

원격제어차량 텔레오퍼레이션 및 재해복구를 위한 올인원 휴대용 특화망 장치 구현

최 태 상*, 윤 상 식°, 이 준 경*,

Implementation of All-in-one Portable Private 5G Network for Remote Control Vehicle Teleoperation & Disaster Recovery

Taasang Choi*, Sangsik Yoon°, Joonkyung Lee*

요 약

본 논문에서는 일본 후쿠시마 원전 사태와 같은 지진, 해일 등 극한 자연재해 상황 하에서 원자력발전소 등 산업시설의 기존 유·무선 통신망이 파괴되었을 때나 원격자율제어차량의 텔레오퍼레이션 환경에서, 기존 통신망과는 별개로 통신 비전문가인 산업시설의 운용자가 수십분 이내에 구축할 수 있는 신속성, 편리성, 휴대성, 신뢰성, 안전성을 모두 갖춘 유·무선 올인원 휴대용 5G 특화망 통신 장치 및 멀티모달/데이터 서비스 자율구축 기술을 제안한다. 또한 연구 결과로 개발된 PoC(Proof of Concept) 시스템과 기능 검증 및 시험 결과를 소개한다.

Key Words : Software-Defined Networking (SDN), Self-Organizing Network (SON), Emergency Communication Kit (ECK), Private 5G Network

ABSTRACT

This paper introduces our research results of an all-in-one portable private 5G communications system for remote control vehicle (RCA) teleoperation and nuclear power plant under extreme natural disaster like Fukushima nuclear power plant incident. In such environment, RCA teleoperation engineers or nuclear power plant operational staffs which do not have technical knowledge of network provisioning and operations have to deploy the emergency network. Thus our proposed system provides capabilities to provision a private 5G network autonomically and enable multi-modal (RCA sensor data, control messages, voice/video, etc.) and data services. It also describes our PoC system developed based on the proposed core technology and architecture as well as the results of system verification testing.

※ 이 논문은 과학기술정보통신부와 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 “극한재난 구조용 지능형 상황인지 초실감 원격협업 및 이동형 자율 네트워킹 핵심기술 개발” 과제 (연구개발과제번호: RS-2023-00263029) 및 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 “AI 기반 다이나믹 B5G/6G 네트워크 슬라이싱 기술을 이용한 원격제어차량 기술 개발” 과제(연구개발과제번호: P0028063) 연구임.

◆ First Author : Electronics and Telecommunications Research Institute & (주)모비젠, choits@etri.re.kr & choits@mobigen.co.kr

° Corresponding Author : Electronics and Telecommunications Research Institute, ssyoon90@etri.re.kr

* Author : Electronics and Telecommunications Research Institute, leejk@etri.re.kr

논문번호 : KNOM2025-02-010, Received November 13, 2025; Revised November 28, 2025; Accepted December 15, 2025

I. 서 론

최근 글로벌 기후 변화에 따른 홍수, 지진, 해일, 산불 등의 극한 재난 상황이 전 세계적으로 빈번히 발생하는 상황에서는 최초 재난 발생 시점에서부터 인명 구조가 필요한 재난 골드타임 내에서는 현장 상황에서 절실히 필요한 기본 통신 시스템이 마비되어 통신 서비스가 단절되는 문제가 발생할 수 있다. 이러한 최악의 상황에서는 재난 구조 현장 상황 실과 구조 대원 뿐만 아니라 피구조자와의 통신 부재로 인한 골드타임 내에서 원할한 인명 구조가 이루어지지 못하게 되어 예상치 못한 엄청난 인명 구조 손실이 추가되는 문제가 발생할 수 있다.

따라서 이러한 극한 재난 상황 시에 기본 통신이 단절되는 상황을 대비하여 긴급하게 현장에 이동하여 무정전으로 전원만 켜고 케이블만 연결하고 휴대단말만 켜면 통신이 이루어지는 올인원 휴대용 비상통신 키트 개발이 필요하다.

또한 대형 교통사고 발생이나 일시적인 극심한 교통 체증 등과 같은 비상 상황 발생시 원격자율제어 차량의 제어를 위해 현장에서 긴급 비상통신망 구축·복구 및 신속한 멀티모달·데이터 통신서비스 기능 제공은 추가 2차, 3차 피해를 최소화할 수 있으며, 산업시설의 안전을 유지하는데 필수적인 작업이다.

이를 해결하기 위해서 본 연구에서는 다양한 재해 조건이나 원격자율제어 차량 통제 환경에서 통신시설이 파괴되어 이용 불가능한 기존 통신망과는 별개로 비전문가도 신속하게 구축할 수 있는 신속성·편리성·휴대성·신뢰성·안전성을 모두 갖춘 유·무선 올인원 휴대용 특화망 비상통신망 장치 및 응급 서비스 자율구축 기술을 개발하였다. 본 연구개발 대상기술은 정상 운영 상황에는 정기적인 기능확인 정도의 기본 기능을 유지하다가 재난이 발생하였을 경우, 아래와 같은 기술을 기반으로 비상 네트워크를 빠르고 쉽게 구축함으로써 재해 시설 운영자들과 재해 복구 로봇/드론과 같은 복구 도구들과 원격 자율제어차량 및 제어 센터 간에 긴급 통신서비스를 제공함을 목적으로 한다.

- 휴대형 배터리 지원 유·무선 올인원 휴대형 특화망 통신스위치, AP(Access Point), 서버 하드웨어 기술
- 원격제어차량 텔레오퍼레이션 및 재난 복구용 멀

티모달/데이터 유·무선 통합 통신서비스 자율 제어, 동적 네트워크 슬라이싱 및 관리 소프트웨어 기술

또한 최악의 극한 재난상황을 고려하여, 재난 발생 이후에 네트워크를 처음부터 모두 설치 및 자동 구축이 가능하도록 개발하였다 (From Zero-clean Network State). 상기의 목적을 달성하기 위해 본 연구개발에서는 enabling technology로 SDN (Software Defined Networking)[1], SON (Self-Organizing Network)[2], SIP (Session Initiation Protocol)[3] 기술을 포함한 Plug-and-Play Operation, 중앙 네트워크 자율관리, 품질 보장 텔레오퍼레이션을 위한 동적 네트워크 슬라이싱, 전원/배터리 동시 지원 유·무선 네트워킹 핵심 기술을 연구 및 개발하였다.

본 논문에서는 우선적으로 해외에서 연구되고 있는 재난용 유·무선 통신서비스 최신 기술들을 분석·소개하고, 국내 원자력발전소 및 자율차량 원격제어 환경의 다양한 요구사항을 분석하여 실제 적용 가능한 원격 자율 제어 차량 텔레오퍼레이션 및 극한 자연재해 복구 환경에 적합한 비상 통신망의 최적 구조를 설계하고, 설계된 구조를 구현하기에 적합한 핵심 요소 기술들을 맞춤형으로 개발하여 Proof of Concept (PoC) 시스템을 개발하였다. 본 PoC 시스템은 한국자동차연구원의 원격자율차량 시험 테스트 베드와 운영 중인 원자력 발전소 및 유럽 여러 국가의 소방청에서 운영 중인 재난 모의 현장에 시범 적용하여 현장 적합성을 검증하였다. 본 연구에서는 비상통신망의 제공 서비스로 원격 제어 차량 텔레오퍼레이션에서 발생하는 비디오/오디오 스트리밍 데이터, 각종 차량 센서에서 발생하는 데이터, 차량 제어용 메시지 및 재난 복구에 필요한 유무선 음성 통신과 콘텐츠 스트리밍, 증강/가상현실 스마트안경 및 재난 복구 로봇에서 생성되는 다양한 데이터를 포함한 데이터 통신을 완료하였다.

본 논문의 나머지 부분은 다음과 같이 구성된다. 2절에서는 관련 연구에 대한 분석 결과를 제공한다. 3절에는 제안된 원격자율제어차량 텔레오퍼레이션 및 재해 복구용 올인원 휴대형 비상통신망 장치 및 서비스의 구조 설계 및 핵심 메카니즘을 설명한다. PoC 시스템 구현, 기능 검증/시험 및 해당 평가 결과는 4절에서 서술한다. 마지막으로 5절은 논문의 마무리 및 향후 연구에 대해 간략히 소개한다.

II. 관련 연구

2.1 원격 차량 제어 기술 (Teleoperation)

원격 차량 제어 기술은 V2N2X 통신을 이용하여 원격에서 차량을 모니터링, 진단하고 동시에 차량을 실시간으로 제어하는 기술로서, 원격모니터링, 원격진단, 원격어시스트, 원격 제어로 구성되며, 통신 인프라를 기반으로한 서비스이기 때문에 네트워크 품질 관리는 원격제어 서비스에 있어서 핵심 기술이다. 원격제어 서비스는 서비스 제공자와 서비스 환경에 따라 Localized communication (WiFi, WAVE/DSRC, 5G-V2X, C-V2X 등)과 Networked Communication (4G, 5G, B5G 등)이 주요 통신시스템으로 적용될 수 있으나, 현재는 주로 WiFi, WAVE/DSRC, 네트워크 슬라이싱 기술이 적용되지 않은 5G-V2X 기술이 적용되고 있다.

2.2 유럽 RECODIS WG-1의 비상통신망 재구성 연결기술[4]

본 연구회에서는 다음과 같이 3가지 기술 대안을 제시하고 있다:

- SDN을 이용한 망 재구성 기술: 네트워크 재구성 과 프로그래머블 제어가 용이하여 재난 경보시 네트워크를 재구성하며, 논리적이고 중앙집중제어적 이어서 물리적 네트워크 시스템과 분리되어 소프트웨어적 처리가 가능한 기술
- Network Virtualization을 이용한 망 재구성 기술: SDN 인프라 기반 위에 다수의 가상화된 tenant들을 운용함으로써 자원의 효율성을 높임. 각 tenant별로 SLA 계약을 맺어 가상 토폴로지 상에서 최소한의 QoS 요구사항을 맞춰줄 수 있으나 제어 채널의 고장 혹은 OpenFlow[5] 스위치의 Forwarding rules 업데이트 고장이 발생한다면, 성능 저하, 상태 불일치 혹은 링크 상의 급작스런 과부하 (over-utilization)를 초래할 수 있어서 “경보” 기반의 네트워크 재구성이 가동되도록 해야 하는 제약 조건이 있음
- NFV[6]를 이용한 망 재구성 기술: 상기 두 기술을 모두 접목하여 뛰어난 유연성과 네트워크 프로그래머빌리티를 가지고 있어서 일반적으로 예측 불가능한 네트워크 두절(붕괴)에 빠르게 대응이 가능한 기술로서, SDN/NFV/Cloud 네트워크의 재난 시,

CP(Control Plane)/UP(User Plane)-생존성 모두를 고려할 수 있는 기술이다.

2.3 유럽 5G PPP의 SelfNet 통신망관리자 동화(SON) 연결기술[7]

본 연구는 5G 네트워크의 재난시 비상통신망 구축 및 운용 관리를 위해 제안한 솔루션으로 SDN/NFV 및 SON 기술을 활용함으로써 다음의 같은 장점들을 제공한다.

- 가상화된 SDN/NFV 네트워크는 유연하고 동적으로 손쉽게 매뉴얼에 따라 관리할 수 있음
- Self-Network 관리로 OPEX 절감이 가능함
- 자동화되고 상황에 적절한 동적 프로비저닝 서비스 제공이 가능함

그림 1은 SelfNet 아키텍처 내의 각 계층들간, 각 네트워크기능들간의 상호작용 인터페이스를 나타낸다.

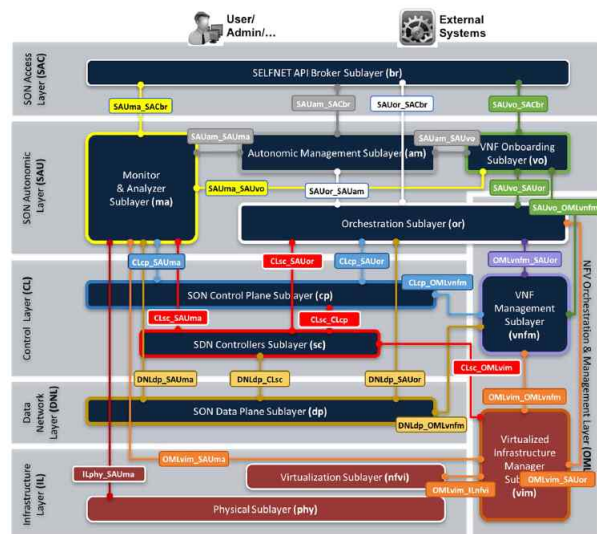


그림 1. SelfNet 아키텍처
Fig. 1. SelfNet Architecture

- SAC(SON ACcess layer): 최상위 계층으로 외부 사용자와 접속을 위한 인터페이스
- SelfNet API Broker Sublayer: 외부 BSS/OSS/GUI에 시스템 자율관리 기능을 제공하는 SON API
- SAU(SON AUtonomic layer): 최상위 바로 밑의 계층으로 자율관리 기능을 수행
- Monitor & Analyzer Sublayer: 네트워크 상태, 성능, 장애 및 품질 관련 정보를 수집/분석하는 계층
- Autonomic Management Sublayer: 수집 및 분석된 정보를 기반으로 자율 관리 조건을 진단 및 생

성 기능을 제공

· **Orchestration Sublayer:** PNF/VNF로 구성된 하부 네트워크상의 다양한 자율 관리 액션에 대한 조율 절차를 수행

· **VNF Onboarding Sublayer:** VNF 기능을 프레임 워크 내에 탑재해 운영 준비를 하는 기능을 제공

2.4 TRS & PS-LTE

관련 기술로 ETSI (European Telecommunications Standards Institute) TETRA (Terrestrial Trunked Radio) [8] 표준 기반의 한국형 디지털 TRS (Trunked Radio System) [9], D2D (Device-to-Device) 표준 기반 국내 기술, 3GPP (3rd Generation Partnership Project) PS-LTE (Public Safety - Long Term Evolution) [10] 표준 기반의 한국형 PS-LTE 기술 등이 존재한다.

한국형 디지털 TRS는 현재 응급 재난이나 비상 상황 발생 시에 사용되고 있는 무선통신망으로 소방청, 경찰청, 철도청 등 국가 중요 기관에서 널리 사용하고 있다. 주요 특징으로 다양한 무선 주파수와 이중 단말 기술로 인한 상호연동이 어렵고, 무선 중심의 넓은 지역을 커버하기 위한 복잡한 무선통신 기술을 사용하고 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해 3GPP는 기존 LTE 서비스에 공공재난 안전 통신망에 필수로 요구되는 기능인 단말들간 직접통신, 그룹통신, 직접 무선통신, 핵심망 연결 붕괴시 독립망 구축 기술 등을 추가하여 멀티미디어 동영상 서비스를 제공하기 위한 PS-LTE 표준을 제정하였다. 이 표준을 한국의 상황에 맞게 보완한 한국형 PS-LTE를 2014년에 채택하여 국가재난안전통신망을 2019년에 시작하여 현재 구축 완료하고 시험 서비스를 진행 중에 있다.

상기의 관련 연구들은 적용 대상이 되는 고유한 환경들을 가정하고 있으며 주파수 간섭, 두꺼운 콘크리트 건물 내벽, 방화문 등의 제한조건이 많은 원전 혹은 재난 현장 내 비상시에 적용하기에는 많은 어려움이 있으며, 원격제어 환경에서도 동적인 환경 적응형 고품질의 통신서비스가 요구되나 이를 충족하지 못하는 상황이며, 특히 본 연구과제에서 가정하는 모든 통신 설비가 고장이 나고 파괴된 재난 상황에서 기본 비상통신 환경을 자동으로 구축하고 응급 서비스하는 기술로는 변경이나 보완 없이 적용하기에는 한계가 있다. 따라서 본 논문에서는 관련 핵심 요소 기술들을 기반으로 텔레오퍼레이션 및 다양한 재난 환경의 복구에 적합한 올인원 휴대

형 특화망 장치 및 자율 제어/관리 기술을 제안한다.

III. 시스템 요구사항 및 구조

3.1. All-in-One Portable 비상통신망 Kit 구조 요구사항

본 절에서는 제안 시스템의 기능 요구사항을 간략히 정리하였다.

- B5G/6G 환경에서 다이나믹 네트워크 슬라이싱 (Dynamic Network Slicing) 기술을 적용하여 차량 원격제어(teleoperation) 서비스의 실시간성과 신뢰성을 향상할 수 있는가?
- 신속한 구조 작업을 위해 재난현장통신시스템을 최대 30분 이내 구축할 수 있는가?
- 긴급 상황에서 신속한 구조작업을 위해 FR(First Responder) 한 사람으로 비상통신망을 구축할 수 있는가?
- FRs의 통신 셋업 시간과 복잡성을 줄이도록 손쉬운 통신망 구축과 구성 프로세스를 제공하는가?
- 이동 휴대성과 운송 편의성을 위해 2개의 손잡이가방으로 되어 있는가?
- 장시간 작업을 위해 최대 14시간 배터리-전원을 제공하는가?
- 이중화 및 백업 솔루션을 제공하는가?
- 자율 네트워크 구성 및 장애 발생 시 자동복구가 가능한가?
- 음성/영상/이미지/텍스트/센서/GIS 및 재난사고 데이터의 상호작용을 보장하는가?
- 험준한 지형을 포함하여 최대 5km²의 재난지역에 비상통신을 제공할 수 있는가?
- 구조장비들(예: OWL드론, 4족보행로봇개, SNAKE로봇, 웨어러블 측위발찌/생체슈트 등)이 여러 네트워크 상에서 채널 할당과 필요 대역폭, 우선순위 서비스, 라우팅/저장/처리자동화/통신자원 등 네트워크 가용성을 보장하는가?
- +45°C ~ -30°C의 온도 범위 내에서, 강풍/먼지/물끼얇음에도 내구성/신뢰성을 보장하는가?
- 방수 및 습한 환경에서 작동 가능한가?
- 대기오염, 먼지, 연기, 재, 모래 등 가혹한 재난환경에도 작동 가능한가?
- 100% 습도에서 긴급메시지 우선순위 송·수신, HQ/Commander/FRs/Robots 그룹 분류 통신 가능한

가?

다음은 All-in-One Portable 비상통신 장비의 주요 KPI 항목이다.

- 최종목표 비상통신망 Plug&Play Set-up 시간: 30분 이내
- 최대 동시 접속 (VoIP)사용자 수: 200명
- 통신장비 내 배터리만으로 작동 지속시간: 8시간
- 무선 주파수 도달범위: 1,000m²
- Download / Upload 트래픽 성능: 100M/20Mbps

3.2. 비상통신망 Kit 주요 기능 요소

본 절에서는 본 고에서 제안한 All-in-One 비상통신망 시스템 개발에 필요한 핵심 기술을 설명한다.

• One-man 휴대형 장비

네트워크 구축에 전문 지식이 없는 재난 현장 운전원 한 명이 들고서 최적의 재난 현장으로 쉽게 이동 가능하도록 장비 형태가 단순하고 손잡이나 밴드가 제공되어야 하며, 최대 20kg 미만의 무게로 제작이 되어 현장 운전원 한 명 만으로도 쉽게 구축 가능하도록 설계 제작되었다.

• Power-on/Cable Plug&Play 자동 통신망 구축 통신 비전문가인 재난 현장 운전원들이 매뉴얼에 따라 비상통신망 장비를 지정된 장소로 이동한 후, 뚜껑을 열고 전원 버튼만 on 시키면 자동으로 Private 5G 망이 구축되도록 설계 제작되었다.

• 오픈소스 Private 5G Core/RAN

제안한 비상통신망은 비상시임에도 불구하고 원활한 구조 활동 지원을 위해서 실시간 동영상 화상 통신 및 초실감 영상 전송과 같은 고품질 서비스를 제공하기 위해서는 이들이 요구하는 고대역폭 데이터 전송 및 저지연 데이터 통신 서비스 제공이 가능해야 한다. 이를 위해서 본 제안에서는 오픈소스인 OAI(OpenAirInterface) 5G Core Network와 RAN gNB를 하나의 One-Box 형태로 설계 제작하였으며 좁은 공간의 한계를 해결하기 위해서 초소형 미니 PC 기반으로 내부 서버들을 구성함으로써 공간과 무게, 성능 문제를 동시에 해결하였다.

• 다중 5G 네트워크 슬라이스 서비스

본 비상통신망 장비는 다양한 서비스에 대하여 서로 다른 QoS 제공을 위해서 5G NSSF(Network Slice Selection Function) 서비스를 이용하여 멀티

네트워크 슬라이스 서비스 Private 5G 망을 구축하여 최적의 네트워크 슬라이스 서비스를 제공가능하도록 구축 완료되었다.

• 무전원 Battery powered

극한 재난 상황에서 가장 기본적인 요구사항은 대부분 초기 골든타임 내에서는 정상적인 전원 공급이 전면 중단된다는 환경을 가정하고 대응해야 된다는 사실이다. 이를 위해서 지원되어야 하는 유일한 방안은 배터리를 통한 전원 공급이다. 그러나 현재 운영 중인 대부분의 네트워크 장비는 정상 전원이 공급되는 기본 가정 하에 개발되었으며 배터리는 급한 전원 장애 발생시 임시 대안으로 짧은 시간 동안 동작할 수 있는 정도의 방안이 고려된 경우는 있지만 대부분의 재난 현장의 골든타임 시간 동안에 작동이 가능하도록 하기 위해서는 최소 8시간 이상의 운영 요구사항 설계가 기본으로 필요하다.

• 로컬 데이터 네트워크 및 멀티 WAN 인터넷 인터페이스

제안하는 비상통신망 키트는 전원만 켜면 자동으로 구축되어 작동하지만 필요에 따라서 내부 로컬 데이터 망 서버와의 연결을 위해서 내부망 연결 인터페이스 서비스 또한 제공되어야 한다. 이는 간단히 내부 서버를 위한 데이터 케이블을 서로 연결만 함으로써 자동으로 구축 완료하도록 설계되었다. 또한 외부 WAN 인터넷 망과의 연결을 위해서 UTP 케이블과 WiFi 인터페이스를 동시에 이중화하여 (Active/Stand-by) 5G 특화망의 높은 서비스 가용성을 보장할 수 있는 것이 특징이다.

• SDR(Software Defined Radio) 기능을 포함한 USRP 장비를 이용한 멀티 Band 무선 주파수 설정 제공

본 고에서 제안하는 비상통신망 장비의 활용성을 쉽게 확장하고 여러 재난 현장에서 빠르게 검증하기 위해서, gNB에 SDR(Software Defined Radio) 주파수 신호 전송/수신이 가능한 범용 USRP(Universal Software Radio Peripheral) 장비를 이용하여 구축 제작함으로써 다양한 5G 주파수 대역을(예: N41, N77, N78, N79 등) 설정하여 운영 가능한 것 또한 큰 장점이다. 마지막으로 짧은 무선 신호를 확장하기 위해서 유선 IP NAT 라우터를 이용하여 중앙 비상통신망 노드로부터 쉽게 확장 구축 가능하도록

설계되었으며, 뿐만 아니라 신호가 도달하지 않는 빌딩 내부에서도 통신이 가능하도록 5G NAT 라우터를 활용하여 추가 확장 가능하도록 설계된 것도 특징이다. 이러한 NAT 라우터의 이더넷 포트나 WiFi 서비스를 이용하여 5G 모뎀이 들어 있는 단말만이 아니라 일반 통신 장비들도 간단히 비상통신망에 접속하여 5G 통신 서비스를 제공받을 수 있도록 확장 설계되었다.

3.3. All-in-One Portable 비상통신망 Kit 시스템 구조

본 절에서는 상기의 사용자/시스템 요구사항에 기반한 극한 재난 상황에서 활용 가능한 All-in-One Private 5G 비상통신망 구조에 대하여 서술한다.

그림 2는 All-in-One 비상통신망 Kit 노드의 외부 인터페이스 구조 설계도를 보여주고 있다.

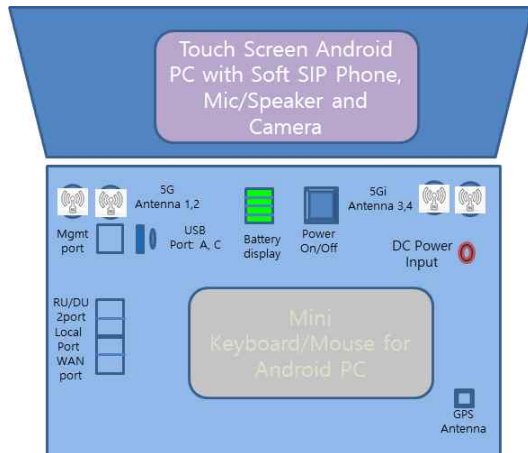


그림 2. All-in-One 비상통신망 Kit 노드의 외부 인터페이스 구조

Fig. 2. External I/F of All-in-One Emergency Communication Kit

비상통신망 KIT 노드는 상단에 기본 음성 서비스 제공 및 내부 시스템 관리/모니터링을 위한 Tap 장비가 장착되고, 노드 하단에는 전원 버튼, 전원 충전 및 상시 전원 입력을 위한 전원 입력 포트, 5G 무선 주파수 신호를 수신/송신할 수 있는 4개의 안테나 연결 포트, 그리고 좌측 하단에는 외부 WAN 연결을 위한 GbE 포트 1개, 내부망 연결을 위한 2개의 이더넷 포트, 그리고 5G 망 추가 확장을 위한 RU/DU 연결 포트 한 개로 각각 구성되어 있다. 마지막으로 5G Core Network 노드에 연결된 관리 이더넷 포트와 USB 포트 2개도 설계되었다.

다음은 All-in-One 5G 비상통신망 노드의 외부 인터페이스에 대한 상세 스펙 내용이다.

- SIP Soft Phone with Receiver/Dial Touch Pad Screen, mic/speaker and camera
- RU/DU Data Gigabit Ethernet port (RJ45 UTP): 2 GbE port
- Local Host Edge Gigabit Ethernet port (RJ45 UTP): 1 GbE port
- WAN Internet Gigabit Ethernet port (RJ45 UTP) : 1 GbE port
- Management port : 1 GbE (RJ45 UTP), 1 USB 3.0 port
- 4 Wireless 5G Radio Antenna [SDR(B210) TX/RX Radio - SMA extension cable - SMA Female Adapter - External 5G antenna]
- 5-Volt Active GPS Antenna
- Display status/remains of battery
- DC input port for charging battery
- Power On/Off button switch (status light)
- Case Size : L411 * W321 * 165H [Wireline spine node size]
- NANUK 933 Size: 19.9 in x 16.1 in x 10.1 in (505 mm x 409 mm x 257 mm) [Private 5G Case]

다음 그림 3은 외부 인터페이스 디자인 설계 초기 도면을 보여주고 있다. 최종 설계 도면과는 실제 차이가 있으나 전체적인 규격은 동일하게 설계 제작되었다.

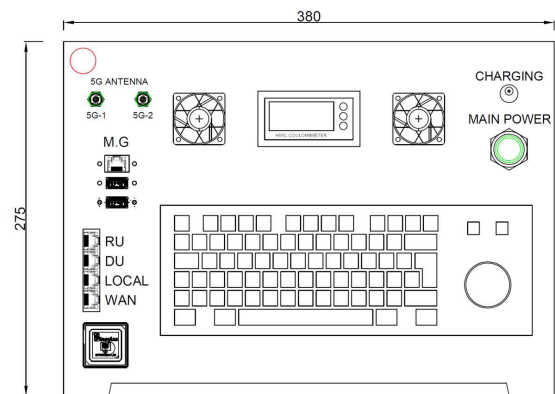


그림 3. All-in-One 비상통신망 외부 인터페이스 상세 설계도면

Fig. 3. Design of All-in-One Emergency Communications External I/F

그림 4는 All-in-One 비상통신망 Kit 노드의 내부 장비와 연결 구성도를 보여주고 있다.

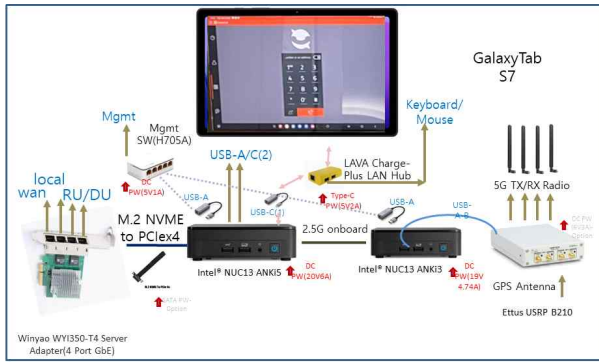


그림 4. All-in-One 비상통신망 Kit 내부 장비 연결 구성도
Fig. 4. Internal Connectivity of All-in-One Emergency Communication Kit

비상통신 노드의 내부 구조는 전체적으로 Intel NUC 기반 미니 PC 2개로 구성되어 있으며 좌측은 OAI 5G Core Network을 위해서 NUC13 ANKi5 서버 위에 Ubuntu 22.04 OS를 설치하였고 멀티 기가비트 이더넷 포트 제공을 위하여 M.2 NVME to PCIe4 변환 케이블을 이용하여 PCI NIC 카드와 직접 연결하였다. 다음 우측의 PC는 OAI gNB 서비스를 위한 것으로 NUC13 ANKi3 서버 위에 마찬가지로 Ubuntu 22.04 OS를 설치하였으며 SDR 무선 주파수 송수신을 위한 Ettus B210 USRP 장비를 USB로 직접 연결하였으며 외부로 무선 주파수 안테나와 GPS 케이블을 연결하도록 설계 구축하였다.

IV. 시스템 구현 및 성능 검증

4.1. 비상통신 Kit 시제품 제작 구현

본 절에서는 제안된 All-in-One 비상통신망 Kit 시작품을 제작하고 기본 인터넷 연결 서비스 기능 시험과 실제 화상회의 서비스 시연 기능 검증 결과를 소개한다. 그림 5는 실제 제작한 All-in-One 비상통신 Kit 노드 화면이다.

비상통신망 Kit 노드는 개방을 하지 않을 경우 방수 처리가 되는 단단한 케이스(NANUK 933)를 이용하였으며 뚜껑(lid)을 오픈하면 크리스탈 판넬을 이용하여 내부가 보이도록 제작하였다. 하단의 구조는 전체적으로 3단 구조도 되어 있으며 맨 하단에는 대용량 배터리가 내장되었으며 중간 층은 전원 제어/송신부와 USRP가 들어 있고 맨 위층에는 NUC PC 2대와 이더넷 스위치가 장착되도록 제작하였다.

이렇게 제작된 비상통신망 노드에 각각 OAI 5G



그림 5. All-in-One 비상통신망 Kit 노드 시작품
Fig. 5. All-in-One Emergency Communication Kit PoC System

Core Network(v2.1.0), gNB openairinterface5g (2025.w20) 버전을 각각 설치하여 구축 제작 완료하였다.

기본 Private 5G 망에 추가로 네트워크 슬라이스 서비스 환경 구축을 위하여 3개의 슬라이스를 그림 6과 같이 구축하였다. NS 1은 SST=128, SD=0x08

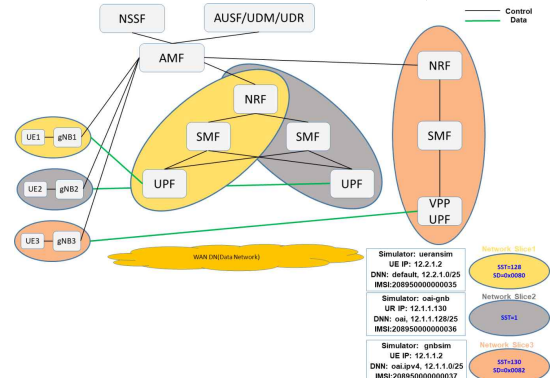


그림 6. Private 5G 망에 구축된 네트워크 슬라이싱 망 구성도

Fig. 6. Network Slicing Architecture of Private 5G Network

이며 ueransim gNB를 이용하여 연결되었으며 NS

2는 SST=1, SD=0xFFFF로 oai-gnb 시뮬레이터로 연결되었으며 마지막 NS 3은 SST=130, SD=0x82로 gnb-sim 시뮬레이터에 연결되도록 구축 완료하였다.

4.2. 비상통신 Kit 시제품 성능 시험 및 검증

상기에서 제작된 All-in-One 비상통신망 Kit 노드의 배터리를 제거한 무게는 약 12kg으로서 내장 배터리를 포함한 경우는 약 15kg 무게로 한 사람이 들고 이동하기에 충분한 무게로 측정되었다. 본 논문에서 제작한 비상통신망 Kit의 기본 기능 시험을 위하여 상용 5G 스마트폰에 Private 5G 프로그래머블 USIM (Sysmocom sysmoSIM-SJ2)을 장착하여 그림 7의 구조와 같이 인터넷에 연결되는 것을 확인하였다.

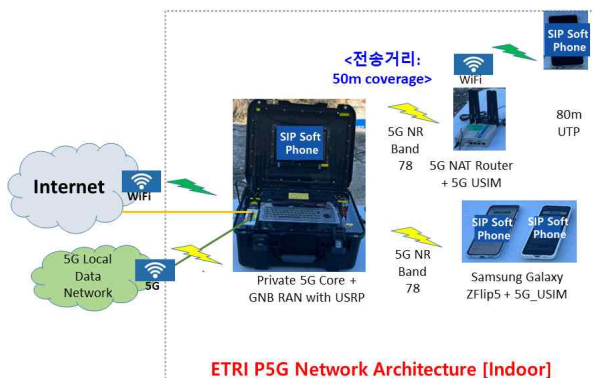


그림 7. Private 5G 비상통신망 구조도 구축 예제
Fig. 7. Example of Private 5G Emergency Communication Network

5G 스마트폰은 정상적으로 비상통신망에 연결이 되었으며 외부 데이터 네트워크로 상용 인터넷 망에 연동이 되었다. 5G NAT 라우터를 사용하거나 직접 5G 무선으로 연결한 인터넷 성능 속도는 그림 8과 같이 두 개의 스마트폰을 동시에 수행한 결과 DL/UL=85.5/15.9Mbps, 41ms 지연, 12ms 지터의 결과를 보여주었다. 다만 내부 USRP 장비의 무선 신호가 Lab 테스트 수준으로 낮아서 전송거리는 50m 이내로 제한된 결과가 나왔다. 이는 이후에 야외용 고출력 RU를 포함한 gNB 성능을 추가 확장함으로써 해결 가능할 것으로 예상된다.

고품질 화상회의 서비스 검증 (5G 네트워크 주파수
범위 확장 및 Video conferencing 서비스 현장 기
능 검증)



Speedtest 측정 결과(동시):
Download/Upload=85.5/15.9Mbps

그림 8. 스마트폰 2개 동시 인터넷 성능 측정 결과 화면
Fig. 8. Internet performance testing results of the two Smartphone

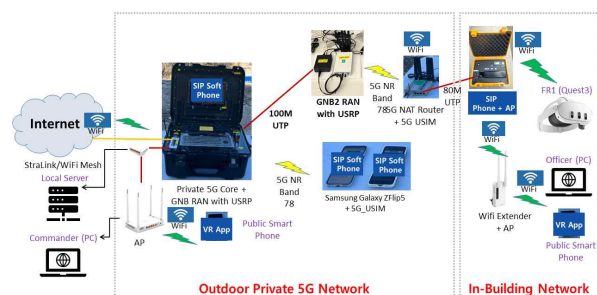


그림 9. Private 5G 비상통신망 추가 확장 구축 구조도 예제
Fig. 9. Extended Private 5G Emergency Communication Network

그림 9는 기존 5G 네트워크 주파수 커버리지 확장을 위한 추가 구조 확장과 Video conferencing 서비스 제공을 위한 WiFi 확장 설계 구조를 보여주고 있으며, 기본 Private 5G 망에 추가 구축 완료하였다. 먼저 거리 확장을 위하여 중앙 5G Core Network 노드에 이더넷 케이블이 연결된 gNB를 추가로 구축하였으며 여기에 5G NAT 라우터를 연결하고 다시 이더넷 케이블을 이용하여 유선 AP를 연결한 후에 마지막으로 WiFi Extender를 이용하여 무선 서비스 범위를 넓게 추가 확장하였다. 이렇게 함으로써 최대 400~500m 범위까지 확장되는 것을 확인하였으며 중앙 HQ(Head Quarter)와 서비스 지역이나 끊김이 없이 매우 만족스러운 고품질의 화상회의 서비스가 원활히 제공되는 것을 확인하였다. 각각의 확장 위치에서의 상세 성능 측정 값은 다음과 같다. 먼저 SIP Soft Phone에서의 인터넷 트래픽 처리 성능은 DL/UL=99.7/18.8Mbps이고, 5G NAT Router의 Wifi에 연결된 경우는 DL/UL=94.3/12.9Mbps, 유선 확장 연결된 AP의 Wifi에 연결된 경우는 DL/UL=69.8/11.6Mbps, 마지막으로 Wi-Fi Extender에 연결된 경우는 DL/UL=63.1/10.7Mbps으로 측정되었다.

V. 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 후쿠시마 원전 사태와 같은 극한 자연재해로 인해 파괴된 통신 기능이나 대형 교통 사고 발생 시나 일시적인 극심한 교통 체증 등과 같은 비상 상황 발생시 원격자율제어 차량의 제어를 위해 현장에서 긴급 비상통신망 구축·복구 및 신속한 멀티모달 데이터 통신서비스를 SDN/SON 기반 기술을 활용하여 의료 비상 구급상자와 같이 네트워크 구급상자를 제작하여 상시 비치해 두었다가 비상시 통신 비전문가들이 필요한 장소로 이동해 연결만하고 전원만 켜면 음성 및 데이터 통신이 가능하게 하는 독립 네트워크가 자율적으로 구축될 수 있는 올인원 휴대형 5G 특화망 통신 장치 기술에 대한 요구사항 분석, 구조 설계 및 구현과 PoC 시험 검증에 대해 기술하였다. 본 제안 기술은 본문에서 예시된 바와 같이 다양한 재난 특수 현장에서 실질적으로 활용될 수 있는 Use Case를 제시하였다는데 의의가 있다고 판단된다.

본 제안 시스템은 실험실과 제한된 현장에서 기술 검증을 위해 제작된 PoC 시스템 기술로 다양한 환경에 노출된 실제 현장 상황에서 적용될 수 있기 위해서는 수백 미터 ~ 수킬로를 지원할 수 있는 RU coverage와 UE ~ CN ~ DN 종단간의 동적 슬라이싱 기능을 지원하기 위한 추가 연구 및 개발이 필요하다. 또한 5G에서 6G로 진화하고 있는 통신 환경을 고려하여 지원할 수 있어야 한다. 이를 위해 네트워크 측면에서 지원되어야 할 연구 이슈들은 향후 연구를 통해서 해결 방안을 제시할 예정이다.

References

- [1] Grag Cross, Open Networking Forum SDN standards, Jan. 2017. Accessed Nov. 15, 2017. <https://www.opennetworking.org/software-defined-standards/overview>
- [2] 3GPP SON, <https://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/105-son>
- [3] Rosenberg, J., Schulzrinne, H., Camarillo, G., Johnston, A., Peterson, J., Sparks, R., Handley, M. and E. Schooler, "SIP: Session Initiation Protocol", RFC 3261, June 2002.
- [4] Massimo Tornatore, et. al. (2017), "A Survey on Network Resiliency Methodologies against

- Weather-based Disruptions", EU-funded RECODIS project
- [5] Science Director, openflow protocol overview, <https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/openflow>
- [6] Jürgen Quittek et. al., "Network Functions Virtualisation (NFV) - Management and Orchestration V.1.1.1", ETSI NFV ISG, Dec. 2014.
- [7] Pedro Neves. et. al. (2017), "Future mode of operations for 5G - The SELFNET approach enabled by SDN/NFV", Computer Standards & Interfaces 54 (2017) 229-8211;246
- [8] ETSI Standard, TErrestrial Trunked RAdio (TETRA), <https://www.etsi.org/technologies/tetra>
- [9] Korea Digital TRS (TETRA) Basic Standard, TTAS.KO-09-0037, April 2005
- [10] 3GPP Public Safety, <https://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/1455-Public-Safety>
- [11] Open Virtual Switch, <https://www.openvswitch.org/>
- [12] Jagadeesan, N.A., Krishnamachari, B: Software-defined networking paradigms in wireless networks: a survey. ACM Comput. Surv. 47(2), 11 p. (2014). Article 27, doi: 10.1145/2655690
- [13] Grag Cross, ONOS open source project, Jan. 2017. Accessed Nov. 15, 2017., <https://www.opennetworking.org/platforms/onos/>.

최 태 상(Taesang Choi)



1988~1991, 컴퓨터통신 석사
1991~1995, 컴퓨터통신 박사
1996~현재, ETRI 책임연구원
<관심분야> SDN/NFV/SON,
네트워크관리, Traffic 관리,
자율관리

윤 상 식(Sangsik Yoon)



1997~1999, 컴퓨터네트워킹 석
사
1999~2003, 컴퓨터네트워킹 박
사
2003~현재, ETRI 책임연구원
2023~현재, (주)아이엔소프트 책
임

<관심분야> SDN/NFV, 통신망관리, Traffic 제어,
QoS 보장, 자율관리, Private 5G/6G, Quantum
Network Simulation

이 준 경 (Joonkyung Lee)



1980~1985, 물리학(전산학) 학
사
1985~1987, 컴퓨터학 석사
1991~1997, 컴퓨터학 박사
1987~현재, ETRI (전)실장/책임
연구원, (현)연구전문위원

<관심분야> SDN/NFV/SON/DPI & (B)5G/Edge통
신, AR/XR, xBMI/Wearable, DRS