

원전 내 무선통신 적용에 대한 전자파 적합성 평가방법 분석

강승석¹ · 임태홍¹ · 주재율² · 김형태² · 김대희² · 변강일³ · 박종연³ · 이준용⁴ · 추호성^{1*}

Analysis on the EMC evaluating method for applying wireless communications in NPP

SeungSeok Kang¹ · Tae Heung Lim¹ · Jaeyul Choo² · HyungTae Kim² · DaeHee Kim² · Gangil Byun³ · Jong Eon Park³ · Jun-Yong Lee⁴ · Hosung Choo^{1*}

¹School of Electronic & Electrical Engineering, Hongik University, Seoul 04066, Korea

²Korea Institute of Nuclear Safety, Daejeon 34142, Korea

³Metamaterial Electronic Device Research Center, Hongik University, Seoul 04066, Korea

⁴School of Information and Computer Engineering, Hongik University, Seoul 04066, Korea

요 약

본 논문에서는 원전용 계측 제어기기를 진단하고 유지·보수하기 위한 무선통신기술의 국내외 적용 사례, 프로토콜(Wi-Fi, Zigbee, Z-wave, WirelessHart 등) 및 그에 따른 전파특성을 조사하였다. 또한, 원전 내 무선통신기술 적용 시 우려되는 전자파 간섭(EMI/RFI)과 관련하여 국내 규제지침 KINS/RG-N03.09(개정 2판)에서 승인한 RG. 1.180(Regulatory Guide 1.180 rev.1), MIL-STD 461E, 및 IEC 61000-4의 차이를 분석하였다. 추가적으로 기존의 EMC 관련 규제에 포함되어 있지 않았던, 실내 환경에서의 구조적 특징, 전파산란 및 차폐효과, 실내 감쇄모델을 고려한 전자파 영향성 평가요소에 대해서도 연구하였다.

ABSTRACT

In this paper, we surveyed previous cases, network protocols (such as Wi-Fi, Zigbee, Z-wave, and WirelessHart) and propagation characteristics on the application of maintaining equipments for instrumentation and control (I&C) using wireless communication techniques inside the nuclear power plant (NPP). In addition, we compared and analyzed the difference of detailed regulations with respect to the electromagnetic interference (EMI) and radio frequency interference (RFI) in the Regulatory Guide 1.180 rev. 1 (RG. 1.180) for adopting the wireless communication techniques inside the NPP, and other regulations, such as MIL-STD 461E and IEC 61000-4, that are recognized in the KINS/RG-N03.09 (Rev. 2). Furthermore, we investigated evaluating factors about electromagnetic properties by considering indoor environments, wave scattering, shielding effectiveness, and the indoor wave attenuation model that were not included in the current electromagnetic compatibility regulation.

키워드 : 원자력발전소, 계측제어기기, 무선통신, 국제표준

Key word : Nuclear power plant, Wireless communication, I&C equipment, Global standard.

Received 08 August 2017, Revised 25 October 2017, Accepted 13 November 2017

* Corresponding Author Hosung Choo (E-mail: hschoo@hongik.ac.kr, Tel: +82-2-320-3066)

School of Electronic and Electrical Engineering, Hongik University, Seoul 04066, Korea

Open Access <https://doi.org/10.6109/jkiice.2017.21.12.2221>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

© This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서 론

최근 무선기기의 급진적인 발달과 기술 고도화로 산업 전반에 걸쳐 무선통신기술이 널리 사용되고 있으며, 원자력 발전소에서도 계측 제어기기의 유지·보수 및 상태정보 모니터링을 위해 무선통신기술을 일부 적용하고 있다[1,2].

해외 발표 자료에 따르면 발전소 내 가스터빈 및 발전기에 무선통신기술이 적용된 사례가 보고되었다. 해당 보고사례에서는 총 11개의 펌프에 장착된 결빙 방지용 히터의 온도 정보를 송신하여 결빙현상 및 고장을 사전에 예측함으로써 무선통신기술을 적용하기 전보다 유지·보수비용을 대폭 감소시켰다[2]. 다른 사례로는 냉각팬의 운전 상태를 감시하기 위해서 무선통신 시스템을 설치하여, 5년간 고장이나 오류에 의한 전력 생산 중지 없이 발전소 시스템을 운영한 예가 보도된 바 있다[3]. 냉각탑 고장 또는 결빙 현상이 발생할 경우, 시스템의 보호를 위해 하나의 타워를 정지시켜 막대한 금전적 피해가 발생하므로 운전상태의 감시는 매우 중요하다.

국내 발전소에서도 유지·보수를 위해 무선통신기술을 적용하여 실시간으로 기기의 작동 상태를 모니터링한 사례가 보고되었다. 화력 발전소에 무선 센서 통신망(무선 센서 17대, 무선 중계기(AP: access point) 2대)을 설치하여 6개월간 시험 운전한 결과, 무선 센서를 통한 다른 기기와의 전파간섭 문제없이 운전감시 기능을 원활히 구현하였다. 원전의 경우 한울 4호기에 무선 인터넷 전화(출력 100 mW, 사용주파수 2.4 GHz)를 설치하고, 계측 제어 기기가 내장된 캐비닛 도어를 개방한 상황에서 전자파 간섭 영향성을 조사한 사례가 있다[1].

이와 같이 발전소 시스템 유지·보수에 있어서 무선통신 시스템을 활용한 결과, 고장 및 오작동을 사전에 예측하고 대비하여 비용을 절감한 사례가 다수 존재한다. 특히 원전의 경우, 지금까지 무선통신의 사용이 일부 발전소에서만 허용되었기 때문에, 무선통신을 적용을 확대할 경우 시간적, 경제적 측면에서 많은 긍정적 효과를 창출할 수 있을 것으로 예상된다[3]. 또한 지속적인 설비 모니터링을 통하여 고장을 사전에 예방하고, 안정적인 전력 생산이 가능할 것으로 예상된다. 무선통신을 원전에 확대, 적용하기 위해서는 몇 가지 선행 연구가 필요하다. 첫째 국내·외 원전들에 대하여 무선통

신시스템을 적용한 연구사례를 조사하고, 원전 환경에 적합한 통신 방법들의 장·단점을 비교 분석하여야 한다. 둘째, 무선 통신기기의 사용에 따른 원전 내 계측 제어기기에 대한 전자파 영향성(EMI/RFI: Electro Magnetic Interference / Radio-Frequency Interference)의 평가연구가 필요하다. 이를 위해서는 전자파영향성 평가관련 현행 규제기준을 국내외적으로 분석하고 최근 규제동향을 파악하여야 한다.

국내외 다수 원자력 발전소에 적용되는 전자파 적합성(electromagnetic compatibility, EMC) 관련 규제지침은 NRC(Nuclear Regulatory Commission)에서 2003년에 발표한 Regulatory Guide(RG.) 1.180의 규제 기준을 따른다. RG. 1.180은 MIL-STD-461E[4]를 기반으로, EPRI-TR102323[5], IEC 61000-4 시리즈[6], CISPR 문서 등의 규제 기준을 참고하여 전도방출(conducted emission(CE)), 전도내성(conducted susceptibility(CS)), 방사방출(radiated emission(RE)), 방사내성(radiated susceptibility(RS)) 등에 관한 시험 내용을 원전 환경에 맞게 일부 변경하여 작성되었다. 그러나 RG. 1.180은 2003년도에 발행되었기 때문에 자유공간의 무선통신 환경만을 고려한 점, 고주파의 시험 주파수가 일부 시험(RE102, RS103)만 고려된 점, 최신 무선통신이 고려되지 않은 점, 실환경 전자파영향성 평가방법의 부재 등과 같은 제약점을 갖고 있다.

본 연구에서는 국내 및 해외 발전소 환경에 무선통신 시스템을 활용한 사례를 조사하였고, 원전 내 적용 가능한 무선통신을 확인하기 위하여 다양한 무선통신의 특성을 비교 및 분석하였다. 이와 더불어 원전 내 EMI/RFI 규제 기준인 RG. 1.180의 규제 현황을 분석하고, 이 문서가 참고하는 타 규제 기준(MIL-STD 461E, IEC 61000-4 등)의 방사내성 내역을 조사하였다. 또한, 차폐 효과, 실내 감쇄 모델과 같이 실내 환경 및 구조적 특징을 고려한 전자파 평가요소에 대해 연구하였다.

II. 무선통신의 발전소 및 유사환경 적용 사례

현재 국내 원전 내 계측 제어기기에 적용되는 전자파 영향성 규제 기준은 무선통신 사용에 대한 고려가 다소 부족하여, 무선통신 사용에 대해서 규제적 평가를 수행하는데 제약점을 갖고 있다. 본 절에서는 국내외 발전

소 시설에 무선통신을 선행 적용한 사례 또는 무선통신을 적용하여 유지·보수 비용을 절감한 사례 등을 조사하였다.

○ 해외의 전기발전 사업체 중 하나는 두 개의 가스 터빈과 발전기 및 11개의 펌프를 하나의 부지에 가지고 있었으며, 각 펌프에는 작은 히터를 달아 결빙 현상을 방지하였다. 히터의 고장과 물의 결빙 현상에 의한 수리비 및 운용비는 20,000 달러에 도달하였으나, 무선통신기술을 적용한 온도 송신기를 각 펌프에 설치한 결과, 결빙 현상과 히터의 고장을 사전에 예측하여 운용비를 감소시킨 사례가 있다[3].

○ 해외 화력 발전소에서 냉각 팬을 모니터링하는 어플리케이션에 무선통신기술을 사용한 사례가 있다. 화력 발전소의 경우, 냉각팬에 고장이나 오류가 발생할 시, 관련 냉각 타워가 정지되어 전력을 생산하지 못해 막대한 손해가 발생하게 된다. 이를 해결하기 위해 무선통신기기를 설치하여 냉각팬을 모니터링하였고, 5년간 시스템에 오작동 없이 운용한 사례가 있다[7].

○ 화력발전소 운용 상태를 개선하는 연구에서 저비용 무선 센서를 활용하여 발전소 환경에서의 무선 단말기 간 최대 통신 범위를 정하는 시험이 진행된 바 있다 [8]. 그림 1은 단말기 위치에 따른 무선 단말기 간 송수신 테스트 셋업과 그 결과를 요약한 그림이다. 무선 단말기는 발전소 가장자리 부근을 이동하도록 설치하였고, 각 단말기는 특정 위치에 있는 메인 단말기와 통신하도록 구성하였다. 모든 단말기들은 해발 424 ft의 동일한 고도에 설치되었으며, 3 dBm(2 mW) ~ 0 dBm(1 mW)의 전력으로 통신하도록 하였다. 메인 단말기는 제어실 외부에 위치시켰으며, 그림 1에서 녹색 원으로 표기된 위치에 존재하고, 다른 단말기들의 위치는 황색 원과 적색 원으로 표시하였다. 시험 결과 대부분의 위

치에서 무선 송수신이 가능했으나, 보일러실의 용광로가 가로막는 위치(적색 원)에서 무선 송수신이 불가능하였다.

○ 원전 내 무선통신기술을 적용한 사례 중 하나로, 해외 원전 중 하나는 시설 전체에 IEEE 802.11b의 무선 LAN 기술을 적용하였다[3]. 이 시스템은 시설 전체에 배포된 무선 AP를 광섬유로 연결하여 backbone 네트워크를 구성하였으며, IEEE 802.11b에 준거하는 IP 무선통신기술을 이용하여 음성통신이 가능하도록 하였다. Voice-over IP 게이트웨이는 무선음성통신 시스템에 LAN 연결을 제공하였고, 2002년에 실증시험 및 종합적인 사용범위에 대한 조사를 성공적으로 마쳤다. 2005년에는 미리 예정된 정전기간 중에 무선통신 시스템의 도입 및 설치를 완료하였으며, 시스템은 400대의 AP로 구성된 광섬유 backbone 내부망으로 상호 연결되었다.

○ 원전을 운용하는 다수의 사업체들은 유지·보수비용을 절감하는 CBM(Condition-Based Maintenance) 프로세스를 도입하였으며, 이를 이용하여 갑작스러운 정전에 대한 설비 고장의 위험을 줄일 수 있었다. 이 프로세스는 기기의 상태 데이터를 사용하여 장애를 예측하고 오작동 또는 고장이 발생하기 전에 미리 유지·보수 일정을 세울 수 있게 하였다. 그러나 기기의 감시 장치 사이의 물리적 케이블 연결을 유지하기 위한 배선 비용은 CBM 프로그램이 설치된 기기 도입 비용의 상당한 비율을 차지하여 부담이 되었다. 이러한 문제를 무선통신기술 및 온라인 장비 모니터링 기술의 통합으로 해결할 수 있었다. 최근 해외 원전 중 하나는 터빈형 블레이드를 가지고 있는 배기 팬 모터에 무선 진동 및 온도 센서(Aeptec / 3eTiTM 무선 어레이 센서를 사용)를 설치하고 초기 장애를 모니터링하였다. 이 터빈 배기 팬은 원통형 덕트의 내부에 배치되어 있어서, 설비 운전 중에는 기술자가 직접적으로 상태를 확인할 수 없었다. 와이어는 모든 센서에 연결되었고, 센서들은 IEEE 802.11 규격에 따른 신호를 팬 모터로부터 91.4 m 이상 떨어진 LAN AP에 송수신하였다. AP는 신호를 수신하면 인터넷 연결을 통해 LAN으로부터 데이터를 받아 모터 상태 평가 소프트웨어에서 사용할 수 있도록 하였다. 또한 시설의 다른 센터에 설치된 모터 시험 시스템은 무선 송수신기를 추가로 설치하여 장비의 고장을 예측 가능하게 하였고 그에 따라 유지·보수를 하도록 하였다[7].

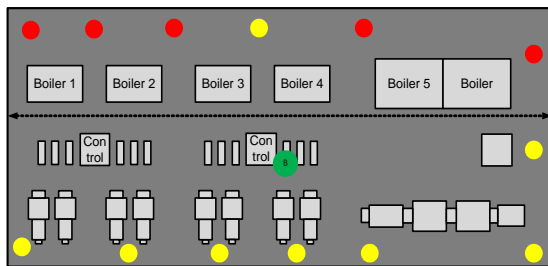


Fig. 1 Test setup for wireless communications according to the position

○ 일부 원전시설에서는 스마트 송신기를 도입하여 비안전 계측 제어기기를 업그레이드하였으며, 진동 및 온도 데이터 취득을 위한 센서의 스마트 송신기를 CCP(Centrifugal Charging Pump) 기어 박스에 설치한 사례가 있다[7]. 비안전 관련 계측 제어기기관 원전의 안전과 관련된 계측 제어시스템이 아닌 그 외의 계측 제어시스템을 의미한다. 비안전 계측 제어기 시스템은 압력, 온도, 흐름 송신기 등을 포함하며, ‘스마트 송신기’라는 용어는 송신기에 마이크로프로세서가 내장되어 기술자의 휴대용 시스템과 데이터(예를 들어, 알람 상태, 기기의 관리 상태)를 무선으로 송신하는 기기를 의미한다. 또한 송신기의 스마트 기능을 통해 자가 점검 및 재교정이 가능하도록 하였다.

III. 원전 내 무선통신 전파특성 조사

앞서 살펴본 무선통신 적용 사례와 같이, 무선통신은 유지·보수비용 절감 및 사고예방 등의 많은 장점을 제공해주는 반면에, 기존의 유선통신을 이용한 관리의 설비 설치비용이 크며 유지·보수가 어려운 단점이 있다. 따라서 발전소 내 관리 시스템은 점차 유선통신보다 무선통신을 응용한 관리 시스템으로 변경될 가능성이 크다. 표 1은 일반적으로 많이 사용되는 무선통신 방식을 사용거리에 따라 원거리영역 무선통신(WAN; wide area network), 대도시영역 무선통신(MAN; metropolitan area network), 근거리영역 무선통신(LAN; local area network), 개인영역 무선통신(PAN; personal area network)으로 분류하여 그 특징을 보여주고 있다[9].

Table. 1 Network platforms according to communication range

	Wireless technology	Bit rate	IEEE standard
WAN (<15 km)	Mobile-Fi	1 Mbps	IEEE 802.20
MAN (<5 km)	WiMax	70 Mbps	IEEE 802.16
LAN (<100 m)	Wi-Fi	1~600 Mbps	IEEE 802.11
	WirelessHART	250 kbps	IEEE 802.15.4
PAN (<10 m)	Bluetooth	1 Mbps	IEEE 802.15.1
	ZigBee	250 kbps	IEEE 802.15.4
	Wi-Media	100~500 Mbps	IEEE 802.15.3

원거리영역 무선통신(WAN)은 라우터, 리피터, 위성 등을 통해 LAN과 MAN을 상호 연결하여 15 km 이내의 넓은 영역에서 전 세계의 통신을 가능하게 하는 무선기술이다. WAN에 무선 연결은 IEEE 802.20 표준에 근거한 Mobile-Fi 프로토콜을 사용하여 수행된다. 이 프로토콜은 비교적 빠른 1 Mbps의 데이터 속도로 모바일 사용자에게 고속 무선 액세스를 제공한다.

대도시영역 무선통신(MAN) 표준은 IEEE 802.16을 따르고 사용하는 통신 방식으로는 70 Mbps로 데이터를 전송할 수 있는 WiMax가 있다.

근거리영역 무선통신(LAN) 표준은 통신 종류에 따라 IEEE 802.11 또는 IEEE 802.15.4를 따르며, 약 100 m 이내에서 통신 네트워크를 설계한다. Wi-Fi 프로토콜을 주로 사용하며 다중입력 다중출력 (MIMO; multi input multi output)기술 및 직교주파수 분할 다중기술 (OFDM; orthogonal frequency division multiplexing)의 빠른 속도로 데이터를 빠르게 전송할 수 있다.

개인영역 무선통신(PAN) 표준은 IEEE 802.15를 따르며, Bluetooth, ZigBee, Wi-Media 등이 있다. 그 사용 범위는 약 10 m 이내 정도이며, 통신 장치와 함께 사용되는 프로토콜 유형에 따라 250 kbps에서 500 Mbps까지의 전송속도를 갖는다.

표 2는 최근 발전소에서 사용되는 다양한 무선통신 기술에 대한 특징을 나타낸다. 최근 국내외 발전소에서는 무선통신기술을 적용하여 실시간 기기 모니터링

Table. 2 Specifications for frequently-used wireless telecommunications in power plants

	Wi-Fi	ZigBee	Z-wave	WirelessHART
Network	LAN	LAN	LAN	LAN
Topology	Star	Mesh, Star, Tree	Mesh	Mesh, Star
Power	Low-High	Very low	Very low	Very Low
Speed	1~600 Mbps	250 kbps	40 kbps	250 kbps
Range	4~100 m	10~100 m	30 m	200 m
Application	Internet, multimedia	Sensor networks, building and industrial automation	Residential lighting and automation	Industrial sensing networks
Cost adder	medium	medium	low	medium

및 유지·보수를 하려고 노력하고 있으며, 대표적으로 Z-wave, ZigBee, Wi-Fi, WirelessHART 등의 무선통신 프로토콜을 고려하고 있다. 이러한 무선통신 기술에 대하여 요약하면 다음과 같다.

○ Z-wave

Z-wave는 주로 가정 자동화에 많이 사용하는 통신 방식으로 국내 기준 920 MHz 주파수 대역의 메시 네트워크 방식을 사용하여 통신한다. 네트워크의 각 노드간 거리는 최대 30m 정도이며, 약 40 kbps의 속도로 데이터를 전송할 수 있다. 호환성면에서는 ZigBee에 비해 훨씬 우수하며, 매우 낮은 전력을 사용하여 통신하는 장점이 있으나, 단말 대수가 232대 이상일 경우 접속이 불가하다는 단점이 있다.

○ ZigBee

ZigBee는 IEEE 802.15.4 표준 기반의 10 ~ 100 m 사용 거리에서 저전력 및 250 kbps의 낮은 전송속도의 통신을 위해 개발되었다. 장치 간에 여러 중간 노드를 거쳐 데이터를 전달함으로써 넓은 범위 통신을 가능하게 하며 호환 장치는 홈 오토메이션, 상업용 오피스 응용 프로그램, 온도, 방사선 및 압력을 모니터링하는 센서 등의 분야에서 주로 사용된다. ZigBee의 단점은 10 m 로 제한되어 있는 전송 범위와 Wi-Fi, Bluetooth 등의 주파수 대역과 동일한 2.4 GHz 대역을 이용하여 방해 원인이 많이 존재한다는 점이다. 또한 보안에 취약하다.

○ Wi-Fi

Wi-Fi 제품은 4 가지 형식(802.11a, 802.11b, 802.11g 및 802.11n)으로 분류되어 있다. 2.4 GHz에서 통신하며, 데이터 통신에 사용되는 IEEE 표준에 따라 1 ~ 600 Mbps 속도로 100 m 범위 내에서 이 통신 기술을 사용하는 장치 간에 전송할 수 있지만, 보안에 취약한 단점이 있으므로, 방화벽과 같은 적절한 안전대책을 필요로 한다.

○ WirelessHART

WirelessHART는 프로세스 자동화 어플리케이션을 위한 하나의 무선 메시 네트워크 통신이며, 2.4 GHz에서 동작한다. 기존의 HART 장비에 무선 성능을 추가한 통신기술로 메시 네트워크를 이용한 신뢰성에 암호화 검증, 인증 등을 추가로 도입하여 보안성을 증대시킨 장점이 있으며, 매우 낮은 전력으로 광범위한 통신이 가능하다. 약 250 kbps의 속도로 200 m 이내 범위에서 통신 가능하며, 대규모 무선 인프라를 필요로 하는 단

점이 있다.

이와 같은 무선 통신 시스템을 원전 내 환경에 적용할 경우, 전도(conduction) 또는 방사(radiation)의 방식으로 의도하지 않은 전자파가 발생할 수 있을 뿐만 아니라, 캐비닛 내부의 계측제어 기기에 오작동이 발생할 수도 있다. 방사를 통해 기계실 내부에 전자파가 전파하는 경우, 캐비닛이 열려 있는 경우는 물론이고 닫혀 있는 경우라 하더라도 문 사이의 좁은 틈을 통해 전자파가 침투될 가능성이 있다. 따라서, 원전 내 무선통신 적용을 위해서는 이러한 환경적 조건을 고려한 전자파 적합성 규제가 필요할 것으로 예상된다.

IV. 무선통신 전파 규제 동향 조사 및 분석

Table. 3 EMC tests

EMC test	
EMI test	EMS test
Conducted Emission(CE) test	Conducted Susceptibility (CS) test
	Radiated Susceptibility(RS) test
	Burst/EFT test
Radiated Emission(RE) test	Surge test
	ESD test
	Voltage dip test

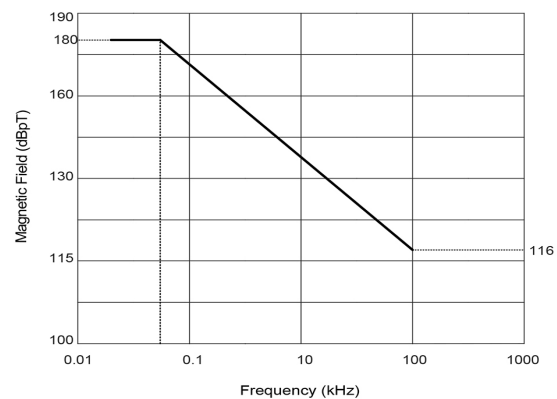


Fig. 2 RS101 test level

표 3은 전자파 적합성 시험 항목들을 요약한 내용을 나타낸다. 현재 원전에서 사용하고 있는 규제 기준인 RG. 1.180(개정1)에 명시된 CE 시험 항목은 CE101과

CE102가 있으며, RE 시험 항목은 RE101과 RE102가 있다. CS 시험 항목은 CS101, CS114, CS115, CS116이 있으며, RS 시험 항목은 RS101과 RS103이 있다[10]. EMI/RFI 시험 방법은 전달 방법에 따라 방사(R: Radiated) 또는 전도(C: Conducted)로 구분되며, 각각 장애(E: Emission) 시험과 내성(S: Susceptibility) 시험으로 구분된다. 특히 원전 내 무선통신 사용을 위해서는 외부의 전계 또는 자계에 대한 원전 내 계측 제어기의 방사 내성(RS)이 중요하다. 그림 2는 현재 국내의 원전에서 규제 기준으로 승인한 RG. 1.180(개정1)에 명시된 RS101 시험의 주파수별 시험수준(test level)을 나타낸 그림이다. RS101 시험은 외부에서 자계가 인가되었을 때, 기기 및 하부 시스템의 방사 자계에 대한 내성

을 확인하기 위한 시험이며, 30 ~ 60 Hz 범위에서는 최대값인 180 dBpT의 자계가 인가되었을 때 기기가 정상 작동하여야 내성적합성이 인정된다. 인가주파수가 높아짐에 따라 점차 이 운전 포락선이 낮아지며 100 kHz에서는 최소값인 116 dBpT의 자계가 인가되게 된다. 단, CRT(Cathode-Ray Tube), 전동기, 고전류 케이블 묶음 등과 같은 강력한 자계가 발생하는 시스템 주변에 설치되지 않으며, RG. 1.180에서 승인한 제한 사항을 따르는 장비는 이 시험을 생략할 수 있다. RS103 시험은 외부에서 전계가 인가될 때, 방사 전계에 대한 기기 및 하부 시스템의 내성을 확인하기 위한 시험이다. 주파수 범위에 상관없이 10 V/m의 전계가 수직 및 수평 편파로 입사 되었을 때 해당기기는 정상으로 작동하여

Table. 4 Differences of RS test according to revision no. in RG. 1.180 and related regulations

Standard		RS101		RS103		
		Frequency (kHz)	Level (dBpT/m)	Frequency (MHz)	Level (dBuV/m)	
EPRI TR-102323	Rev.1 (1997)	0.03~100	180~116	0.01~1000	140	
	Rev.2 (2000)			0.01(30)~10000		
	Rev.3 (2004)			0.01~1000		
RG. 1.180	First edition (2000)			30~1000*		
	Rev.1 (2003)			180 ~ 116 (Army) 175 ~ 88 (Navy)		0.01 ~ 40000
MIL-STD-461	Rev.D (1993)			180 ~ 116 (Army) 170 ~ 110 (Navy)		2 ~ 40000
	Rev.E (1999)					
	Rev.F (2007) Rev.G (2015)					
IEC 61000-4-8***	Rev.1 (2000)	50, 60 Hz	30 (Continuous wave) 300 (Short pulse)	-		
	Rev.2 (2009)					
IEC 61000-4-3****	First edition (1995)	-	-	80 ~ 1000 800 ~ 960 1400 ~ 2000	1, 3, 10 1, 3, 10, 30 1, 3, 10, 30	
	Rev.3 (2006)			800 ~ 960 1400 ~ 6000	1, 3, 10, 30 1, 3, 10, 30	

* The need for radiated susceptibility testing in the frequency range 1 GHz to 10 GHz has arisen because of the development of faster speed microprocessors and wireless communications.

** There were specific figure modifications in three revisions (Rev.E, Rev.F, and Rev.G) according to the applications in the case of RS103 test.

*** The method of measurement is partly changed.

**** The level 30s are extensively applied in accordance with applications.

야 하며, 원형 편파 신호로는 테스트하지 않는다.

표 4는 RG. 1.180에서 참고한 각종 외부 규제 문서들에 대한 개정 이력과 내용을 분석한 자료이다. EPRI TR-102323의 RS 시험 항목들은 시험 주파수 범위를 제외하고는 RG. 1.180(개정1)과 동일하다. EPRI TR-102323과 RG. 1.180를 비교하면, 모두 RS101 시험의 경우는 인가된 자계의 시험수준 및 주파수 범위까지 동일하며, RS103 시험의 경우는 인가된 전계의 시험수준만 동일하다. EPRI TR-102323의 경우, RS103 시험 주파수 범위를 개정 전은 최대 1 GHz까지 시험하도록 규정하였으나, 개정 후에는 최대 10 GHz 까지 시험하도록 변경되었다[5].

MIL-STD-461 시리즈는 미국 방위청이 배포하는 규제 문서의 일종으로, EMI/EMS 시험과 관련된 내용을 다루고 있다[4]. 1967년 7월 초판이 발행된 이후로 수차례의 개정되었으며 가장 최근에 발행된 문서는 MIL-STD 461(개정 G)로 2015년 12월에 발행되었다. MIL-STD-461 시리즈 중 RS 시험과 관련된 변동 내역은 표 4와 같으며, 개정 E판 이후로는 변동 내역이 없다. RS101 시험은 개정 D판에서 E판으로 개정될 때, Navy 분야에서 시험수준이 175 ~ 88 dBpT에서 170 ~ 110 dBpT로 축소되었다. RS103 시험의 경우, 10 kHz부터 시험하던 것을 2 MHz부터 시험하도록 변경되었으며, 적용 상황에 따른 시험수준이 변경되었다.

IEC 61000-4 시리즈 중에서 전계에 의한 방사 내성 시험은 IEC 61000-4-3에서 다루며, 1995년 초판이 발행되었고, 1998년에 개정 1판과 2002년에 개정 2판이 발행되었다[6]. IEC-61000-4-3에 명시된 전계에 대한 전자파 내성 시험수준은 Class 1~4와 Class X로 나누어져 있다. 특히, Class X는 실외 상황에서 시험할 경우의 시험수준을 나타낸다. 개정 2판에서 가장 크게 변경된 점은 휴대용 무선 전화 또는 다른 전자파(RF) 방사기에 의한 전자파 영향을 고려하여 시험 주파수 범위를 확장하였다는 점이다. 기존에는 800 ~ 960 MHz, 1.4 ~ 2 GHz 까지 시험하던 것을 800 ~ 960 MHz, 1.4 ~ 6 GHz 까지 확장하였으며, 의도성 전파(RF) 방사기에 대해서 시험수준 Class 4를 모든 주파수 범위에 적용하였다. 그러나 RG. 1.180의 경우, 무선통신 기기의 적극적인 사용을 고려하지 않은 수준인 Class 3의 전자파 내성을 시험하므로, 무선통신 적용시 전계 내성 시험수준을 30 V/m 까지 확장할 필요가 있을 것으로 사료된다.

V. 원전 내 무선통신 적용을 위한 외부 EMC 평가요소 조사 및 실내 전파 모델의 필요성

○ 외함에 의한 차폐 효과 평가 요소

외함의 차폐특성은 IEEE Std. 290 “method for measuring the shielding effectiveness of enclosures”에 차폐 효과(SE: shielding effectiveness)로서 정의되어 있다[11]. 차폐 효과란 전자기파가 외함(차폐벽)을 통과하기 전과 후의 세기에 대한 비율 값에 로그를 취한 값으로, 외함에 의한 전자기파의 감쇄정도를 나타내는 지표로 사용된다. 외함의 차폐효과는 외함의 형상과, 재질 등에 따라 다른 특성을 나타내며, 실제 시스템에 미치는 영향은 외함 외부 환경에서의 전자파 세기에서 차폐효과가 고려되어 감쇄된 전자파 세기의 영향을 받게 된다. 해당 IEEE Std. 290은 일반적인 소형 외함을 가진 기기의 차폐 효과를 제시하고 있으며, 9 kHz ~ 18 GHz (필요에 따라 50 Hz ~ 100 GHz로 확장 가능) 범위에서 외함에 의한 전자계 차폐 효과를 측정하는 통일된 기준을 제시한다.

측정을 통해 차폐 효과를 계산하는 방법에 대해서 예로서 그림 3은 1 GHz 이상의 주파수 범위에서 차폐 효과 측정 방법을 나타낸다. 이 영역에서는 외함의 내·외부에서 혼안테나를 일직선상에서 서로 마주보도록 위치

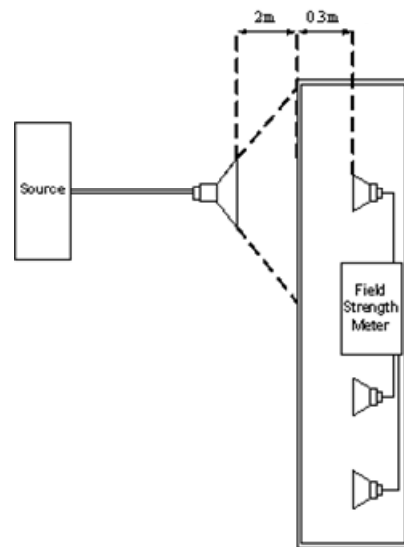


Fig. 3 Method of shield effectiveness measurement (above 1 GHz)

하여 측정한다. 수신 안테나는 외함의 내벽에서 최소 0.3 m 떨어진 위치에서 측정하며, 수평편파와 수직 편파를 모두 측정한다.

○ 개구면에 의한 누설(leak) 전계 평가 요소

최근 원전에서는 계측 제어시스템의 일부로서 디지털설비를 적용하고 있다. 이러한 디지털설비가 많이 설치된 예가 디지털계측 제어용 캐비닛이다. 원전 내 디지털계측 제어설비 캐비닛은 제작결함 및 부정합에 의한 개구면이 존재할 수 있다. 이러한 개구면은 주파수 영역에 따라 공진을 유발시킬 수 있으며, 이 경우 캐비닛 내부 디지털 설비에 전자파 간섭을 발생시킬 수 있다. IEEE Std. 1560은 개구면 누설 시험을 포함한 산업 기준문서로서, 개구면을 포함한 shielding room에서 혼 안테나를 사용하여 누설전계를 측정한다. 이러한 누설 전계측정방법을 원전 내 디지털 계측 제어설비 캐비닛에 적용할 경우 캐비닛 도어 또는 제작상의 문제로 인해 생길 수 있는 개구면의 형상을 고려한 전자파 적합성 평가요소로 사용될 수 있을 것으로 사료된다[12].

○ 실내 전파 모델을 적용한 평가요소

무선 전파 모델은 무선 전파의 특성을 주파수, 거리 및 여러 변수들의 조합으로 경험적 수학 공식으로 만든 모델을 의미하며, 여러 가지 모델이 있다. 각각의 모델은 서로 다른 전파환경 조건 하에서 전자파의 전파를 예측할 수 있도록 개발되었다. 무선 전파 모델은 크게 실내 모델과 실외 모델로 나뉘지며, 이 중 실내 전파 모델은 무선기기가 실내에 위치할 경우 거리 및 건물의 층 높이 등에 따른 전파의 경로손실을 나타내는 모델이다. 실내 전파 모델은 크게 ITU(International

Telecommunication Union) 실내 감쇄 모델과 로그-거리 경로손실 모델로 나누어진다. 현재는 원전 내 안전 관련 계측 제어설비에 대한 배제구역(exclusive zone)의 크기를 설정할 때, 자유공간을 가정하여 배제구역의 거리를 계산한다. 그러나 이는 실내 환경에서 무선 전자파가 전파될 때, 실질적인 전파 환경에 의한 무선 전자파의 감쇄는 고려되지 않는 계산 결과이다. 따라서 실내 전파 모델을 적용하여 안전관련 디지털계측 제어설비에 대한 보다 실제적인 배제구역 등을 도출할 수 있다.

ITU 실내 감쇄 모델은 실내 환경에서 건물 벽에 의해 닫힌 공간이나 방안에서의 전파 경로손실을 계산하는 모델로 무선기기의 동작 주파수, 송수신 기기 간의 거리, 건물 환경, 송수신기기간 층수 차이 등의 요소에 의해 계산된다. 표 5는 ITU 실내 감쇄 모델에서 900 MHz에서 70 GHz까지 총 7개의 주파수 대역으로 분류하였을 때 적용되는 손실 계수를 나타낸다. 건물환경은 주거지, 사무실, 상업지역 등으로 분류할 수 있으며, 주파수 범위, 건물의 복잡도에 따라 전파의 거리출력 손실 계수가 다르게 나타난다.

표 6은 송수신기가 서로 다른 층에 위치할 경우, 전파가 건물을 뚫고 통신되는 환경을 고려하여 층이 바뀔 때 발생하는 무선기기간 전파의 감쇄의 정도를 바닥통과계수(L_f)를 이용하여 제시하고 있다. 송수신기가 동일한 층에 있을 경우 $n=0$ 으로 계산한다. 식 (1)은 건물 환경, 경로, 거리(d), 바닥 통과 계수(L_f), 층수 차이(n) 등의 조건을 고려한 ITU 실내 감쇄 모델의 경로 손실 수식이다. 이를 원전 내 안전관련 계측 제어시스템의 배제 구역 결정에 적용하면 보다 현실적인 결과를 도출할 수 있을 것으로 사료된다.

$$Path\ loss_{indoor}(dB) = 20\log(f) + N\log(d) + L_f(n) - 40.9 \quad (1)$$

Table. 5 Distance-power dissipation coefficient of ITU indoor attenuation model (n)

Frequency	Residential area	Office area	Commercial area
900 MHz	-	33	20
1.2 ~ 1.3 GHz	-	32	22
1.8 ~ 2.0 GHz	28	30	22
4 GHz	-	28	22
5.2 GHz	-	31	-
60 GHz	-	22	17
70 GHz	-	22	-

Table. 6 Floor penetration coefficient of ITU indoor attenuation model (L_f)

Frequency	Residential area	Office area	Commercial area
900 MHz	-	9 (n=1) 19 (n=2) 24 (n=3)	-
1.8 ~ 2.0 GHz	4 n	15 + 4 (n-1)	6 + 3 (n-1)
5.2 GHz	-	16 (n=1)	-

이와 같이 실내 환경에서 원전 내 기기에 영향을 줄 수 있는 요소를 다양하게 고려하여[13, 14] 실제 발전소 환경에 최적화된 규제요소 마련이 필요할 것으로 예상되며, 이를 위해 추후 실내 환경 변화에 따른 전자파 분포를 측정하여 실 환경에 적합한 전자파 적합성 규제 기준을 제시할 계획이다.

VI. 결 론

본 연구에서는 원전용 계측 제어기기를 진단하고 유지·보수하기 위한 무선 통신 기술의 국내외 적용 사례, 프로토콜 및 그에 따른 전파특성을 조사하였다. 이와 더불어 원전내 EMC와 관련하여 규제 지침으로 사용 중인 KINS/RG-N03.09(개정 2판)에서 승인한 RG. 1.180, MIL-STD 461E 및 IEC 61000-4를 분석하였고 대하여 분석하였다. 또한 차폐효과, 실내 감쇄 모델 등 실내 환경 및 구조적 특징을 고려한 전자파 평가 요소에 대하여 분석하였다. 원전 내 무선통신 적용시, 유지·보수 비용의 절감, 안정적인 기기 운용 등 다양한 장점이 있으나, 전자파 적합성과 관련하여 현재 원전 내에서 승인하고 있는 규제 지침은 무선통신 적용에 대한 고려가 다소 미진한 실정이다. 따라서 원전 내 환경에 무선통신 시스템을 적용하는 것과 관련한 많은 연구가 필요할 것으로 예상된다.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by the Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (No. 2015R1A6A1A03031833) and Nuclear Safety Research Program through the Korea Foundation Of Nuclear Safety(KoFONS), granted financial resource from the Nuclear Safety and Security Commission(NSSC), Republic of Korea. (No. 1305003).

REFERENCES

- [1] J. K. Lee, "Adopting wireless technology in NPP I&C system," in *proceedings of the Nuclear Procurement Issues Committee 2011*, Gyeongju, Korea, pp. 13-14, 2011.
- [2] J. Blaney, "Benefit by installing reliable secure wireless communications networks at your plant," *Combined Cycle Journal*, pp. 103, Sep. 2008
- [3] Oak Ridge National Laboratory, "Assessment of Wireless Technologies and Their Application at Nuclear Facilities," Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge: USA, Technical Report NUREG/CR-6882, 2006.
- [4] U.S. DOD, "Requirements for The Control of Electro Magnetic Interference Characteristic of Subsystems and Equipment," DoD: USA, Technical Report MIL-STD-461 E, 1999.
- [5] EPRI, "Guidelines for Electromagnetic Interference Testing of Power Plant Equipment," EPRI : USA, Technical Report EPRI TR-102323 Rev.3, 2003.
- [6] IEC, "Testing and measurement techniques - Radiated, radio-frequency,electromagnetic field immunity test," IEC: USA, Technical Report IEC 61000-4-3, 2010.
- [7] J. Ralston, "Improving plant production with wireless condition monitoring," Prosoft Technology [Internet]. Available: <http://www.prosoft-technology.com/content/download/4578/32674/file/Improving+Plant+Production+with+Wireless+Condition+Monitoring.pdf>.
- [8] C. W. Taft, A. J. Hussey, T. Kuruganti, J. N. Sorge, and A. Nasipuri., "Low-Cost Wireless Sensors Can Improve Monitoring in Fossil-Fueled Power Plants Power," [Internet]. Available: <http://www.powermag.com/low-cost-wireless-sensors-can-improve-monitoring-in-fossil-fueled-power-plants/?printmode=1>.
- [9] U.S. NRC, "Instrumentation and Controls in Nuclear Power Plants: An Emerging Technologies Update," Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge: USA, Technical Report NUREG/CR-6992, 2009.
- [10] U.S. NRC, "Guidelines For Evaluating ElectroMagnetic and Radio-Frequency Interference in Safety-Related Instrumentation and Controls Systems," Nuclear Regulatory Commission: USA, Technical Report Regulatory Guide 1.180 Rev. 1 , 2003.
- [11] IEEE Std 299, *IEEE Standard Method for Measuring the Effectiveness of Electromagnetic Shielding Enclosures*, IEEE, Piscataway, N.J., 2006.

- [12] IEEE Std 1560, *IEEE Standard for Methods of Measurement of Radio-Frequency Power-Line Interference Filter in the Range of 100 Hz to 10 GHz*, IEEE, Piscataway, N.J., 2006.
- [13] D.J. Kim, and P. L. Manjusha, "Building detection in high resolution remotely sensed images based on automatic histogram-based fuzzy c-means algorithm," *Asia-pacific Journal of Convergent Research Interchange*, vol. 3, no. 1, pp. 57-62 Mar. 2017.
- [14] S.H. Ye, and S. Han, "Indoor environment monitoring system using short-range wireless communication in mobile devices," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 17, no. 9, pp. 2167-2173, Sep. 2013.



강승석(Seungseok Kang)

2015년 홍익대학교 전자전기공학부 졸업
2015년 홍익대학교 전자전기공학과 석사 입학
※관심분야 : GPS 안테나, 차량 및 항공기 탑재 안테나 시스템



임태흥(Tae Heung Lim)

2016년 홍익대학교 전자전기공학부 졸업
2016년 홍익대학교 전자전기공학과 석사 입학
※관심분야 : 광대역 안테나 설계, 어레이 안테나 시스템 설계 및 방탐, TMA 안테나 시스템 설계



주재율(Jaeyul Choo)

2004년 홍익대학교 전자전기공학부 학사
2006년 홍익대학교 전파통신공학부 석사
2014년 한국과학기술원 전자전기공학부 박사
2006년 ~ 2011년 (주) LS산전 중앙연구소 주임연구원
2014년 ~ 현재 한국원자력안전기술원 선임연구원
※관심분야 : 안테나 설계, IC 패키징 해석, EMC 해석 및 대책



김형태(HyungTae Kim)

1999년 부산대학교 전자공학과 졸업
2001년 포항공과대학교 정보통신대학원 졸업(공학석사)
2001~2004 LG이노텍 시스템 연구소
2004~2007 LG전자 MC 사업부
현재 한국원자력안전기술원 선임연구원.
※주관심분야: 원전 계측제어계통 규제기술



김대희(Daehee Kim)

2008년 고려대 전파통신공학과 졸업.
2010년 고려대 대학원 컴퓨터통신공학부 졸업(공학석사).
2014년 고려대 대학원 컴퓨터통신공학부 졸업(공학석사).
현재 한국원자력안전기술원 선임연구원.
※주관심분야: 원전 계측제어계통 규제기술



변강일(Gangil Byun)

2010년 홍익대학교 전자전기공학부 졸업
2012년 홍익대학교 전자전기공학과 석사 졸업
2015년 한양대학교 전자컴퓨터통신공학과 박사 졸업
2015년 ~ 2017년 홍익대학교 메타물질전자소자연구센터 연구교수
※관심분야 : 빔포밍 배열안테나 기술, 안테나설계 및 최적화, 차량 및 항공기용 안테나, 방향 탐지 및 항재밍 배열 안테나



박종언(Jong Eon Park)

2006년 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 학사 졸업
2009년 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 석사 졸업
2013년 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 박사 졸업
2013년 ~ 2015년 미국 오하이오 주립대학교 박사후 연구원 근무
2016년 ~ 현재 홍익대학교 메타물질전자소자연구센터 연구교수
※관심분야 : 전자파 산란, 안테나 설계, EMI & EMC 해석, 개구 투과 현상 분석 등



이준용(Jun-Yong Lee)

1986년 서울대학교 컴퓨터공학과 졸업
1988년 Univ of Minnesota 컴퓨터공학과 석사 졸업
1996년 Univ of Minnesota 컴퓨터공학과 박사 졸업
1996년 ~ 1997년 미국 IBM Staff 연구원 근무
1997년 ~ 현재 홍익대학교 정보컴퓨터공학과 교수
※관심분야 : 컴퓨터시스템 응용, 임베디드 시스템, 실시간 프로세싱 등



추호성(Hosung Choo)

1998년 한양대학교 전파공학과 졸업
2000년 University of Texas at Austin 전자전기공학과 석사 졸업
2003년 University of Texas at Austin 전자전기공학과 박사 졸업
2003년 ~ 현재 홍익대학교 전자전기공학과 교수
※관심분야 : 초소형 안테나, 최적화 알고리즘을 이용한 안테나 설계, RFID용 태그 및 리더 안테나 등