

원자력발전소의 무선통신 기술 동향

Trends in Wireless Communication Technologies for Nuclear Power Plants

이승식 (S.S. Lee, rfsslee@etri.re.kr)

디지털원전플랫폼연구실 책임연구원

구자범 (J.B. Gu, gjb@etri.re.kr)

디지털원전플랫폼연구실 책임연구원

박미룡 (M.-R. Park, mrpark@etri.re.kr)

디지털원전플랫폼연구실 책임연구원

강호용 (H.Y. Kang, hoyong.kang@etri.re.kr)

디지털원전플랫폼연구실 책임연구원/실장

ABSTRACT

As the digitalization and modernization of nuclear power plant (NPP) facilities have accelerated, the strategic importance of a highly reliable and safe communication infrastructure supporting instrumentation and control (I&C) systems is becoming increasingly critical. This study provided a concise analysis of recent trends in wired and wireless communication technologies within NPPs, focusing on their technical characteristics and regulatory requirements. With growing demand for NPP facility condition monitoring, radiation monitoring, and sensor expansion in hard-to-reach areas, the application of wireless communication technology is gradually expanding, particularly in non-safety systems. Recent advancements in IEEE 802.15.4-based networks, WirelessHART, ISA100.11a, and low-power wide-area network (LPWAN) technologies have considerably enhanced reliability, latency control, and interference mitigation. Furthermore, Defense-in-Depth (DiD), cybersecurity, electromagnetic compatibility (EMC), and verification and validation (V&V) requirements remain key considerations in the design and integration of these communication systems. This study analyzed the specific characteristics and operational constraints of wireless communication technologies in the unique environment of NPPs and outlined the latest technological trajectories.

KEYWORDS I&C, NPP, Wire/Wireless Network, 스마트센서

I. 서론

우리나라는 1973년 석유파동을 계기로 에너지 안보 확보를 국가적 과제로 인식하고, 국내 부존자

원의 개발과 에너지원 다원화의 정책적 흐름 속에서 원자력발전 시대가 열렸고, 이후 원자력은 국가 전력 공급의 핵심축으로 자리매김하였다. 하지만 원전 산업의 성숙 과정에서 후쿠시마 원전 사고, 원

* DOI: <https://doi.org/10.22648/ETRI.2026.J.410404>

* This work was supported by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) and the Ministry of Climate, Energy and Environment(MCEE) of the Republic of Korea (No. 20224B10100090).



본 저작물은 공공누리 제4유형

출처표시+상업적이용금지+변경금지 조건에 따라 이용할 수 있습니다.

©2026 한국전자통신연구원

전 환경의 안정성에 대한 우려 등으로 국내 원전 산업은 기술적 보수성을 과도하게 유지하는 분위기에 놓였다. 이런 현상은 새로운 기술 도입에 대한 높은 진입 장벽으로 작용하여 원전 계측제어(I&C: Instrumentation and Control) 계통과 핵심 설비 감시 분야에서 혁신 기술의 적용이 제한적으로 이루어지고 있다. 최근에는 이러한 한계를 극복하기 위해 미국 ANO(Arkansas Nuclear One) 원전, 프랑스 EDF (Établissement public à caractère industriel et commercial)의 원전 디지털 전환 계획, 중국 원전의 스마트센서 적용 사례, UAE BNPP(Barakah Nuclear Power Plant) 원전의 무선통신 네트워크 구축 등과 같이, 세계 주요 원전들이 안전성 향상과 운전 효율 개선을 목적으로 스마트센서 및 고신뢰 무선 네트워크 도입을 적극적으로 추진하고 있다[8].

원전의 스마트센서 적용을 위해서는 고방사능 환경, 건물 내부 대형 구조물의 차폐 효과 등의 원전 환경에 특화된 고신뢰 무선 네트워크 설계 방법론과 최악 조건에서의 생존성 검증이 필요하다. 본 연구에서는 원자력발전소의 무선통신 기술 개발 현황과 기술 적용을 위한 표준화 진행 상황을 살펴본다.

II. 원전 계측제어 네트워크

1. 개요

원자력발전소(NPP: Nuclear Power Plant)의 계측제어 계통 네트워크 구조는 안전성(Safety), 가용성(Availability), 결정성(Determinism), 그리고 규제 준수(Regulatory Compliance)라는 상호 연계된 요구 조건을 동시에 만족하도록 설계된다. 일반 산업 플랜트와 달리, 원전은 설계 기준 사고(Design Basis Events), 안전 등급 분리(Safety Class Separation), 독립성(Independence), 단일 고장 기준(Single Failure Criterion) 등의 안전 설계 원칙을 충족해야 하며, 또한 사이버보안 프

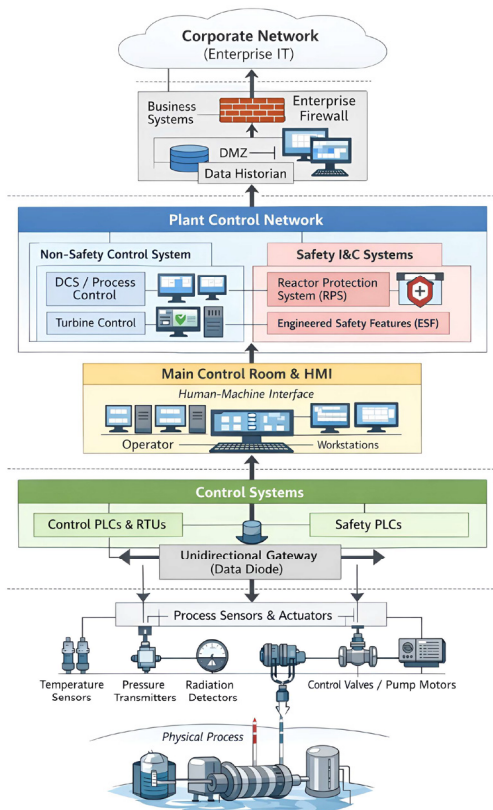
로그램 요구사항(Cyber Security Program Requirements)을 포함하는 규제 환경의 준수를 전제로 한다. 이러한 제약 조건은 네트워크 아키텍처의 구조적 특성을 규정하며, 결과적으로 원전 통신 및 제어 네트워크는 유선 기반(Wired-Centric)의 계층적 분리 구조와 심층방어(DID: Defense-in-Depth) 전략을 중심으로 설계된다. 특히 안전 계통과 비안전 계통 간에는 물리적 또는 논리적 분리 구조가 적용되며, 이를 통해 공정 제어의 신뢰성과 발전소 운전 안전성을 동시에 확보할 수 있다.

기존 원자력발전소 디지털 계측제어 시스템(Digital I&C: Digital Instrumentation and Control)의 사이버 보안 설계는 산업제어시스템(ICS: Industrial Control System) 보안 원칙과 원자력 규제 요구사항을 기반으로 수행된다[1,4]. 국제표준 IEC 62645는 디지털 시스템을 보안 구역(Security Zone)과 보안 경계(Security Boundary)로 구분하고, 구역 간 통신을 통제하는 보안 아키텍처를 요구한다[5,7]. 이러한 구조는 NIST SP 800-82에서 제시하는 산업제어시스템 네트워크 분리 원칙과 유사하며, 미국 원자력규제위원회(NRC: U.S. Nuclear Regulatory Commission)의 규제 지침에서도 안전 계통과 비안전 계통 간의 네트워크 분리를 핵심 보안 요구사항으로 제시하고 있다[2]. 따라서 원전 I&C 네트워크는 보안 구역 기반의 네트워크 분리와 접근 통제, 데이터 흐름 제어 등의 보안 메커니즘을 통해 사이버 위협으로부터 발전소 I&C를 보호하도록 설계된다.

2. 원전 계측제어 네트워크 구조

그림 1에 원자력발전소의 계측제어 시스템의 계층적 네트워크 구조와 안전·비안전 제어 시스템 간의 기능적 분리 및 보안 아키텍처를 나타냈다.

최하위 계층에는 실제 발전소 설비와 직접 연결



출처 AI 이용 이미지 작성

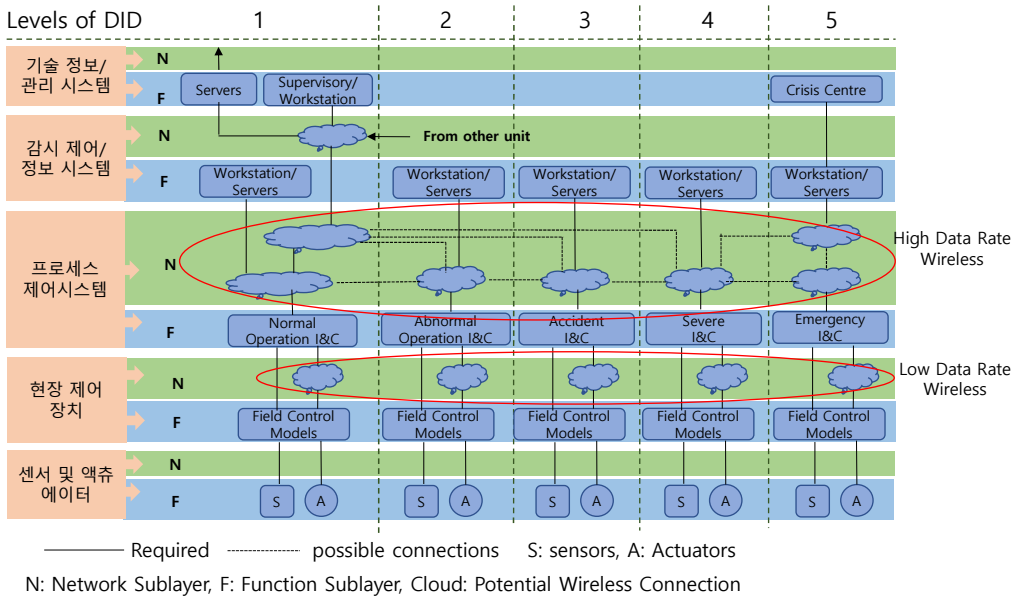
그림 1 NPP I&C 네트워크 구조

되는 물리 공정 계층(Physical Process Layer)이 위치하며, 원자로, 터빈 설비, 냉각 계통, 펌프 및 배관 등 발전소의 실제 물리적 공정이 포함된다. 이 계층에는 온도 센서, 압력 트랜스미터, 방사선 검출기 등 다양한 공정 센서(Process Sensor)와 제어 밸브, 펌프 모터 등 액추에이터가 설치되어 공정 상태를 측정하고 제어 신호를 수행한다. 상위에는 제어 시스템 계층이 위치하며, 공정 제어용 프로그램 가능 논리 제어기(PLC: Programmable Logic Controller) 및 원격단말장치(RTU: Remote Terminal Unit)와 Safety PLCs가 공정 데이터를 수집하고 제어 알고리즘을 수행하여 설비를 자동으로 제어한다. 이 과정에서 안전 계통과 비안전 계통 간 데이터 흐름은 단방향 게이트웨이

이(Unidirectional Gateway)를 통해 제한적으로 전달되어 제어망의 보안 격리를 강화한다. 다음 상위 계층은 주 제어실(Main Control Room) 및 인간-기계 인터페이스(HMI: Human-Machine Interface) 영역으로, 운영자 콘솔과 워크스테이션을 통해 발전소 운전 상태를 실시간으로 감시하고 필요한 제어 명령을 수행한다.

HMI 계층보다 상위에 있는 발전소 제어 네트워크(Plant Control Network) 영역은 터빈 제어 및 일반 공정 제어를 수행하는 비안전 제어 시스템(Non-Safety Control System)과 원자로 보호 시스템(RPS: Reactor Protection System) 및 공학적 안전설비 시스템(ESF: Engineered Safety Feature)으로 구성된 안전 계측제어 시스템(Safety I&C System)으로 구분된다. 안전 계통은 비안전 계통과 물리적 · 논리적으로 분리되어 설계되어 발전소 안전 기능의 독립성을 확보한다. 발전소 제어 네트워크 상위에는 제어망과 기업 정보 네트워크 간 직접적인 통신을 방지하기 위한 중간 보안 영역인 비무장지대 네트워크(DMZ: Demilitarized Zone)가 구성되며, 플랜트 데이터 이력 관리 시스템(Plant Data Historian)을 활용하여 발전소 운전 데이터를 중간 저장 · 관리한 후 상위 네트워크로 제한적으로 전달함으로써 산업제어 시스템의 보안성과 네트워크 격리 수준을 향상시킨다. 이와 구분되는 기업 정보기술 네트워크 계층은 기업 비즈니스 시스템 및 데이터 분석 플랫폼으로 구성되어 발전소 운영 데이터를 기반으로 경영 의사결정 지원, 운영 성능 평가 및 장기 데이터 관리 기능을 수행한다.

이러한 상위 정보 시스템은 발전소 제어 네트워크와 직접 연결되지 않고 보안 경계 영역을 통해 제한적으로 연계되어 산업제어 시스템의 보안성을 확보하도록 설계된다. 이와 같은 계층적 네트워크 구조는 발전소 제어 시스템의 안정성과 보안을 확보



출처 Reproduced with permission from INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, "Application of Wireless Technologies in Nuclear Power Plant Instrumentation and Control Systems," IAEA, NP-T-3.29, Vienna, 2020[9].

그림 2 Defense-in-Depth 환경에서의 원전 ICS 계층 구조 및 무선통신 적용 영역

하기 위한 심층방어 기반 네트워크 아키텍처를 반영한 것으로, 각 계층 간 기능적 분리와 제한된 데이터 흐름을 통해 시스템 간 간섭을 최소화하고 원자력발전소의 안전한 운전을 지원하도록 설계된다(그림 2).¹⁾

3. 타 산업 분야 네트워크와 비교

표 1은 원자력발전소 네트워크 구조를 일반 산업

플랜트 및 기업 IT 네트워크와 비교하여 나타낸 것이다. 원자력발전소의 디지털 계층제어 네트워크는 발전소의 안전 운전과 원자로 보호를 최우선 목적으로 설계되며, 안전 계통 계층제어 시스템과 비안전 계통 계층제어 시스템이 기능적으로 구분된 다계층 구조(Field-Control-Plant-Enterprise)를 기반으로 구성된다. 이러한 구조는 매우 높은 안전 요구 수준을 충족하기 위해 안전 계통과 비안전 계통 간의 물리적·논리적 분리를 적용하고, 심층방어 개념 및 다중 보안 계층을 통해 시스템 신뢰성과 사이버 보안성을 동시에 확보하도록 설계된다. 또한, 발전소 제어망과 상위 네트워크 간 데이터 흐름은 단방향 통신 또는 DMZ를 이용 제한적 연계 방식으로 운영되어 외부 위협의 전파를 최소화한다. 반면, 일반 산업 플랜트의 제어 네트워크는 생산 공정 자동화와 효율성 향상을 주된 목표로 하며, PLC 및 분산 제어 시스템(DCS: Distributed Control System) 기반의 3~4계

1) 그림 2는 『Application of Wireless Technologies in Nuclear Power Plant Instrumentation and Control Systems, IAEA Nuclear Energy Series No. NR-T-3.29 © IAEA 2020』의 그림 1(7쪽)을 일부 번역한 것이다. 본 그림의 번역은 저자가 작성하였다. 이 자료의 정본은 IAEA 또는 IAEA를 대신하여 정식 권한을 부여받은 자가 배포한 영어본이다. IAEA는 본 번역 및 그 출판물의 정확성, 품질, 진정성 또는 완성도에 대해 어떠한 보증도 하지 않으며, 본 번역의 사용으로 인해 직접적 또는 간접적으로 발생하는 모든 손실이나 손해에 대해 어떠한 책임도 지지 않는다.

표 1 타 산업 분야 네트워크와 비교

구분	원자력발전소	일반 산업 플랜트	기업 IT 네트워크
주요 목적	발전소 안전 운전 및 원자로 보호	생산 공정 자동화 및 효율성 향상	기업 업무 및 정보 관리
시스템 유형	Safety I&C + Non-Safety I&C	DCS / PLC 기반 제어 시스템	ERP, Database, Business Systems
네트워크 구조	다계층 구조 (Field-Control-Plant-Enterprise)	3~4계층 구조 (Field-Control-SCADA-IT)	단일 또는 계층형 IT 네트워크
안전 요구 수준	매우 높음(Nuclear Safety Critical)	중간(Industrial Safety)	낮음
네트워크 분리	Safety / Non-Safety 물리적·논리적 분리	일부 논리적 분리	일반적으로 통합 네트워크
보안 구조	Defense-in-Depth 기반 다중 보호 구조	방화벽 기반 보안	IT 보안 정책 중심
데이터 흐름	제한적 단방향 또는 DMZ 경유	양방향 데이터 통신	자유로운 데이터 통신
적용 표준	IAEA, NRC RG 5.71, IEC 61513, IEC 62645	ISA-95, IEC 62443	ISO 27001 등
주요 장비	Safety PLC, Protection System, RTU	PLC, DCS, SCADA	서버, 스토리지, 클라우드
통신 특성	높은 신뢰성 및 결정성 요구	실시간 제어 중심	데이터 처리 중심

층 구조(Field-Control-SCADA-IT)를 중심으로 일부 논리적 네트워크 분리와 방화벽 기반 보안 체계를 적용한다. 기업 IT 네트워크의 경우 기업 업무 지원과 정보 관리를 목적으로 서버, 스토리지 및 클라우드 중심의 통합 또는 계층형 네트워크 구조를 구성하며, 상대적으로 자유로운 데이터 통신과 IT 보안 정책 중심의 운영 특성을 가진다.

이처럼 원자력발전소 네트워크는 적용 표준, 보안 구조, 데이터 흐름 제어 및 통신 신뢰성 요구 측면에서 차별화된 특성을 보이며, 이는 발전소 안전 기능의 독립성과 안정적 운전을 보장하기 위한 핵심 설계 원칙이라 할 수 있다.

III. 무선 네트워크 적용

1. 무선 적용 시 고려 사항

1.1 심층방어 단계에 따른 필요 기술

원전의 계측·제어 시스템은 단일 고장이나 인적 오류가 중대 사고로 확대되는 것을 방지하기 위해 심층방어 개념에 기반한 다층적 구조로 설계·운영된다[1]. 심층방어는 원전 하위 시스템을 기능

적 요구사항과 안전 중요도에 따라 상호 독립적인 다섯 단계로 구분하고, 각 단계가 이전 단계의 실패를 보완하도록 구성되는 것이 특징이다. Level 1은 정상 운전 유지와 기본 공정 제어 기능을 수행하며, Level 2는 비정상 상태를 조기에 감지하고 제어하여 사고 진행을 예방하는 보호 및 제한 기능을 담당한다. Level 3은 사고 발생 시 원자로 보호계통과 공학적 안전설비를 통해 노심 손상과 방사성 물질 방출을 방지하는 단계이며, Level 4와 Level 5는 각각 중대사고 영향 완화와 외부 비상 대응을 통해 방사선 영향을 최소화하는 것을 목표로 한다. 이와 같은 심층방어 기반 계측제어 아키텍처에서는 단계별 안전 중요도와 기능적 역할에 따라 요구되는 기술 특성이 상이하며, 적용 가능한 통신 및 제어 기술 또한 차별화된다. 특히 Level 1~3 영역은 원자로 안전 기능과 직접 연계되므로 고신뢰성·저지연·결정론적 특성을 확보할 수 있는 유선 중심의 통신 구조와 시스템 간 기능적 독립성이 필수적으로 요구된다[8]. 반면, Level 4~5 영역에서는 상황인지와 정보 전달의 연속성이 중요해지며, 이동형 장비와 비상 센서 적용이 확대됨에 따라 제한적 데이터율의 무선

통신 기술이 보조적 수단으로 활용될 수 있다. 따라서 심층방어 단계별 기술 적용은 안전 중요도와 실시간성 요구 수준을 고려한 계층적 통신 전략에 기반하여 설계될 필요가 있다.

1.2 제외 구역

미국 원자력규제위원회와 미국 EPRI(Electric Power Research Institute)는 원자력발전소 환경에서 무선 송신기 등 전자기파 발생원이 계측·제어 장비에 미치는 영향을 보수적으로 관리하기 위해, 장비의 전자기 감도 한계와 허용 전기장 강도 간 최소 8dB 이상의 여유 확보를 권고하고 있다[8]. 이러한 여유 기준은 측정 불확실성, 설치 환경 변화 및 다중 송신원에 의한 전자기장 중첩 효과 등을 고려한 안전 계수로, 시험 환경과 실제 운전 조건 간 차이를 보완하기 위한 목적을 가진다[9]. 특히 안전 관련 장비가 밀집된 원전 환경에서는 전자기적 간섭(EMI: Electromagnetic Interference)에 의한 기능 이상을 예방하는 것이 중요하며, 해당 기준은 무선 장치 적용 시 제외 구역(Exclusion Zones) 설정, 송신 전력 제한 및 설치 위치 선정의 주요 설계 근거로 활용된다. 보수적 여유 확보 원칙은 심층방어 개념과 연계되어 원전 계측제어 시스템의 기능적 독립성과 운전 신뢰성을 유지하는 데 중요한 역할을 한다.

2. 무선 시스템 요구사항 및 구성

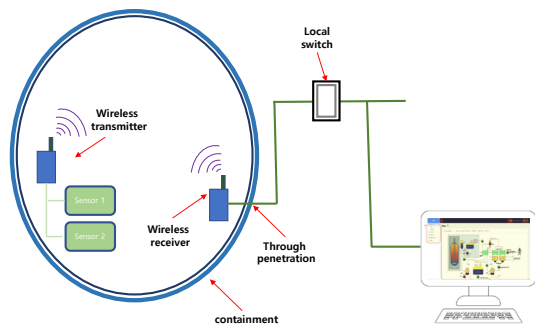
2.1 무선 시스템 적용 요구사항

원자력발전소 환경에서 무선 시스템을 적용하기 위해서는 계측제어 장비에 대한 전자기적 간섭을 최소화하는 것이 핵심 요구사항으로 고려된다. 이를 위해 무선 송신 장치와 전자기적으로 민감한 설비 간 충분한 물리적 분리를 확보하는 제외 구역 개념이 적용되며, 송신 전력 제한 및 설치 위치 최적화

등의 보수적 설계 기준이 요구된다. 또한, 원전 구조물의 금속 차폐 특성으로 인해 다중 경로 페이딩과 신호 감쇠가 빈번하게 발생하므로, 확산 스펙트럼 및 주파수 호핑 기법을 활용한 통신 강건성 확보가 필요하다. 아울러 격납 건물 내부의 높은 방사선 환경은 마이크로컨트롤러 및 전원 회로 등 반도체 소자의 신뢰성 저하 요인으로 작용할 수 있으므로, 방사선 내성을 고려한 장비 설계와 시험·검증이 병행되어야 한다. 따라서 원전 무선 시스템의 적용은 전자기 간섭 영향, 방사선 환경 및 전파 전달 특성의 변동성을 종합적으로 고려한 보수적 설계 기준에 기반하여 수행될 필요가 있다.

2.2 무선 시스템 구성 방식

그림 3과 같이 원자력발전소 격납 건물 환경에서의 무선 시스템은 격납 내부 무선망과 외부 유선망을 결합한 하이브리드 구조가 가장 신뢰성이 높은 구성 방식으로 평가된다. 격납 건물 내부 설비에 설치된 무선 송신기는 단거리 무선통신을 통해 공정 및 상태 자료를 수집하며, 격납 경계부에 배치된 무선 수신 게이트웨이가 이를 모아서 데이터 전달의 효율성을 확보한다. 이후 수집된 데이터는 격납 관



출처 Reproduced with permission from INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, "Application of Wireless Technologies in Nuclear Power Plant Instrumentation and Control Systems," IAEA, NP-T-3.29, Vienna, 2020[9].

그림 3 원전에서의 무선통신 시스템 구조

통부를 통해 유선통신망으로 연계되어 외부 계통 및 상위 감시·제어 시스템으로 전달된다.

이러한 구조는 격납 벽을 통한 전파 투과를 최소화함으로써 전자기적 간섭 가능성과 규제 부담을 줄이는 동시에, 내부 구간에서는 무선 기술이 가지는 설치 유연성과 유지보수 효율성을 확보할 수 있는 장점이 있다. 따라서 본 하이브리드 구성은 심층 방어 개념과 제외 구역 원칙을 고려한 원전 무선 시스템 적용에 있어 보수적이면서도 현실적인 설계 방안으로 평가될 수 있다.

IV. 규제 및 표준 현황

원자력발전소의 디지털 제어계측 및 데이터 통신은 안전 등급에 따라 국제표준을 기반으로 기능요건이 정의된다. 특히 안전에 중요한 계측제어 기능에 대해서는 IEC 61500 규격이 적용된다[4,6]. 국내에서도 해당 표준을 준용한 KSC IEC 61500이 적용되어 범주 A 기능을 수행하는 계통의 데이터 통신요건을 규정하고 있다.

IEC 61500은 원자력발전소에서 안전 관련 기능에 사용되는 데이터 통신의 신뢰성, 독립성 및 연계 요구사항을 명시하며, 비안전 범주(B, C) 기능 및 타 계통과 연계되는 제어 계통의 통신 요구사항 또한 포함한다. 미국 NRC에서는 후쿠시마 원전 사고를 거울삼아 핵연료 손상을 감시하는 시스템 생존성 확보 필요성에 따라 IEEE Std. 497-2016을 표준화하고, RG 1.97 Rev. 5를 발표하였다. 이는 안전 범주(A)와 비안전 범주(B, C, D) 이외 사고감시 계통 채널(E)을 요구하며, 신규 원전에 적용해야 한다고 명시하고 있다. 중대 사고용 사고감시 시스템은 핵연료 손상감시 계측기(온도, 압력, 수위, 방사능 등 IEEE Std. 497-2016의 F 변수), 원전 블랙박스로 명명된 신호처리기, 통신장치, 주 제어실의 사고감시제어 모니터

링, 모바일/원격 제어실 등으로 구성된다.

사고감시 시스템 예와 같이 원자력발전소 설비 계측제어 계통에 통신장치로 IEEE 802.11 계열을 비롯하여 ZigBee, Z-Wave, WirelessHART, IEEE 802.15.4e 등 다양한 무선통신 기술의 원전 환경 적용 가능성이 검토되고 있으며, 시범 적용 사례도 점차 확대되고 있다. 무선통신 기술의 원자력발전소 적용에 있어서는 특정 통신 표준 자체에 대한 제한보다는 원전 환경에서 요구되는 전자기 적합성 기준과 방사 및 전도 장애에 대한 내성 확보가 중요한 고려 요소로 평가된다. 이를 위해 국내외 원자력발전소에서는 미국 원자력규제위원회가 제시한 Regulatory Guide(RG) 1.180 기준(MIL-STD-461E)을 준용하여 전자기 간섭 관리 기준을 적용하고 있다[3].

또한, 원전 환경에서 유·무선통신 기술을 활용할 때 물리적 방호뿐만 아니라 계측제어 계통의 사이버보안 확보 역시 중요한 설계 요소로 고려되며, 관련 기술 지침으로는 국제원자력기구(IAEA: International Atomic Energy Agency)의 NSS No. 17 Computer Security at Nuclear Facilities 및 NST-038 Computer Security Incident Response, 그리고 원자력규제위원회의 RG 5.71 Cyber Security Programs for Nuclear Facilities 등이 참조되고 있다[2]. 국내에서는 한국원자력안전기술원에서 원자력시설에 대한 안전 관련 제어 계통의 사이버 침해 대응 지침으로 GT-N27을 정의하고 개정 버전 RG-N08.22(디지털 계측 및 제어 장치의 사이버보안)를 참조하고 있다. 주요 보안 요구사항으로는 계층 구조 설계, 단방향 통신 프로토콜 적용, 기밀성/무결성 확보, 접근제어, 망 분리화, 심층방어, 관리 활동 등을 포함하고 있다.

V. 원자력발전소

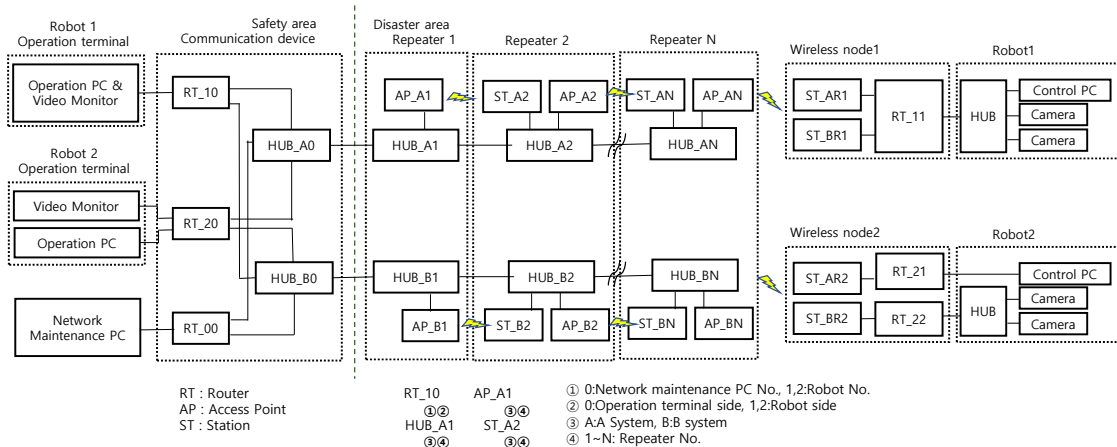
표 2[9]는 해외 원자력발전소 및 시험 시설에서

표 2 원전 환경에서의 무선통신 및 센서 네트워크

구분	기관/시설	적용 목적	구성 및 규모	통신 구조
공정 모니터링	Indira Gandhi Center	원자로 및 관련 설비에서 다양한 공정 데이터를 실시간으로 모니터링	37개 통신 노드 운영	격납 건물 내부에서 WSN으로 수집한 데이터를 유선을 통해 외부로 전송
누출감지	Sodium Test Facility	복잡한 케이블 감소 및 누출 감지 성능 검증	누출감지기 50개, 라우터 3개, 이중경로	감지기를 병렬 모드의 이중화 시스템으로 내부 개발된 WSN에 연결
안전등급 계동	Indira Gandhi Natrium	안전등급 잔열제거, 루프 온습도 감시	5개 온도, 습도 센서	2.4GHz WSN
상태감시	Comanche Peak Plant	보조 계통 상태 모니터링	센서 40개, 이중화 광섬유 백본	Wi-Fi + 광통신
유지보수	Arkansas One Plant	격납 냉각 팬 진동 모니터링	진동센서, Wi-Fi, AP	기존 Wi-Fi 활용

적용된 무선통신 기반 계측·감시 시스템의 대표 사례를 정리한 것으로, 적용 목적, 시스템 구성 규모 및 통신 구조 측면에서 공통적인 설계 경향을 확인할 수 있다. 먼저 Indira Gandhi Center의 공정 모니터링 사례에서는 원자로 및 관련 설비의 다양한 공정 데이터를 실시간으로 수집하기 위해 약 37개의 통신 노드로 구성된 무선 센서 네트워크(WSN: Wireless Sensor Network)를 격납 건물 내부에 구축하고, 수집된 데이터를 유선 백홀(Backhaul)을 통해 외부 계통으로 전달하는 하이브리드 통신 구조를 적용하였다. Sodium Test Facility의 누출 감지 시스템은 복

잡한 케이블 배선을 감소시키면서 감지 신뢰성을 확보하기 위해 다수의 누출 감지기와 라우터를 병렬 및 이중 경로로 구성하고, 내부 개발 WSN과 연계하여 운용한 것이 특징이다. 또한, Indira Gandhi Natrium 시설에서는 안전 등급 잔열 제거 계통의 온도 및 습도 감시를 위해 2.4GHz 기반 WSN을 적용함으로써 환경 감시의 자동화를 구현하였다. 발전소 운전 상태 감시 측면에서는 Comanche Peak Plant는 보조 계통 상태 모니터링을 위해 약 40개의 센서와 이중화 광섬유 네트워크를 Wi-Fi와 병행 운용함으로써 무선·유선 융합 통신 구조를 구현하였다.



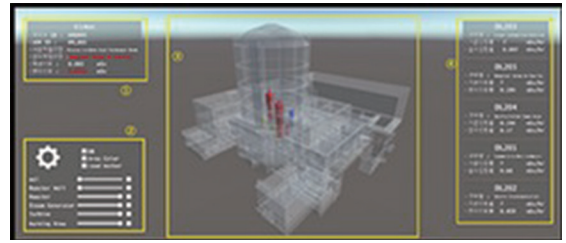
출처 Reproduced with permission from INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, "Application of Wireless Technologies in Nuclear Power Plant Instrumentation and Control Systems," IAEA, NP-T-3.29, Vienna, 2020[9].

그림 4 일본 원자력발전소 로봇 기반 무선-유선 통합 통신 네트워크 구조

마지막으로 Arkansas One Plant 사례에서는 격납 건물 냉각팬의 진동 상태를 기존 Wi-Fi 인프라와 액세스 포인트(AP: Access Point)를 활용하여 유지보수 중심의 상태감시 체계를 구축하였다. 이러한 사례들은 원자력 환경에서 무선 시스템이 독립적으로 사용되기보다는 격납 내부의 국지 무선망과 외부 유선망을 결합한 하이브리드 구조가 신뢰성, 규제 적합성 및 유지보수 효율성 측면에서 효과적인 적용 방식을 시사한다.

원전 사고가 발생한 일본은 유선통신 불능 시 발전소 내 무선 네트워크로의 실시간 전환 가능성에 대한 실험을 진행하였다. 그림 4와 같이 운영자 단말(Operator PC 및 Video Monitor)은 라우터와 허브를 통해 유선 네트워크로 연결된다. 이후 재난지역 인근에 설치된 중계기(Repeater) 구간에서는 AP와 Station(ST)으로 구성된 무선 링크가 형성되어 로봇 측 무선 노드 및 제어 장치와 통신을 수행한다. 전체 시스템은 A/B 이중화 구조로 구성되어 단일 케이블 단선, 허브 또는 무선 장치 고장과 같은 장애 발생 시에도 라우팅 경로 재구성을 통해 통신을 유지할 수 있도록 설계된다. 정상 상태에서는 유선망을 우선 사용하고 장애 발생 시 무선 경로로 자동 전환되는 하이브리드 운용 개념을 적용한다. 또한, 각 Repeater 구간은 수신된 신호의 세기(RSSI: Received Signal Strength Indicator) 및 처리량 요구 조건을 만족하도록 단계적으로 배치되어 로봇 제어 데이터와 영상 데이터의 신뢰성 있는 전송을 보장하며, 이러한 AP 기반 무선 접속 구조는 재난 환경에서의 이동형 계측·제어 시스템 운용 시 네트워크 연속성과 확장성을 동시에 확보할 수 있는 핵심 설계 요소로 평가된다.

기존 Wi-Fi를 이용한 통신 방식에 비해 저전력 저속 통신(LPWA: Low Power Wide Area) 기반의 멀티채널 멀티홉(MCMH: Multi-Channel Multi-Hop) 기술을



출처 Reprinted from H. Kang et al., "Wireless IoT-based radiation integrated management system," in Proc. Int. Conf. Struct. Mech. React. Technol., (Toronto, Canada), Aug. 2025[10].

그림 5 3D Visualization of Radiation Monitoring Systems

활용하여 한국원자력연구소 내 하나로 연구용 원자로에서 무선 네트워크를 구축하였다. 이동 단말의 핸드오버 실험을 통해 유선 기반 없이도 센싱 네트워크 구성 가능성을 확인하였다. 그 예는 그림 5에서 MCMH를 이용한 WSN 모니터링 시스템을 확인할 수 있다[10].

VI. 결론

본 연구에서는 원자력발전소 환경에서 스마트센서 기반 무선통신 기술의 적용 가능성과 이를 위한 네트워크 설계 개념, 심층방어 기반 계층 구조, 국제 표준 및 실제 적용 사례를 종합적으로 분석하였다. 원자력발전소의 계층제어 네트워크는 안전성, 결정성, 규제 준수 및 기능적 독립성을 최우선으로 고려하는 유선 중심 구조를 기반으로 설계되지만, 최근 해외 사례에서 확인되듯 상태감시 및 비상 대응과 같은 비안전 영역에서는 WSN, Wi-Fi 및 LPWA 기술의 보조적 활용이 점차 확대되고 있다. 특히 유선·무선 하이브리드 구조와 MCMH 기반 네트워크는 금속 구조물 차폐, 전자기 간섭 및 방사선 환경과 같은 원전 특수 조건에서도 네트워크 연속성과 설치 유연성을 확보할 수 있는 현실적인 대안으로 평가된다. 향후 원전 무선통신 기술의 실질적 확

산을 위해서는 제외 구역 설정, 전자기 적합성 확보, 방사선 내성 설계, 사이버보안 대응 및 국제표준 정합성 확보를 포함한 체계적인 설계 기준과 실증 기

반 신뢰성 검증이 병행되어야 하며, 이를 통해 기존 유선 중심 I&C 아키텍처와 조화되는 단계적 기술 도입 전략이 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] International Atomic Energy Agency, "Instrumentation and Control Systems for Nuclear Power Plants," IAEA Nuclear Energy Series NP-T-3.12, 2012.
- [2] U.S. Nuclear Regulatory Commission, "Cyber Security Programs for Nuclear Facilities," Regulatory Guide 5.71, Jan. 2010.
- [3] U.S. Nuclear Regulatory Commission, "Guidelines for Evaluating Electromagnetic and Radio-Frequency Interference in Safety-Related Instrumentation and Control Systems," Regulatory Guide 1.180, 2003.
- [4] IEC, "Nuclear power plants - Instrumentation and control important to safety - General requirements," IEC 61513, 2011.
- [5] IEC, "Nuclear power plants - Instrumentation and control systems - Requirements for security programmes for computer-based systems," IEC 62645, 2014.
- [6] IEC, "Nuclear power plants - Instrumentation and control important to safety - Data communication in systems performing category A functions," IEC 61500, 2018.
- [7] National Institute of Standards and Technology, "Guide to Industrial Control Systems (ICS) Security," NIST SP 800-82 Rev.2, 2015.
- [8] Electric Power Research Institute, "Wireless Technology Applications Guidance for Nuclear Power Plants," EPRI Report 1023481, 2011.
- [9] International Atomic Energy Agency, "Application of Wireless Technologies in Nuclear Power Plant Instrumentation and Control Systems," IAEA Nuclear Energy Series NP-T-3.29, 2020.
- [10] H. Kang et al., "Wireless IoT-based radiation integrated management system," in Proc. Int. Conf. Struct. Mech. React. Technol., (Toronto, Canada), Aug. 2025.