

스마트 건설을 위한 효율적인 네트워크 구축 및 관리

(Efficient Network Construction and Management for Smart Construction)

강왕규*, 홍지만**

(Wang-kyu Kang, Jiman Hong)

요약

스마트 건설은 낮은 생산성·높은 재해율 등 전통적 한계를 극복할 핵심 기술로, 성공의 관건은 견고한 네트워크 인프라라고 할 수 있다. 본 고는 스마트 건설의 성공적인 구축을 위하여 계층적 네트워크 모델을 제안한다. 이를 위하여 TVWS·장거리 Wi-Fi·이동형 기지국(COW), LoRa·위성통신을 비교하고, 터널·산악·선형 현장별 결합 시나리오(TVWS+PLC, 장거리 Wi-Fi+전진 COW, LoRa+LEO 위성)를 제안한다. 제안한 설계 방법은 운영·보안 측면에서는 중앙 관제-엣지 병행 구조로 지연·부하를 줄이고, 암호화·AI 이상 탐지로 컴플라이언스를 확보함으로써 안전성과 생산성을 동시에 달성할 수 있음을 보인다.

■ 중심어 : 스마트건설 ; 네트워크 인프라 ; 계층적 네트워크 모델

Abstract

Smart construction is recognized as a key technology to overcome the traditional limitations of low productivity, high accident rates, and poor quality management, with robust network infrastructure being the decisive factor for success. This paper proposes a hierarchical network model (access-backhaul-core) that incorporates MEC and QoS to stably handle heterogeneous traffic. It further compares alternative communication technologies such as TVWS, long-range Wi-Fi, mobile base stations (COW), LoRa, and satellite systems, and suggests combined deployment scenarios for tunnel, mountainous, and linear construction sites (e.g., TVWS+PLC, long-range Wi-Fi+forward COW, LoRa+LEO satellite). From the perspective of operation and security, it presents a roadmap that reduces latency and network load through a central control-edge collaborative structure, while ensuring safety and productivity by applying encryption, AI-based anomaly detection, and compliance measures such as data minimization, anonymization, and access control.

■ keywords : Smart Construction ; Network Infrastructure ; Hierarchical Network Model

I. 서론

건설 산업은 여전히 노동 집약적인 구조에 머물러 있으며, 설계·시공·유지관리 전 과정에 다양한 주체가 분절적으로 참여하는 특성을 지닌다. 이러한 다단계 분업 구조는 정보의 단절과 공유 부족 문제를 초래하여, 프로젝트 전반의 생

산성과 효율성을 저하시킨다. 실제로 대형 건설 현장에서는 설계 변경 사항이 시공 단계에 즉시 반영되지 않거나, 안전 관련 정보가 하도급 협력사와 실시간으로 공유되지 못하는 사례가 빈번하게 발생한다. 이로 인해 품질 관리가 어려워지고, 안전사고 발생 빈도가 높으며, 전체 프로젝트 비용과 기간이 증가하는 악순환이 반복된다. 숙련 인력의 부족과 고강도 노동 환경은 이러한 문

* 정회원, KT 미래네트워크연구소

** 종신회원, 숭실대학교 컴퓨터학부

이 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원이 시행하고 한국도로공사가 총괄하는 “스마트건설기술개발 국가R&D사업(과제번호 25SMIP-A158708-06)”의 지원으로 수행되었습니다.

접수일자 : 2025년 10월 01일

게재확정일 : 2025년 11월 13일

교신저자 : 홍지만 e-mail : jman@ssu.ac.kr

제를 더욱 심화시키며, 건설 산업의 경쟁력을 저해하는 주요 요인으로 작용하고 있다[1].

이러한 한계를 극복하기 위한 새로운 패러다임으로 스마트 건설이 제안되었다[2-4]. 스마트 건설은 기존의 경험·노동 중심 방식을 넘어, ICT, IoT, AI, 클라우드, 디지털 트윈 등 첨단 기술을 건설 전 과정에 접목하여 데이터 중심의 운영 체계를 구축하는 것을 목표로 한다[5]. 즉, 단순히 일부 자동화 장비를 도입하는 수준을 넘어서, 설계 단계에서부터 실시간 데이터 기반의 시뮬레이션과 최적화, 시공 단계에서의 지능형 모니터링과 안전 관리, 유지관리 단계에서의 예측 정비까지 건설 생애주기 전체를 아우르는 디지털 전환이 핵심이다.

그러나 이러한 첨단 기술들이 실질적인 효과를 발휘하기 위해서는 안정적이고 신뢰할 수 있는 네트워크 인프라가 필수적이다. 네트워크가 원활히 구축되지 않는다면, 센서 데이터의 실시간 수집이 어렵고, 클라우드 및 디지털 트윈 기반의 분석·시뮬레이션이 불가능하며, 원격 관제 및 협업 시스템도 정상적으로 작동할 수 없다. 특히 건설 현장은 터널, 지하 구조물, 산악 지대 등 통신 음영지역이 빈번하게 발생하는 환경이므로, 일반 산업 현장보다 네트워크 설계가 훨씬 더 도전적이다. 따라서 스마트 건설의 성패는 첨단 기술 자체의 성숙도뿐 아니라, 이를 지탱하는 네트워크 인프라의 설계와 운영 역량에 달려 있다고 해도 과언이 아니다.

따라서, 본 고에서는 이러한 문제의식에 기반하여 스마트 건설을 위한 계층적 네트워크 구축을 제안한다. 구체적으로는 액세스망-백홀망-코어망으로 이어지는 계층적 네트워크 모델의 필요성과 설계 방안을 제시하고, 터널·지하 공간 등 통신 사각지대를 보완하기 위한 대체 무선 기술의 적용 가능성을 확인한다. 그리고 장기적으로 스마트 건설의 확산을 위해 요구되는 네트워크 운영·보안 관리 전략을 고찰한다. 이러한 논의를 통해 스마트 건설의 성공적 구현을 위한 네

트워크 인프라 설계의 방향성을 제시하고자 한다.

II. 계층적 네트워크 모델

1. 계층적 구조와 음영지역 통신

스마트 건설 현장에서는 IoT 센서의 간헐적 저용량 데이터부터 드론의 고화질 영상까지 다양한 데이터가 생성된다. 각 데이터 유형마다 요구되는 네트워크 성능이 상이하다. 예를 들어, 온도·습도 등 환경 센서 데이터는 수 Kbps 수준으로 수 초의 지연이 발생해도 큰 문제가 없지만, 실시간 CCTV나 드론 영상은 수백 Mbps 이상의 대역폭이 필요하고, 수 초의 지연도 치명적일 수 있다[6].

또한 원격 중장비 제어 신호는 데이터량은 작지만 지연 요구가 밀리초(ms) 단위로 매우 엄격하다. 이러한 상반된 요구사항을 단일 네트워크 기술로 모두 충족하기 어렵기 때문에, 계층적 네트워크 아키텍처를 도입하여 계층별로 적합한 기술을 적용하는 전략이 필요하다.

아울러 건설 현장은 산악 오지나 지하 터널 등 통신 음영지역이 많아 상용 LTE/5G 망이 닿지 않는 경우가 발생한다. 따라서 이러한 환경에서는 상용 망을 보완할 수 있는 대체 통신 기술이 필수적이다.

가. 계층적 네트워크 모델의 필요성

<그림 1>에서 보여주듯이, IoT 네트워크 표준 아키텍처는 데이터 수집, 전송, 활용의 3계층으로 구분되며, 스마트 건설 현장에서는 액세스망-백홀망-코어망 구조로 대응된다[7].

- 액세스망은 센서, 장비, 드론, CCTV 등이 데이터를 수집하는 계층으로, 필요 시 MEC를 통해 현장에서 전처리를 수행한다.
- 백홀망은 여러 액세스망 데이터를 중앙 시스템으로 전달하는 계층으로, 광케이블이나 전용 무선 링크가 활용된다.

- 코어망은 클라우드·데이터센터에서 데이터를 통합 저장·분석하며, AI 분석 및 디지털 트윈 시뮬레이션을 수행하는 중앙 시스템이다.

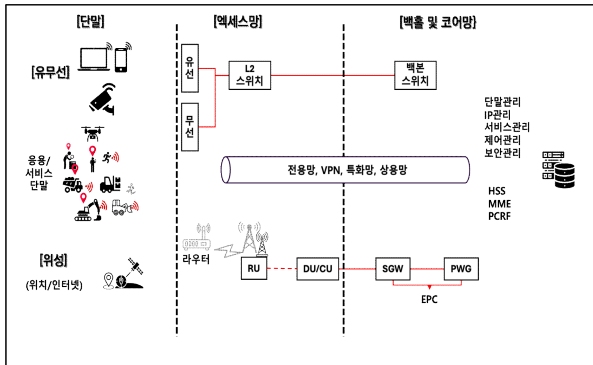


그림 1. IoT 네트워크 계층 구조

계층별로 역할을 분리하면 최적 기술을 활용할 수 있고, 특정 계층의 장애 발생 시 신속히 격리·복구가 가능하여 전체 시스템 안정성을 높일 수 있다. 특히 코어망을 클라우드 기반으로 운영하면 모든 이해관계자가 동일한 데이터를 실시간 공유함으로써 협업 효율성이 극대화될 수 있다 [8].

실제 사례에서도 이러한 효과가 입증되었다. 국내 고속도로 건설 현장에서 액세스망에 Wi-Fi와 LoRa를 병행해 센서 데이터와 CCTV 영상을 수집하고, 백홀망으로 TVWS 무선 링크를 활용해 터널 구간의 음영지역을 보완하였다. 코어망은 클라우드 기반으로 운영하여 kbps급 센서 데이터부터 Mbps급 영상 데이터까지 끊김 없이 전송·처리할 수 있었다[9].

이탈리아 Lungro 터널 프로젝트에서는 LoRaWAN 센서망과 클라우드 BIM을 연계해 작업자 위치 추적과 구조물 상태 모니터링을 실현했고[10], 일본 NTT 도코모는 5G를 이용하여 중장비 제어 현장을 실증한바 있다[11].

이러한 사례들은 계층 구조에 따라 이기종 네트워크를 구성하는 것이 필수적임을 보여준다.

나. 음영 지역을 위한 대체 통신 기술
상용 LTE/5G망이 닿지 않는 산악 지형이나 지하 터널에서는 센서 데이터 전송, 원격 제어, 현장 모니터링이 제한된다. 이러한 음영 지역을 보완하기 위해 TV 화이트 스페이스(TVWS), 장거리 Wi-Fi, 이동형 기지국 차량(COW, Cell on Wheels), LoRa 및 LPWAN, 및 위성통신(LEO 위성) 등의 대체 통신 기술이 활용되고 있다.

<표 1>은 이러한 대체 통신 기술의 특성과 장단점은 보여준다. 이러한 대체 통신 기술들은 건설 현장 지형·규모·서비스 요구에 따라 적합한 기술을 선택하거나 복합적으로 구성하는 것이 중요하다. 예를 들어, 지하 터널에서는 TVWS와 PLC를 병행하고, 산악 도로 현장에서는 장거리 Wi-Fi와 COW를 조합하며, 해외 오지 현장에서는 LoRa 센서망과 위성을 결합하는 방식이 활용될 수 있다.

표 1. 건설 IT의 음영지역 대체 네트워크 기술

기술	장점	단점
TVWS	<ul style="list-style-type: none"> • 낮은 주파수 대역 활용 • 장거리 전파 및 장애물 투과 우수 • 면허 불필요 대역으로 추가 비용 저렴 • 지하·산간까지 통신 커버리지 확대 가능 	<ul style="list-style-type: none"> • 주파수 규제로 채널·출력 제한 • 최대 수십 Mbps로 전송속도 제한 생태계 미흡 • 상용 장비 및 운용 사례 적음
장거리 Wi-Fi	<ul style="list-style-type: none"> • 수백 Mbps급 고속 데이터 링크 구현 • 표준 Wi-Fi 활용 • 장비 저렴, 설치 용이 • 도로 등 선형 현장 장거리 P2P 백본에 최적 	<ul style="list-style-type: none"> • 가시거리(LoS) 필수 • 장애물 통과 취약 • 전파 간섭·안테나 정밀조준 등 세밀한 설계 필요 • P2MP 구성 제한, 링크 장애 시 영향 큼 (이중화 필요)
이동형 기지국	<ul style="list-style-type: none"> • 기존 LTE/5G 단말로 현장 통신 사용 (호환성) • 음성·영상 등 고품질 서비스 제공 • 현장 상황에 맞춰 커버리지 유연 조정 가능 	<ul style="list-style-type: none"> • 구축 비용 높음 (차량·기지국 장비) • 백홀 연결 필요 (위성 등 추가 수단 요구) • 전원·환경 등 운용 조건 고려 필요
LoRa	<ul style="list-style-type: none"> • 초저전력·장거리 통신 • 저비용, 대규모 IoT 연결 적합 • 비면허 대역으로 운용 자유로움 	<ul style="list-style-type: none"> • 속도 매우 느림 (kbps급) - 대용량 전송 불가 • 주로 단방향 - 실시간 제어 응답 한계 • 게이트웨이당 연결 기기 수 제한 (충돌 시 지연)
위성 통신	<ul style="list-style-type: none"> • 전 지구 커버리지 - 어디서나 통신 가능 • LEO 위성으로 지연 대폭 감소 	<ul style="list-style-type: none"> • 요금·장비 비용 매우 높음 (기존 위성 기준) • 지연시간 큼 (수십~수백 ms) • 기상·지형 영향으로 신호 저하 가능

2. 네트워크 관리 및 보안 전략

스마트 건설 네트워크는 구축 이후에도 안정적인 운영과 강력한 보안 확보가 핵심이다. 이를 위해 <그림 2>에서 보여주듯이 중앙 관제와 현장 엣지 컴퓨팅을 연계한 다층 운영 구조를 마련하고, 서비스 품질(QoS) 관리와 다양한 보안 기술을 종합적으로 활용해야 한다.

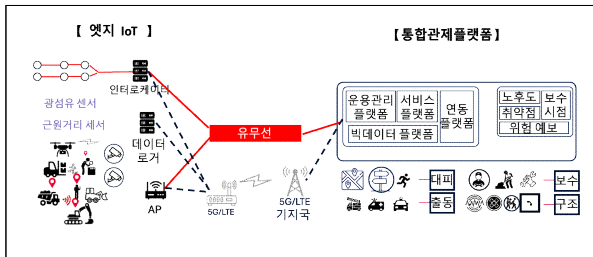


그림 2. 엣지 IoT와 중앙 관제 플랫폼

(1) 중앙 관제센터와 엣지센터의 연계 운영

중앙 관제센터와 현장 엣지 센터의 협업 운영은 스마트 건설 네트워크의 근간이 된다. 중앙은 여러 현장의 상황을 종합 모니터링하며 대규모 데이터를 분석해 정책 결정을 내리고, 엣지 센터는 각 현장 가까이에서 센서 데이터를 전처리하며 긴급 상황에 즉각 대응한다. 이러한 구조는 데이터 전송량 감소, 백홀 비용 절감, 그리고 실시간 제어 신뢰성을 높여준다. 그러나 데이터 일관성 유지, 전문 인력 확보, 중복 처리 방지 등 설계·운영 상의 도전과제도 존재한다.

(2) 품질 보장(QoS) 관리의 중요성

스마트 건설 네트워크에는 센서 데이터, CCTV 영상, 제어 신호 등 다양한 트래픽이 혼재한다. QoS 관리가 부재하면 대용량 영상 데이터가 제어 신호를 지연시켜 안전사고를 유발할 수 있다. 따라서 트래픽을 종류별로 분류해 우선 순위와 자원을 차등 배분하는 QoS 정책이 필수적이다. 5G 네트워크 슬라이싱과 TSN(Time-Sensitive Networking) 기술은 이러한 요구를 충족시킬 수 있는 대표적 방안이다. 그러나, QoS 정책은 공정 단계와 트래픽 특성

변화에 따라 주기적으로 최적화해야 하며, 그렇지 않으면 오히려 병목 현상을 초래할 수 있다.

(3) 네트워크 보안 전략

스마트 건설 네트워크는 수많은 IoT 기기와 민감 데이터가 연결된 사이버-물리 융합 시스템이므로 보안이 필수적이다. 주요 전략은 다음과 같다.

- 데이터 암호화와 접근 통제: 종단 간 암호화(E2EE)를 통해 기밀성을 보장하고, 다중 인증(MFA) 및 기기 인증으로 무단 접근을 차단해야 한다[12]. 암호화는 데이터 무결성을 높이지만 성능 지연과 관리 복잡성을 초래할 수 있어 중요도 기반 차등 적용이 필요하다.
- AI 기반 이상 탐지: 머신러닝 모델을 통해 정상 트래픽 패턴을 학습하고, 비정상적 데이터 급증이나 제어 명령 이상을 탐지할 수 있다. 이는 기존 시그니처 기반 보안보다 유연하며, 대규모 로그 분석 자동화를 통해 운영자의 부담을 줄인다[13]. 그러나, 오탐지(false positive) 최소화를 위해 지속적인 모델 학습·튜닝이 요구된다.

스마트 건설 네트워크의 관리·보안 전략은 구현이 다소 복잡하고 초기 투자가 높더라도 현장 안전성과 생산성 향상을 위해 반드시 갖춰야 할 분야이다. 궁극적으로 중앙-엣지의 조화로운 운영, QoS로 보장된 안정적 통신, AI·블록체인 등을 활용한 선제적 보안, 개인정보 보호 준수가 뒷받침될 때 스마트 건설 현장의 안전 혁신과 생산성 향상을 동시에 달성할 수 있다.

III. 결 론

본 고에서는 스마트 건설 환경에서 네트워크 인프라가 갖는 결정적 중요성을 다각도로 살펴보았다. 또한 국내외 실증 사례와 최신 기술 동향을 토대로, 스마트 건설 네트워크의 구축 및 운영에 필요한 구체적 방안을 제안하였다.

전통적 건설 산업이 지닌 낮은 생산성과 높은 재

해율, 그리고 분절된 정보 구조의 한계를 극복하기 위해서는 단순한 장비 도입이 아니라, 계층적 네트워크 아키텍처를 기반으로 한 정교한 설계와 관리가 필수적임을 확인하였다.

결론적으로, 스마트 건설 네트워크는 고성능 네트워크 인프라·음영지역 대체 통신 기술·지능형 운영 및 보안 전략의 결합을 통해 구현되어야 한다. 초기 구축 비용과 관리 복잡성이 뒤따르더라도, 이는 안전성과 생산성 향상을 동시에 달성하기 위한 필수적 투자라 할 수 있다.

향후 연구에서는 네트워크 계층 간 표준화, 멀티기술 통합 관리 플랫폼 개발, AI·디지털 트윈 기반 예측적 운영 모델 등이 심화 연구될 필요가 있다. 이를 통해 스마트 건설은 4차 산업혁명 시대의 지속 가능한 건설 혁신을 주도하는 핵심 산업으로 발전할 것으로 판단된다.

이 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원이 시행하고 한국도로공사가 총괄하는 “스마트건설기술개발 국가R&D사업 (과제번호 RS-2020-KA156902)”의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- [1] International Labour Office, “Safety and health in construction: ILO code of practice”, *International Labour Office*, 2020.
- [2] 국토교통부, “스마트 건설 기술 로드맵 2018”, 국토교통부, 2018년
- [3] A. Bakhshi 등., “Construction management and digitalization: A systematic review,” *Journal of Civil Engineering and Management*, vol. 28, no. 3, pp. 161-177, 2022.
- [4] Y. Fang et al., “The role of IoT and AI in smart construction site management,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 35645-35658, 2021.
- [5] M. Salhaoui et al., “Smart Industrial IoT Monitoring and Control System Based on UAV and Cloud Computing Applied to a Concrete Plant,” *Sensors*, Vol. 19, No. 15, 2019.
- [6] ETSI GS MEC 003, “Multi-access Edge Computing (MEC); Framework and Reference Architecture”, 2019.
- [7] M. Burhan et al., “IoT Elements, Layered Architectures and Security Issues: A Comprehensive Survey,” *Sensors*, Vol. 18, No. 9, 2018.

- [8] T. Domínguez-Bolaño et al., “An overview of IoT architectures, technologies, and existing open-source projects”, *Internet of Things*, Vol. 20, 2022.
- [9] 한국건설기술연구원, TVWS 통신기술을 활용한 엣지 컴퓨팅 기술과 인공지능 기반의 독립형 영상정보 관리장비 개발, 2020년 중소기업 기술사업화 지원사업 연구보고서, 2020년
- [10] M. Ragnoil et al., “A LoRaWAN Multi-Technological Architecture for Construction Site Monitoring” *Sensor*, Vol. 22, No. 22, 2022
- [11] NTT DOCOMO Technical Journal, Vol.20 e, NTT Docomo (2018).
- [12] 김형철, “IoT 보안기술 기반 스마트건설기술 활성화에 관한 연구”, 융합보안 논문지, 제24권, 제4호, 39-47쪽, 2024년
- [13] M. Reis, “AI-Driven Anomaly Detection for Securing IoT Devices in 5G-Enabled Smart Cities,” *Electronics*, Vol. 14, No. 12, 2025.

저 자 소 개



강왕규(정회원)

1995년 충남대학교 토목공학과 (학사)
1997년 충남대학교 대학원 토목공학과 졸업(구조공학 석사)
1998년~ KT 미래네트워크기술연구소 <주관심분야 : 통신인프라 효율화, 로봇 활용 AI 점검 등>



홍지만(종신회원)

2003년 서울대학교 컴퓨터공학 박사
2007년~현재 숭실대학교 컴퓨터학부 교수
<주관심분야 : 시스템 소프트웨어, 운영체제, 스마트 IT 건설 등>