

원자력 발전소에서의 무선 기술 적용사례 연구

이승식, 구자범, 강호용

한국전자통신연구원

rfsslee@etri.re.kr

A Study on Wireless Technology Applications in Nuclear Power Plants

Seung-Sik Lee, Jabeom Gu, Hoyong Kang

Electronics and Telecommunications Research Institute

요약

원자력 발전소와 같은 열악한 무선 환경에서 계측 및 제어(Instrumentation & Control, I&C) 시스템은 주로 유선 통신 기반으로 구축되어 왔다. 그러나 무선 통신 기술의 발전은 유선 통신의 대체뿐만 아니라 시스템의 유연성 확보 등 새로운 기회를 제공하고 있다[1]. 본 연구에서는 원자력 발전소에 적용 가능한 주요 무선 기술을 검토하고, 활용 가능한 무선 통신 응용 기술을 제안한다. 또한 무선 센서 네트워크(WSN) 등의 적용 사례와 강한 방사선이 무선 통신에 미치는 영향을 분석하였다. 연구 결과, 적절한 검증(Verification & Validation)과 위험 평가를 통해 무선 기술은 기존 유선 시스템을 보완하고 원자력 발전소의 디지털 전환을 지원할 수 있음을 확인하였다.

I. 서론

원자력 발전소는 위험 수준에 따른 대응(Defense in Depth, DID) 개념을 적용하여, 하나의 보안 계층이 실패하더라도 다른 계층에서 방어할 수 있도록 물리적, 기술적, 관리적 측면에서 최소 세 겹 이상의 다층적 통신 링크를 요구한다[2]. 이러한 요구사항을 충족하기 위해서는 저전력 장거리 무선 통신과 고속 무선 통신의 병행이 필요하다.

현재 널리 사용되는 무선 통신 방식에는 Wi-Fi, 셀룰러, ZigBee, 블루투스, 저전력 블루투스(BLE), 저전력 광역 IoT 네트워크 등이 있으며[1], 각 방식은 고유한 장단점을 가진다. 이를 통신 거리와 데이터 전송 속도 측면에서 비교하면 그림 1과 같다. 본 연구에서는 원자력 발전소 내 무선 통신 적용 시 필요한 요구사항과 실제 적용 사례, 그리고 무선 기술 도입 시 고려해야 할 사항들을 논의하였다.

II. 본론

II-1. Wireless 시스템 요구사항

원자력 발전소와 같이 안전에 민감한 시스템에서 무선을 적용하기 위해서는 다음과 같은 요구사항이 충족되어야 한다.

- 안정성: 무선 시스템 장애가 원자로 안전 계통(reactor safety system)에 영향을 주어서는 안 된다.
- 신뢰성: 통신 링크를 이중화하여 긴급 상황에서도 네트워크를 유지할 수 있어야 한다.
- 보안성: 원자력 발전소의 사이버 보안 규정을 준수해야 한다.
- 규제 및 표준 준수: 국내외 원자력 규제기관(NRC, KINS 등)의 가이드 라인을 반영해야 한다.
- 운용 및 유지보수성: 설치 후 최소 10년 이상 장기적으로 운영 가능해야 하며, 실시간 모니터링 및 장애 진단 기능을 갖추어야 한다.

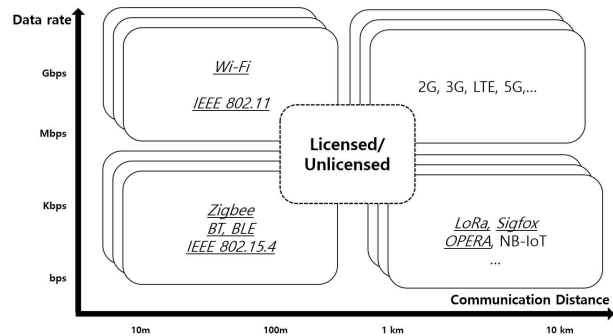


그림 1 무선 통신 방식 비교

그림 2와 같이 5단계 위험도에 따른 기능과 네트워크 구조를 정의할 수 있으며, 무선 센싱 네트워크를 위한 저속 통신 링크와 영상 송신을 위한 고속 통신 링크의 병행이 요구된다. 일반 운전 단계(1단계)에서부터 방사성 물질이 노출된 비상 단계(5단계)에 이르기까지 무선 통신 시스템은 이러한 요구사항을 만족해야 한다.

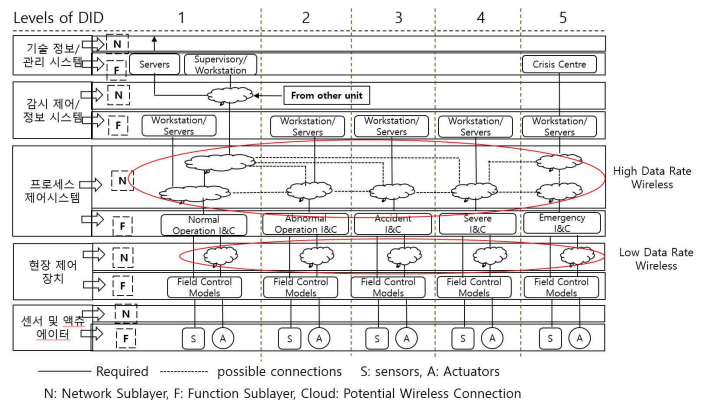


그림 2 원자력 발전소의 위험 단계에 따른 무선 통신 필요 기술

II-2. 무선통신 적용 사례

원자력 발전소 내 무선 링크 요구사항 만족의 확인하기 위한 다양한 무선 통신 실험이 수행되었다. 일반적으로 원자로 내부의 두꺼운 콘크리트 벽체는 유선 통신을 이용하고, 외부 구간은 Wi-Fi를 사용하는 방식이 대표적이다(그림 3). 이러한 방식으로 원자력 발전소 내 무선 통신 및 무선 센서 네트워크 구현 실험은 인도와 미국 등에서 다수 수행되었으며, 실효성이 입증되었다[2].

일본에서는 사고 대응을 위한 유무선 통합 통신 실험이 진행되었다. 유선 통신이 중단 될 경우 백업 망으로 무선 네트워크가 작동하도록 구성되었으며, 통신망을 이중화하여 안정적인 링크를 확보하였다(그림 4)[2]. 저속 통신의 경우, LPWA(Low Power Wide Area) 기반의 MCMH(Multi-Channel Multi-Hop)[3] 기술을 활용하여 한국 원자력 연구소 내 하나로 연구용 원자로에서 무선 네트워크를 구축하였다. 이동 단말의 핸드오버 실험을 통해 유선 기반 없이도 센싱 네트워크 구성 가능성을 확인하였다.

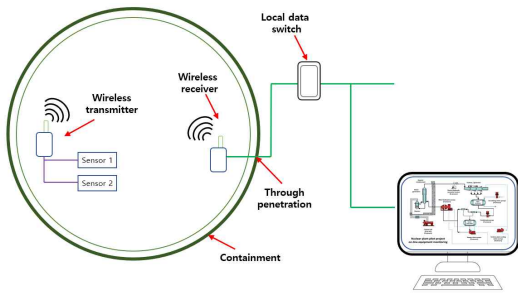


그림 3 원자력 발전소 내 고속 무선 통신 방식

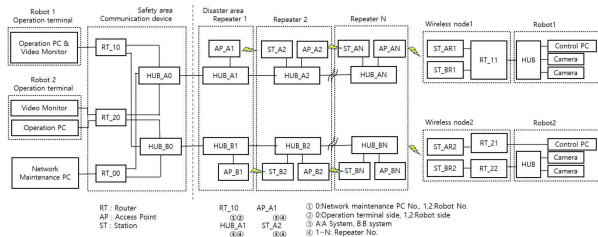


그림 4 일본 중대 사건 대응용 무선 로봇시스템 구조

II-3. 방사선의 무선 통신 영향

원자력 발전소 내 무선 통신 기기는 고방사선에 노출되며, 이로 인해 장치 자체와 무선 신호 특성에 변화가 발생할 수 있다. 본 연구에서는 감마선을 조사하는 핫셀 내에서 기기를 시험하여 그 영향을 평가하였다. 또한 감마선 유무에 따른 신호 크기와 주파수 변화를 확인하기 위해 그림 5와 같은 실험 환경을 구축하였다. 실험 결과는 다음과 같다.

- 배터리: 일부 제품은 수명이 단축되었으나, 일부는 안정적인 전압 유지
- 마이크로컨트롤러: 최대 -1.83 kGy까지 방사선 내성을 보임
- MOSFET 증폭기: 바이어스 전압 감소 및 영구적 손상 발생
- DAC: 출력 전압이 크게 감소하여 영구적 고장 발생.
- 주파수 이동: 2.4GHz 대역 15개 주파수 중 12개 주파수에서 이동 현상 발생.
- 수신 신호 감쇄: 모든 주파수에서 수신 신호 저감 현상 발생.

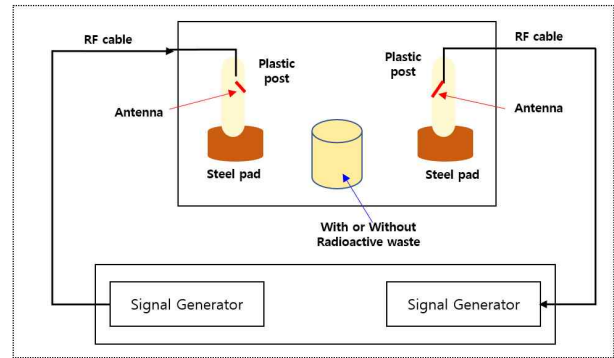


그림 5 핫셀 내 주파수 및 신호 감쇄 실험 구성도

III. 결론

본 연구에서는 원자력 발전소와 같은 열악한 환경에서 무선 통신 기술을 적용하기 위한 요구사항과 적용 사례, 그리고 방사선 환경이 무선 통신에 미치는 영향을 검토하였다. 원자력 발전소 내 무선 시스템 적용을 위해서는 안정성, 신뢰성, 보안성, 규제 준수, 운용·유지보수성과 같은 핵심 요구사항이 충족되어야 함을 확인하였고, 특히, 원자로 안전 계통에 직접적인 영향을 주지 않으면서도, 이중화된 네트워크 구조와 장기 운영 가능성을 보장하는 설계가 필요하다.

또한 해외 다양한 연구 기관에서 수행된 무선 통신 적용 실증 사례를 통해 무선 네트워크가 유선망을 보완하고, 사고 대응 및 원격 감시에서 실질적인 효과를 제공할 수 있음을 보여 주고 있다.

무선 통신의 방사선 환경 사용 사전 평가를 위한 실험에서 무선기기 부품마다 방사선 내성 특성이 다르게 나타났고 특히 마이크로컨트롤러, MOSFET 증폭기, DAC 등에 영구적 손상이 발생하였다. 주파수 이동 및 신호 감쇄 현상은 무선 통신 품질 저하의 주요 요인이므로 무선 링크 설계 시 많은 고려가 필요함을 확인하였다. 이런 연구는 원자력 발전소 내 무선 통신의 적용은 많은 가능성을 가지고 있음을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20224B10100090)

참 고 문 헌

- [1] Do-Young Ko, Jae-Gon, Lee, Byung-Hwan, Bae, A Study on the Application of the Most Suitable Wireless Communication System in Nuclear Plan., KIEE-CICS, 454~456, 2005.
- [2] IAEA, "Application of Wireless Technologies in Nuclear Power Plant Instrumentation and Control Systems," IAEA Nuclear Energy Series No. NR-T-3.29, 2020, (<http://www.iaea.org/publications>).
- [3] Seung-sik Lee, Mi-Ryong Park, Hoyong Kang, Young-gil Kim., "Development of LPWA Wireless Network for Decommissioning NPPs," Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting, pp.31-32, Oct. 2021.