

# 원자력발전소 안전 관련 디지털 기기의 내환경검증 (Environmental Qualification) 동향

고재승\* · 김상은\*\* · 김성렬†

## Trend of Environmental Qualification of Safety-Related Digital Equipment in Nuclear Power Plants

Jae Seung Ko\*, Sang Eun Kim\*\*, Sung-ryul Kim†

(Received 2 May 2024, Revised 3 June 2024, Accepted 10 June 2024)

### ABSTRACT

Environmental qualification is required for safety related electrical equipment under harsh environments located in nuclear power plants according to 10 CFR 50.49 and RG 1.89. As analog technology has recently been replaced by digital technology, NRC established RG 1.209 as a regulatory guideline for environmental qualification of safety related computer-based I&C system located in mild environments, requiring evaluation for electromagnetic compatibility, smoke exposure and type test for actual service conditions such as temperature and humidity. In this paper, the trend of environmental qualification for digital equipment is analyzed by comparing the environmental qualification requirements between digital and analog equipment.

**Key Words :** Environmental qualification (내환경검증), Digital equipment (디지털 기기), Mild environment (온화한 환경), Electromagnetic compatibility(전자파적합성), Smoke exposure(연기 노출), Type test(형식 시험)

## 1. 서 론

원자력발전소(이하 원전)에 주로 사용되었던 아날로그 기기가 디지털 기기로 대체됨에 따라 미국의 규제 기관인 Nuclear Regulatory Commission(NRC)는 디지털 기기에 대한 내환경검증 요건을 보완하여 기존보다 강화된 규제 입장을 제시하고 있다. 미연방 규정인 10 CFR 50.49가 가혹한 환경에 위치하는 기기(이하 Harsh 기기)로 내환경검증 대상 범위를 제한함<sup>(1)</sup>에 따라 온화한 환경에 위치하는 기기(이하 Mild 기기)는 주요 노화 메커니즘이 확인되지 않는 한 노화 처리나 사고 시험이 요구되지 않으므로 기기의 설계/구매 사양서와 정비 및 주기 점검

프로그램을 통해 10 CFR 50 부록 A 일반 설계 기준의 환경 설계 기준(GDC 4)이 준수된다<sup>(2)</sup>.

하지만, NRC는 아날로그 기기를 대상으로 개발된 기존의 내환경검증 방법만으로 디지털 기기의 복잡한 기능 특성을 평가하는 것은 한계가 있다고 판단하여 온화한 환경에 위치하는 안전 관련 컴퓨터 기반 계측제어 계통에 대한 내환경검증 규제 지침서인 RG 1.209<sup>(3)</sup>를 추가 제정함으로써 전자파, 연기 노출, 정상 운전 시 온습도 환경에 대한 영향 평가를 요구하고 있다. 아울러, 해당 규제지침서의 대상 범위가 프로그램 가능한(Programmable) 모든 디지털 기기로 확장될 필요가 있음을 피력하고<sup>(4)</sup>, 내환경검증 관련 후속 규제 지침서들의 변경 요건을 반영하기 위한 동 규제 지침서의 개정 계획을 밝히고 있다<sup>(5)</sup>. 따라서, 본 논문에서는 온화한 환경에 위치하는 디지털 기기에 대한 내환경검증 규제 요건을 선제 검토하고 기존의 전형적인 내환경검증 평가 방법과

†책임저자, 공오공대, 소프트웨어공학과

E-mail : sungryul@kumoh.ac.kr

TEL : (054)478-7549

\* 한국전력기술(주) 원전안전센터

금오공과대학교 디지털융합공학과 석사과정

\*\* 한국전력기술(주) 원전안전센터

비교를 통해 변화되고 있는 내환경검증 동향을 분석하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 안전관련 전기기기에 대한 기기검증

기기검증은 원전 산업의 고유 업무로써 원전의 안전성 유지에 필요한 안전 관련 기기들이 정상 운전 시뿐만 아니라 지진 및 냉각재 상실 사고(Loss of Coolant Accident; LOCA) 등과 같은 설계 기준 사건(Design Basis Event; 이하 DBE) 발생 시에도 안전 기능이 수행될 수 있음을 입증하는 것을 말하며 내환경검증과 내진검증을 포함한다<sup>6)</sup>.

내환경검증은 발전소 환경조건(온도, 압력, 방사선, 습도, 화학 산수 등)에 대한 기기 건전성을 입증하는 과정으로써 정상 운전 시의 노화를 모의하여 검증 수명(Qualified Life)을 결정하고, 사고 시험을 통해 안전 기능 수행 여부를 검증하는 것을 목적으로 한다.

내진검증은 내진 범주 I급 기기에 대해 예상되는 운전 기준 지진(Operating Basis Earthquake) 및 안전 정지 지진(Safety Shutdown Earthquake) 조건을 모의하여 기기의 구조적 건전성과 운전성을 입증하는 과정을 말하며, 내진 검증 요건은 전기기기 종류(아날로그 또는 디지털)에 따른 차이가 없고 RG 1.209에서도 디지털 기기에 대한 내진검증 관련 변경 요건을 제시하고 있지 않아 본 논문 범위에서 제외하였다.

### 2.2 내환경검증 관련 주요 규제요건 및 기술기준

기기검증은 산업계에서 발행한 IEEE 323-1971(Trial Use Guide)로부터 시도되었고 이후 기술적인 개념과 검증 방법 및 절차가 보완된 IEEE 323-1974<sup>7)</sup>가 RG 1.89 Rev.0에 의해 승인되면서 내환경검증에 대한 정식 기술기준으로 확립되었으며, NRC가 Three Mile Island 원전 사고(1979년)를 계기로 10 CFR 50.49(1983년)를 제정함으로써 원전의 안전 관련 전기기기에 대한 내환경검증 요건이 법규화되었다.

국내의 경우, 10 CFR 50.49와 RG 1.89 Rev.1<sup>8)</sup>을 기반으로 하는 국내 경수로형 원전의 내환경검증에 대한 규제 기준과 규제 지침이 제정(2011년)되어 있으며 건설 중인 신규 원전은 미국의 법적 및 규제 요건 외에도 국내 경수로형 원전 규제 기준 및 규제 지침이 적용된다. 미국과

국내의 주요 규제 요건 및 기술기준은 Fig. 1과 같다.

US Regulatory Regulation	Korean Regulatory Regulation	Remark
10 CFR 50. 49	3.5	Environmental Qualification

US Regulatory Guideline	Korean Regulatory Guideline	Remark
Reg. Guide 1.89	Korean Reg. Guide 3.3	Environmental Qualification
Reg. Guide 1.40	Korean Reg. Guide 3.4	Electric Motors
Reg. Guide 1.73	Korean Reg. Guide 3.5	Power Operated Valve Assemblies
Reg. Guide 1.211	Korean Reg. Guide 3.6	Cables
Reg. Guide 1.156	Korean Reg. Guide 3.7	Electrical Connection Assemblies
Reg. Guide 1.158	Korean Reg. Guide 3.8	Batteries
Reg. Guide 1.180	Korean Reg. Guide 3.9	EMI/RFI
Reg. Guide 1.209	Korean Reg. Guide 3.10	Computer-Based I&C System
Reg. Guide 1.210	Korean Reg. Guide 3.11	Inverters
Reg. Guide 1.213	Korean Reg. Guide 3.12	Motor Control Centers

Industry Standard	Industry Standard
IEEE, ASME	- KEPIC END, MF

Fig. 1 Comparison of regulations between US and Korea

#### 2.2.1 10 CFR 50.49

미국의 에너지 관련 연방 규정으로서 원전의 내환경검증에 대한 법적 규제 요건을 수립하기 위해 제정되었으며 원자력 발전사업자가 내환경검증 시 반드시 지켜야 할 강제 규정이다. 내환경검증 대상 범주를 Table 1과 같이 제시하고 있으며 Harsh 기기로 내환경검증 적용 범위를 제한하고 있다. 국내의 경우, 경수로형 원전 규제기준(KINS/RS) 3.5 “기기검증”과 내용이 대응된다.

Table. 1 Environmental qualification category criteria

1) 안전 관련 전기기기
2) 안전 관련 기기의 안전 기능 수행을 저해할 수 있는 비 안전 관련 전기기기
3) 사고 후 감시 기기

#### 2.2.2 RG 1.89

10 CFR 50.49를 보조하기 위한 시행지침 성격의 규제 지침서로서 내환경검증에 대한 NRC의 상세한 규제 입장을 제시하고 있으며 내환경검증 관련 기술기준인 IEEE 323-1974을 승인하기 위해 제정(1974년)되었다. 이후 내환경검증에 대한 법규화 과정을 통해 규제 입장이 추가 보완되어 개정 발행(1984년)되었으며 국내의 경수로형 원전 규제지침(KINS/RG) 3.3 “안전 관련 계측 및 전기기기에 대한 내환경검증”과 내용이 대응된다.

#### 2.2.3 RG 1.180<sup>9)</sup>

원전의 안전 관련 계측제어 계통에 대한 EMI/RFI 및

Power Surge 영향 평가를 위해 제정된 규제 지침서로서 전자파 적합성 검증(Electromagnetic compatibility; EMC)에 관한 시험 요건과 방법을 제시하고 있다. 국내의 경우, 경수로형 원전 규제지침 3.9 “안전 관련 계측 및 전기기기의 전자파 장해에 대한 평가 지침”과 내용이 대응된다.

### 2.2.4 RG 1.209

원전의 안전 관련 컴퓨터 기반 계측제어 계통에 대한 내환경검증 규제 지침서로서 Harsh 기기만을 대상으로 하는 RG 1.89를 보완하여 온화한 환경에 위치하는 디지털 기기의 내환경검증 요건(전자파 적합성 검증, 화재에 의한 연기 노출, 정상 운전 온습도 환경에 대한 평가 등)을 제시하고 있으며 IEEE 323-2003<sup>(10)</sup>을 승인하고 있다. 국내의 경우, 경수로형 원전 규제지침 3.10 “안전 관련 컴퓨터-기반 계측제어 계통에 대한 검증”과 내용이 대응된다.

### 2.2.5 NUREG 0800 (Standard Review Plan 3.11)

원전의 건설 및 운영 허가를 위해 작성되는 안전성분석 보고서(Safety Analysis Report)에 관한 NRC의 검토지침이 제시된 문서로서 안전 관련 전기 및 기계기기에 대한 내환경검증 평가 방법이 제시되어 있다. 국내의 경우, 경수로형 원전 안전심사지침(SRG) 제3.11절 “기계 및 전기기기의 환경검증”과 내용이 대응된다.

### 2.2.6 IEEE 323

원전의 안전 관련 전기기기에 대한 기기 검증 기술기준으로서 내환경검증, 내진 검증 관련 요건 및 절차를 담고 있다. 주요 내용으로 내환경검증 원칙, 검증 방법, 시험 순서, DBE 시험 시 고려 사항, 문서화 요건 등이 제시되어 있으며 국내의 경우, 전력산업기술기준(KEPIC END 1100) “전기 1급 기기 검증”과 내용이 대응된다. 본 논문에서는 내환경검증만 기술한다.

## 2.3 전형적인 내환경검증 방법 및 절차

내환경검증은 기기가 설치되는 격실의 환경에 따라 검증 방법이 다르게 적용된다. 원전은 가혹한 환경과 온화한 환경으로 구분되며, 냉각재 상실사고(LOCA), 고에너지

배관파단사고(HELB) 및 주증기관 파단사고(MSLB)와 같은 설계기준사건의 결과에 의한 환경과 방사선이 100Gy(전자부품의 경우 10Gy)를 초과하는 지역을 가혹한 환경으로 정의하고, 운전 중 예상사건을 포함한 발전소 정상 운전 기간 동안 발생할 수 있는 환경보다 더 심각하지 않은 환경과 방사선이 100Gy보다 적은 지역을 온화한 환경으로 정의한다<sup>(2,10)</sup>. IEEE 323-1974에서는 검증 방법으로써 시험, 해석, 운전 경험, 이들의 조합된 방법을 제시하고 있으며 시험을 통한 검증이 가장 선호되는 검증 방법임을 기술하고 있다. 고온, 고압, 고습의 가혹한 환경에 놓이는 기기의 성능을 단지 해석적인 방법만으로 검증하는 것은 규제 요건에 부합하지 않으므로<sup>(11)</sup> Harsh 기기는 시험을 통한 검증이 통용되는 반면, Mild 기기는 유지보수를 위한 접근성이 용이하므로 기기의 성능을 확인할 수 있는 간단한 문서화 요건과 정비 및 주기 점검 프로그램을 통해 환경 설계 기준이 준수됨과 더불어 내환경검증의 적절성이 확인된다.

Harsh 기기에 대해 시험으로 검증을 수행하는 경우, 검증될 기기의 대표 시편을 선정 후 시너지 효과(Synergistic Effect)를 고려하여 기기를 자연 노화시키거나 인위적인 가속 노화 방법으로 설치 수명의 말기 조건으로 만들어야 하며, DBE 동안의 안전 기능 수행 여부를 검증하기 위해 기기의 공통원인고장(Common Cause Failure)을 유발할 수 있는 온도, 압력, 습도, 방사선, 화학 살수 등의 주요 환경인자들이 모두 고려되어야 한다<sup>(18)</sup>.

내환경검증은 일반적으로 IEEE 323에 제시되어 있는 시험 절차에 따라 시행되며, Fig 2와 같이 순차적으로 진행된다. 시편의 손상 여부를 확인하기 위한 초기 점검을 시작으로 성능시험을 시행하여 기기의 이상 유무를 확인한 후 온도에 대한 노화를 모의하기 위해 기기가 설치되는 격실의 최고 온도와 기기 운전 시 발생하는 열 상승(Heat Rise)을 고려하여 기기의 검증 수명을 결정한다. 열 노화는 온도에 대한 가속 노화 기법인 아레니우스 방정식을 이용하며 발전소의 저온/장시간 운전 조건을 고온/단시간의 시험 조건으로 모의하여 시험한다. 아울러, 방사선 환경하에서 검증되어야 하는 기기는 열 노화 후 기기가 견뎌야 하는 총누적방사선량(정상 시 방사선량+사고 시 방사선량)에서 노화되어야 하며, Cobalt 60이나 Cesum 137을 방사선원으로 시험한다. 저 방사선량에 노출되는 기기의 검증에

대해서는 유기물질들(Organic Compound)의 방사선 문턱값(Radiation Threshold)이 최소 100Gy 이상을 나타내고 있으므로 100Gy 미만의 방사선량에 대한 검증은 기존 시험자료나 운전 경험으로 그 타당성을 입증할 수 있으나, 유기 물질을 포함하는 전자부품의 경우, 방사선 문턱값이 100Gy 미만일 수 있으므로 10Gy를 초과하는 방사선량은 가혹한 환경으로 분류됨에 따라 일반적으로 시험을 통해 검증이 수행된다<sup>(2)</sup>.

검증 기간 단축을 위해 너무 높은 온도와 방사선 조사율로 시험하게 되면 재질의 노화를 제대로 모의할 수 없으므로 열 노화에 대해서는 100시간 이상의 시험이 권고되며<sup>(7,10)</sup> 방사선 시험에 대해서는 일반적으로 시간당 10,000Gy 이하의 조사율로 시험한다<sup>(12)</sup>.

노화 처리를 통해 목표로 설정한 수명만큼의 경년열화가 모의되었다면 IEEE 344에 따라 내진 시험을 시행하여 구조적 건전성과 운전성을 확인한 후 최종적으로 사고 시험을 통해 DBE 동안의 안전 기능 수행 여부를

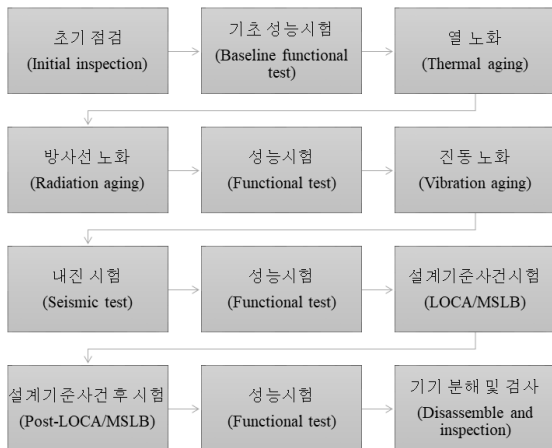


Fig. 2 General test procedure of environmental qualification based on IEEE 323

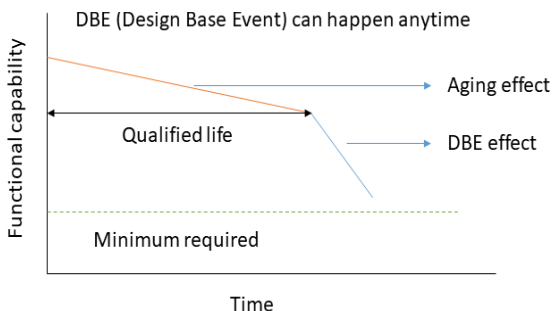


Fig. 3 Relationship of functional capability to qualified life

입증한다. 사고 시험은 시험 및 측정 장비 등에 대한 불확실성(Uncertainty)을 고려하기 위해 여유도(Margin)가 포함되어 시행되어야 하며, 해당 시험 절차를 거치면서 단계별 성능시험을 통해 허용 기준을 모두 만족하였다면 그 기기는 해당 발전소의 환경 조건에서 검증이 완료된 것으로 판단한다. (Fig. 3 참조)

반면, Mild 기기에 대한 내환경검증은 Harsh 기기에 비해 엄격한 내환경검증 요건이 적용되지 않는다. 내환경검증이 초기 원전의 아날로그 기기를 대상으로 개발됨에 따라 환경 내성이 우수한 아날로그 기기들은 온화한 환경 조건에서 주요 노화 메커니즘에 의한 공통 원인 고장을 일으킬 가능성이 매우 낮고, 문제가 발생하더라도 가동 중 유지보수로 조치가 가능하므로 주요 노화 메커니즘이 없는 Mild 기기에 대해서는 내진 시험 이전의 노화 처리와 사고 시험이 요구되지 않는다<sup>(10)</sup>. 따라서, Mild 기기에 대해서는 운전 조건을 확인할 수 있는 기기의 설계/구매 사양서와 성능을 입증하는 품질보증확인서(Certificate of Conformance) 및(또는) 평가 등의 문서화 요건이 요구되며<sup>(2,10,13)</sup>, 잘 지원된(Well-supported) 정비 및 주기 점검 프로그램을 통해 그 기기는 설계 수명 동안 충분히 검증될 것으로 평가된다<sup>(2)</sup>.

하지만, 국내의 경우, 보다 보수적인 접근방법으로 Mild 기기에 대해서도 주요 노화 메커니즘 존재 유무를 확인하기 위해 노화 해석 평가를 수행하며, 기기에 사용되는 재질별 활성화에너지 및 방사선 문턱값을 기준으로 기기의 수명을 해석하여 산출된 수명에 따라 기기의 교체 주기를 설정한다.

### 2.4 디지털 기기의 내환경검증

디지털 기기는 아날로그 기기보다 방사선에 취약한 단점이 있어 온화한 환경에 위치하도록 설계됨에 따라 Mild 기기에 대한 내환경검증 방법이 적용되어 왔으나, 디지털 계측제어 계통이 NRC의 기술보고서<sup>(14~19)</sup>를 통해 원전 내 전자과 환경에 상당히 취약한 것으로 확인됨에 따라 EMI/RFI 및 Power Surge는 내환경검증 시 고려되어야 하는 환경인자로 간주되고 있다<sup>(10)</sup>. 아울러, 화재에 의한 연기 노출(Smoke Exposure)과 온화한 환경의 정상 운전 시 온습도 환경도 디지털 기기의 안전 기능에 영향을 미칠 수 있다는 연구 결과<sup>(17,18,20~22)</sup>가 보고되면서 NRC는 RG 1.209를 통해 온화한 환경에 위치하는 안전 관련 컴퓨터 기반 계측제어 계통의 내환경검증 기술기준으로 IEEE 323-



2003의 사용을 승인하고 온화한 환경에 위치하는 디지털 기기에 대해서는 기존의 내환경검증과 다른 접근 방법으로 검증되어야 함을 요구하고 있다. 따라서, 디지털 기기는 RG 1.180 Rev.1에 따른 전자파 적합성 검증, 화재에 의한 연기 노출 영향, 정상 운전 시 온습도 환경 시험이 추가적으로 고려되어야 한다.

### 2.4.1 전자파 적합성 검증

전자파 적합성 검증이란 기기가 주위의 전자파환경에서 고장 없이 성능을 유지하고, 그 기기 자체도 전자파환경을 유발하는 원인이 되지 않음을 입증하는 것을 말한다. 따라서, 전자파 적합성 검증 시 기기의 방출성(Emission) 및 감응성(Susceptibility) 측면과 Power Surge에 대한 영향이 모두 고려되어야 하며, 전자파 장애는 매개 경로에 따라 전도 (Conducted)되거나 방사(Radiated)될 수 있으므로 시험 대상 기기는 전도방출 시험(Conducted Emission), 방사방출 시험(Radiated Emission), 전도감응성 시험(Conducted Susceptibility), 방사감응성 시험(Radiated Susceptibility) 등이 모두 시행되어야 한다. RG 1.180 Rev.1은 전자파 적합성 검증과 관련하여 Table 2과 Table 3에 제시되어 있는 시험 항목들을 요구하고 있다.

**Table 2** List of EMC test required by RG 1.180 Rev.1

구분	MIL Std	IEC 61000-4 Series	시험성격
Emission (방출)	CE101	-	전도방출 시험 (저주파수)
	CE102	CISPR11	전도방출 시험 (고주파수)
	RE101	-	방사방출 시험 (저주파수)
	RE102	CISPR11	방사방출 시험 (고주파수)
Susceptibility (감응성)	CS101	IEC61000-4-13	전도감응성 시험 (저주파수)
		IEC61000-4-16	
	CS114	IEC61000-4-6	전도감응성 시험 (신호선/전원선, 고주파수)
	CS115	IEC61000-4-4	전도감응성 시험 (신호선 Surge)
		IEC61000-4-5	
		IEC61000-4-12	
	RS101	IEC61000-4-8	방사감응성 시험 (저주파수)
IEC61000-4-9			
IEC61000-4-10			
RS103	IEC61000-4-3	방사감응성 시험 (고주파수)	

**Table 3** List of surge test required by RG 1.180 Rev.1

구분	IEEE	IEC 61000-4 Series	인가파형
Surge	IEEE C62.41 IEEE C62.45	IEC61000-4-4	EFT
		IEC61000-4-5	Combination Wave
		IEC61000-4-12	Ring Wave

### 2.4.2 화재에 의한 연기 노출

화재에 의한 연기 노출은 내환경검증 시 고려되지 않았던 환경인자였으나 1990년대 초반 NRC의 독립 검토기관인 ACRS(Advisory Committee on Reactor Safeguards)로부터 연기 노출이 디지털 기기의 성능에 영향을 미칠 수 있다는 주장이 야기되면서 NRC는 마이크로프로세서 기반 기술의 새로운 노화 메커니즘 존재 가능성을 확인하기 위해 화재에 의한 연기 노출을 디지털 기기에 영향을 미칠 수 있는 하나의 환경인자로 가정하고 국립 연구기관(SNL, ORNL, BNL)들과 함께 연기가 디지털 기기에 미치는 영향에 대해 연구를 시작하였다<sup>(17,18,20,21)</sup>.

시험 결과, 연기는 부속 모듈 간의 통신을 방해하여 오류를 발생시키고 PCB의 절연저항을 감소시켜 증가된 누설전류로 인해 기기의 오동작을 유발하는 등 디지털 기기의 기능에 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 아울러, 연기에 한 번 노출된 기기는 연기가 제거된 후에도 지속적으로 오류가 발생하였으며 연기의 농도가 올라갈수록 오류의 심각도(Severity)도 증가하였다. 오류 발생의 원인이 카드 접촉부(Edge Connector 등) 내 연기 입자의 축적과 연기 입자에 의한 일시적인 회로 단락(Circuit Bridging)으로 분석됨에 따라 기밀성이 우수한 HSM(Hermetically Sealed Microcircuits) 소자를 사용하고 기판에 솔더 마스크(Solder Mask)와 컨포멀 코팅(Conformal Coating)을 적용하는 것이 연기 노출에 대한 영향을 감소시킬 수 있는 방법임을 제시하고 있다.

NRC는 연기 노출 관련 최종 연구 결과 보고서<sup>(22)</sup>를 통해 연기가 디지털 기기의 성능에 영향을 미칠 수 있는 잠재적인 노화 메커니즘임이 명확하다고 결론 내렸으나 연기 노출에 대한 실용적이고 반복 가능한 시험 방법이 없고 시험 지침이나 절차가 개발되지 않았기 때문에 내환경검증의 일부로서 연기 민감도를 평가하는 것은 한계가 있다고 판단하였고 직접적인 검증보다는 화재 안전 규정을 엄격히 준수함으로써 연기의 확산을 방지하여 연기

노출 가능성을 최소화하고 내연성을 향상할 수 있도록 설계하는 것이 중요하다고 밝히고 있다.

따라서, RG 1.209는 연기 노출에 대한 검증방법을 제시하기 보다는 연기 노출 가능성을 최소화할 수 있도록 기기를 설계 및 제작하고 화재 발생 가능성이 낮은 지역에 기기를 설치하는 등 화재 방호에 대한 요건(10 CFR 50.48)과 관례(Practice)를 엄격하게 준수하는 것이 연기에 대한 영향을 완화하기 위한 가장 효과적인 방안으로 제시하고 있다<sup>(3)</sup>.

### 2.4.3 정상 운전 시 온습도 환경

가혹한 환경의 사고 환경 조건은 정상 운전 시의 환경 조건을 모두 포괄하므로 사고 시험 동안의 안전 기능 수행 여부 확인만으로도 정상 환경 조건에서의 기기 건전성이 확보될 수 있다. 그러나, Mild 기기는 온화한 환경의 특성상 사고 시험이 요구되지 않음에 따라 NRC는 정상 운전 시 온습도 환경을 디지털 기기의 또 다른 잠재적인 노화 메커니즘으로 인지하고 정상 운전 시 온습도 환경이 기인하는 디지털 기기의 고장 유형(Failure Mode)과 온습도 환경에서의 안전 기능 수행 여부를 확인하기 위해 형식 시험(Type test)을 모의하였다<sup>(17)</sup>.

시험 결과, 고온 저습 조건(71°C/30% RH)에서는 별다른 고장 반응이 발생하지 않았지만, 고온 고습(71°C/85% RH) 조건에서는 통신 오류, 데이터 손실 등의 고장 유형이 발견되었으며 회로 기판의 미세균열(Microcrack)이 고온에 의해 팽창되면서 균열 부분으로 습분이 침투하여 회로 기판에 간헐적인 오류를 발생시킨 것으로 확인되었다. 아울러, IC 제작자의 보증 범위보다 낮은 온습도 조건에서 시험하였을 경우에도 고장이 확인됨에 따라 품질보증만으로 성능 평가를 수행하는 것은 부적절할 수 있으므로 제작자 시험에 적용되는 기술기준과 시험 항목들이 명확히 식별되거나 Temperature/Humidity Test, High/Low Temperature Operating Life Test, Temperature Cycle Test, Autoclave Test, System Soft Error Test 등의 특정 시험 항목 및 시험 조건이 제작자 시험에 포함되어야 함을 제안하였다.

또한, 디지털 기기의 빠른 개발 속도로 인해 검증 관련 운전 경험과 데이터베이스가 충분하지 않고, 환경 조건으로부터 기인하는 디지털 기기의 성능 저하를 해석할 수 있는 수학적 모델을 개발하기 어렵기 때문에 유효한 해석 검증 모델이

확보되기 전까지는 형식 시험을 통해 검증하는 것이 가장 우선시 되어야 함을 권고하고 있다<sup>(23)</sup>.

따라서, 디지털 기기는 온화한 환경에 위치하더라도 시험을 통한 검증이 선호되어야 하며 해당 격실의 온습도 환경에서 시험이 진행되는 동안 계통의 안전 기능과 연관된 모든 기기들의 안전 기능 수행 여부가 확인되어야 한다. 특정 환경 조건에서의 기기 성능을 확인할 수 있는 제작자 시험이 문서화되어 있다면, 정상 운전 시 온습도 조건에서의 형식시험은 제작자 시험으로 대체될 수 있다<sup>(3)</sup>. 그러나, RG 1.209에는 어떠한 기술기준으로 온습도 시험이 시행되어야 하는지 명확한 절차와 시험 방법이 무엇인지 제시되어 있지 않아 원자력 산업계에서는 관례로 IEEE 650-2006<sup>(24)</sup>에 제시되어 있는 환경 응력 시험(Environmental Stress Test)에 대한 시험 방법과 시험 곡선을 준용하고 있으나 해당 기술기준은 Battery Charger & Inverter에 관한 내용으로서 디지털 기기에 대한 시험 기준으로 대표될 수 없으므로 어떠한 방법과 순서가 디지털 기기에 대한 성능 확인을 가장 적절히 모의할 수 있는지에 대한 연구와 규제 입장이 필요하다.

### 2.5 내환경검증 관련 규제 동향

RG 1.209는 2007년에 제정된 이후 아직 개정판이 발행되지 않아 여전히 2000년대 초반의 규제 지침서들과 기술기준들을 참조하고 있다. 이로 인해, NRC는 동 규제 지침서에 대한 Periodic Review를 통해 원전의 안전 계통에 사용되는 디지털 컴퓨터에 대한 기술기준(IEEE 7-4.3.2-2003)이 펌웨어(Firmware)를 포함하는 디지털 기기로 대상 범위를 확장 예정임에 따라 동 규제 지침서의 적용 범위도 프로그램 가능한(Programmable) 모든 디지털 기기로 확장할 필요가 있다고 기술하고 있다<sup>(4)</sup>. 또한, RG 1.89 Rev.2에서 승인하고 있는 IEC/IEEE 60780-323-2016<sup>(25)</sup>이 Table 4와 같이 기존에 고려되지 않았던 추가적인 검증 요건들을 요구하고 있으므로 해당 변경 요건들을 반영하기 위한 RG 1.209의 개정 계획을 밝히고 있다<sup>(5)</sup>. 아울러, RG 1.180 Rev.2<sup>(26)</sup>도 Table 5와 같이 주요 검증 요건들이 변경되면서 전반적으로 보수적인 방향으로 개정되었음이 확인된다.

내환경검증 관련 후속 규제 지침서들과 기술기준들이 대상 범위를 확대하거나 기존보다 강화된 검증 요건을 제시하고 있음에 따라 변화되고 있는 규제 동향과 신규

검증 요건을 고려하여 디지털 기기에 대한 내환경검증 절차 및 방법을 명확하게 확립할 필요가 있다.

**Table 4** Comparison list between IEEE 323-1974 and IEC/IEEE 60780-323-2016

구분	IEEE 323-1974	IEC/IEEE 60780-323-2016
검증대상	Harsh 기기	Harsh/Mild 기기
검증범위	DBE	DBE/DEC
산소화산영향	X	O
부식영향평가	X	O
항공기충돌	X	O
전자파검증	X	O

**Table 5** Comparison list between RG 1.180 Rev.1 and RG 1.180 Rev.2

구분	RG 1.180 Rev.1	RG 1.180 Rev.2
시험 규격	MIL 461E	MIL 461G
	2003년 이전의 최신판	2019년 이전의 최신판
	IEEE C62.41-1991 IEEE C62.45-1992	IEEE C62.41-2002 IEEE C62.45-2002
CE101	시험 곡선 허용 기준 완화 가능 (1A 이상의 교류전력선)	삭제
CE102	시험 주파수 대역 (10kHz ~ 2MHz)	시험 주파수 대역 확장 (10kHz ~ 10MHz)
ESD	-	추가
CS115	인가 레벨 2A	인가 레벨 5A
CS116	인가 레벨 5A	인가 레벨 10A

### 3. 결 론

원전의 안전 관련 기기에 대한 환경 설계 기준(10 CFR 50 부록 A 일반 설계 기준)은 기기의 설치 환경에 구분없이 모두 적용되므로 Harsh 기기는 10 CFR 50.49에 따라 정상 및 사고 조건에서 내환경검증을 수행하여 주위 환경 조건에 대한 건전성을 확인하는 반면, Mild 기기는 주요 노화 메커니즘이 확인되지 않는 한 노화처리나 사고 시험이 요구되지 않으므로 기기의 성능을 확인할 수 있는 간단한 문서화 요건과 발전소 가동 중 유지 보수 활동을 통해 내환경검증의 유효성이 확보된다. 하지만, NRC는

아날로그 기기를 대체하는 디지털 기기가 점차 소형화되고 집적화됨에 따라 온화한 환경에 위치하는 디지털 기기의 내환경검증 요건을 보완하는 RG 1.209를 제정하여 기존에 고려하지 않았던 전자파, 연기 노출, 정상 운전 시 온습도 환경에 대한 영향 평가를 추가로 요구하고 있다.

따라서, 디지털 기기는 RG 1.180에 따른 전자파 적합성 검증을 통해 방출 및 내성 시험을 모두 시행하여 기기 주변 전자파 환경으로부터 영향을 받지 않고, 주변 기기에도 영향을 미치지 않음이 확인되어야 하며, 연기에 직접적인 노출을 방지하도록 기기를 설계 및 제작하여 화재 발생 가능성이 낮은 지역에 배치하는 등 화재 방호에 대한 요건과 관례를 엄격하게 준수함으로써 연기 노출 가능성을 최소화해야 한다. 또한, IC 제작자가 보증하는 환경조건만으로 디지털 기기의 성능을 평가하는 것은 부적절할 수 있으므로 유효한 수학적 해석 검증 모델이 개발되기 전까지는 설치 격실의 정상 운전 시 온습도 환경을 모의하여 형식 시험을 시행하거나 제작자 시험을 통해 디지털 기기의 안전 기능 수행 여부가 확인되어야 한다.

국내 가동 및 건설 원전들의 경우, 전자파 적합성 검증에 대해 발전소별 Code Cut Off Date(CCD)에 따라 RG 1.180 Rev.1과 경수로형 원전 규제 지침 3.9 제정판을 적용하고 있으며, 미국과 국내 규제 지침은 동일한 규제 입장을 취하고 있으므로 국내 원전들은 해당 규제문서들에서 제시하고 있는 MIL STD 461E와 IEC 61000 Series 등의 시험 방법에 따라 전자파 적합성 검증을 수행한다. 현재 건설이 예정되어 있는 후속 원전의 경우, RG 1.180 Rev.2가 처음으로 적용될 예정이므로 해당 규제지침서의 개정 이력에 대한 정확한 이해를 바탕으로 Table 5에 제시된 강화된 검증요건을 충족시킬 수 있도록 시험 절차를 계획하여 검증하는 것이 중요할 것으로 판단된다.

아울러, 국내 원전들은 내환경검증에 대해 RG 1.89 Rev.1과 경수로형 원전 규제 지침 3.3 제정판을 적용하며, 해당 규제지침서들에서 제시하고 있는 IEEE 323에 따라 내환경검증을 수행한다. 발전소별 CCD에 의해 아직 RG 1.89 Rev.2가 적용된 사례는 없으나, 후속 원전들의 최신 CCD 적용에 의해 미래에는 국내에도 RG 1.89 Rev.2가 적용될 가능성이 크며, NRC가 RG 1.89 Rev.2의 변경 사항들을 반영하기 위한 RG 1.209의 개정을 예고<sup>5)</sup>하고

있으므로 이에 대한 대비로써 기존에 고려되지 않았던 IEC/IEEE 60780-323의 신규 요건(DEC, 항공기 충돌 등)들을 만족시키기 위한 검증 방법 등의 개발이 요구된다.

RG 1.89 Rev.2와 RG 1.180 Rev.2는 비교적 최근에 발행되어 아직 향후 개정에 대한 계획이 확인되지 않으므로 당분간 최신 규제 입장을 유지할 것으로 판단되나, 경수로형 원전 규제지침 3.3과 3.9는 아직 RG 1.89 Rev.2와 RG 1.180 Rev.2의 개정 사항을 반영한 후속 개정판들이 발행되어 있지 않아 향후 개정 발행이 예상된다.

이에 따라, 변화되고 있는 규제 동향을 명확히 파악하고 변경 요건들을 철저히 준수할 수 있도록 내환경검증 관련 규제 지침서 및 기술기준들에 대해 주기적인 검토가 면밀히 수행되어야 할 것으로 판단된다.

## 4. 제 언

국내 원전 대부분은 미국 원전을 참조하였으므로 미국의 규제 지침 영향을 많이 받는다. RG 1.180 Rev.1에 제시되어 있는 전자파 시험 곡선의 경우, 1990년대 미국 원전의 방출 데이터를 기준으로 작성되었기 때문에 국내 원전의 전자파 방출 레벨을 대표할 수 없지만, 국내 규제 지침이 미국의 규제 지침을 준용함에 따라 국내 원전 산업계에서는 전자파 적합성 검증 시 해당 시험 곡선을 준용하고 있다. 그러나, 전자파 환경은 노형의 유형, 출력 용량 등 발전소 특성에 따라 달라질 수 있고 신규 디지털 기기의 사용 등으로 인해 초기 발전소 대비 전자파 환경이 변화되었을 가능성이 매우 크므로 국내 원전에 대한 전자파 환경 현장 조사의 필요성이 증가하고 있다. 아울러, 단순 디지털 부품 변경으로도 설치 예정 지점 부근의 전자파 환경이 악화하여 새로운 유형의 EMI 문제 발생 가능성이 커짐에 따라 전자파 관련 인허가 현안 사항이 지속해서 발행하고 있으므로 국내 원전의 전자파 환경에 대한 실태 파악과 규제 기관 대응을 위한 도구 마련이 시급하다.

하지만, 기존의 상태 감시(Condition Monitoring) 시스템은 온도, 압력, 방사선 등으로 그 범위가 제한되어 있어 전자파 환경을 측정 및 감시하는 데는 한계가 있으므로 주변 기기들로부터 방출되는 전자파 스펙트럼을 측정하고 분석하여 전자파 환경을 실시간 감시할 수

있는 전자파 상태 감시 시스템이 개발된다면 측정된 방출 데이터를 빅데이터로 활용하여 전자파 환경에 대한 상태 감시/진단/예측이 가능한 IoT 기반 스마트 플랫폼 구축이 가능할 것으로 판단된다.

시스템 구현을 위해서는 전자파를 측정하고 전송하기 위한 하드웨어들(안테나, 스펙트럼 분석기, 통신 모듈 등)과 데이터를 수집/분석/관리하기 위한 소프트웨어 프로그램이 요구되며 데이터 예측을 위한 AI 기법 등 수많은 디지털 기기의 사용과 최신 딥러닝 기술의 접목이 예상된다. 따라서, 해당 시스템은 컴퓨터 기반 계층제어 계통으로 분류될 수 있으므로 설치 환경 조건에서의 기능 유지를 통해 신뢰도 높은 측정결과를 제공할 수 있어야 하며 주변의 안전 관련 기기에도 영향을 미치지 않아야 함에 따라 동 시스템을 안전 관련 계통에 준하도록 설계/제작/검증/배치함으로써 RG 1.209의 내환경검증 요건을 만족시킬 수 있어야 할 것이다.

## 참고문헌

- (1) 10 CFR 50.49, 1983, “Environmental Qualification of Electric Equipment Important to Safety for Nuclear Power Plants,” U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C.
- (2) USNRC, 2007, “Standard Review Plan 3.11 Environmental qualification of mechanical and electrical equipment,” U.S Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C, NUREG-0800.
- (3) Reg. Guide 1.209, 2007, “Guidelines for Environmental Qualification of Safety-Related Computer-based Instrumentation and Control Systems in Nuclear Power Plants,” U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C.
- (4) USNRC, 2013, Regulatory Guide Periodic Review on RG 1.209.
- (5) USNRC, 2023, Regulatory Guide Periodic Review on RG 1.209.
- (6) Lee, D. Y., Kim, M. Y., 2019, “A study on technical standards and procedures related to qualification of nuclear safety grade equipment,” *Trans. of the KPVP*, Vol. 15, No.1, pp.1-7. doi:https://dx.doi.org/10.20466/KPVP.2019.15.1.001
- (7) IEEE 323, 1974, “IEEE Standard for Qualifying Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations,” Institute of Electrical and Electronic Engineers, New York.
- (8) Reg. Guide 1.89 Rev.1, 1984, “Environmental Qualification of Certain Electric Equipment Important



- to Safety for Nuclear Power Plants,” U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C.
- (9) Reg. Guide 1.180 Rev.1, 2003, “Guidelines for Evaluating Electromagnetic and Radio Frequency Interference in Safety-Related Instrumentation and Control systems,” U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C.
- (10) IEEE 323, 2003, “IEEE Standard for Qualifying Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations,” Institute of Electrical and Electronic Engineers, New York.
- (11) USNRC, 1981, “Interim Staff Position on Environmental Qualification of Safety-Related Electrical Equipment,” U.S Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C, *NUREG-0588*.
- (12) IEEE 383, 1974, “IEEE Standard for Type Test of Class 1E Electric Cables, Field Splices, and Connections for Nuclear Power Generating Stations,” Institute of Electrical and Electronic Engineers, New York.
- (13) IEEE 323, 1983, “IEEE Standard for Qualifying Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations,” Institute of Electrical and Electronic Engineers, New York.
- (14) USNRC, 1992, “Aging Assessment of Reactor Instrumentation and Protection System Components,” U.S Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C, *NUREG/CR-5700*.
- (15) USNRC, 1994, “Functional issues and Environmental Qualification of digital Protection Systems of Advanced Light-Water Nuclear Reactors,” U.S Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C, *NUREG/CR-5904*.
- (16) USNRC, 1996, “Literature Review of Environmental Qualification of Safety-Related Electric Cables,” U.S Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C, *NUREG/CR-6384*.
- (17) USNRC, 1996, “Environmental Testing of an Experimental Digital Safety Channel,” U.S Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C, *NUREG/CR-6406*.
- (18) USNRC, 1998, “Digital I&C Systems in Nuclear Power Plants,” U.S Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C, *NUREG/CR-6579*.
- (19) USNRC, 1994, “Common-Cause Failures due to Inadequated Design Control and Dedication,” U.S Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C, *Information Notice No. 94-20*.
- (20) USNRC, 1996, “Circuit Bridging of Components by Smoke,” U.S Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C, *NUREG/CR-6476*.
- (21) USNRC, 1997, “Effects of Smoke on Functional Circuits,” U.S Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C, *NUREG/CR-6543*.
- (22) USNRC, 2001, “Results and Insights on the Impact of Smoke on Digital Instrumentation and Control,” U.S Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C, *NUREG/CR-6597*.
- (23) USNRC, 2001, “Application of Microprocessor-Based Equipment in Nuclear Power Plants-Technical Basis for a Qualification Methodology,” U.S Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C, *NUREG/CR-6741*.
- (24) IEEE 650, 2006, “IEEE Standard for Qualification of Class 1E Static Battery Chargers and Inverters for Nuclear Power Generating Stations” Institute of Electrical and Electronic Engineers, New York.
- (25) IEC/IEEE 60780-323, 2016, “Nuclear Facilities – Electrical Equipment Important to Safety – Qualification,” International Electrotechnical Commission/Institute of Electrical and Electronic Engineers, New York/Geneva.
- (26) Reg. Guide 1.180 Rev.2, 2019, “Guidelines for Evaluating Electromagnetic and Radio-Frequency Interference in Safety-Related Instrumentation and Control Systems,” U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C.