 GHz 지원 단말 소프트웨어 구조

Fig. 1. 5G sub-6 GHz support terminal software structure.

데이터 교환이 어렵다. 따라서, 지능형 공장을 구현하기 위해서는 국제 산업용 표준 프로토콜 OPC UA(open platform communications unified architecture)를 지원하는 서버 측 통신 플랫폼과 단말이 필요하다^[12].

이러한 이유로, 본 연구에서는 OPC UA 미들웨어를 탑재한 5G sub-6 GHz와 mmWave 지원 단말을 제작하였다. 이후 단말 성능 평가를 통해 본 연구에서 제작한 OPC UA 미들웨어를 탑재한 5G 이동통신 단말이 향후 지능형 공장 구현에 사용할 수 있음을 검증하였다.

II. 지능형 공장을 위한 5G 이동통신 단말 설계

1. 5G 이동통신 단말 소프트웨어 개발

본 연구에서는 지능형 공장을 위한 5G sub-6 GHz와 5G mmWave 지원 단말을 개발하였다. 이를 위해 설계한 소프트웨어 플랫폼 구조는 그림 1과 같다. 소프트웨어 플랫폼을 구성하는 각 블록에 대한 설명은 아래와 같다:

Web UI: 로컬 관리를 위한 web server 기능을 수행한다. 시스템, 네트워크, Wi-Fi 관리 기능을 수행하고 5G 모뎀 조회 및 설정 기능을 수행한다. Web UI 구조는 그림 2와 같다.

Wi-Fi Authentication: Wi-Fi AP(access point) 및 STA(station) 사이 인증 및 암호화 기능을 수행하며, AP/STA 무선 보안 인증 기능 등을 수행한다. WEP(wired equivalent privacy), WPA(Wi-Fi protected access)2, WPA3, WPA3-EAP(extensible authentication protocol) 등 다양한 인증 방식 지원하며, 보안 강화를 위해 802.1x 표준 프로토콜을 지원한다.

Wi-Fi Management: Wi-Fi 802.11/a/b/g/n/ac/ax을 지원하며 SSID(service set identifier) 조회 및 설정 기능과 단말 접속 관리 기능을 수행한다. Wi-Fi Management 구조는 그림 3과 같다.

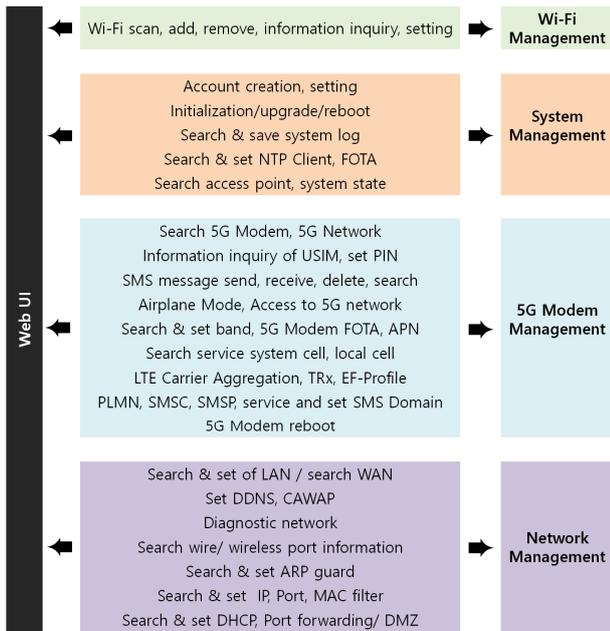


그림 2. Web UI 구조
Fig. 2. Web UI structure.

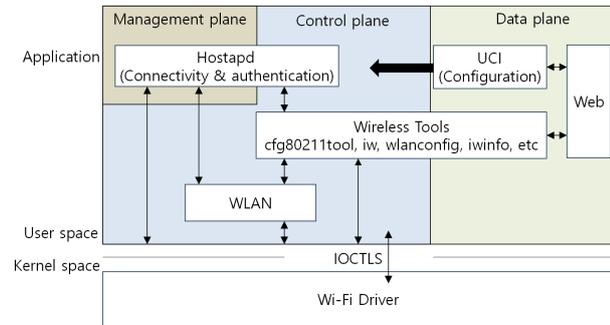


그림 3. Wi-Fi Management 구조
Fig. 3. Wi-Fi Management structure.

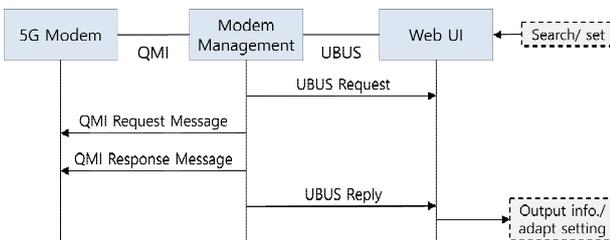


그림 4. 5G Modem Management 구조
Fig. 4. 5G Modem Management structure.

5G Modem Management: 5G 모듈 데이터 통신 및 설정 변경 기능을 수행한다. 또한, 모뎀 상태, 기기 정보, 그리고 설정 정보 등을 출력하고 모뎀 Band/ Mode/APN (access point name)/USIM (universal subscriber identity module) 등을 설정한다. 5G Modem Management 구조는 그림 4와 같다.

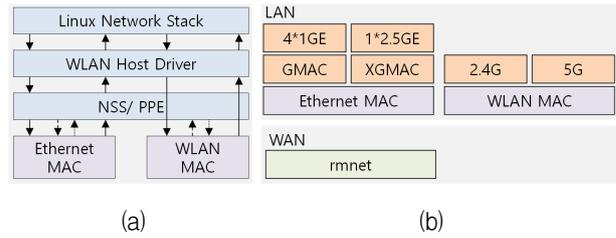


그림 5. Network Management 구조: (a) Data path 구조; (b) 유선 및 무선 포트 구성
Fig. 5. Network Management structure: (a) Data path structure; (b) Wired and wireless port structure.

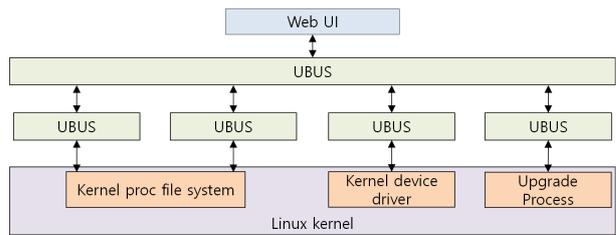


그림 6. System Management 구조
Fig. 6. System Management structure.

Network Management: WWAN (wireless wide area network), WLAN (wireless local area network) 및 LAN 등 네트워크 설정 및 상태를 관리하며, NAT (network address translation)/Port forwarding/DMZ (demilitarized zone) 기능을 수행한다. 또한, 시스템 네트워크 보안을 관리하여 ARP (address resolution protocol) spoofing 공격 차단과 방화벽 기능을 수행한다. Network Management 구조는 그림 5와 같다.

System Management: CPU, 메모리, 및 TEMP (temporary) 부하를 관찰하여 설정 임계치를 초과하면 알람을 생성하며 네트워크 연결을 관찰하여 설정한 목적지와 ICMP (internet control message protocol) 상태를 확인한다. 또한, 칩셋이 특정 온도에 도달 시, 주요 칩셋을 언더클럭하여 1차로 보호한다. 만약 칩셋 1차 보호가 실패하여 칩셋 온도가 120°C에 도달하면, System Management는 칩셋을 재부팅 한다. System Management 구조는 그림 6과 같다.

그 외 (DHCP server/client, BLE management): WAN과 LAN IP 주소 할당 기능을 수행한다. BLE (bluetooth lower energy) management는 BLE 장비를 관리하는 기능을 수행한다.

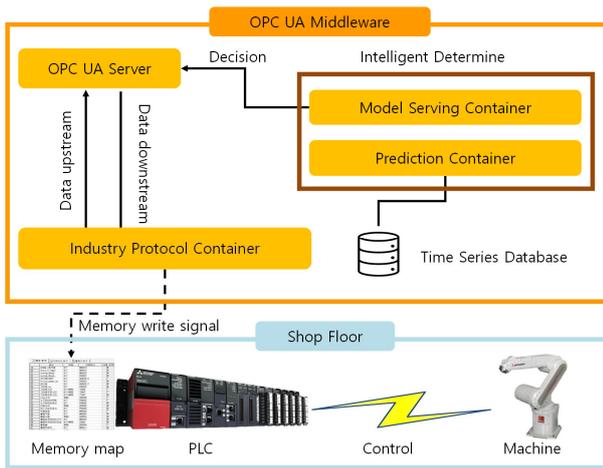


그림 7. OPC UA 미들웨어 엣지 지능형 판단 구조
Fig. 7. OPC UA middleware edge intelligent structure.

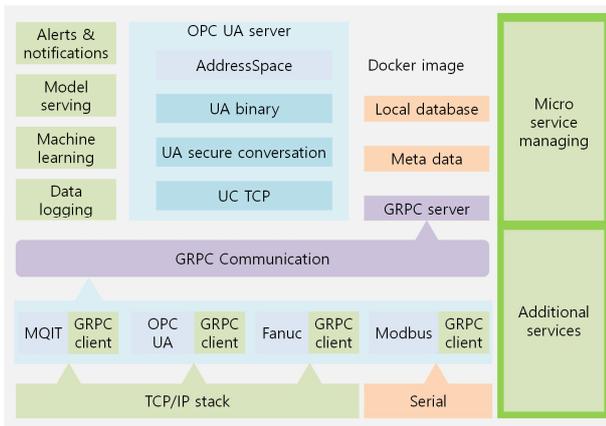


그림 8. 엣지 내부 구조
Fig. 8. Edge inner structure.

2. OPC UA 미들웨어 개발

가. 지능형 엣지 개발

다음으로, 지능형 공장 내 다양한 장비들 사이 데이터 송·수신을 가능하게 하는 OPC UA 미들웨어를 설계한다. 설계한 OPC UA 미들웨어는 5G 단말에 탑재되어 다양한 산업 장비에서 데이터를 읽어와 중앙서버에 안정적으로 전달하는 것을 목표로 한다. 그림 7은 OPC UA 미들웨어 엣지 지능형 판단 구조를 나타낸다. OPC UA 미들웨어는 각 장비로부터 수집한 데이터와 CPS 서버로부터 받은 시계열 빅데이터 기반 모델을 활용하여 엣지에서 장비 상태를 감지 및 분류하고, 이를 OPC UA 서버에 전달한다. OPC UA 서버에선 신호 형태를 파악하고 권한을 검증하는 작업을 거친다. 이후, OPC UA 서버는 머신 컨테이너와 통신하여 제어 명령을 전달한다. 최종적으로 제어할 설비 메모리 맵에 데이터를 작성하여, PLC를 통해 장비를 제어한다.

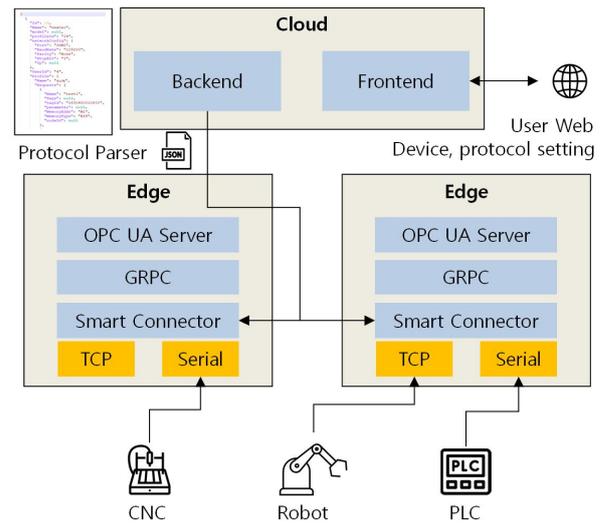


그림 9. 스마트 커넥터 구조
Fig. 9. Smart connector structure.

그림 8은 설계한 OPC UA 미들웨어 엣지 내부 구조이다. OPC UA 미들웨어 엣지 내부 프로그램은 컨테이너화를 통해 설계한다. 엣지 내부 프로그램을 컨테이너화하면 다음과 같은 장점을 얻을 수 있다. 먼저, 내부 프로그램이 OS (operating system)에 대한 의존성이 없어 클러스터링, 이중화, 분산제어와 같은 서비스 구현이 가능하다. 또한, 데이터 수집 및 저장 시에 운영 지속성을 확보하여 높은 가용성과 함께 무정지 서비스를 지원할 수 있다.

나. 스마트 커넥터 개발

그림 9는 OPC UA 미들웨어 내 스마트 커넥터 구조를 보여준다. 스마트 커넥터 및 내부 OPC UA 서버는 도커를 기반으로 동작하며, 컨테이너화 기술을 활용하여 서버 장애 발생 시 원상복구 기능 등 다양한 기능을 지원한다. 스마트 커넥터는 지능형 공장 내 장비로부터 데이터를 수집하여, 이를 GRPC (google remote procedure call) 통신을 통해 엣지 내부 OPC UA 서버 AddressSpace에 동기화한 후 클라우드에 전송한다. 스마트 커넥터 통신 인터페이스는 크게 TCP (transmission control protocol)/IP, Serial로 나뉘며, 사용자 설정에 따라 선택할 수 있다. 스마트 커넥터는 데이터 수집 주기와 동기화 주기를 설정할 수 있으며, 설정 파일은 EdgeConfig 이름으로 엣지에 저장한다. 스마트 커넥터를 통해 장비와 통신을 수행하기 위한 프로토콜 역시 사용자가 설정할 수 있으며, OPC UA, Fanuc, Modbus, LS, Mitsubishi 전용 프로토콜 등을 파싱할 수 있다. 스마트 커넥터는 엣지 내부에서 자동으

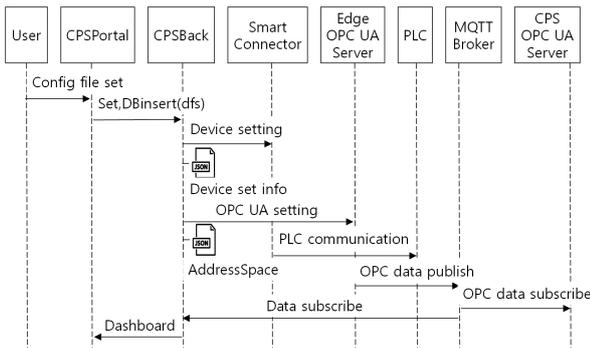


그림 10. 스마트 커넥터 동작 시퀀스
Fig. 10. Smart connector operation sequence.

로 실행되는 프로그램이며, 실행 전 사용자가 어떤 장비와 무슨 통신을 할지 미리 정해 주어야 한다. 사용자는 CPSPortal을 통해 프로토콜 설정, 옛지 설정, 장치 설정, 그리고 OPC UA 모델링을 수행해야 한다. 이러한 사용자 설정을 마치면, 백엔드에서 JSON 파일 형식 장비 설정 파일이 스마트 커넥터로 전달되고, 파일 내용에 따라 장비와 통신한다. OPC UA 모델러는 프로토콜 매핑 및 설계를 수행한 결과를 nodesetXML 파일 형태로 OPC UA 서버로 전달하는데, 이때 옛지 내부 AddressSpace가 OPC UA 서버에 실시간으로 반영된다. 스마트 커넥터는 config 파일에 따라 PLC와 통신하며, 이후 내부 OPC UA 서버에 데이터를 전달한다. 내부 OPC UA 서버는 pub(publisher)/sub (subscriber) 기능을 통해 broker에 데이터와 메타데이터를 주기적으로 전달하고, 이 데이터를 활용하여 데시보드 및 DB (data base) insert 과정을 수행한다. 스마트 커넥터 동작 시퀀스는 그림 10과 같다.

3. OPC UA 중앙서버 개발

개발한 OPC UA 중앙서버는 그림 11과 같이 동작한다. OPC UA 중앙서버는 OPC UA 미들웨어로부터 받은 자료를 수집한다. 이때, 수집한 데이터는 OPC UA 중앙서버에 저장되고, 사용자는 사용자 정의 대시보드를 통해 실시간으로 제조 공장 상황을 파악할 수 있다. 사용자가 설정한 중요 데이터는 OPC UA 서버가 알람 기능을 활용하여 사용자에게 알린다. OPC UA 중앙서버는 외부로 나가는 네트워크 스트림을 줄이기 위해 네이브 클라우드에서 SaaS (software as a service)로 구현하였다. 그림 12는 SaaS를 위한 OPC UA 중앙서버 MSA (micro service architecture)를 나타내며, 이는 추후 서버 기능 확장을 위해 API (application programming interface) 게이트웨이를 기반으로 보안

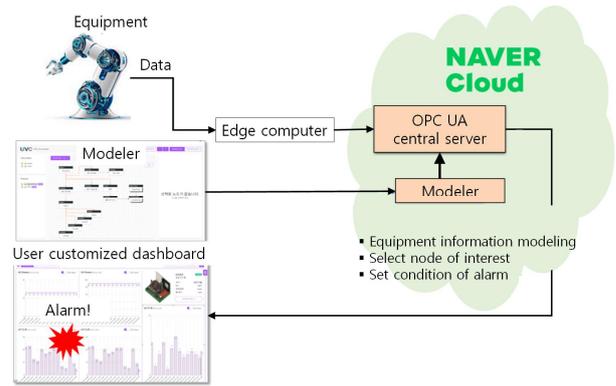


그림 11. OPC UA 중앙서버 데이터 처리 개념
Fig. 11. Data processing concept of the OPC UA central server.

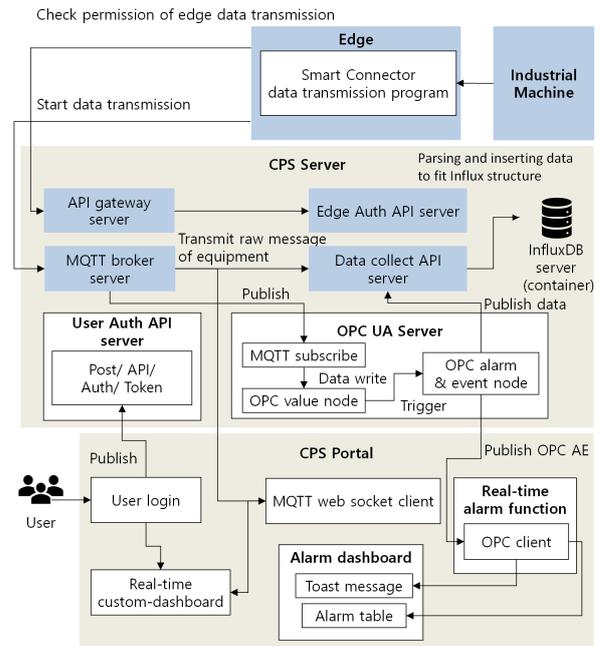


그림 12. OPC UA 중앙서버 MSA
Fig. 12. OPC UA central server MSA.

서버와 서비스 서버를 나누는 방식으로 설계한다. 또한, MSA로 OPC UA 중앙서버 SaaS를 배포하려면 컨테이너화 기술을 기반으로 어플리케이션을 실행해야 한다.

III. 5G 단말 하드웨어 제작

1. 5G sub-6 GHz 지원 단말 제작

본 연구에서는 5G sub-6 GHz 중 3.5 GHz와 4.7 GHz 주파수 대역을 모두 지원하는 5G sub-6 GHz 지원 단말을 그림 13과 같은 구조로 설계하였다. 해당 단말은 Qualcomm SDX55 Chip 기반으로 설계되었으며, 4개 LAN 포트 및 6E 표준 Wi-Fi AP를 지원하여 지능

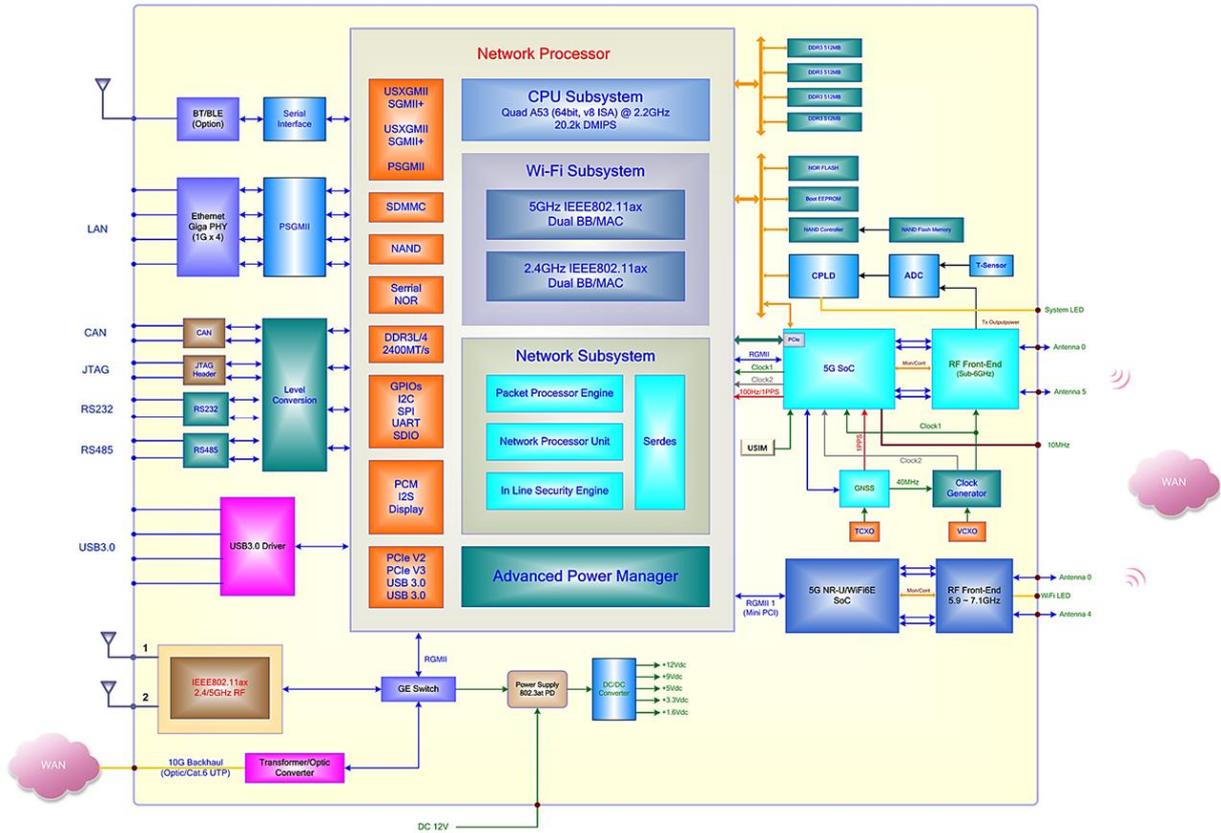


그림 13. 5G sub-6 GHz 지원 단말 구조
Fig. 13. 5G sub-6 GHz support terminal structure.



그림 14. 5G sub-6 GHz 지원 단말 PBA 형상
Fig. 14. 5G sub-6 GHz support terminal PBA feature.

형 공장 내 다양한 제조설비와 유·무선으로 연동이 가능하다. 해당 단말은 회로, PCB (printed circuit board), 및 PBA (printed board assembly) 설계를 통해 그림 14와 같이 제작하였으며 5G sub-6 GHz 지원 단말 제원은 표 1과 같다.

표 1. 5G sub-6 GHz 지원 단말 규격 및 제원
Table 1. 5G sub-6 GHz support terminal specifications.

Structure		Specification
WAN Interface	2.5GBase-T	Support single 2.5GBase-T, support Auto-Negotiation/Auto-MDIX
LAN Interface	1GBase-T	Support four 2.5GBase-T, support Auto-Negotiation/Auto-MDIX
Button	Reset	Factory reset (5 sec)
	WPS	Automatic wireless settings, support WPS-PBS
	Rebooting	AP rebooting
LED	Display Status	PWR, 4G/5G, WAN, LAN, Wi-Fi
USB		Support single USB 3.0
Wireless Interface		2.4 G/5 G/ 6 G Wi-Fi MIMO (4x4) Chipset, 802.11a/b/g/n/ac/ax Wi-Fi 6E support
Antenna		4 G/ 5G: External antenna (2.4 G/ 5G 4개, 6G 4개), Wi-Fi: Internal antenna (Wi-Fi 2.4 G/ 5G/ 6G Triple type)
Power		Adapter (12V/ 4A)

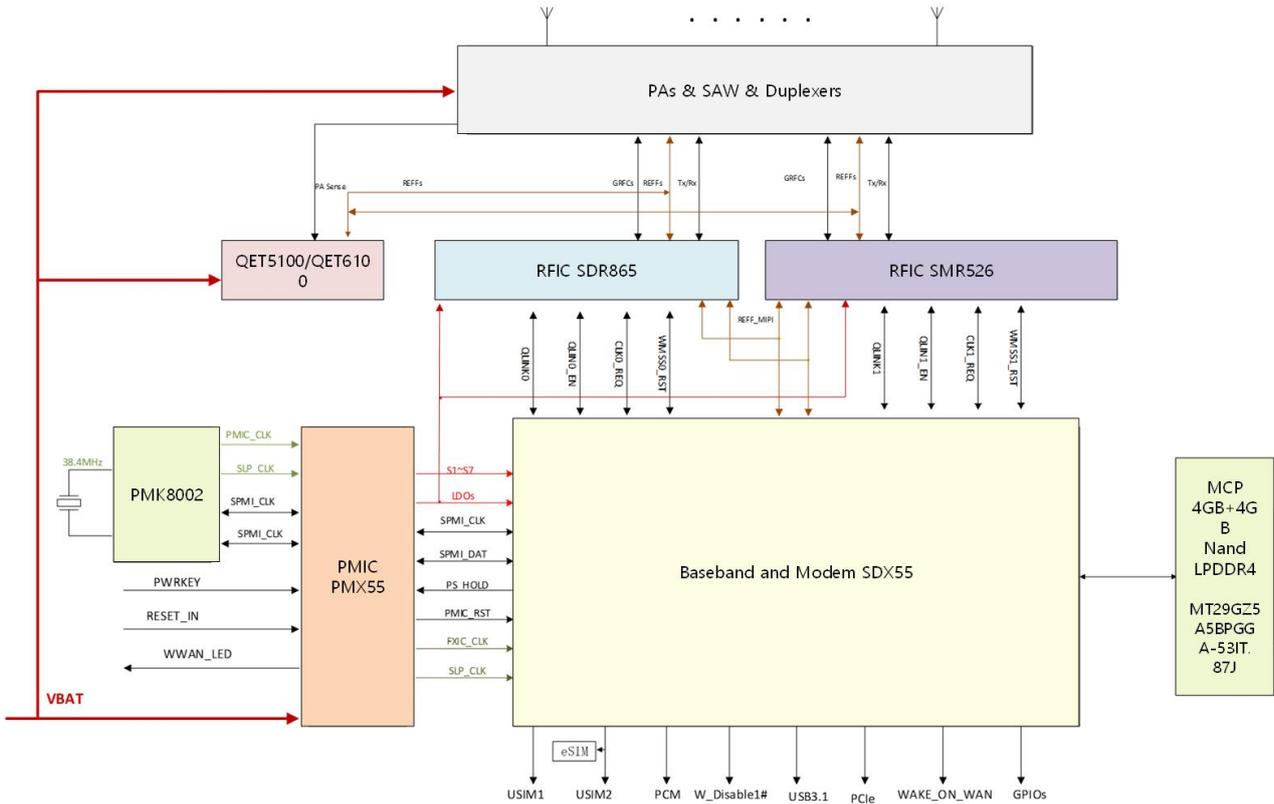


그림 15. 5G mmWave 지원 단말 구조
Fig. 15. 5G mmWave support terminal structure.

2. 5G mmWave 지원 단말 제작

다음으로, 5G mmWave 지원 단말을 그림 15와 같은 구조로 설계한다. 해당 단말은 5G sub-6 GHz 지원 단말과 같이 Qualcomm SDX55 칩을 사용하여 설계하며, Rel-15 규정 5G sub-6 GHz, mmWave, LTE 및 WCDMA를 지원하는 M.2 타입 모듈이다. 또한, USB 3.0, PCIe 3.0과 UART Interface를 지원하며, Android, Linux, Windows 7/8/10에서 사용할 수 있다. 해당 단말은 회로 설계, PCB 설계를 통해 그림 16과 같이 제작하였다. 추가로, 5G mmWave 지원 단말 RF (radio frequency) 송·수신기인 QTM525 모듈은 발열이 매우 높아, 그림 17 같이 이중 방열구조로 설계해 5G mmWave 지원 단말에 탑재한다. 제작한 5G mmWave 지원 단말 제원은 표 2에서 확인할 수 있다.

IV. 성능 테스트

1. 최대 전송 속도

가. 5G sub-6 GHz 지원 단말

본 연구에서 개발한 5G 단말 성능 평가를 위해 단말

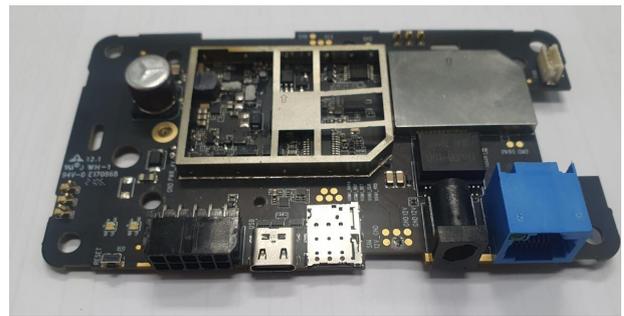


그림 16. 5G mmWave 지원 단말 메인 PCB 형상
Fig. 16. 5G mmWave support terminal PBA feature.

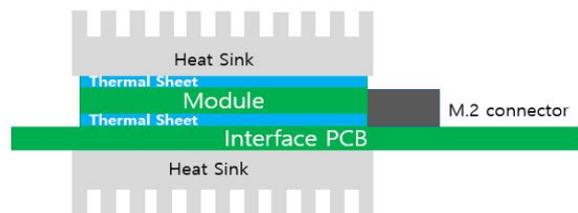


그림 17. 5G mmWave 지원 단말 이중 방열구조
Fig. 17. 5G mmWave support terminal dual heat dissipation structure.

표 2. 5G mmWave 지원 단말 규격 및 제원
Table 2. 5G mmWave support terminal specifications.

Structure	Specifications
5G-Module	HM-950 (Qualcomm SDX55)
Indicator	2 LED (5G/(4G,3G)) 1 LED (Ethernet)
Band	Support NSA mode 5G FR1&FR2 (N78, N257) LTE B1, B3, B5, B7, B8 WCDMA B1
USB Interface	USB 3.1 C-type (USB 2.0 compatible)
USIM Interface	4FF PUSH-PUSH SIM Socket
RJ45 Port	5 Gbps Ethernet port (1 port)
Antenna	Internal antenna LTE/SUB6 Antenna X 4, QTM525 X3
Power	12 V/2 A
Uart	2-wire/ 4-wire UART Interface
Size	126x71x30 (mm)
Weight	About 220 g
Temperature/humidity	0~50°C / 95%



그림 19. 5G 3.5 GHz 접속 최대 전송 속도 측정 결과
Fig. 19. Maximum transmission rate of 5G 3.5 GHz band connection.

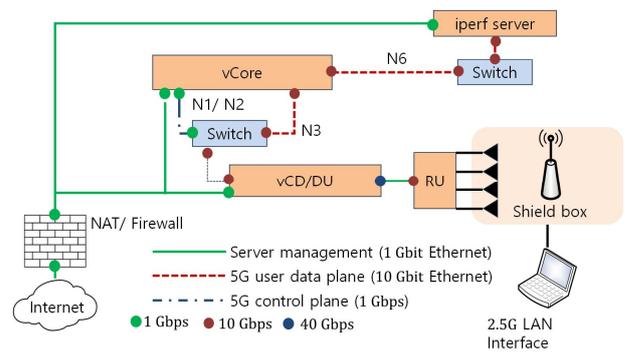


그림 20. 5G 4.7 GHz 접속 최대 전송 속도 실험 구성도
Fig. 20. Maximum transmission rate experimental with 5G 4.7 GHz band connection.



그림 18. 5G 3.5 GHz 접속 최대 전송 속도 실험 구성도
Fig. 18. Maximum transmission rate experimental with 5G 3.5 GHz band connection.

이 지원하는 주파수 대역별로 실험을 수행한다. 먼저 5G sub-6 GHz 지원 단말을 통해 5G sub-6 GHz 주파수 대역 상용망인 3.5 GHz 주파수 대역과 특화망인 4.7 GHz 주파수 대역에서 최대 전송 속도를 측정한다. 3.5 GHz 주파수 대역 최대 전송 속도 측정을 위한 실험 구성은 그림 18과 같다. 그림에서와 같이, 5G sub-6 GHz 지원 단말을 통해 KT 5G 3.5 GHz 상용망에 접속한 후 사용자 단말에서 NIA (national information society agency) 인터넷 속도 측정 프로그램으로 최대 전송 속도를 측정한다. 그림 19에서 확인할 수 있듯이, 5G 3.5 GHz 대역을 통한 5G sub-6 GHz 지원 단말은 다운로드 기준 최대 0.653 Gbps 전송 속도를 얻는 것을 확인하였다. 다음으로 5G sub-6 GHz 지원 단말로 4.7 GHz 특화망 접속 시 최대 전송 속도를 측정한다. 그림 20은 특화망 전송 속도 측정 실험 구성도이다. 실험

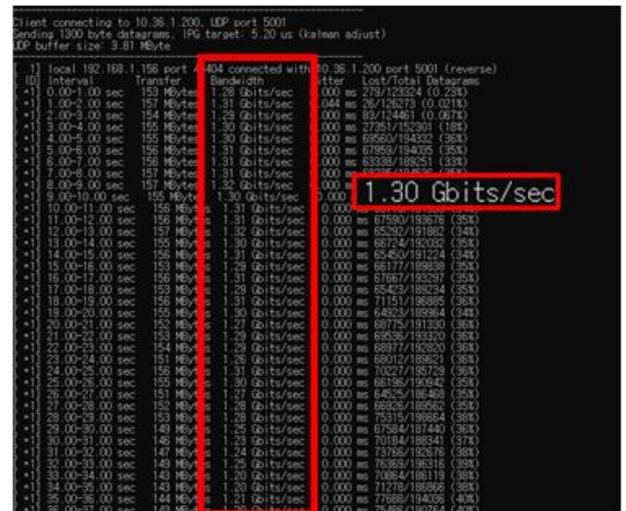


그림 21. 5G 4.7 GHz 최대 전송 속도 측정 결과 (2.5 Gbps 지원 PC)
Fig. 21. Maximum transmission rate of 5G 4.7 GHz band connection (2.5 Gbps support PC).

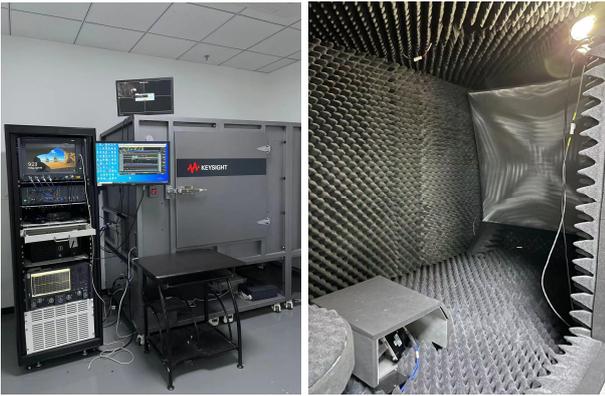


그림 22. 5G mmWave 접속 최대 전송 속도 실험 구성
Fig. 22. Maximum transmission rate experimental with 5G mmWave band connection.

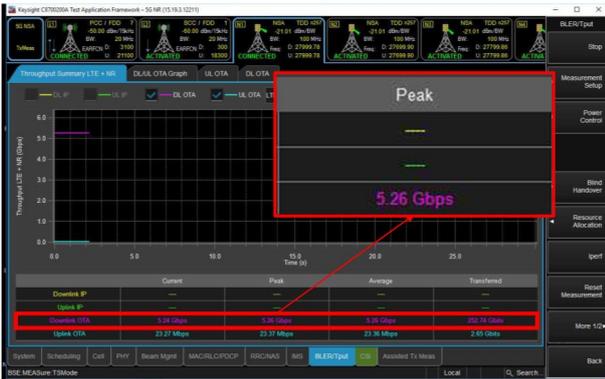


그림 23. 5G mmWave 접속 최대 전송 속도 측정 결과
Fig. 23. Maximum transmission rate of 5G mmWave band connection.

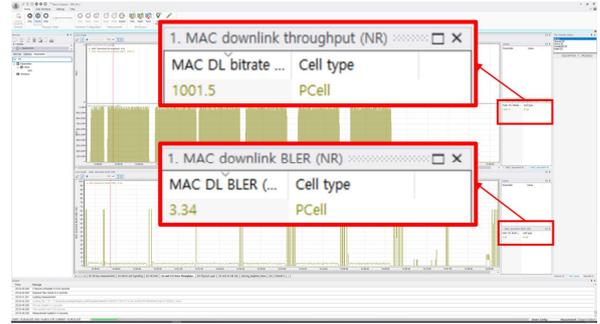
험 결과, 그림 21과 같이 5G sub-6 GHz 단말 4.7 GHz 특화망 대역 접속 시 최대 전송 속도는 UDP (user datagram protocol) 기준 1.3 Gbps이다.

나. 5G mmWave 지원 단말

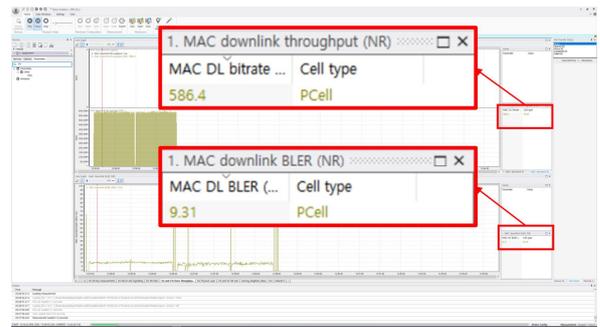
본 연구에서 개발한 5G mmWave 단말 최대 전송 속도를 측정하기 위해, 그림 22와 같이 실험 환경을 구성하였다. 5G mmWave 기지국 계측기를 통해 5G mmWave 지원 단말 상용망 전송 속도를 측정한 결과, 그림 23과 같이, 하향 링크에서 최대 5.26 Gbps를 얻을 수 있음을 검증하였다.

2. 신뢰성

다음으로, 본 연구에서 개발한 5G sub-6 GHz 단말 신뢰성을 평가하기 위해 그림 24와 같이 5G 4.7 GHz 특화망 대역 접속 후 신뢰성 평가 지표인 BLER을 측정하였다. 실험 결과, 그림 24(a)와 같이 RSRP(reference signal received power)가 -70 dBm이고, MAC



(a)



(b)

그림 24. 5G 4.7 GHz 접속 신뢰성 측정 결과: (a) RSRP=-70 dBm, MAC 하향 링크 TP=1001.5 Mbps일 때, BLER=3.34%; (b) RSRP=-90 dBm, MAC 하향 링크 TP=586.4 Mbps일 때, BLER=9.31%

Fig. 24. Reliability result of 5G 4.7 GHz band connection: (a) RSRP=-70 dBm, MAC downlink TP=1001.5 Mbps, BLER=3.34%; (b) RSRP=-90 dBm, MAC downlink TP=586.4 Mbps, BLER=9.31%.

(medium access control) 하향 링크에서 TP (throughput)이 1001.5 Mbps일 때, BLER=3.34%를 나타내며, 그림 24(b)와 같이 RSRP=-90 dBm, MAC 하향 링크 TP=586.4 Mbps일 때, BLER=9.31%이다.

3. 제조공정 데이터 처리 성능

OPC UA 미들웨어를 탑재한 5G 이동통신 단말 데이터 처리 성능을 측정하기 위해 그림 25와 같이 단말과 제조공정 설비를 연결 후 초당 데이터 처리 성능을 확인한다. 5G 단말은 제조공정에서 발생한 데이터를 WAS (web application server) 서버로 전송하고 응답을 요청한다. WAS 서버는 백엔드 API 서비스를 통해 데이터를 TimescaleDB에 저장하여 응답을 처리하고, 저장된 제조공정 데이터를 조회하여 생성한 데이터 수 D 를 측정한다. 이후, 5G 단말 응답 요청에서 WAS 서버 응답 처리까지 걸린 전체 응답 시간 R 을 측정한다. 이에 따라, 데이터 처리 성능 P 는 아래와 같이 계산한다:

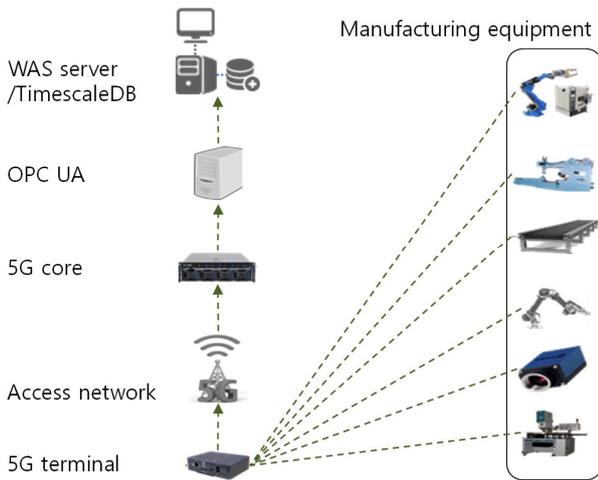


그림 25. 제조공정 데이터 처리 성능 실험 구성도
Fig. 25. Manufacturing data processing test.

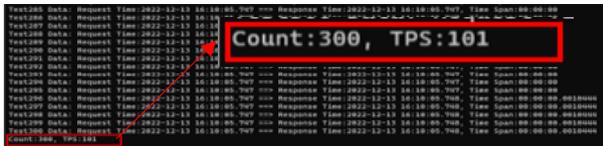


그림 26. 제조공정 데이터 처리 성능 결과
Fig. 26. Manufacturing data processing performance result.

$$P = \frac{D}{R}$$

본 실험에선 $D \geq 300$, $R \leq 3s$ 인 환경에서, $P \geq 100$ TPS (transaction per second)를 성능 목표 기준으로 정한다. 그림 26에서 확인할 수 있듯이, 개발한 5G 단말은 $P = 101$ TPS에 도달하였으며, 이를 통해 개발한 단말이 성능 목표를 만족함을 확인하였다.

해당 실험에서는 제작한 단말 전송 속도, 신뢰도 및 데이터 처리 성능을 확인하였다. 추후 본 연구에서 제작한 단말 성능 최적화를 위해 빅데이터 활용 6-시그마 기법을 통한 데이터 분석을 수행할 예정이다.

V. 결 론

본 연구에서는 지능형 공장을 위한 OPC UA 미들웨어를 탑재한 5G 이동통신 단말을 설계 및 검증하였다. 설계한 단말은 5G sub-6 GHz와 mmWave 대역을 지원하는 단말로, 5G 상용망과 특화망에서 모두 활용이 가능하다. 설계한 5G 이동통신 단말 성능 검증을 위해 실험을 진행한 결과, 5G sub-6 GHz 단말은 3.5 GHz 대역 상용망에서 최대 전송 속도 0.653 GHz를 나타내며 4.7 GHz 대역 특화망에서는 1.3 Gbps를 나타낸다.

5G mmWave 지원 단말은 상용망에서 최대 전송 속도 5.26 Gbps를 나타내는 것을 확인하였다. 제작 단말 신뢰성 평가 결과, 5G sub-6 GHz 단말은 특화망 대역에서 RSRP=-70 dBm, MAC TP=1001.5 Mbps일 때, BLER=3.34%를 나타내며 안정적인 신뢰성을 가짐을 검증하였다. 마지막으로 제작한 5G 단말 데이터 처리 성능은 101 TPS를 얻어 성능 목표치인 100 TPS를 만족하였다. 본 연구 내용을 토대로, 추후 5G sub-6 GHz 대역과 mmWave 대역을 모두 지원하는 단일 5G 이동통신 단말을 제작할 계획이다. 또한, 제작한 5G 이동통신 단말로 실제 제조 시설을 통한 실증 테스트를 수행하여 해당 5G 이동통신 단말이 지능형 공장 구축에 적합함을 보일 것이다.

REFERENCES

- [1] B. Chen, J. Wan, L. Shu, P. Li, M. Mukherjee and B. Yin, "Smart factory of industry 4.0: Key technologies, application case, and challenges," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 6505-6519, December 2018.
- [2] P. Osterrieder, L. Budde, and T. Friedli, "The smart factory as a key construct of industry 4.0: A systematic literature review," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 221, pp. 107476, March 2020.
- [3] H. Shin, T. Kim, D. Park, H. Jeon, and W. Ju, "Design and implementation of a real-time facility data collection system using an embedded system," *Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers*, vol. 58, no.1, pp. 83-91, January 2021.
- [4] K. Lee, "Smart factory technology trends and R&D road map," *Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers*, vol. 43, no. 6, pp. 16-24, June 2016.
- [5] S. Noh, "Technology trends and issues in the cyber physical system (CPS) of smart factories," *Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers*, vol. 43, no. 6, pp. 47-50, June 2016.
- [6] N. Jazdi, "Cyber physical systems in the context of industry 4.0," in *Proc. IEEE Int. Conf. Aut. Quality Testing Robotics*, pp. 1-4, Cluj-Napoca, Romania, July 2014.
- [7] A. Padovano, F. Longo, L. Nicoletti, and G. Mirabelli, "A digital twin based service oriented application for a 4.0 knowledge

- navigation in the smart factory,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 11, pp. 631–636, June 2018.
- [8] V. Kamath, J. Morgan, and M. I. Ali, “Industrial IoT and digital twins for a smart factory: An open source toolkit for application design and benchmarking,” in *Proc. Glob. Internet Things Summit*, pp. 1–6, Dublin, Ireland, June 2020.
- [9] S. Yu, “Digital twin standardization trends for smart manufacturing,” *Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers*, vol. 46, no. 12, pp. 16–25, December 2019.
- [10] K. T. Park, Y. W. Nam, H. S. Lee, S. J. Im, S. D. Noh, J. Y. Son, and H. Kim, “Design and implementation of a digital twin application for a connected micro smart factory,” *Int. J. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 32, no. 6, pp. 596–614, June 2019.
- [11] G. Zhou, C. Zhang, Z. Li, K. Ding, and C. Wang, “Knowledge-driven digital twin manufacturing cell towards intelligent manufacturing,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 58, no. 4, pp. 1034–1051, February 2020.
- [12] T. Kim, and J. Cho, “A study of OPC UA network technology for industrial network integration,” in *Proc. Summer Annual Conference of Institute of Electronics and Information Engineers*, pp. 1,509–1,510, Busan, Korea, June 2017.

저 자 소 개



김 규 빈(학생회원)
 2022년 2월 중앙대학교
 전자전기공학부 학사.
 2022년 3월~현재 중앙대학교
 전자전기공학과 석사과정.

<주관심분야: 무선통신, 통합 감지 및 통신 시스템, 이미지 기반 무인 이동체 추적 알고리즘>



김 재 홍(학생회원)
 2021년 2월 중앙대학교
 전자전기공학부 학사.
 2023년 2월 중앙대학교
 전자전기공학과 석사.
 2023년 3월~현재 중앙대학교
 전자전기공학과 박사과정.

<주관심분야: 시공간 부호화, 지능형 반사표면, 인공지능 신호처리>
 [ORCID:0000-0003-2190-3535]



김 세 훈(비회원)
 1993년 2월 한남대학교
 전자공학과 학사.
 1995년 2월 한남대학교
 전자공학과 석사.
 1995년 1월~2016년 9월:
 (주)동원시스템즈,
 수석연구원.

2016년 10월~현재 (주)올래디오 주식회사,
 수석연구원.
 <주관심분야: 이동통신, IoT, 근거리 통신, 해양 통신, 스마트 제조 기술, 5G 특화망>



정 진 곤(정회원)
 2001년 2월 연세대학교
 전자공학과 학사.
 2003년 2월 KAIST 전자전산학과
 석사.
 2007년 2월 KAIST 전자전산학과
 박사.

2007년 3월~2008년 8월 KAIST, 박사후연구원.
 2007년 8월~2008년 8월 (주)루미콤, 위촉연구원.
 2008년 9월~2009년 9월 UCLA, 박사후연구원.
 2009년 10월~2016년 2월 I2R, Singapore, 연구원.
 2016년 3월~현재 중앙대학교 전자전기공학부
 교수.
 <주관심분야: 무선통신, 통신 신호처리, 기계학습>
 [ORCID:0000-0002-9551-1123]



이 주 연(비회원)
 1994년 8월 한양대학교
 산업대학원
 컴퓨터 통신학과 석사.
 2001년 9월~2014년 2월
 동원시스템즈,
 책임/수석연구원.

2014년 3월~2016년 10월: 동원시스템즈,
 상무/연구소장
 2016년 11월~현재 올래디오 주식회사, 대표이사
 <주관심분야: WiFi, IoT, 무선통신, 5G 특화망, Smart Factory, 광통신>