

EMC 최근 기술 동향

원전 계측제어계통 전자기파 검증 동향

구인수 · 이준구 ·
박근옥 · 박재윤
한국원자력연구원

I. 개 요

디지털 기기의 원전 적용이 피할 수 없게 됨에 따라 디지털 기기의 전면적인 원전 적용에 따른 기술 문제가 제기되어 왔다. 주요 문제점은 소프트웨어가 내장되는 디지털 계통의 신뢰도 평가, 전자기파 적합성 문제, Human Machine Interface 설계 및 평가이다. 특히 디지털 계통의 전자기파 문제는 계속적으로 대처 방안을 대한 연구가 진행되고 있는 분야이다. 원자력 환경에서의 기기 신뢰성을 확보하기 위한 최근의 전자기파 검증 규제 지침은 Regulatory Guide 1.180-2003이다.

전자기파의 경우, 새로운 디지털 및 아날로그 기기가 적용될 신규 원자력 발전소의 계측 제어 계통은 생명주기가 비교적 짧고 모델 및 형태가 다양하게 변하고 있으므로 기기 검증 방법 중에서 시험(type test)에 의한 검증 방법이 최우선되어야 한다.

II. 원자력 전자기파 관련 인허가 요건

전자기파의 경우, 과거 전통적으로 릴레이 소자를 중심으로 하는 아날로그 기기는 고유의 강한 전자기파 내성 특성을 가지고 있으므로 원자력 발전소의 안전 계통에 적용되더라도 전자기파 혹은 공중파 장애에 대한 특별한 기준에 의한 검증을 수행하지 않았다. 1970년대, ABB-CE는 ANO-2 발전소에 노심보

호계산기(CPC: Core Protection Calculator)를 설치하기 위하여 미국의 전자기파 군사 기준인 MIL-STD-461A에 따라 전자기파 기기 검증을 수행하였다. 부근에 CPC 이외에 다른 디지털 기기가 없었으므로 이 검증시험은 내성에 관한 사항만을 시험하였다.

검증하는 디지털 기술의 원전 적용 추세는 이 전자기파 장애에 대한 규제 입장과 적용 기준의 확립 필요성을 제기하였다. 이를 반영하여 NRC의 후원으로 ORNL(Oak Ridge National Laboratory)은 일련의 연구 결과를 보고서로 발간하였다. 이 보고서들은 미국에 있는 원전 내의 전자기 환경과 전자기파 적합성을 확보하기 위하여 적용할 수 있는 관련 기준 및 표준들에 관하여 기술하고 있다. 그 내용을 보면 EMI/RFI(Electromagnetic Interference/Radio Frequency Interference)에 관한 검증시험은 MIL-STD-461C/D, 서지 내성 능력(SWC: Surge Withstand Capability)은 IEEE C62. 41-1991을 기준으로 제시하고 있다. NRC는 이 보고서를 인용하여 전자기파 검증과 평가에 대한 규제 지침 검토용 초안 DG-1029를 1998년에 발표하였는 바, 그 초안에서도 전자기파 및 공중파 장애에 대한 시험 기준은 MIL-STD-461 C/D를, SWC의 경우는 IEEE C62.41-1991를 권장하고 있다. 그러나 EPRI TR-102323에 대한 승인 입장에는 변함이 없었다.

SRP(Standard Review Plan), NUREG-0800 Rev.5, 2007에서 언급하였듯이 이는 디지털 시스템의 불연속성,

아날로그와는 근본적으로 다른 기능 및 하드웨어 특성 등이 있기 때문이다. IEEE 표준 603-2009는 디지털 기기의 채용 시 전자기파에 대한 기기검증기준을 직접적으로 제시하지 않고 포괄적인 내용으로 IEEE 표준 323-2003에 의한 기기검증만을 명시하고 있다. 원자력 발전소의 디지털 컴퓨터 안전기기에 대한 IEEE 표준 7-4.3.2-2010 또한 전자기파에 대한 취약성과 민감성을 지적하고 전자기 환경을 고려할 것을 요구하고 있으므로 전자기파에 대한 기기검증은 원자력 디지털 기기의 필수 고려항목이 되었다.

현재, 국내 인허가 기관은 규제지침 검토용 초안 DG-1029의 발간본인 USNRC RG 1.180-2003에 따른 기기검증을 요구하고 있으며, RG 1.180-2003은 MIL-STD-461E, IEC61000-4의 사용을 승인하고 있다. 또한, 인허가 기관은 EPRI-TR-102323-2004에 따른 별도의 정전기 방전(ESD)을 안전 관련 기기 검증에 요구하고 있다.

Ⅲ. 기기검증이 요구되는 원자력 전기기기 및 계통

원자력 발전소에서 기기검증을 받아야 할 기기의 범위는 미국 연방규제법 10CFR50 Section 50.49가 규정하는 ‘원자력 발전소의 안전에 중요한 전기기기’가 된다. 이것은 구체적으로 안전등급 전기기기(Class 1E)와 비안전등급의 기기 중 그 기기의 고장이 안전등급 기기의 기능 수행에 지장을 주는 기기, 그리고 사고후 감시를 수행하는 일부 기기가 포함된다. 다음은 검증이 요구되는 기기 및 계통들의 예를 상용 원자력 발전소 계측 제어 계통의 구조를 기준으로 제시한 것이다.

- (1) 공정 계측 계통
- (2) 핵계측 계통
- (3) 디지털 발전소 보호 계통
- (4) 공학적 안전 설비 기기 제어 계통

- (5) 노심 보호 연산기 계통
- (6) 기타 (비안전계통 기기)

Ⅳ. 전자기파 상세 기기 검증 요건

디지털 기기는 낮은 전압과 빠른 주파수로 작동하므로 전기적 왜란과 잡음에 취약하다. 따라서 디지털 기기에 대하여 전자기파 검증시험을 수행하고, 전자기파 영향을 평가하는 것이 중요하다.

현재, 원자력 발전소 전자기파의 시험기준은 USNRC RG 1.180-2003, MIL-STD-461E, IEC61000-4, EPRI-102323, IEEE Std 62.41-1991 /62.45-1992 등을 적용하고 있다. 정전기 방전에 적용할 기술 기준은 EPRI TR-102323이다. <표 1>은 USNRC RG 1.180-2003에 기술된 전자기파 시험항목의 특징을 간략하게 나타낸 것이다.

4-1 저주파 전도 방출(CE101)

피시험기로부터 전자기파가 전원 입력선을 통하여 방출될 때 허용 수준을 초과하지 않음을 입증하기 위하여 실시하며, 피시험기기의 AC 및 DC 공급 케이블 전도 전자기파 방출(30 Hz~10 kHz)의 크기를 측정한다. [그림 1]은 저주파 전도 방출 제한치를 나타낸다.

4-2 고주파 전도방출(CE102)

피시험기로부터 전자기파가 전원 입력선을 통하여 방출될 때 허용기준을 초과하지 않음을 입증하기 위하여 실시하며, 피시험기기의 AC 및 DC 공급 케이블의 고주파 전도 방출(10 kHz~2 MHz)의 크기를 측정한다. [그림 2]는 고주파 전도 방출 제한치를 나타낸다.

4-3 저주파 복사 방출(RE101)

이 시험은 피시험기기 및 관련 케이블로부터 방사

<표 1> 전자기파 검증 시험 항목

시험 항목	내용
CE101	Conducted Emissions, Power Leads, 30 Hz~10 kHz
CE102	Conducted Emissions, Power Leads, 10 kHz~2 MHz
CS101	Conducted Susceptibility, Power Leads, 30~150 kHz
CS114	Conducted Susceptibility, Power Leads, Signal Leads, Bulk Cable Injection, 10 kHz~30 MHz
CS115	Conducted Susceptibility, Signal Leads, Bulk Cable Injection, Impulse Excitation
CS116	Conducted Susceptibility, Signal Leads, Damped Sinusoidal Transient
RE101	Radiated Emissions, Magnetic Field, 30 Hz~100 kHz
RE102	Radiated Emissions, Electric Field, 2 MHz~1 GHz
RS101	Radiated Susceptibility, Magnetic Field, 30 Hz~100 kHz
RS103	Radiated Susceptibility, Electric Field, 30 MHz~1 GHz
EFT	5 ns/Tr, 50 ns/Td Pulse in 15 ms bursts
Surge	Ring & Combination Wave

되는 자기장이 규정된 요구사항을 초과하지 않음을 입증하기 위하여 실시하며, 피시험기기의 저주파 주파수 영역의 자기장 방출(30 Hz~100 kHz)의 세기를 측정한다. [그림 3]은 저주파 자기장 방출 제한치를 나타낸다.

4.4 고주파 복사 방출(RE102)

이 시험은 피시험기기 및 관련 케이블로부터 방사되는 전기장이 규정된 요구사항을 초과하지 않음을 입증하기 위하여 실시하며, 피시험기기의 고주파 영역의 전기장 방출(2 MHz~1 GHz)의 세기를 측정한다.

다. [그림 4]는 고주파 복사 방출 제한치를 나타낸다.

4.5 저주파 전도 내성(CS101)

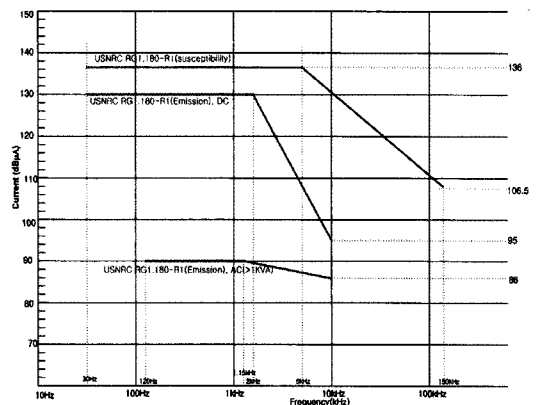
이 시험은 외부전자계에 의해 피시험기기의 각 접속 케이블로 유기된 간섭 전류로 인한 피시험기기의 내성을 확인하기 위하여 실시하며, 피시험기기의 전원 공급선에 가해지는 저주파 EMI 신호(30 Hz~150 kHz)에 대하여 충분한 내성을 가지고 있음을 확인한다. [그림 1]은 저주파 전도내성 허용치를 나타낸다.

4.6 고주파 전도 내성(CS114)

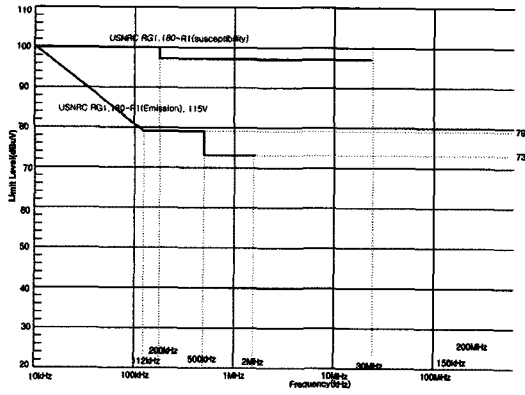
이 시험은 외부전자계에 의해 피시험기기의 각 접속 케이블로 유기된 간섭 전류로 인한 내성을 확인하기 위하여 실시하며, 피시험기기의 전원 공급선에 가해지는 고주파 EMI 신호(10 kHz~30 MHz)에 대하여 충분한 내성을 가지고 있음을 확인한다. [그림 2]는 고주파 전도 내성 허용치를 나타낸다.

4.7 자기장 복사내성(RS101)

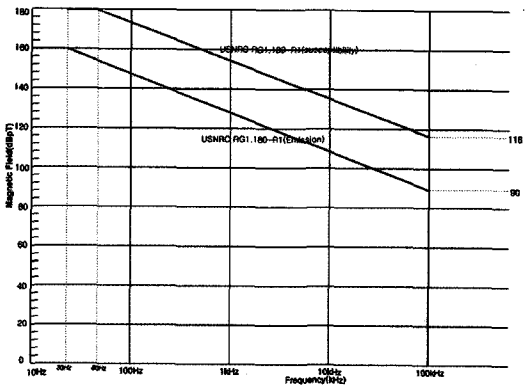
이 시험은 복사 자기장을 피시험기기에 인가하여 피시험기기의 성능 유지 여부를 확인하기 위하여 실시하며, 30 Hz~100 kHz 사이의 저주파 자기장에 대



[그림 1] 저주파 전도 방출(CE101) 제한치 및 전도 내성(CS101) 허용치



[그림 2] 고주파 전도 방출(CE102) 제한치 및 전도 내성(CS114) 허용치

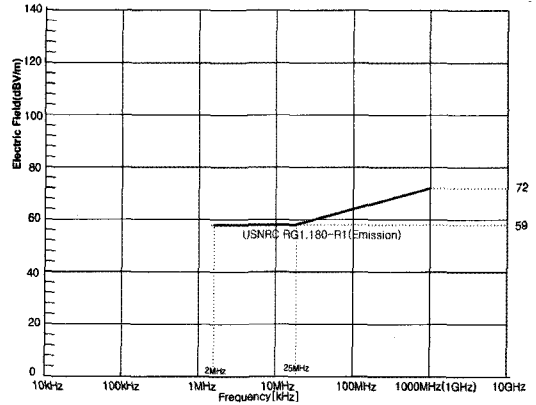


[그림 3] 저주파 복사 방출(RE101) 제한치 및 복사 내성(RS101) 허용치

한 내성시험을 수행한다. [그림 3]은 저주파(자기장) 복사 내성의 허용치를 나타낸다.

4-8 전기장 복사내성(RS013)

이 시험은 전자기파 방사 환경에 유사한 고주파 전기장을 피시험기에 인가하여 피시험기의 전기전자적 성능 유지 여부를 확인하기 위하여 실시하며 30 MHz~1 GHz 사이의 고주파 전기장에 대한 내성 시험을 수행한다. 시험 인가수준은 10 V/m를 가한다.



[그림 4] 고주파 복사 방출(RE102) 제한치

4-9 EFT(Electrical Fast Transient)

EFT 신호를 전원 공급선과 외부 연결 신호선에 인가하여 피시험기가 충분히 성능을 발휘하는지 시험한다. 인가 전압의 크기는 피시험기 설치범주에 따라 각각 2 kV, 4 kV를 가한다.

4-10 서지(Surge)

서지 시험 전압을 전원 공급선에 인가하여 피시험기의 감응성(susceptibility)를 확인한다. 시험 전압의 크기는 피시험기 설치범주에 따라 각각 2 kV, 4kV 와 2 kV/1 kA, 4 kV/2 kA, 6 kV/3 kA로 한다.

4-11 신호선에 대한 전도 내성(CS114, CS115, CS116)

이 시험은 외부 전자계에 의해 피시험기의 신호선으로 유기된 간섭 전류로 인한 피시험기의 내성을 확인하기 위하여 실시한다. 고주파 전도 내성은 USNRC RG 1.180을 적용하여 피시험기의 신호선에 가해지는 <표 2>의 신호에 대하여 충분한 내성을 가지고 있음을 확인한다.

4-12 정전기방전(ESD: Electrostatic Discharge)

시험 수준은 EPRI TR-102323에서 요구하는 기중 방전(air discharge) 15 kV, 접촉 방전(contact discharge) 8

〈표 2〉 신호선에 대한 전도내성 포락선

방법	내용
CS114	91 dBuA
CS115	2 A
CS116	2 A

kV를 적용한다. 정전기 방전에 대한 피시험기기의 감응성을 IEC 61000-4-2에 의해 시험한다.

V. 전자기파 기기검증 및 전자기파 간섭 극복 방안

전자기파 및 공중파 간섭은 기기 검증의 일부로 대처해야 하는 발전소에 상존하는 환경 조건의 하나이다. 릴레이를 주로 사용하던 아날로그 계측제어 계통은 전자기파에 강한 내성을 보였다. 원자력 발전소에 적극적으로 적용되기 시작한 컴퓨터를 이용한 계측 제어 계통의 고집적회로의 마이크로프로세서 시스템들은 낮은 구동 전압, 고속의 clock, 조밀한 소자의 배치 등의 특징을 갖는다. 이러한 디지털 고유의 특징들로 인하여 디지털기기는 아날로그 장비보다 전기적 잡음과 서지 전압 변동에 취약성을 나타낸다. 전자기파에 대한 디지털기기의 취약성에 대처하기 위한 여러 가지 방안들이 있을 수 있다. 첫째로 좋은 전자기파 적합성(Electromagnetic Compatibility: EMC)을 갖도록 계측 제어 장비를 설계하고 설치하는 것이다. 둘째로는 양질의 부품을 사용하여 시스템을 구성함으로써 그 기기나 계통이 외부의 전자기파 간섭에 잘 견디며, 또한 외부로 전자기 간섭을 발산하지 않도록 한다. 세 번째는 전자기파 시험에 의하여 기기의 전자기파 특성(발산 및 내성)이 요구되는 기준에 맞는지 확인한다. 네 번째는 서지에 대한 내성 능력(Surge Withstand Capability: SWC)을 시험하고 평가하여 그 적합성을 확인하는 것이 된다. 국내

외의 전자기파에 대한 기준은 모두 최종 생산품에 대한 전자기파 검증 시험에 초점이 맞추어져 있다. 전자기파 기기 검증의 기본 방안은 다음과 같다.

5-1 Aging 분석의 생략

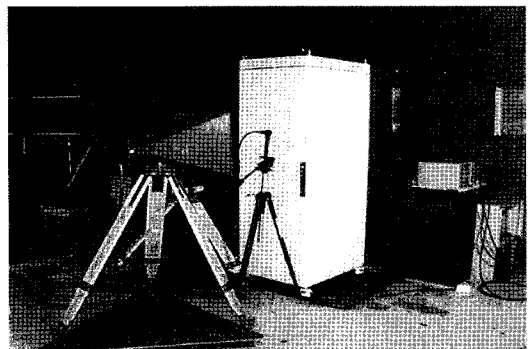
일반적으로 장기간의 일반 전자기파 노출에 대한 노화(aging) 현상은 잘 알려져 있지 않고 있다. 따라서 특별히 노화 분석에 의해 요구되지 않으면, 계측 제어기기의 내환경 검증 시험 전에 수행되는 노화처리(age conditioning)의 수행이 필요치 않는다.

5-2 시험 검증 방법

광범위하게 통용되는 전형적인 수학적인 모델이나 정량적인 분석 방법이 아직 개발되어 있지 않으므로, 전기 및 계측제어기기의 전자기파 검증은형식 시험(type test)에 의하여 수행하는 것이 권장된다.

5-3 전자기파 적합 설계 및 설치

아무리 엄격한 검증시험을 수행하였다더라도, 그 장비에 관련된 전자기 발산과 결합 경로가 적절하게 통제되지 않으면, 전자기파 적합성을 보장할 수는 없다. IEEE 표준 1050-2004, “Guide for Instrumentation and Control Equipment Grounding in Generating Stations”는 전자기 간섭에 기인한 장애와 기능 상실을 예방할



[그림 5] 원자력 계측 제어 캐비닛 전자기파 검증

수 있는 유용한 지침과 정보를 제공한다.

참 고 문 헌

- [1] IEEE Std 323-2003, "IEEE Standards for Qualifying Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations," Jun. 1983.
- [2] USNRC Regulatory Guide 1.180, "Guidelines for Evaluating Electromagnetic and Radio-Frequency Interference in Safety-Related Instrumentation and Control Systems", 2003.
- [3] EPRI TR-102323, "Guidelines for Electromagnetic Interference Testing in Power Plants", 2004.

≡ 필자소개 ≡

구 인 수



1977년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
 1996년 2월: 청주대학교 전자공학과 (공학석사)
 2000년 8월: 충남대학교 전자공학과 (공학박사)
 1988년 8월: 전자기술사 (산업계측제어)

1980년 5월~현재: 한국원자력연구원
 [주 관심분야] 센서, 계측 및 제어, 신호처리

박 근 옥



1986년 2월: 경기공업개방대학교 전산학과 (공학사)
 1993년 8월: 충남대학교 전산학과 (공학석사)
 2006년 2월: 공주대학교 컴퓨터공학과 (공학박사)
 1987년 5월~현재: 한국원자력연구원 책

임연구원
 [주 관심분야] 계측제어 설계 및 시뮬레이터 개발

이 준 구



1998년 2월: 충남대학교 전기공학 (공학사)
 2000년 2월: 충남대학교 전기공학 (공학석사)
 2010년 3월~현재: 충남대학교 전기공학 공학박사 과정
 2000년 1월~현재: 한국원자력연구원

[주 관심분야] Instrumentation and Control System

박 재 운



1984년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
 1990년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학석사)
 2002년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학박사)
 1986년 2월~현재: 한국원자력연구원 책

임연구원
 [주 관심분야] Instrumentation and Control System