



KR0101290

KAERI/TR-1809/2001

技術報告書

원전 계측제어기기에 대한

내환경/EMI 영향 평가

Survey and Analysis on Environmental and
Electromagnetic Effect on I&C Equipment of
Nuclear Power Plants

한국원자력연구소

32 / 48

제 출 문

한국원자력연구소장 귀하
이 보고서를 2001년도 기술보고서로 제출합니다.

제목 : 원전 계측제어기기에 대한 내환경/EMI 영향평가

2001년 3월 일

과제명 : 차세대 원자로 설계관련 요소기술개발

주 저 자 : 황인구

공동저자 : 이동영, 차경호

요 약

기존 원자력발전소의 아날로그 방식의 계측제어장비는 더 이상 산업계에서 공급이 되기 힘들므로 디지털기기의 원자력 계측제어설비에 적용하는 것은 이제 피할 수 없게 되었다. 그러나 디지털장비의 전면적인 원전적용은 지금까지 고려하지 않았던 여러 문제를 제기한다. 대표적인 것이 소프트웨어의 신뢰성 확보와 아날로그 장비보다 취약할 것으로 예상되는 내환경 및 전자기파 장애에 대한 대책 두 가지이다.

이 보고서의 목적은 환경적인 요소가 원자력 발전소의 계측제어기기에 미치는 영향을 조사 분석하여 계측제어기기의 노화(aging)관리 및 설계과정에 참고가 되도록 하기 위함이다. 또한 국내 원전의 전자기파세기를 측정하여 그 결과를 분석 평가함으로써 차세대원전의 설계 및 기기제작과정에 하나의 기술적인 근거가 될 수 있도록 하였다.

Abstract

As the instrumentation and control (I&C) equipment suppliers tend to provide digital components rather than conventional analog type components for instrumentation and control systems of nuclear power plants(NPPs), it is unavoidable to adopt digital equipment for safety I&C systems as well as non-safety systems. However, the full introduction of digital equipment for I&C systems of nuclear power plants raises several concerns which have not been considered in conventional analog I&C equipment. The two major examples of the issues of digital systems are environmental/electromagnetic compatibility (EMC) and software reliability.

This report presents the survey and research results on environmental and electromagnetic effect on I&C equipment of nuclear power plants to give a guideline for aging management and design process. Electromagnetic site surveys were conducted to be used as a part of technical basis to demonstrate that I&C systems are compatible with the ambient electromagnetic noise in Korean nuclear power plants.

목 차

1.	서론.....	8
2.	계측제어 소자의 고장 메커니즘.....	9
2.1.	집적회로.....	9
2.1.1.	집적회로 형태.....	9
2.1.2.	Electromigration.....	9
2.1.3.	유전층 파괴(Dielectric Breakdown).....	9
2.1.4.	부식 (Corrosion).....	9
2.1.5.	정전기 장애.....	10
2.1.6.	접점 손상, 피로, 밀봉불량, 등.....	10
2.2.	디지털 계측제어시스템의 고장 유형.....	10
2.2.1.	디지털 장비의 구조적 차이[10].....	10
2.2.2.	디지털 소자의 고장유형.....	11
2.2.3.	디지털 시스템의 고장유형.....	13
2.2.3.1.	미 원자력 발전소의 고장 경험 분석.....	13
2.2.3.2.	디지털 제어시스템의 고장사례의 또 다른 예.....	14
2.3.	원자력 안전시스템의 내환경관련 고장원인 분석.....	15
2.3.1.	안전시스템의 고장 원인.....	15
3.	Aging.....	17
3.1.	열화(Thermal Aging).....	17
3.1.1.	반응이론(Collision Model).....	17
3.1.2.	Arrhenius Model.....	18
3.1.3.	기타 열화 모델.....	19
3.1.3.1.	Eyring Model.....	19
3.1.3.2.	Inverse Power Model.....	20
3.2.	열화 모델의 평가.....	20
3.3.	방사능 Aging.....	21
3.4.	마모 Aging.....	21
4.	전자기환경 측정(EMI Site Survey).....	22
4.1.	용어정의(Definitions).....	22
4.2.	EMI 측정 항목 및 방법.....	23
4.2.1.	시험 항목(test items).....	23
4.2.2.	측정 Mode.....	23
4.2.3.	Site Survey 에 필요한 장비.....	23
4.2.4.	측정기간 및 발전소 운전 상태.....	24

4.2.5.	측정 지점(measurement point)	24
4.2.5.1.	울진 3 호기	24
4.2.5.2.	월성 2 호기	25
4.2.5.3.	고리 1 호기	25
4.2.6.	Survey 방법	25
4.2.6.1.	울진 3 호기의 측정방법	25
4.2.6.2.	월성 2 호기의 전자기파 측정	25
4.2.6.3.	고리 1 호기 RMS 의 전자기파 측정	26
4.2.6.4.	기존 EMI Site Survey 결과 수집	26
4.3.	Test Set up	26
4.4.	측정 수신기의 대역폭 및 스캔 측정시간	27
5.	평가 분석	29
5.1.	울진 3 호기 전자기 환경	29
5.1.1.	저주파 전도성 잡음(30Hz – 50kHz).....	29
5.1.2.	고주파 전도성 잡음(10kHz – 30 MHz).....	30
5.1.3.	Surge 전압 측정	32
5.2.	월성 2 호기 전자기 환경	35
5.2.1.	전도성 잡음(30Hz – 10 MHz).....	35
5.2.2.	Magnetic Field(RE101 : 30 Hz ~ 100 kHz).....	36
5.2.3.	고주파 전계 강도 (RE 102 : 10 kHz ~ 7GHz)	37
5.2.4.	실외 공중파 전계강도 측정결과	38
5.3.	고리 2 호기의 전도성 잡음 분포	39
5.3.1.	120V 전원의 잡음분포	39
5.3.2.	접지선의 전도성 전자기 분포	40
5.3.3.	Signal Line 의 잡음 분포.....	43
5.3.4.	High Voltage Line 의 잡음 측정	44
5.4.	측정데이터의 비교	45
6.	결론	47

표목차

표 1. 마아크로 프로세서 기기의 고장유형	12
표 2. 디지털 시스템의 고장원인 종류	13
표 3. 공통원인 고장사례의 유형별 분류 보기	14
표 4. 원자로 안전계통 고장원인 분류	15

표 5. EMI/RFI 관련 안전계통 오동작	16
표 6. 시험항목.....	23
표 7. 시험장비 목록.....	24
표 8. 대역폭 및 측정시간.....	27

그림 목차

그림 1. 기본 디지털 계측제어장비 구조도.....	11
그림 2. 전류 PROBE 를 사용하는 전도잡음 측정 설비 배치도.....	26
그림 3. 안테나를 사용하는 공중파 강도 측정도.....	27
그림 4. 울진 3 호기 PCS 의 저주파 전도잡음.....	29
그림 5. 울진 3 호기의 CPC 저주파 전도성 잡음(공통모드).....	29
그림 6. 울진 3 호기 PCS 의 고주파 전도잡음.....	30
그림 7. 차동모드 PCS 의 전도성 잡음.....	31
그림 9. CPC 의 고주파 전도성 잡음(차동모드).....	32
그림 10. 서지 측정시스템 구성도.....	33
그림 11. PCS 의 전원 전압파형 측정결과.....	34
그림 12. CPC 전원 파형.....	34
그림 13. DCC-Y 의 전도성 잡음 분포-DIFFERENTIAL MODE.....	35
그림 14. DCC-Y 의 CPU 캐비닛 전원선의 COMMON -MODE 전도잡음.....	36
그림 15. MAGNETIC FIELD 측정결과.....	37
그림 16. 방사성 전계강도 측정결과.....	37
그림 17. 200MHZ - 7 GHZ 영역의 전자기 환경.....	38
그림 18. 실외 공중파 분포도(10 KHZ ~200 MHZ).....	39
그림 19. 실외 공중파 분포도(200 MHZ ~ 7 GHZ).....	39
그림 20. 120VAC 입력전원의 잡음주파수 분포.....	40
그림 21. 접지선의 전자기 잡음 측정.....	40
그림 22. R-11 LCU 접지선 잡음분포(1).....	41
그림 23. R-11 LCU 접지선 잡음분포(2).....	42
그림 24. R2 LCU(SKID UNIT 없는 경우:격납용기 입구)의 접지선의 잡음분포.....	42
그림 25. R15 LCU(SKID UNIT 있는 경우:터빈빌딩)접지선 잡음분포.....	43
그림 26. DETECTOR 신호선(SIGNAL LINE)의 전류성분 분포.....	44
그림 27. 고리 1 호기 R-11 RADIATION DETECTOR HV(고전압)선로의 잡음분포.....	45
그림 28. 원자력발전소의 전도성 잡음분포의 비교.....	45
그림 29. MAGNETIC FIELD 의 비교.....	46
그림 30. ELECTRIC FIELD 의 측정데이터 비교.....	46

1. 서론

원자력 발전소의 수명이 길어질수록 또한 새로 지어질 차세대 원자력발전소의 설계수명이 기존의 원전보다 길게 설계됨으로 인하여 계측제어 기기의 노화(aging)현상이 발전소의 운영과 작동에 영향을 줄 수도 있다. 이 노화는 주로 환경적인 요소, 즉 온도, 습도, 진동 등에 따라 진행속도와 고장유형이 변화한다. 또한 디지털 장비의 채택이 증가함에 따라 기존의 아날로그 장비와 달리 환경적요인에 대한 적합성에 의문이 제기되고 있다[1-6]. 특히 디지털기기의 전자기파 장애문제는 규제기관 등에서 새로운 대책 기준을 내 놓고 있는 실정이다[7,8].

IEEE 7-4.3.2-1993[6]은 디지털기기에 대한 이러한 내환경 적합성 문제들이 충분히 고려되어 적용되어야 한다고 요구하고 있다. 안전기기에 있어서 내환경 적합성이 중요한 것은 안전기기의 다중채널에 공통모드고장(common mode failure)을 일으킬 수 있기 때문이다.

공통모드고장은 random failure(불규칙 고장)과 개념적으로 매우 다르다. random failure는 문자 그대로 환경적인 노화(aging) 혹은 마모(wear-out)와는 무관하게 기기의 재질, 특성, 제조과정등에서 불규칙적인 변동으로 인하여 생기는 욱조형(bathtub)고장을 곡선의 무변동 구간(constant period)에서 생기는 고장을 말한다[9].

공통모드고장은 다음과 같은 특징을 갖는다. (1) 안전채널의 두 혹은 그 이상의 경로에 고장이 발생하고 (2) 그 고장이 서로 같은 원인, 메커니즘, 스트레스, 혹은 기타의 공통점을 갖는 경우이다. 이러한 공통모드고장을 일으키는 원인은 (1) 설계단계에서의 오류 혹은 부적절, (2) 제조과정의 오류 혹은 부적절, (3) 검증 과정의 오류나 생략, (3) 부적절한 설치방법, (4) 환경적 스트레스(정상 혹은 사고 환경포함, 그리고 (5) 인적인 실수, 등이다[9].

따라서 계측제어기기의 환경적 적합성을 만족하는 것은 공통모드고장에 대한 대책 중의 하나가 된다. 본보고서는 계측제어기기의 노화(aging)및 환경스트레스에 의한 고장 메커니즘과 열화 및 기타 aging 시험방법에 대한 것을 기술하고, 원전의 전자기파 환경평가의 일환으로 수행된 electromagnetic site survey의 과정과 결과를 수록하였다.

2. 계측제어 소자의 고장 메커니즘

2.1. 집적회로

2.1.1. 집적회로 형태

집적회로는 두 가지 형태로 나뉜다. Bipolar junction transistor 들로 구성하는 bipolar IC(integrated circuit)형과 metal oxide semiconductor(MOS) transistor 소자로 만드는 MOS IC이다. 그러나 대부분의 고집적회로(VLSI : very large-scale integrated circuit)에는 소비전력이 적고 집적도를 높일 수 있는 MOS 형이 쓰인다. 또한 이 MOS 형은 gate 의 재질과 극성에 따라 P-MOS, N-MOS, C-MOS 등으로 나뉘어 진다[2].

집적회로의 제조는 맨 처음 얇은 실리콘 반도체판으로부터 시작된다. 이 판에 화학처리를 하여 절연층, 도전층, 그리고 반도체층을 생성한다. 그리고 정밀한 석판 인쇄기술(lithographic)과 같은 공정으로 집적회로의 기하학적인 구조를 만들고 각 소자(chip)는 외부로 연결되는 lead frame 과 아주 가는 선으로 접속된 후 플라스틱이나 세라믹 등으로 몰딩된다. 집적회로의 제조에는 매우 복잡하고 섬세한 공정을 거치게 되므로 여러 가지 요소들이 집적회로 소자의 신뢰성에 영향을 미치게 된다. 다음은 그 중에서 주요한 고장 메커니즘의 예를 나타낸 것이다[2].

2.1.2. Electromigration

Electromigration 은 전류의 흐름에 의해서 질량이 이동하는 것을 말한다. 이런 현상이 고장을 일으키는 정도로 나타나기 위해서는 큰 전류밀도(10^5A/cm^2)가 요구되기 때문에 보통의 전기회로에서는 발생되기 어렵지만, 고집적회로에서는 전류밀도가 위의 값보다 크게 설계된다. 이 현상은 알루미늄 금속 고집적회로에서 단선고장을 일으키는 주원인의 하나로 분석되고 있다. 구리를 첨가한 구리-알루미늄 혹은 알루미늄-실리콘(Al-Si)합금은 이 현상이 매우 줄어드는 것으로 나타난다. 온도 및 전류밀도가 이 현상의 진행속도에 영향을 주게 된다.

2.1.3. 유전층 파괴(Dielectric Breakdown)

유전층 파괴는 MOS(Metal-Oxide Semiconductor)집적회로에서 얇은 유전층 때문에 일어나는 주 고장유형이다. 순간적인 전기충격뿐만 아니라 장기간 동안의 전계영향을 받을 때에도 이 현상이 일어나며, 온도 및 전계강도가 진행속도에 영향을 준다.

2.1.4. 부식 (Corrosion)

집적회로 소자를 만들기 위해서는 집적회로판과 리드프레임을 지지하기 위

해서 두 개의 층으로 된 거꾸집모양의 화합물을 접합하게 된다. 이 때 두 층 사이로 습기가 스며들어 집적회로의 연결회로에 부식을 일으키게 된다. 이 부식은 IC 회로의 전류 전도도에 영향을 주어 고장을 일으키게 된다. 압축, 밀봉, 보호막 등의 기술과 방법의 개선으로 부식문제가 상당히 감소하였으나 아직도 부식은 집적회로의 형태와 제조공정 등에 따라 달라지는 주 고장유형 중의 하나이다. 습기, 구동전압 및 온도 등이 부식의 진행에 영향을 주는 인자들이다.

2.1.5. 정전기 장애

MOS 집적회로의 산화물 게이트에 과도한 전압이 인가되면 게이트의 유전층이 파괴되어 소자의 기능을 상실한다. 산화규소의 경우 허용 전계강도가 8 MV/cm 이고 게이트의 두께는 2.5 μm 이므로 게이트는 20V 이상 견디기 힘들 것이다. 그러나 실내의 보통사람의 몸에서도 수천 볼트의 정전기가 발생된다. 따라서 조립된 장비에 적절한 접지와 커버 등을 사용, 정전기로부터의 보호수단을 마련한다.

2.1.6. 접점 손상, 피로, 밀봉불량, 등

접점손상, 피로, 밀봉불량, 등 기타의 고장유형 들이 환경조건 및 제품의 고유 품질등에 따라 고장을 일으키게 된다. 온도, 금속 종류, 사용된 불순물 종류 등이 접점손상에 관련이 깊고, 피로는 접착력 및 온도의 변동 빈도 등에 의해 영향을 받는다. 밀봉불량은 압력 및 대기의 조건에 따라 영향을 받는다.

2.2. 디지털 계측제어시스템의 고장 유형

2.2.1. 디지털 장비의 구조적 차이[10]

디지털장비는 기존의 아날로그 장비와는 그 작동방식이 다르므로 고장유형 (failure mode) 또한 다르게 나타난다. 만일 장비의 디지털장비의 고장이 출력모듈에서 stuck-on 상태로 고착되는 경우처럼 안전시스템의 작동에 방해되는 형태로 나타나는 경우는 plant 의 안전성에 타격을 줄 수도 있다. 디지털장비는 사용목적과 설계에 따라 매우 다양하게 구성된다. 따라서 일률적으로 고장의 유형과 그 고장의 영향을 평가할 수는 없다. 그러나 일반적인 하드웨어 구조에 대하여 고장유형을 분류함으로써 고장대책의 수립에 활용할 수는 있을 것이다.

일반적으로 산업에 사용되는 디지털 시스템은 process 센서, 입출력 모듈, 데이터 및 논리처리부, 통신네트워크, 그리고 actuator 기기 등으로 구성되어 있다. 그림 1 은 간단한 디지털 계측제어 시스템의 구성을 나타낸 것이다. 센서와 구동기는 일반적으로 아날로그 시스템과 동일하다. 아날로그 시스템과 디지털 시스템은 구조적으로 서로 차이가 있다. 아날로그 계통은 일반적으로 다중채널 간에 서로 기기나 소자를 공유하지 않는다. 그러나 보통의 디지털 계측제어 장

비들은 신호의 처리와 데이터 송수신을 위해 중앙의 프로세서와 통신 네트워크가 중심적인 역할을 한다. 이러한 주요 공통기능에 관계되는 소자들의 고장은 여러 채널에 동시에 영향을 줄 수 있다. 그림 1에서 중앙처리 장치의 고장은 모든 입출력 채널의 기능을 잃게 만든다.

디지털 계통에서 다중성은 보통 고장을 검출하고 격리하는 ‘fault-tolerance’ 개념으로 구현한다. 이것은 각 채널을 감시하는 self-diagnostic 기능에 의해 fault가 발견되면 발견된 채널은 격리하고 대기중이거나 정상동작중인 채널로 기능을 ‘switch-over’한다. 진단장치가 고장을 검출하지 못하거나 ‘switch-over’기기의 기능상실은 시스템 전체의 기능상실로 발전될 수 있다. 즉 ‘fault-tolerance’ 특성을 잃게 된다. 입출력모듈을 공유하고 자동 고장검출기능을 가진 이중화 중앙처리부, 그리고 switch-over 회로로 fault tolerance를 구현한 디지털 시스템의 경우, 이 시스템의 신뢰도는 결코 ‘switch-over’ 회로의 신뢰도보다 나올 수는 없다. 즉 이 switch-over 부분이 시스템의 common-module이 되고 이중화된 계통의 성능을 좌우하게 된다. 또한 다중화 된 디지털 시스템에서는 공통원인고장(common-cause failure) 혹은 공통모드고장(common-mode failure)이 발생할 가능성이 아날로그 계통보다 훨씬 높게 평가된다.

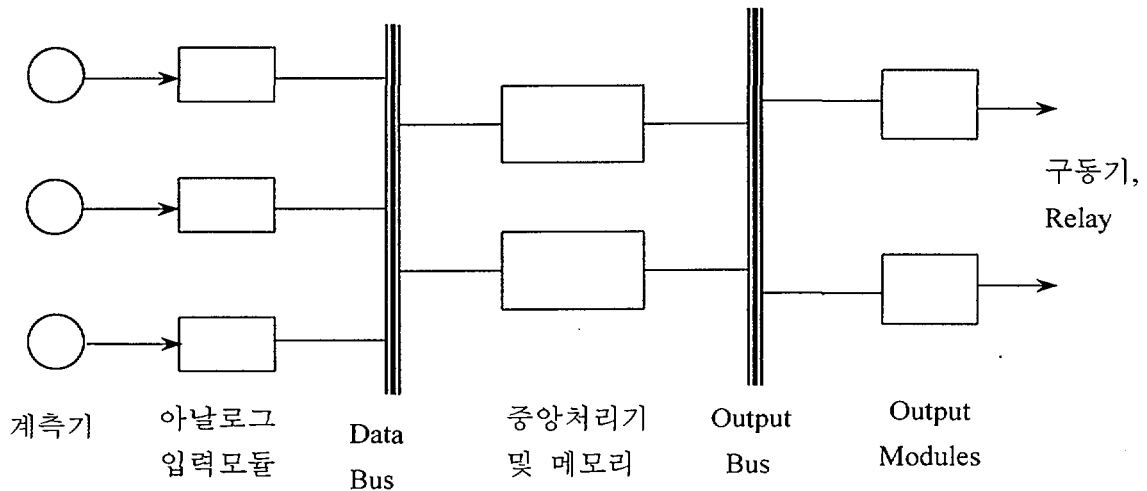


그림1. 기본 디지털 계측제어장비 구조도

2.2.2. 디지털 소자의 고장유형

표 1은 대표적인 디지털 소자인 마이크로프로세서와 입출력모듈의 고장유형을 나타낸 것이다[10]. 나열된 고장유형이 전체 시스템에 미치는 영향은 시스템의 설계와 특성, 그리고 자동 고장검출 및 진단 성능등에 따라 매우 달라지기 때문에 단정적으로 말할 수 없다. Arithmetic Logic Unit(ALU),의 기능상실이나, 프로세서의 입출력 bit의 고착(stuck) 등 대부분의 고장은 시스템의 작동에 중대한 영향을 미친다. 그러나 잘 설계된 고장검출 및 진단 기능을 가지고

있으면 error 의 발생시 즉각적인 채널전환 등으로 고장을 차단함으로써 시스템의 기능상실을 막을 수도 있다.

표 1. 마이크로 프로세서 기기의 고장유형

소자 (device)	Category	Failure Modes
마이크로프로세서	CPU Bit Error	<ul style="list-style-type: none"> - Stuck bit or multiple bits - Dynamic faults or cross talk - Instruction time or wait state stall - Micro code or macro code error - Arithmetic Logic Unit(ALU) faults - Access time wait state logic faults - Stuck IRQ(interrupt Request) - Stuck or loss of timing - Device specific faults
	I/O port error	<ul style="list-style-type: none"> - Cross talk on Input/Output Lines - Stuck Input/Output lines - Data direction faults(I/O port) - Signal too fast or slow(I/O port)
	Communication Error	<ul style="list-style-type: none"> - Lost bit, bits, or message - Wrong sender/receiver message - Time out - Deadlock - Parity generator fault - Frame fault or buffer overrun
	Direct Memory Access (DMA) error	<ul style="list-style-type: none"> - Stuck direct memory access - x-talk - loss of I/O communication - bus request stuck - transfer time incorrect
	Timing problem	<ul style="list-style-type: none"> - timer register fault - wrong timer - timeout/overrun - timebase fault - set/reset fault - IRQ/poll fault - Trigger too early/late
Input Module	Error	<ul style="list-style-type: none"> - Stuck on/off - Upscale/downscale/conversion fault - Drift or calibration error - Unstable input - Isolation fault - Linearization/compensation error
Output Module	Error	<ul style="list-style-type: none"> - Stuck on/off - Upscale/downscale - Conversion fault - Drift or calibration error - Unstable output - Isolation fault - Linearization/compensation error

2.2.3. 디지털 계통의 고장유형

원자력 발전소에 적용되었던 디지털 시스템의 고장은 여러 원인으로부터 발생되어왔다. 디지털 장비의 고장원(failure cause)을 크게 분류하면 하드웨어, 소프트웨어 운전원의 운전조작, 환경 스트레스 등이다. 하드웨어 고장은 불규칙 고장과 공통모드 고장을 모두 일으킨다. 하드웨어의 불규칙고장(random failure)은 다중성을 확보한 시스템에서는 문제를 일으키지 않을 수 있다. 그러나 소프트웨어 고장은 어떤 기능상실로 표현될 수 있는데, 그 기능이 작동되는 조건에서 고장으로 나타난다. 환경인자에 의한 고장은 다중채널이라도 설치장소가 같거나 충분한 물리적 격리가 이루어 지지않았을 경우 공통모드 고장을 초래한다.

2.2.3.1. 미 원자력 발전소의 고장 경험 분석

NRC가 작성한 디지털 계통의 고장사례[11]를 보면 디지털 장비의 고장원인은 소프트웨어의 결함, 인적인 실수(human error), 전자기파장애, 그리고 하드웨어 소자의 고장발생의 4가지로 분류하였다. 각 원인의 증상 및 초래된 현상을 구분하여 보면 다음 표 2와 같다.

표 2.. 디지털 시스템의 고장원인 종류

고장원인	증상 및 결과				
	시스템 오작동 (spurious actuation or unexpected operation)	작동정지 (loss of operation)	부정확, 변동 (Incorrect, Output change)	기타 (Others)	합 (Total)
소프트웨어	14	17	13	6	50
인적인 오류	5	6	4		15
EMI	1	8	1		10
하드웨어	10	19	1		30
합	30	50	19	6	

대부분의 디지털 계통 고장은 시스템의 오작동(erroneous actuation)이나 작동정지로 나타난다. 표 2는 고장사례모음 문서를 임의로 분류한 것이며 작동정지와 오작동을 구분하기 애매한 경우가 많았다. 소프트웨어결함의 경우 성능시험이나 설계확인 및 검증 단계에서 많이 발견되었으며, 소프트웨어의 upgrade 과정에서 결함이 유입되는 사례도 적지 않았다. 인적오류는 데이터의 입력오류에 의한 계통 오작동 혹은 오류(error)가 많았으며, 전자기파장애의 경우는 voltage spike에 의한 작동이상인 것이 특징이다. 하드웨어의 고장은 여러 유형 중에서 전원공급기(power supply)의 고장 혹은 이상상태로 인한 시스템 고장발생이 자주 발생되었다.

2.2.3.2. 디지털 제어시스템의 고장사례의 또 다른 예

Paula[12]는 여러 산업분야에서 사용된 10 개의 fault-tolerant 디지털제어시스템의 사용 경험 중 다중채널에 영향을 준 공통원인고장(CCF : common-cause failure)을 분석하였다. 10 개의 시스템 중 9 개는 1/2 의 이중화된 제어계통이고 나머지 하나는 2/4 선택 논리를 갖는 고신뢰도 보호계통이었다. 표 3 은 발견된 공통원인 고장의 유형별로 분석한 것이다. 소프트웨어가 공통원인 고장을 일으키는 가장 큰 위험 요소임을 알 수 있다.

표 3. 공통원인 고장사례의 유형별 분류 보기

Failure Category	Failure Cause and Feature		No. of Common Cause Events	Remarks
Hardware	Common hardware defect in redundant channels of the high-integrated protection system		1	7 single channel failures occurred in the system
Software			9	The most significant factor of CCF
Operation/Maintenance			7	The second significant factor of CCF
Others	Environmental Stressors	High temperature due to the failure of air-conditioning	1	
		Multiple computer failure due to lightning	1	
	Power Supply related failures		5	
Unidentified			11	

표 3 에 조사된 디지털 제어시스템은 다중화가 되지 못한 공통하드웨어가 있다. 시스템 bus, wiring, shared disk, shared A/D converter, 공통전원공급기, 등 중앙 처리장치가 이중화 되었더라도 시스템의 설계형태에 따라 여러 가지 공통기기를 사용하는 경우가 많다. 이러한 공통기기의 고장은 표 3 의 분류에 포함되지 않았다. 엄밀한 의미의 여러 채널에 동시에 일어나는 CCF 로 보기 어렵기 때문이다. 조사된 10 개의 장비 중 2 개의 장비에서 대부분의 공통하드웨어 고장이 발생한 것으로 나타났다. 이것은 시스템의 설계에 따라 공통하드웨어의 범위가 매우 달라지기 때문으로 평가된다. CANDU(Canadian Deuterium Uranium)형 원자력발전소에 적용된 이중화 플랜트 제어시스템에 대한 고장 사례 중 한 발전소에서 발생한 두 대의 컴퓨터 모두 고장을 일으켜 플랜트 제어기능을 상실한 4 번의 사례 모두가 예방정비(maintenance) 및 시험도중에 일어난 것으로 분석

되었다. 이것은 표 3 에서 조사된 CCF 의 중요한 원인 중 하나가 예방정비와 시험(Operation/Maintenance)상의 오류임을 뒷받침한다.

2.3. 원자력 안전계통의 내환경 관련 고장원인 분석

2.3.1. 안전계통의 고장 원인

ORNL 은 License Event Reports(LER)분석하여 1982 년부터 1991 년 까지 10 년 동안 안전계통에 발생한 고장을 종합하였다[1]. 안전계통 고장은 보호계통의 Channel Trip 이상과 ESF 작동신호 발생의 경우를 포함한다. 표 4 는 고장원인이 내환경 인자로 판단된 경우를 환경요소별로 분류한 것이다. 기타로 분류한 숫자는 원인이 밝혀지지 않은 경우이거나 환경인자로 인한 고장으로 분류할 수 없는 것들이다. 따라서 기타로 분류된 것 중의 상당수도 내환경에 의한, 특히 온도나 부식에 의한 고장이 포함될 수 있다. 예를 들면, ‘전원공급기 기능상실’로만 고장원이 보고되는 경우 이것이 열적 열화(thermal aging) 혹은 고온에 의한 영향으로 발생했을 수도 있기 때문이다. 고장보고를 인정하면 고장발생 환경인자 중에서 EMI/RFI 에 의한 고장빈도가 적지 않다는 것이 특이하다. 지금까지 아날로그 계측제어기기는 전자기파의 영향에 대하여 매우 강한 내성이 있다고 간주되어 내환경 검증항목에도 포함하지 않았다.

표 4. 원자로 안전계통 고장원인 분류

고장원인	원자로 형태		합계
	가압경수로	비등원자로	
온도(temperature)	7	5	12
습도 및 습기 (humidity/moisture)	10	13	23
부식(corrosion)	3	8	11
EMI/RFI, ESD	22	21	43
Lightning	6	4	10
Maintenance Error	50	51	101
Others	118	192	310
합계	216	294	510

한편 위의 고장원인 중에서 EMI/RFI 로 인한 고장발생은 전자기파장애의 형태에 따라 표 5 와 같이 전자가 스파이크, 무전기 사용(RFI), 정전기 방전(ESD : Electrostatic Discharge) 등으로 분류할 수 있다[1].

표 5. EMI/RFI 관련 안전계통 오동작

EMI/RFI 원인 종류	가압경수로(PWR) 발생횟수/(비율)	비등경수로(BWR) 발생횟수/(비율)
미확인 잡음 스파이크(Noise Spike)	5/(22.7%)	2/(9.5%)
휴대용 무선기 사용에 의한 계측 transmitter 측정값 오류	7/(31.8%)	5/(23.8%)
안전채널 EMI/RFI 유도잡음 발생	9/(41.0%)	14/(66.7%)
정전기방전(Electrostatic Discharge)으로 인한 장애	1/(4.5%)	0(%)

3. Aging

어떤 상품이던지 시간이 지남에 따라 성능 혹은 특성이 변하게 되는 것을 흔히 보게 된다. 많은 경우 이 특성의 변화는 성능의 저하로 이어진다. 따라서 이 변화율(rate of deterioration)에 따라 상품 혹은 재질의 수명이 결정되게 된다. 이러한 노화현상(aging)에 영향을 주는 것은 방사능(radiation), 온-습도(temperature/humidity), 작동주기(operation cycling), 진동(vibration), 등을 들 수 있다.

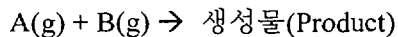
원자력 안전기기들은 플랜트의 수명기간동안 작동하여야 할 뿐만 아니라 설계가상사고에서도 그 안전기능을 수행하여야 하므로 [13] 기기의 작동환경에서의 aging으로 인하여 안전기능의 장애가 생기지 말아야 한다. 따라서 Aging analysis는 내환경 검증의 한 항목으로 요구된다[14, 15].

노화 및 열화 효과에 대한 평가는 환경검증시험 이전에 그 기기에 aging 효과가 두드러지게 있는 지 여부를 밝히기 위하여 수행된다. Aging의 형태는 열화, 방사능, 마모, 진동 등이 포함된다. 극한환경에 있는 기기들은 일반 온화환경의 기기보다 환경적인 스트레스를 장기간 심하게 받게 되므로 aging 대처 프로그램을 갖출 필요가 있다. aging 프로그램은 자연적 aging과 age conditioning(accelerated aging)등이 있을 수 있다. 만일 age conditioning과 자연적 aging 방법에 의한 시험이 기술적으로 유효하지 않거나 부적절하면 aging 효과를 검출하고 대응할 수 있는 주기적 시험 및 검사로 대신할 수 있다. 기기를 구성하는 재료가 어떤 환경인자들에 대하여 노화상승작용(synergistic effect)가 있다고 알려지는 경우는 aging 시험은 이를 반영하여야 한다.

3.1. 열화(Thermal Aging)

3.1.1. 반응이론(Collision Model)

열화(thermal aging)는 화학적 반응속도(chemical reaction rate)로 설명이 된다. 또한 많은 화학적 반응(reactions)은 충돌모델(collison model)로 설명할 수 있다 [16]. 즉 아래와 같은 화학 반응,



에서 화학반응은 A 분자와 B 분자들간에 충돌할 때 일어난다는 것이다. 그러나 모든 분자의 충돌이 반응을 일으키지는 않는다. 오히려 대부분의 충돌은 화학반응을 일으키지 않는다고 봄이 옳다. 충돌마다 반응이 일어나지 않는 이유는 다음 두 가지로 설명된다.

첫째, 반응이 일어나기 위해서는 분자의 기하학적 위치가 서로 맞아야 한다. 간단한 기체상태의 보론과 요오드화수소의 반응($Br(g) + HI(g) \rightarrow HBr(g) + I(g)$)에서 충돌시 수소원자가 쉽게 보론에 접근될 수 있는 위치에 있지 않으면 이

반응은 일어날 수 없을 것이다. 이것을 입체효과(steric factor)라고 부른다.

두 번째 요소는 활성화 에너지(activation energy)이다. 분자들은 화학적 결합에 의해서 서로 당기고 있다. 이 결합을 끊기 위해서는 충돌로 인한 운동에너지가 충분히 커야 한다.

그러므로 이러한 충돌모델로 설명되는 화학반응에서 반응률은 다음 식과 같이 된다.

$$k = p * Z * f \text{-----}(1),$$

여기서

- p 는 steric factor 로 총 충돌횟수 중에서 적합한 기하학적 위치를 갖는 (기하학적)유효충돌수의 비(0 과 1 사이의 수)이다. 그러나 이 값을 계산하거나 구하는 값은 쉬운 일이 아니다.
- Z 는 횟수/초 단위로 표현되는 시간당 분자들의 충돌 횟수이다. 기체인 경우는 기체의 운동이론으로부터 구해진다.
- f 는 총 충돌횟수 중에서 활성화에너지보다 큰 경우의 비율이다. 이것은 $f = e^{-E_a/RT}$ 로 표현된다. 여기서 E_a 는 활성화에너지(activation energy), R 은 기체상수(gas constant)이고, T 는 절대온도이다.

위의 식으로부터 활성화에너지(activation energy)가 크면 f는 감소한다. 따라서 활성화에너지가 큰 반응은 작은 활성화에너지 반응보다 서서히 일어난다. 실제로 대부분의 반응은 상온에서 잘 일어나지 않는다. 예를 들면 수소와 산소의 반응 $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$ 는 폭발성의 발열반응이지만, 산소와 수소를 가열하지 않으면 상온에서 반응률은 거의 제로이다. 활성화에너지가 매우 높기 때문이다. 한편 온도가 오르면 반응률은 증가한다.

3.1.2. Arrhenius Model

앞 절에서 제기한 충돌반응에서 반응속도 혹은 반응률은 (1) 식에서

$$k = p * Z * e^{-E_a/RT} \text{-----}(2)$$

로 표현된다. 여기서 Z는 충돌률, p는 입체효과(steric factor), E_a 는 활성화 에너지, R은 기체상수(Boltzmann's Constant : $8.31 * 10^{-3} \text{kJ/molK}$), 그리고 T는 절대온도이다.

만일 우리가 위의 (2)식에서 온도의 관점에서 생각한다면, 입체효과는 분명히 온도와 전혀 관계없음을 추측할 수 있다. 충돌률 Z는 온도에 약간의 관계만 있는 것으로 알려졌다. 온도 100도(섭씨)의 변화(500°K 부터 600°K 까지)에 대하여 충돌률 Z의 변화는 10%이내이다.

따라서 위 식의 p*Z부분을 상수화하여 온도에 대한 변화를 근사식으로 표

현하면, 다음 식 (3)과 같이 된다.

$$k = A \cdot \exp(-E_a/RT), \text{-----} (3)$$

혹은, 양변에 대수를 취하면

$$\ln(k) = \ln(A) - E_a/RT \text{-----} (4)$$

가 된다. 위의 두 식을 아르헨니우스 모델(Arrhenius Model)이라 한다. 여기서 반응률 혹은 반응속도의 역수 $1/k$ 는 반응이 일어나는 주기 즉 어떤 반응이 일어나는데 걸리는 시간의 의미를 지닌다. 기기 및 재료의 노화를 다루는 경우가 반응률의 역수를 수명(life)으로 정의한다. 즉,

$$L = 1/k = 1/A \cdot e^{E_a/RT} \text{-----} (5)$$

위식을 대수함수로 표현하면,

$$\ln(L) = E_a/R \cdot (1/T) + \ln(1/A) \text{-----} (6)$$

이 된다.

식 (6)은 수명의 로그값($\ln(\text{life})$)과 절대온도의 역수($1/T$)간에 1차 선형함수 관계가 있음을 보여준다. 이제 위의 로그 함수형 Arrhenius 모델을 가지고 두 온도간의 수명 혹은 반응률의 차이(비율)을 구해보면 두 온도(T_1, T_2)에서 각각의 Arrhenius 방정식은

$$\ln(L_1) = E_a/R \cdot (1/T_1) + \ln(1/A) \text{-----} (7)$$

$$\ln(L_2) = E_a/R \cdot (1/T_2) + \ln(1/A) \text{-----} (8)$$

로 표현되고 여기서 L_1 과 L_2 는 T_1 과 T_2 에서의 수명 혹은 반응주기이다. (7)식에서 (8)식을 빼면

$$\ln(L_1/L_2) = E_a/R \cdot (1/T_1 - 1/T_2) \text{-----} (9)$$

가 된다. 위 식은 두 개의 서로 다른 온도에 의한 수명의 차이(L_1/L_2) 혹은 반응속도의 차이를 알 수 있으므로 재질의 열화가속시험(thermal accelerated aging simulation)에 이용된다. 식(9)에서 온도 T_1 (낮은 온도환경)에서의 수명을 예측하기 위해서 온도 T_2 (높은 온도)에서 수명 L_2 을 측정하면 식(9)로부터 L_1 을 예측할 수 있다. 이때 물질에 따른 활성화 에너지(activation energy)를 알고 있어야 한다. 이 활성화 에너지는 경험적이거나 실험적인 데이터로부터 구한다.

3.1.3. 기타 열화 모델

3.1.3.1. Eyring Model

Eyring Model 은 온도 이외의 다른 요소(stressor)들이 반응속도에 영향을 주는 경우 이용한다. Eyring 모델은 아래의 식과 같이 일반적으로 표현한다[2,9].

$$k = k_0 \cdot e^{nS} = aT^w \cdot e^{-b/RT} \cdot e^{S(c+d/RT)} \text{-----} (10)$$

여기서,

- k_0 = 다른 스트레스요소가 없는 온도만 고려된 경우의 반응속도,,
- k = 다른 환경요소가 가해진 경우의 반응률,

- R = 볼츠만 기체상수,
- T = 절대온도,
- a, b, c, d, 및 w = 시간, 온도, 스트레스와 관계없이 실험적으로 결정되는 상수
- S = 스트레스 함수,
- $n = c + d/RT$ 이다.

부식(corrosion)이 기기의 수명을 결정하는 주 요소인 경우 평균수명은 다음 식과 같이 표현된다.

$$t_{50} = A * e^{Ea/RT} * F_{RH} * F_v, \dots \text{-----} (11)$$

여기서 A는 상수, F_{RH} 는 습도효과, F_v 는 인가전압효과를 반영하는 값이다.

3.1.3.2. Inverse Power Model

Inverse Power 모델은 재료의 피로(fatigue), 캐패시터의 유전파괴(dielectric breakdown), 여러 기기로 구성된 장비의 노화 등을 시험할 때 사용될 수 있는 것으로서 식 (12)와 같이 표현된다[9].

$$L = 1/kV^n \text{-----} (12)$$

여기서,

- L = 수명 혹은 특정 사건이 일어나는 데 걸리는 시간
- k, n = 재질 및 실험방법에 따라 결정되는 양의 파라미터
- V = 스트레스 (예, 전압, 전류, 온도, 등)

3.2. 열화 모델의 평가

아르헨니우스(Arrhenius) 모델은 전형적인 열화 시험모델이고 다른 모델보다 간단하며, 재료에 따른 활성화에너지만 구해지면 쉽게 수명 혹은 반응속도를 예측할 수 있다. 이 방법은 미 원자력 규제위원회에서 Reg Guide 1.89를 통해 승인된 방법으로 여러 분야에서 가장 광범위하게 사용되어 왔다. 그러나 이 모델은 화학반응의 시간-온도 관계만을 고려한 것이다. 그러나 고집적회로(VLSI)에서는 많고 복잡한 aging 현상이 존재한다. 특히 습도는 디지털기기에서 노후화를 빠르게 진행시킬 것으로 보인다. 따라서 온도뿐만 아니라 습도 및 인가전압을 모두 고려하는 Eyring 모델이 디지털기기의 열화 시험에는 더 적절할 것으로 보인다. 그러나 현재까지 개발된 열화데이터, 기술동향과 요건은 복잡한 Eyring 모델을 광범위하게 일반적으로 사용하기에는 충분하지 않은 것으로 평

가된다. 또한 현재까지의 규제기술에서는 원전의 디지털장비의 노화 시험에 Arrhenius 이외의 다른 모델을 사용해야 한다는 분명한 요구가 확립되지 않았다.

경험적으로 금속은 온도-시간의 인자에 대하여 별로 영향을 받지 않는 것으로 판단되어 왔다[17]. 따라서 열화평가는 안전기기의 비금속재질에 초점이 맞추어져 있다. 예를 들면 전선케이블의 경우 내부 도체는 열화의 문제가 되지 않으며 외부를 덮고 있는 절연체의 열화속도가 케이블의 수명을 결정하게 된다.

집적회로(IC)의 경우 여러 가지의 다양한 환경적 고장 메커니즘이 있지만 이러한 고장을 피하기 위하여 반도체 제조회사에서 충분한 시험과 관리(screening)를 수행하고 있으므로, 원자력발전소에 디지털장비의 적용에 있어서 위의 다양한 환경적 고장메커니즘을 포함하는 새로운 디지털소자의 노화시험 방법을 개발하여 적용하기에는 현실적으로 곤란한 점이 많다. 따라서 제조회사의 적절한 신뢰성 시험 및 관리방법을 확인하고, 그 시험 및 품질 데이터를 활용하여 원자력발전소에의 적용타당성을 확보해야 할 것이다. 그리고 위에서 지적하였듯이 비금속 재질에 있어서의 Arrhenius 모델적용은 아직도 적용되는 데 무리가 없다.

3.3. 방사능 Aging

Aging 평가에 의해서 방사능에 대한 aging 이 필요하다고 인정되면 기기의 수명기간동안 정상운전시의 방사능 양과 설계사고시에 입게 되는 방사능 피폭 양을 합한 총 누적 방사능 양을 조사하여 그 aging 효과를 시험한다. 냉각재 상실 사고시에 발생할 것으로 예상되는 방사능의 양이 10^8rad 를 넘을 것으로 추정되어 대부분의 고집적회로는 이 수준의 방사능의 세기에 파괴될 것이므로 격납용기 안에는 디지털 기기의 설치를 삼가야 한다.

3.4. 마모 Aging

연속 혹은 반복동작에 의하여 마모가 예상되는 전기기계류의 경우 마모 aging 시험을 환경시험(type test)이전에 수행하여야 한다. 펌프 및 밸브의 예상되는 작동횟수, 전원의 on-off 횟수 등이 해당 기기의 기기검증 요건서에 제시되어야 한다.

4. 전자기환경 측정(EMI Site Survey)

원자력 발전소에서의 전자기환경 조사 혹은 측정(Electromagnetic Site Survey)은 디지털기기의 교체나 새로 도입하는 경우 간간히 제한적으로 수행되었으며, 최근 미 전력연구소(EPRI: Electric Power Research Institute)와 Oak Ridge National Laboratory(ORNL)등에서 신규 디지털기기의 대부분의 경우에 적용될 수 있는 일관된 EMI 기기검증기준 및 방안을 마련하기 위하여 미국의 몇몇 발전소에 대해 전기잡음의 강도를 측정하였다[18,19]. 국내 발전소 또한 필요 시 외국의 측정기관에 의뢰하여 전자기환경조사를 수행하여 왔으나 장기간의 데이터 수집이 불가능하고 소요비용이 과다하였다. 한국원자력연구소는 원자력 안전기술원과 공동으로 울진 원자력 3 호기의 PCS 와 CPCS 의 전원선 전도성 잡음측정을 수행하였고, 한국전력기술연구원과 공동으로 월성 2 호기의 전자기환경을 측정 평가하였다. 또한 고리 1 호기의 RMS(Radiation Monitoring Systems)의 일부 LCU(Local Control Unit)에 대한 전도성 잡음 일부를 측정 평가하였다.

4.1. 용어정의(Definitions)

이 Site Survey 에 사용되는 주요 약어 및 용어의 정의는 다음과 같다[20].

EMI : Electromagnetic Interference (전자기파 방해)

EMC : Electromagnetic Compatibility(전자기파 적합성)

(Electromagnetic) Site Survey: a systematic, documented investigation of the amplitudes of electromagnetic fields at one or more locations with respect to frequency, time, and position[21].

RE : Radiated Emission

CE : Conducted Emission

4.2. EMI 측정 항목 및 방법

4.2.1. 시험 항목(test items)

다음 도표는 시험항목과 측정 지점을 나타낸 것이다. 측정방법과 항목은 MIL-STD-462D[22]를 참고로 하여 측정하였다.

표 6. 시험항목

시험항목	주파수범위	측정 지점	비고
CE101: Conducted Emissions	30 Hz – 10 kHz	Power Leads	울진, 월성, 고리
CE102: Conducted Emissions	10 kHz – 10 MHz	Power Leads	울진, 월성, 고리
RE101: Radiated Emissions (Magnetic field)	30Hz – 100 kHz	기기 설치예상지점 혹은 최대 발생 예상 지점	월성
RE102: Radiated Emissions (Electric Field)	10kHz – 7GHz	상동	월성
Surge(시간 파형)		Power Leads	고리

4.2.2. 측정 Mode

Conducted Emissions : Differential Mode 와 Common Mode

Radiated Emissions : Horizontal Polarization 과 Vertical Polarization

Common Mode 측정:

- 1) 전압측정 : 접지(Ground)와 각 Power Leads 사이의 전압
- 2) 전류측정 : 모든 전원선의 전류 합

Differential Mode 측정:

- 1) 전압측정: Neutral 과 Live 단자간의 전압, 혹은 전원선간의 전압
- 2) 전류측정 : Common Mode Current Rejected 전류측정 혹은 각 전원선의 개별전류측정(Common Mode Current 포함)

4.2.3. Site Survey 에 필요한 장비

전자기환경을 측정하기 위한 장비는 EMI Receiver 및 부속 설비로 다음 표와 같다

표 7. 시험장비 목록

번호	장비명	모델번호	제조사	특성 및 용도	비고
1	EMI Test Receiver	ESI7	Rohde Schwarz	20 Hz - 7 GHz, CE 및 RE 측정용	
2	Current Probe	EZ-17	Rohde Schwarz	5 Hz - 2 MHz	
3	Biconical Antenna	HK116	Rohde Schwarz	20 MHz - 300 MHz, 전계 안테나	
4	Rod Antenna	HFH2-Z6	Rohde Schwarz	9 kHz - 30 MHz	
5	Log Periodic Antenna	HL223	Rohde Schwarz	200 MHz - 1300 MHz	
6	Magnetic Pickup Coil	HZ-10	Rohde Schwarz	5 Hz - 10 MHz	
7	Notebook Computer	Sens 670	삼성	장비 제어 및 데이터저장	울진
8	오실로스코프	TDS410	HP	시간과형(Surge) 측정	울진
9	전압 Probe	P6015A	HP	전압측정	울진
10	연결 Cable			안테나 및 Probe 연결용	
11	Diskettes	3.5 인치		데이터 기록용	

4.2.4. 측정기간 및 발전소 운전 상태

울진 및 월성원자력 발전소의 경우 전원 부하가 증가되는 Cold Shut-Down 부터 100% 출력 때까지 계속하여 측정하였으나 운전모드의 변화에 따른 전자기 잡음의 세기 변화는 거의 없었다. 고리 2 호기의 RMS 관련 잡음측정은 snapshot 형태로 이루어 졌다. 발전소의 site survey 는 전자기 환경이 가장 나쁜 상태(worst case)의 세기를 측정하는 것이 원칙이다. 그러나 이 worst case 를 규명하기가 힘들고 발전소의 설비들을 임의로 조작하는 것이 어렵기 때문에 평상운전의 세기를 측정하고 여기에 worst case 를 감안한 margin 을 추가하는 것이 현실적인 방안이다.

4.2.5. 측정 지점(measurement point)

측정측정지점은 발전소의 사정과 기타 제한조건에 의해서 결정되었다.

4.2.5.1. 울진 3 호기

<Conducted Emission>

A. PCS(Plant Control System)의 Power Leads

B. CPC(Core Protection Calculator) A, D 채널의 전원 인입선

4.2.5.2. 월성 2 호기

<Radiation Emission>

- A. DCC(Digital Control Computer)-X 및 Y 사이 가운데
- B. 계기실(CER : Electric Component Room)의 63102-PL160 캐비닛 옆 공간
- C. 계기실의 Terminal Block Train 과 Shut-off Rod Logic(63733-PL178) 사이.
- D. Emergency Core Cooling Cabinet 옆의 통로 가운데
- E. 보조건물 건물옥상(1 회 측정)

<Conducted Emission>

- F. DCC 로 들어오는 3 개의 120V 모선 중 하나(differential mode 측정)
- G. DCC 의 CPU 보드로 들어가는 전원공급선(common mode)

4.2.5.3. 고리 1 호기

<Conducted Emission>

RMS(Radiation Monitoring System)의 일부 채널의 LCU(Local Control Unit)의 전원선, 접지선, 및 신호선 1 개.

4.2.6. Survey 방법

MIL-STD-462D 의 측정방법을 준용하였다. 단, LSIN 등의 장비 설치하는 사실상 불가하고, 존재하는 전자기 환경을 측정하는 시험이므로 규격에서 요구하는 실험요건을 모두 지킬 수는 없었다.

4.2.6.1. 울진 3 호기의 측정방법

Conducted emission 의 경우 수 십 개의 PCS 캐비닛 중에서 10 개를 선정하여 순차적으로 설정된 주파수 범위를 differential mode 와 common mode 를 한 스캔씩 측정하였다. CPC 의 경우는 4 개의 채널 중 두개의 채널(A,D)를 위와 같은 방법으로 측정하였다. 이러한 순차적인 측정을 2 주간 수행하여 데이터를 저장하였다. Surge 시험의 경우는 장시간동안 측정기를 연결하여 입력전압의 변동을 보는 것으로서 2 주일동안 PCS 와 CPC 각각 두 채널씩 측정하였다.

4.2.6.2. 월성 2 호기의 전자기파 측정

월성 2 호기의 전자기 환경 측정은 공중파 특히 고주파 전계강도 측정이 주목적이었으므로 계기실의 공간에 안테나를 설치하고 연속적으로 주파수를 스

캔하면서 장소별로 주파수 스펙트럼을 측정하였다. 월성발전소의 경우 site 외 부에서 들어오는 radiation emission의 확인을 위한 예비적 평상잡음강도의 측정이었으므로 공중파 특히 전계강도를 연속하여 측정하고, 자계강도 및 전도성 잡음의 경우는 일부 지점에서만 1,2 회 측정하였다.

4.2.6.3. 고리 1 호기 RMS 의 전자기파 측정

고리 1 호기의 RMS(Radiation Monitoring System)의 한 구역의 LCU(Local Control Unit)에서 이상신호가 발생함으로 EM Noise의 크기를 측정하는 일환으로 Ground 선을 포함하는 몇 개의 선로에 전류 프로브를 이용하여 주파수별 잡음 크기를 계측하였다.

4.2.6.4. 기존 EMI Site Survey 결과 수집

고리 1 호기의 보호계통 개선과정에서 수행된 전자기 잡음측정치 및 영광 3 호기의 전계강도 측정치를 수집하여 분석하였다.

4.3. Test Set up

측정설비의 설치는 다음 그림과 같이 설치한다.

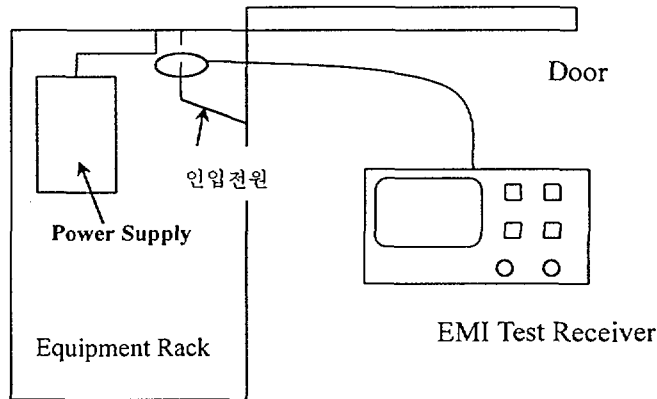


그림2. 전류 Probe를 사용하는 전도잡음 측정 설비 배치도

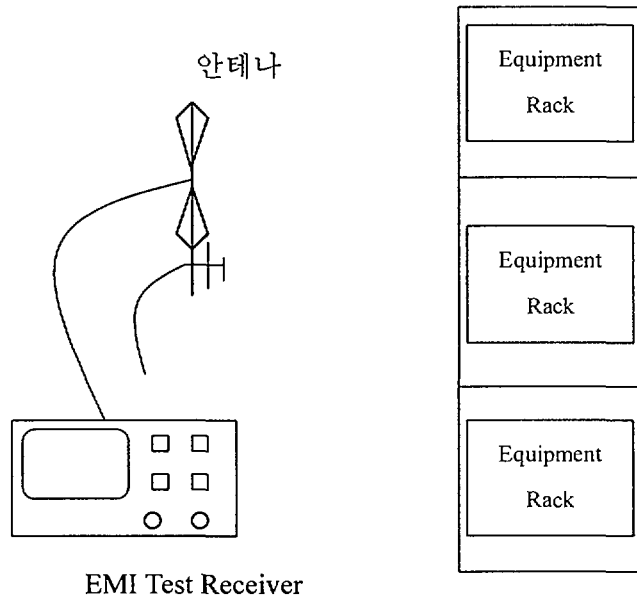


그림3. 안테나를 사용하는 공중파 강도 측정도

4.4. 측정 수신기의 대역폭 및 스캔 측정시간

CE 및 RE의 측정은 MIL-STD-462D에서 요구하는 Bandwidth와 최소 Dwelling Time 요건을 만족하기 위해서 다음 표와 같이 ESI7 EMI Receiver의 Scan Range를 설정하였다. 괄호 안의 숫자는 MIL-STD-461D의 최소 측정시간 요건이다.

표 8. 대역폭 및 측정시간

주파수 범위	Bandwidth	Measurement Time /Dwelling Time	Step Size	비고(안테나종류/측정기입력단자)
30 Hz – 1 kHz	10 Hz	0.2 s (0.15 sec)	4 Hz	Magnetic Loop/Input2
1 kHz – 10 kHz	100 Hz	0.02s (0.015 sec)	40Hz	Magnetic Loop/Input2
10 kHz – 250 kHz	1 kHz	0.02 s (0.015 sec)	400Hz	Rod /Input2 (100kHz 까지 magnetic field를 측정할 때는 magnetic loop)
250 kHz – 30 MHz	10 kHz	0.02 s (0.015 sec)	4kHz	Rod/Input2
30 MHz – 200 MHz	100 kHz	0.02 s(0.015 sec)	40kHz	Bicornical/Input1
200 MHz – 1 GHz	100 kHz	0.02 s (0.015 sec)	40kHz	LogPeriodic/Input2
1 GHz – 7GHz	1 MHz	0.02 s (0.015 sec)	400kHz	Horn/Input2

여기서 Dwelling Time(체재시간)이라함은 어느 특정 주파수 f_i 가 수신기의 대역폭에 포함되어 수신되는 최소 기간을 말한다. 15 msec 는 60Hz 정도의 주파수 성분이 측정되기에 필요한 응답시간(Response Time)이다($1/60 \text{ Hz} = 0.01666 \text{ sec.}$). 본 시험에 사용되는 측정기는 계단식으로 스캔하는 Synthesized(Digital) Receiver 에 속하므로 한 스텝에서 스캔이 멈추어 측정하는 시간을 Measurement Time 으로 정의하고 이것이 MIL-STD-462D 의 Dwelling Time 보다 크도록 설정하였다. 이때 Step Size 는 대역폭의 1/2 을 넘지 않도록 설정하여야 한다. ESI7 측정기는 대역폭의 0.4 만큼 Step Size 가 자동으로 대역폭에 맞추어 지도록 설정된다.

5. 평가 분석

5.1. 울진 3 호기 전자기 환경

5.1.1. 저주파 전도성 잡음(30Hz - 50kHz)

30Hz 부터 50 kHz 까지의 주파수범위에서 PCS(Plant Control System)과 CPC(Core Protection Calculator)의 전원입력선의 잡음성분을 전류 Clamp 를 사용하여 측정하였다. Site Survey 의 특성상 입력 전원의 모선에서 유입되는 noise 차단 기능을 수행하는 LISN(Line Impedance Stabilization Network)을 삽입하기 힘들므로 측정되는 전자기파의 크기와 분포는 전원모선과 기기 즉 장비 캐비닛 으로부터 발생하는 전자기파의 합이 측정되게 된다. 그림 4는 PCS 의 저주파 전도성 잡음(차동모드) 최대치를 그림 4는 CPC 의 저주파잡음을 공통모드 (common mode)로 측정한 최대치(worst case)를 나타낸 것이다.

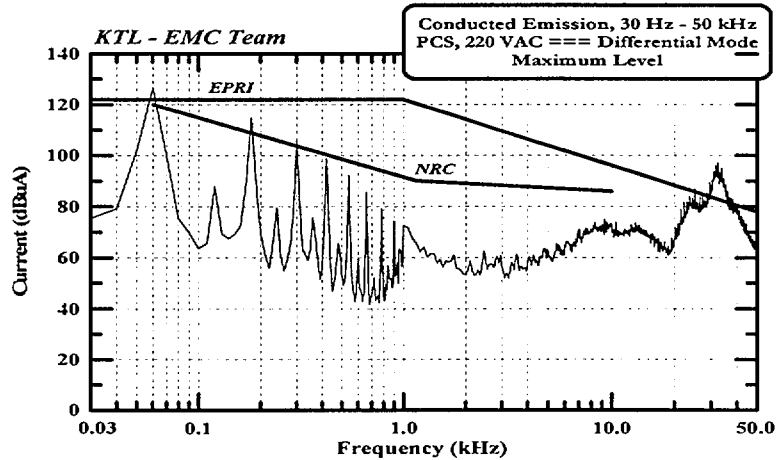


그림4. 울진3호기 PCS의 저주파 전도잡음

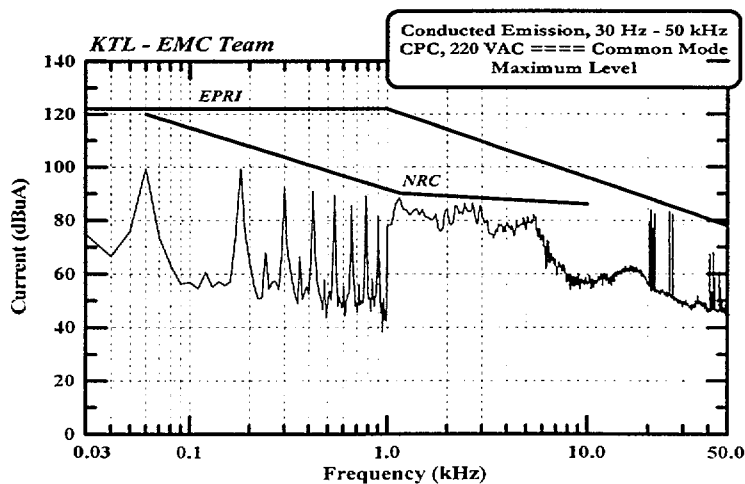


그림5. 울진 3호기의 CPC 저주파 전도성 잡음(공통모드)

그림 4 과 그림 5 에서 굵은 실선으로 나타낸 기준선은 EPRI 와 NRC 가 기기의 EMI 검증시험에 적용되는 권고값을 site survey 측정치와 참고적으로 비교평가하기 위해 표시한 것이다. 저주파 잡음의 특징은 전원주파수의 기수 고조파의 크기가 매우 높게 나타나고 있다. CPC 의 경우는 전원공급기로 스위칭 모드 전원장치(switching mode power supply)를 사용하고 있어서 그의 영향으로 인하여 고주파 영역(1kHz 이상)에서 PCS 보다 대체적으로 높게 나타난 것으로 판단된다.

5.1.2. 고주파 전도성 잡음(10kHz - 30 MHz)

10kHz 부터 30 MHz 의 주파수 영역은 전압 probe 를 사용하여 저주파 전도성 잡음과 같이 PCS 와 CPC 의 전원선의 잡음분포를 측정하였다. 전압 probe 를 사용하였기 때문에 측정단위도 dB μ A 로 나타내었다. 그림 6 은 PCS 의 고주파 전도잡음의 최대치를 나타낸 것이다. PCS 의 경우 고주파 잡음강도가 일부 주파수 영역에서는 100 dB μ V 를 넘고 있다. 그림 7 의 경우는 차동모드로 측정 한 것이다. 전압신호의 경우 공통모드의 잡음강도가 차동모드 측정치보다 크다.

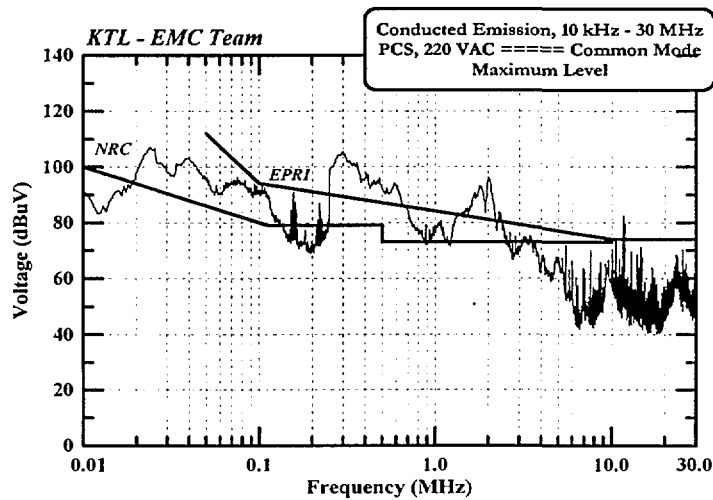


그림6. 울진3호기 PCS의 고주파 전도잡음

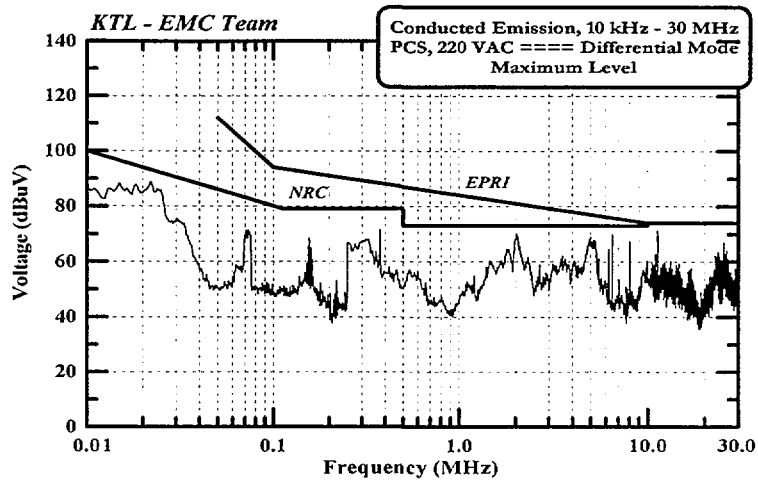


그림 7. 차동모드 PCS의 전도성 잡음

그림 8 과 그림 9 의 스펙트럼 그래프는 CPC 의 고주파 전도성 잡음을 공통 모드와 차동모드로 측정하여 나타낸 것이다. CPC 의 경우는 차동모드의 잡음세기가 공통모드보다 다소 크게 측정이 되었다.

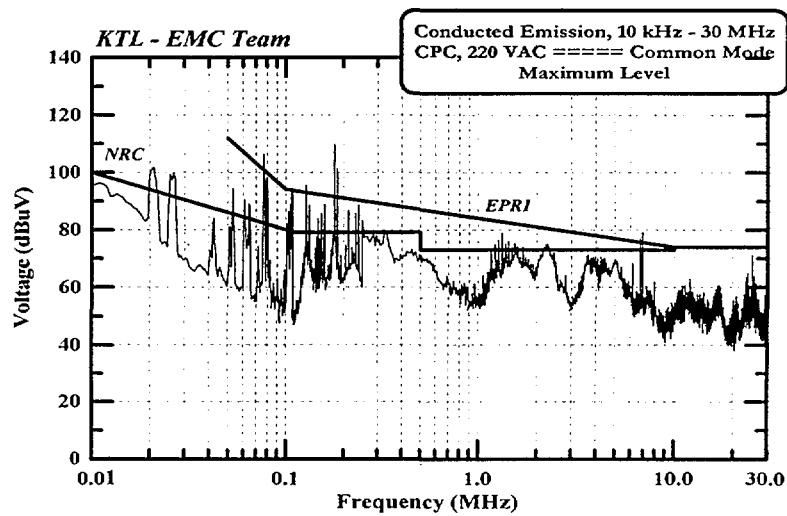


그림 8. CPC 의 고주파 전도성 잡음(공통모드)

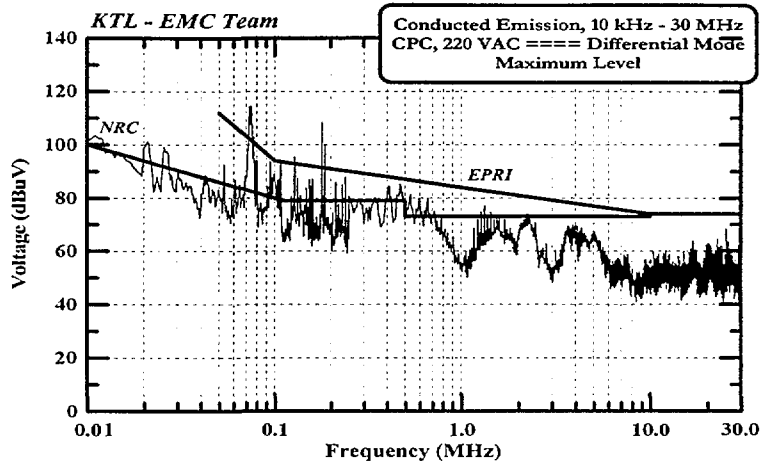


그림9. CPC의 고주파 전도성 잡음(차동모드)

공통모드 잡음의 특징은 발생원에서 전원선을 통해 방사될 경우 접지선을 결합경로로 하여 전도되기 때문에 연결 전원선의 길이가 길어진다고 해도 감쇠가 거의 일어나지 않는다. 그러나 차동모드 잡음의 경우는 전원선의 길이에 따라 감쇠가 커지기 때문에 차동모드에서 높은 잡음이 발생한 것은 대부분 인접한 기기 즉, PCS 나 CPC 내부의 잡음일 가능성이 크다. 반면 공통모드인 경우에는 인버터 잡음 등 외부에서 유입된 것인지, 또는 기기 내부에서 발생된 것인지에 대해서는 좀더 면밀한 조사가 필요하다.

한편 발전소 출력의 변화에 따라 잡음의 세기는 큰 변화가 없었으며 잡음의 형태 또한 변화가 없는 것으로 분석되었다. 발전출력의 병합과정과 발전출력의 증가시에 전원과 부하의 변동으로 인한 잡음의 갑작스런 변화와 같은 현상이 일어날 가능성을 배제할 수는 없다. 그러나 이것은 아주 짧은 시간동안에 그리고 아주 장시간의 간격을 두고 갑자기 발생할 수 있기 때문에 시간영역에서 오랜시간을 두고 장기적으로 관찰하는 것이 바람직하다.

5.1.3. Surge 전압 측정

울진 3 호기의 주파수 영역에서의 전자기파 측정과 더불어 시간영역에서의 전압변동(Surge) 유무를 측정하였다. 서지 측정시스템은 크게 검출을 위한 오실로스코프와 검출데이터를 저장하기 위한 컴퓨터로 그림 10 과 같이 구성하여 측정하였다.

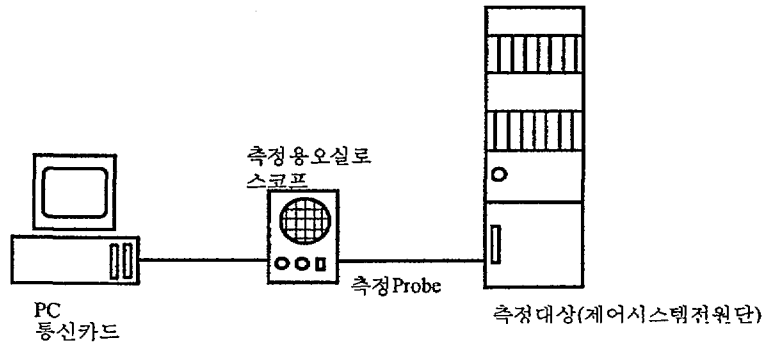


그림10. 서지 측정시스템 구성도

시간영역에서 불연속적으로 발생하는 과도현상 및 서지의 측정은 전원 전압보다 약간 높게 트리거를 설정하여 장시간 측정하면서 설정치 이상의 비정상 전압은 모두 검출하였다. 약 100 여개의 저장된 측정데이터를 분석한 결과 특이한 과도현상이나 비정상적인 전압의 유입은 없었다(표 9). 다만 그림 11 과 그림 12 에서처럼 전원전압에 잡음이 중첩되어 전원전압이 일그러지는 현상을 볼 수 있었다. 이것은 PCS 와 CPC 에 전원을 공급하는 인버터에서 유입된 잡음과 각 기기의 내부에서 발생된 잡음으로 인한 것으로 보여지며, PCS 보다 CPC 가 더 많은 잡음이 중첩되어 있는 것은 스위칭 모드 전원공급기(SMPS)의 영향으로 보여진다.

표 9. 시험결과

측정대상 시스템	측정단자	측정시간 **	전원서지 및 전원불연속성 측정결과
PCS 01	Differential Mode	16 시간	이상없음.*
	Common Mode (Neutral-Ground)	1 시간	이상없음.
	Common Mode (Line-Ground)	1 시간	이상없음.
PCS 04	Differential Mode	7 시간 30 분	이상없음.
	Common Mode (Neutral-Ground)	1 시간	이상없음.
	Common Mode (Line-Ground)	1 시간	이상없음.
CPC	Differential Mode	8 시간 30 분	이상없음.

	Common Mode (Neutral-Ground)	2 시간	이상없음.
	Common Mode (Line-Ground)	2 시간	이상없음.

* 이상없음 : 전원서지 및 전원 불연속성 등이 검출되지 않았음.

** 측정시간은 원전내부사정에 따라 실시된 것임.

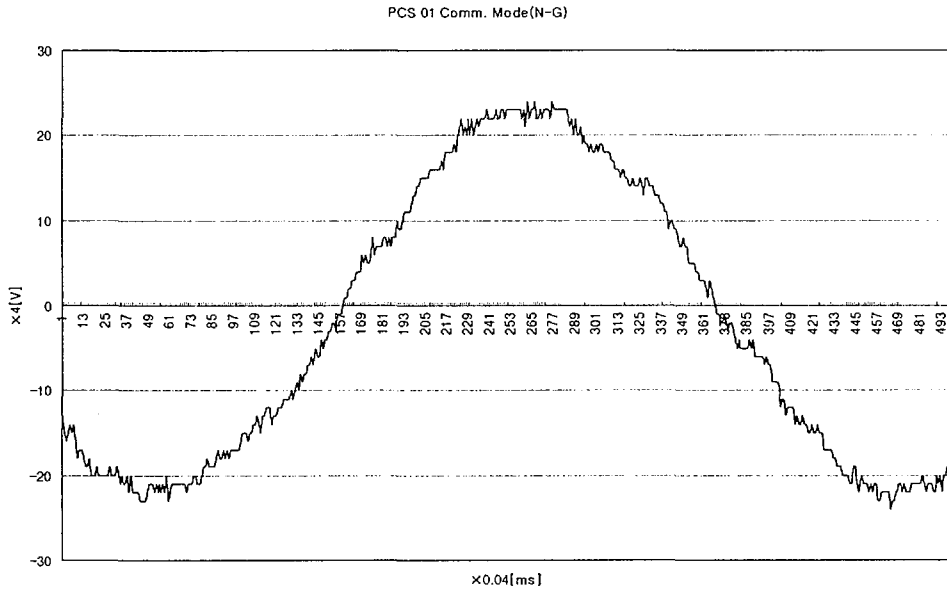


그림 11. PCS의 전원 전압파형 측정결과

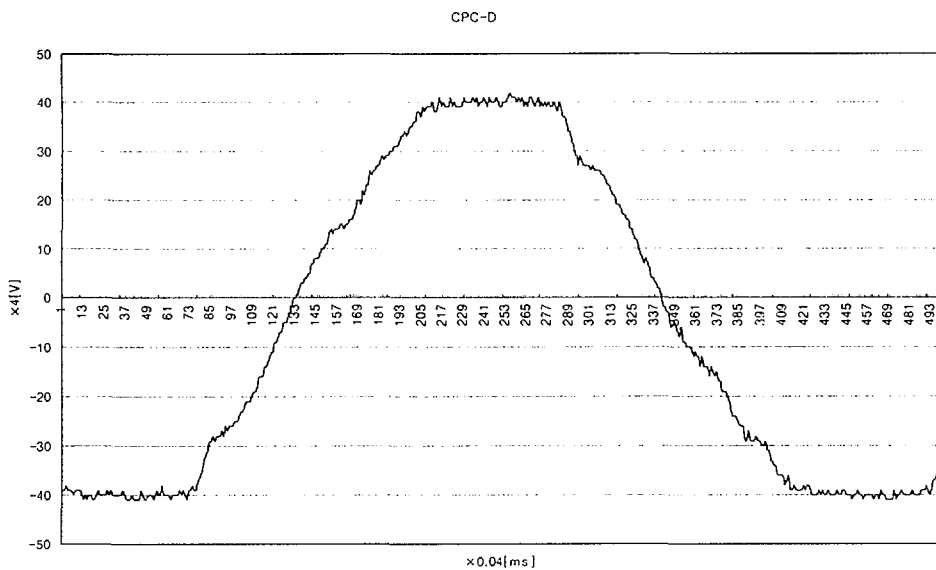


그림12. CPC 전원 파형

시간영역에서의 서지 측정은 event가 예측되는 경우는 그 event의 전후를 측정도록 하고 이번 시험과 같이 전압변동이 어려운 경우는 장기간 동안 무인 자동측정하여 분석하는 것이 바람직하다. 발전소의 사정으로 야간에 측정이 이루어지지 못한 것이 부족한 점이다.

5.2. 월성 2 호기 전자기 환경

5.2.1. 전도성 잡음(30Hz - 10 MHz)

월성의 전도성 잡음의 측정은 EPRI에서 수행한 방법과 같이 전류 clamp를 이용하여 30Hz부터 10 MHz의 값을 dB μ A로 측정하였다. 월성의 site survey는 공중과 측정이 주 목적이었으므로 전도성의 잡음은 DCC-Y에서만 측정하였다. 그림 13은 DCC-Y에서 차동모드(differential mode)로 전원전류의 주파수 성분을 측정한 것이다.

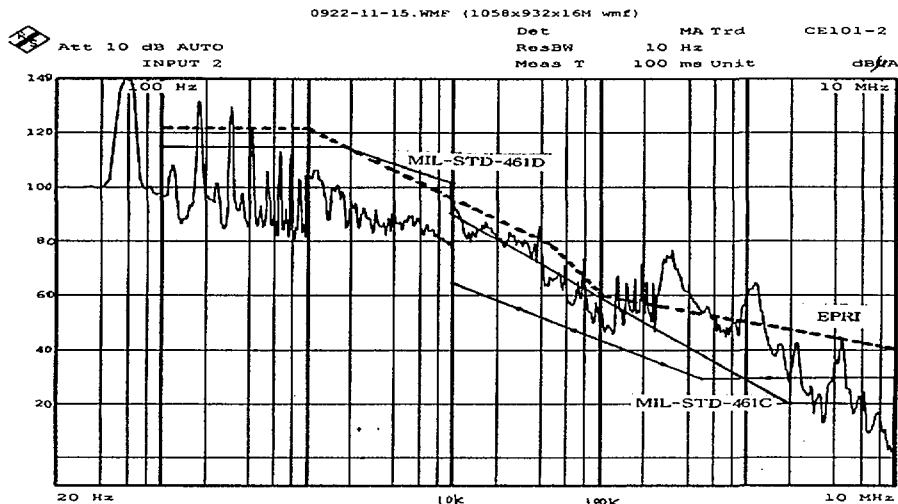


그림13. DCC-Y의 전도성 잡음 분포-Differential Mode

그림 13에서 점선으로 표시한 기준은 EPRI가 권고하는 값이며, 120Hz부터 10kHz까지의 기준선은 MIL-STD-461D의 부하전류 20A에 적용되는 선이다. 10kHz부터 10 MHz까지는 MIL-STD-461D의 기준단위가 dB μ V이므로 직접 비교가 불가능하여 dB μ A 단위로 제시하는 MIL-STD-461C의 기준선을 표시하였다. 점을 포함하는 실선으로 나타낸 기준선은 전압(dB μ V)으로 나타낸 단위를 임피던스를 50ohm으로 가정하고 전류(dB μ A)로 변환한 MIL-STD-461D 기준을 표시한 것이다. 그림 13에서 보는 바와 같이 일부 주파수영역에서는 MIL-STD-461보다 높은 신호가 검출되고 있으나, EPRI 기준선은 대체로 만족되고 있다. 그러나 MIL-STD의 목적은 통신에 방해받지 않기 위한 것으로 인접 안전

장비 등의 작동에 간섭 혹은 장애를 미치지 않게 하려는 원전의 경우에 있어서는 허용 기준에 여유를 줄 수 있다. 고려할 사항은 울진의 경우와 마찬가지로 전원선의 기수 고조파 성분이 대체로 큰 Spike 를 만든다는 것이다. 즉 60Hz 의 3, 5, 7 배의 고조파(180Hz, 300Hz, 420Hz)에서 120dB μ A(=1A)를 넘는 Spike 를 보이고 있다. 통상 인버터 전원에 일그러짐이 생기므로 측정 당시 DCC-Y 에 인버터 전원이 공급되었을 것으로 추정된다.

그림 14 는 DCC-Y 의 CPU 캐비닛에 공급되는 전원선의 전도잡음을 Common-Mode 로 측정한 것이다. 측정부위가 다르고 전류 용량이 다르지만, Differential Mode 보다 기수 고조파의 크기가 상당히 작음을 알 수 있다.

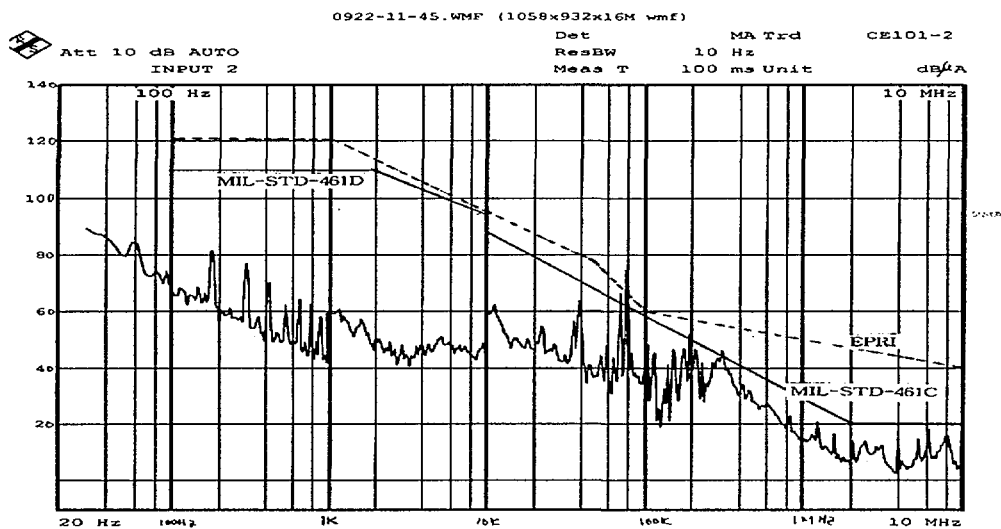


그림14. DCC-Y의CPU 캐비닛 전원선의 Common -Mode 전도잡음

5.2.2. Magnetic Field(RE101 : 30 Hz ~ 100 kHz)

자계강도는 자계를 발생하는 전기기기(CRT, Relay, Transformer, 등)의 유무와 이들 근원의 거리와 매우 관련이 깊다. 그림 15 는 자장을 가장 많이 발생할 것으로 예상된 계기실의 120V Power Distribution Panel 뒷편의 50cm 지점에서 측정한 자계강도의 세기를 나타낸 것이다. 이 자계강도의 스펙트럼에서도 60Hz 의 기수 고조파에서 Spike 가 있음을 알 수 있다. 그러나 저주파 방사성 전자기파인 자계강도(Magnetic Field)는 MIL-STD-461D 와 EPR1 권고기준을 큰 여유로 만족하고 있다.

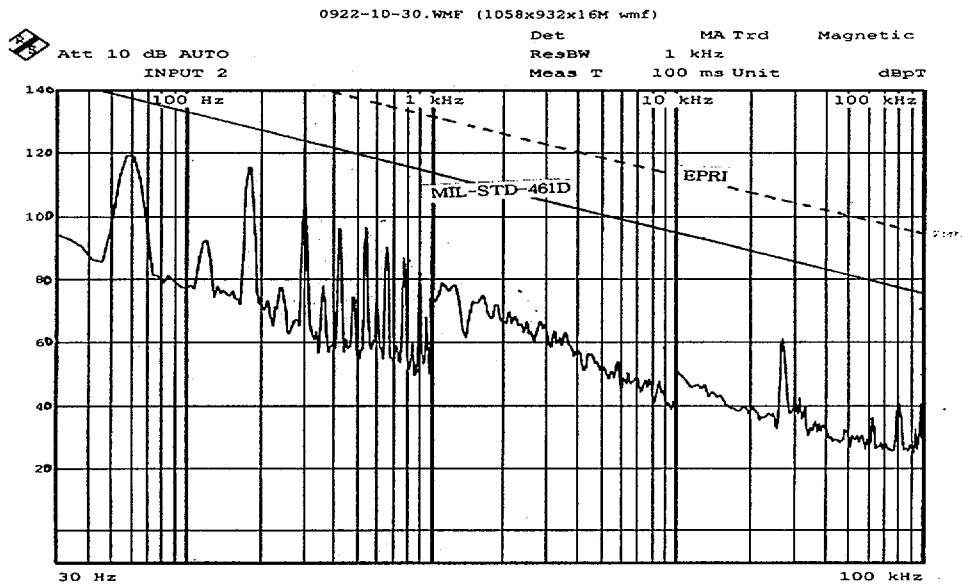


그림15. Magnetic Field 측정결과

5.2.3. 고주파 전계 강도 (RE 102 : 10 kHz ~ 7GHz)

고주파 방사성 발산강도는 10 kHz ~ 200 MHz, 200 MHz ~ 7GHz 의 두 영역으로 나누어 측정하였다. 그림 16은 계기실의 터미널 Block Train 옆에서 측정한 10 kHz ~ 200 MHz 영역의 공중파 전계강도의 측정 결과를 나타낸 것이다. EPRI의 기준선을 일부 영역에서 벗어나고 있으나 대체로 내성시험 기준인 10 V/m(=140dB μ V/m)와는 큰 여유를 보이고 있으므로 전자장비의 작동에 영향을 줄 가능성은 적다.

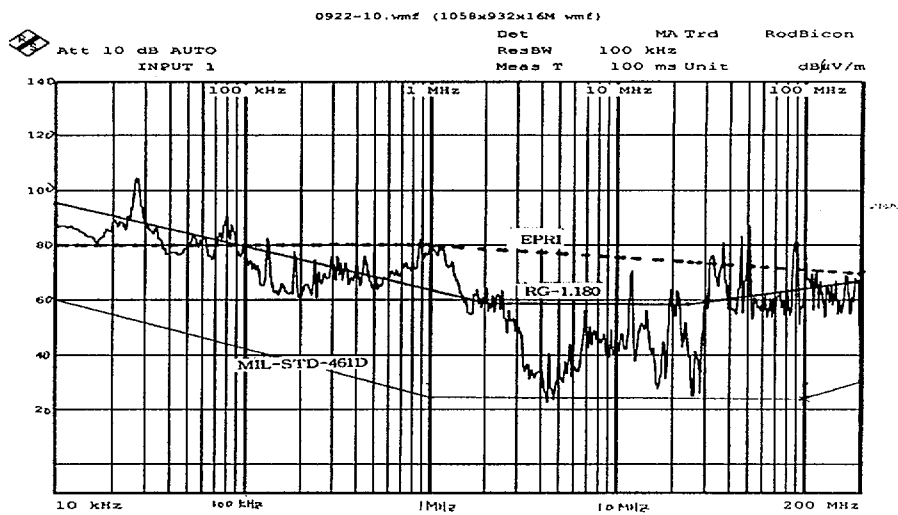


그림16. 방사성 전계강도 측정결과

그림 17은 200MHz ~ 7GHz 주파수 영역의 공중파 전계강도 측정결과를 나타낸 것이다. 이것은 네 곳의 측정 결과 중 가장 높은 값을 가지는 결과이다. 이 그래프에서 850 MHz 근처의 Spike가 검출되었지만 크기는 110dB μ V/m 정도로서 산업용 계측제어 장비의 작동에 영향을 미칠 가능성은 낮다.

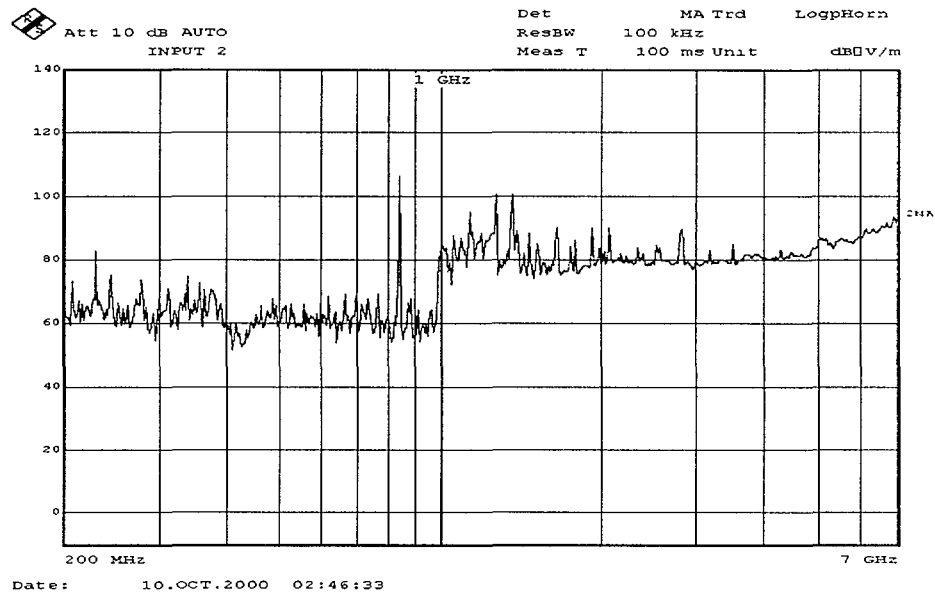


그림17. 200MHz – 7 GHz영역의 전자기 환경

5.2.4. 실외 공중파 전계강도 측정결과

계기실의 전자기 환경과 실외의 전자기 환경을 비교하기 위하여 2 호기 보조빌딩의 옥상에서 전자기환경을 측정하였다. 그림 18 과 그림 19 는 80m 정도의 거리에서 비상디젤발전기가 작동 시험중인 경우의 전자기파 분포를 나타낸 것이다. 200MHz ~ 1GHz 영역에서 몇 개의 Spike가 역시 검출 되었지만 100 dB μ V를 넘지 않는다.

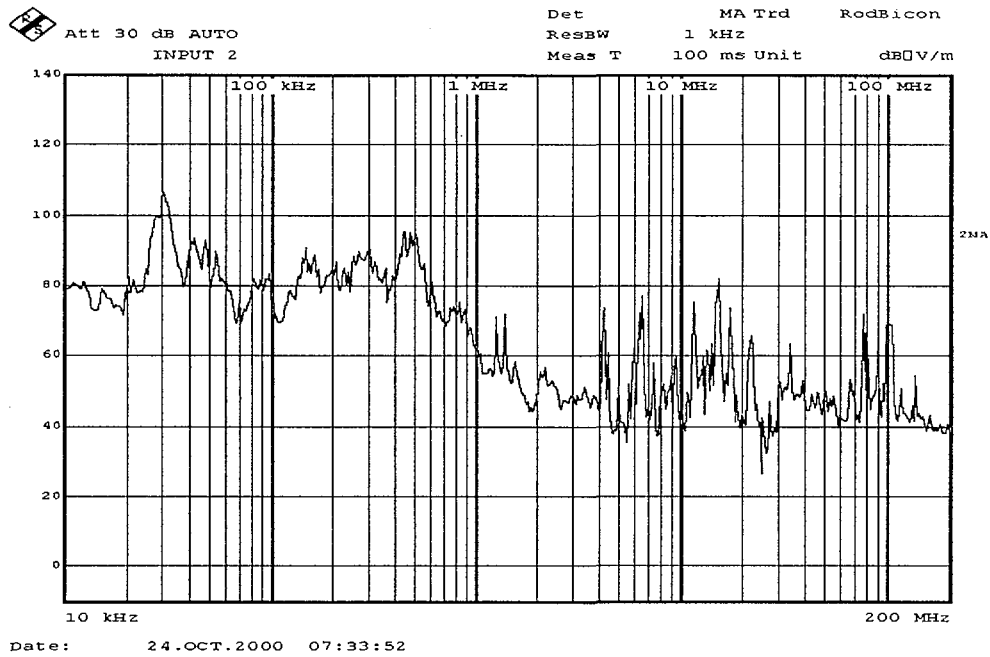


그림18. 실외 공중파 분포도(10 kHz ~200 MHz)

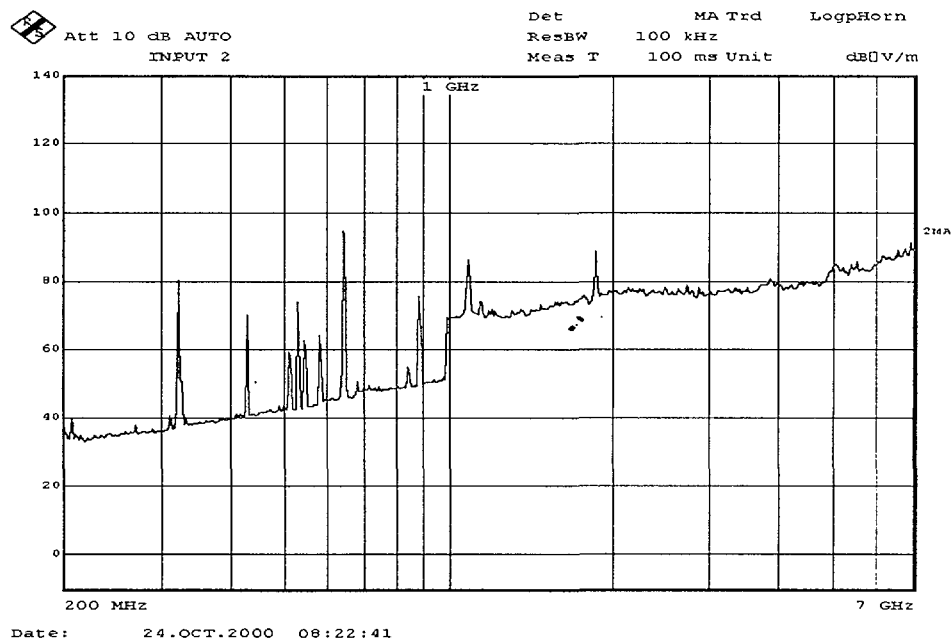


그림19. 실외 공중파 분포도(200 MHz ~ 7 GHz)

5.3. 고리 2 호기의 전도성 잡음 분포

5.3.1. 120V 전원의 잡음분포

고리 2 호기의 경우는 RMS(Radiation Monitoring System)의 한 LCU(Local Control Panel : 검출기번호 R-11)의 전도성 잡음분포를 측정하였다. 그림 20 은

120VAC 입력전원의 측정 그래프이다.

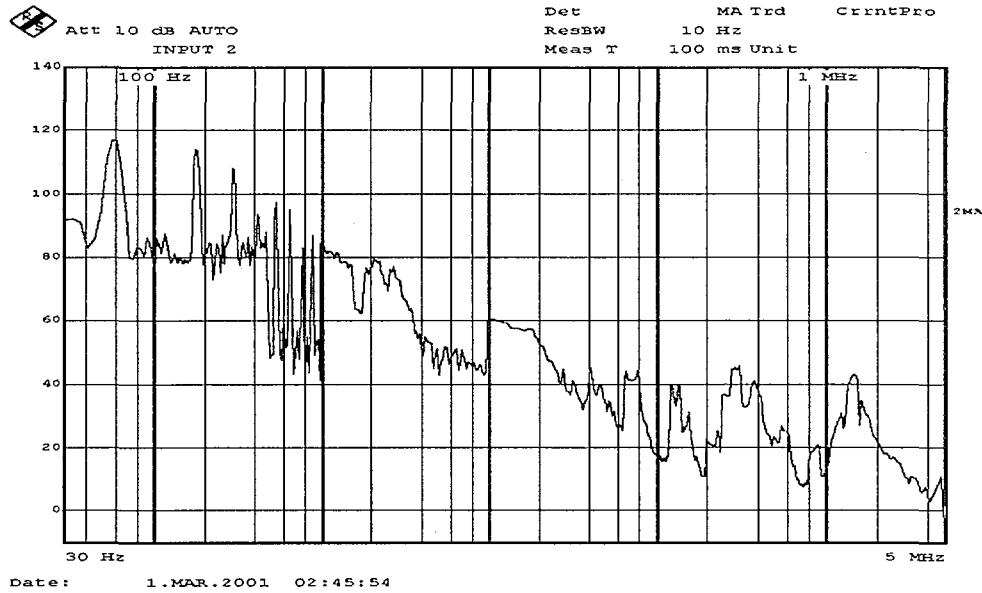


그림20. 120VAC입력전원의 잡음주파수 분포

5.3.2. 접지선의 전도성 전자기 분포

고리 2 호기의 경우에는 울진 및 월성의 경우와 달리 접지선에 흐르는 전자기 잡음을 측정하였다. 접지선은 공통모드 잡음의 결합통로가 되므로 접지선의 전자기 잡음분포는 전자기환경에 있어서 중요한 의미를 가진다. 그림 21 은 접지선에 존재하는 잡음을 측정하는 구성도이다.

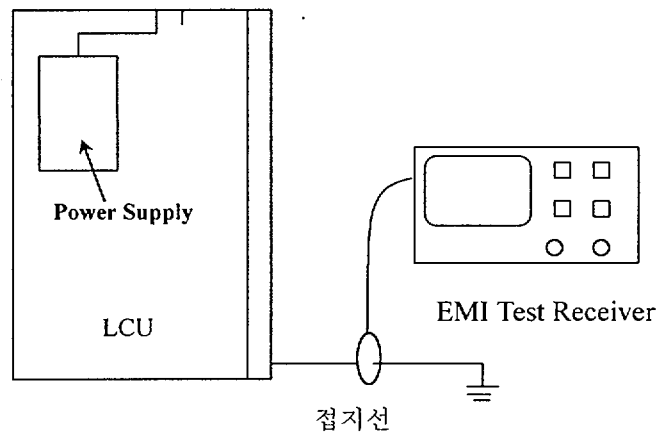


그림21. 접지선의 전자기 잡음 측정

그림 21 과 같이 설치하고 R11 LCU 의 접지선을 측정한 잡음주파수 성분은 그림 22 - 그림 23 과 같다. 이 두 그림은 약 20분 간격으로 같은 지점을 측정

한 것으로서 접지에 전원 고조파(60 Hz Harmonics)가 흐르고 있음을 알 수 있다. 특이한 것은 그림 23 에는 120 Hz 고조파가 그림 22 에 비해서 크게 나타났다. 이것은 관련회로에 모터작동 같은 부하변동에 의해 발생하였는 지 모른다. 그러나 격납용기 출입구 옆에 설치되어 있는 R2 LCU 의 접지선은 전원주파수인 60 Hz 및 그의 고조파 성분이 전혀 나타나지 않았고(그림 24), 터빈빌딩의 R15 LCU 접지선에는 세기가 작지만 60Hz 전원주파수 및 그 고조파 성분이 측정되었다(그림 25). 따라서 접지선의 전자기 환경은 장비와 장소에 따라 매우 다양한 형태를 보이고 있어서 Plant 접지선의 전반적인 전자기파 환경을 규명하기 위해서는 좀더 추가적인 접지선에 대한 조사가 필요하다.

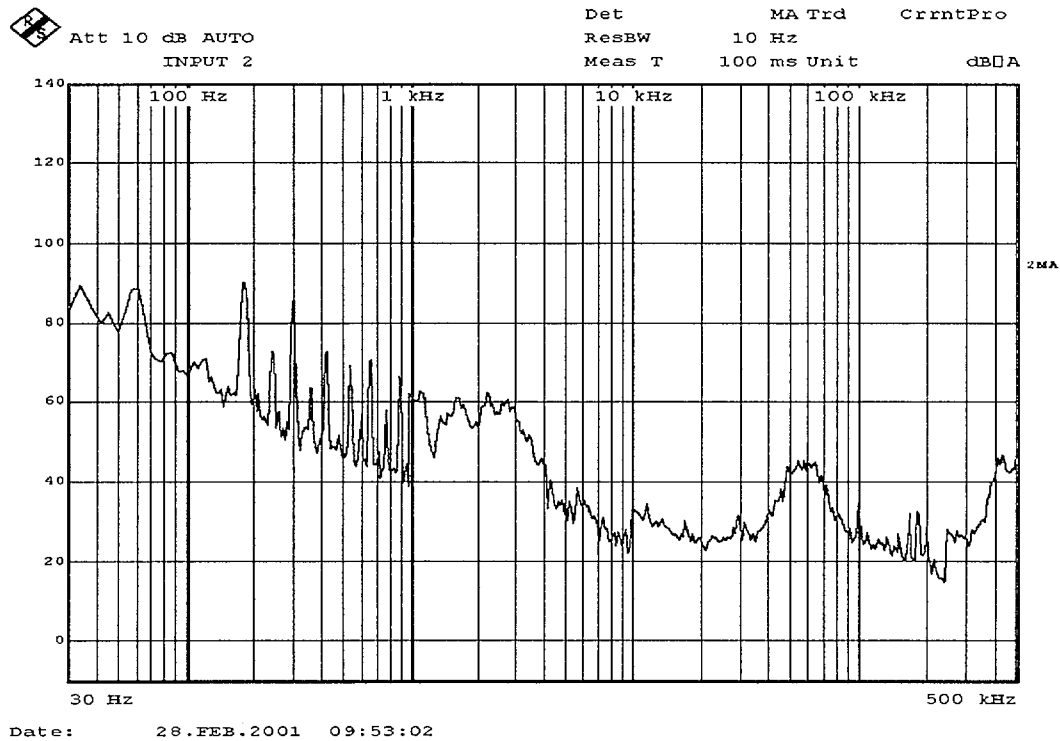


그림22. R-11 LCU접지선 잡음분포(1)

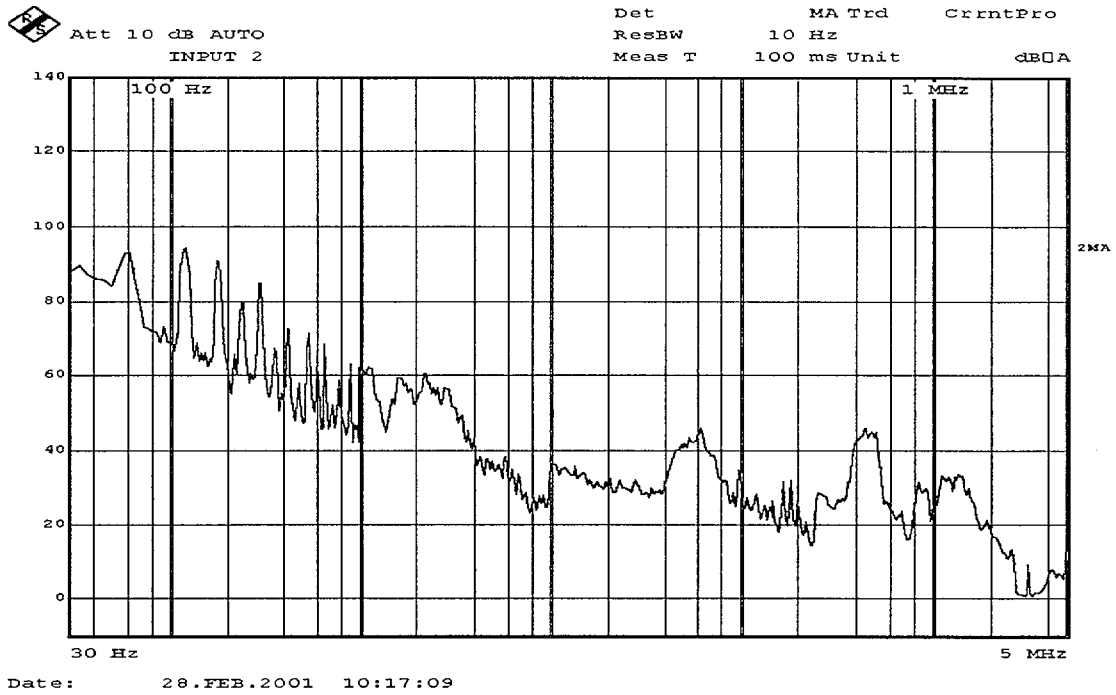


그림 23. R-11 LCU접지선 잡음분포(2)

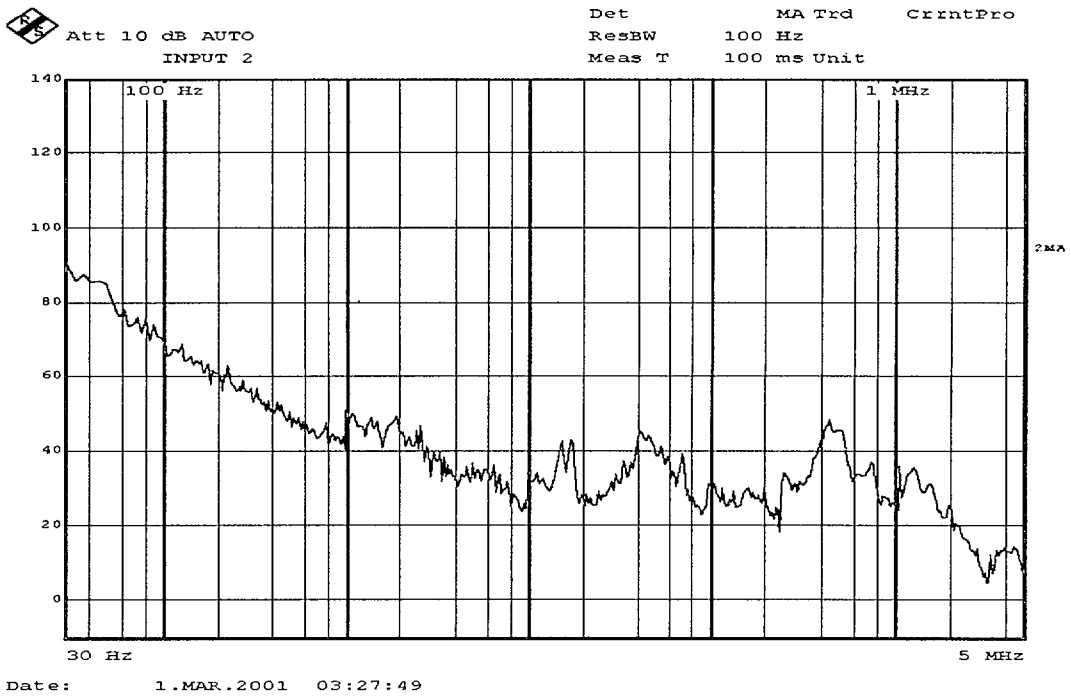
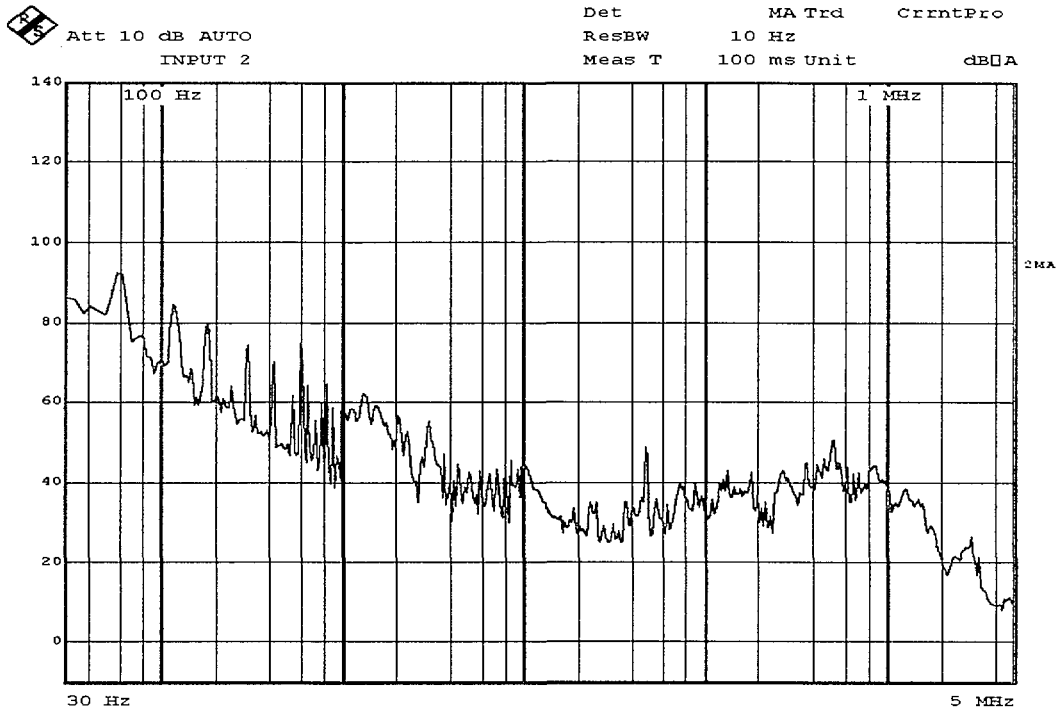


그림24. R2 LCU(Skid Unit없는 경우:격납용기 입구)의 접지선의 잡음분포



Date: 1.MAR.2001 04:01:47

그림25. R15 LCU(Skid Unit 있는 경우:터빈빌딩)접지선 잡음분포

5.3.3. Signal Line 의 잡음 분포

그림 26 는 Radiation Detector 로부터 R-11 LCU 로 들어오는 검출 신호선로에
서의 전류성분을 측정 한 것이다. 이 신호 라인에서도 전원 주파수 및 그 고조
파 성분이 포함되어 있음을 알 수 있다. 그러나 접지선의 잡음크기보다는 매우
작음을 알 수 있다.

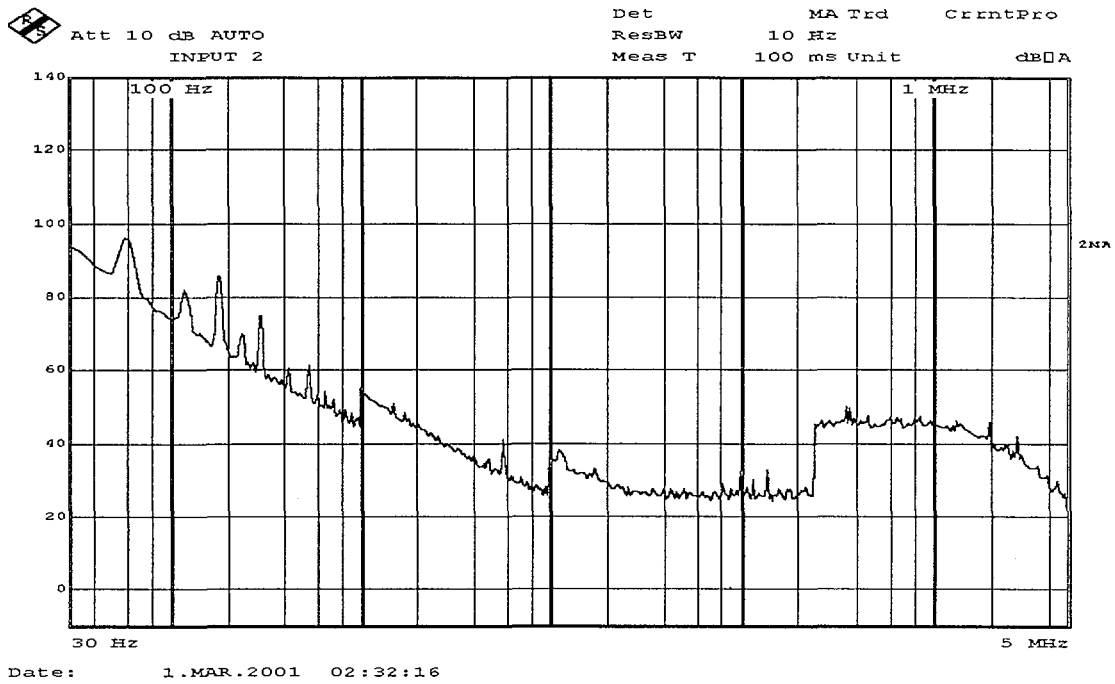


그림26. Detector 신호선(Signal Line)의 전류성분 분포

5.3.4. High Voltage Line 의 잡음 측정

그림 27 은 Radiation Detector 로 공급되는 고전압 선로의 잡음분포를 나타낸 것이다. 이 선로에는 전원고조파 잡음성분이 전혀 없으며 고주파 성분도 매우 낮음을 알 수 있다.

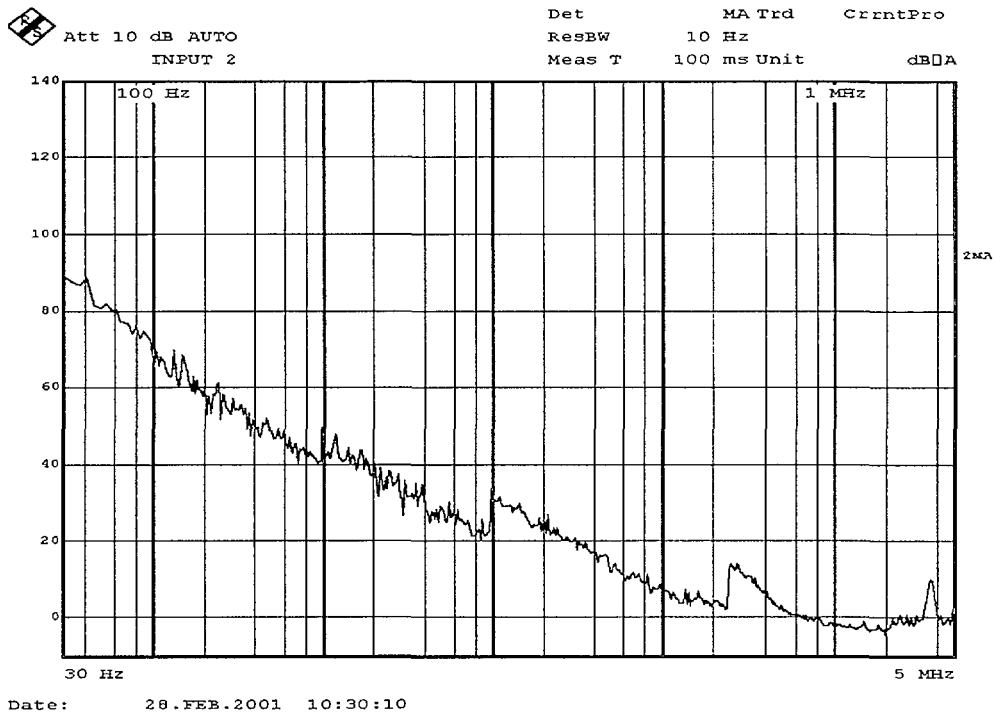


그림27. 고리 1호기 R-11 Radiation Detector HV(고전압)선로의 잡음분포

5.4. 측정데이터의 비교

측정된 발전소의 데이터의 평가를 위해서 기존의 국내외 측정 데이터들과 비교하기 위해서 각 측정 데이터들의 Envelope 들을 그림 28 - 그림 30에 나타내었다.

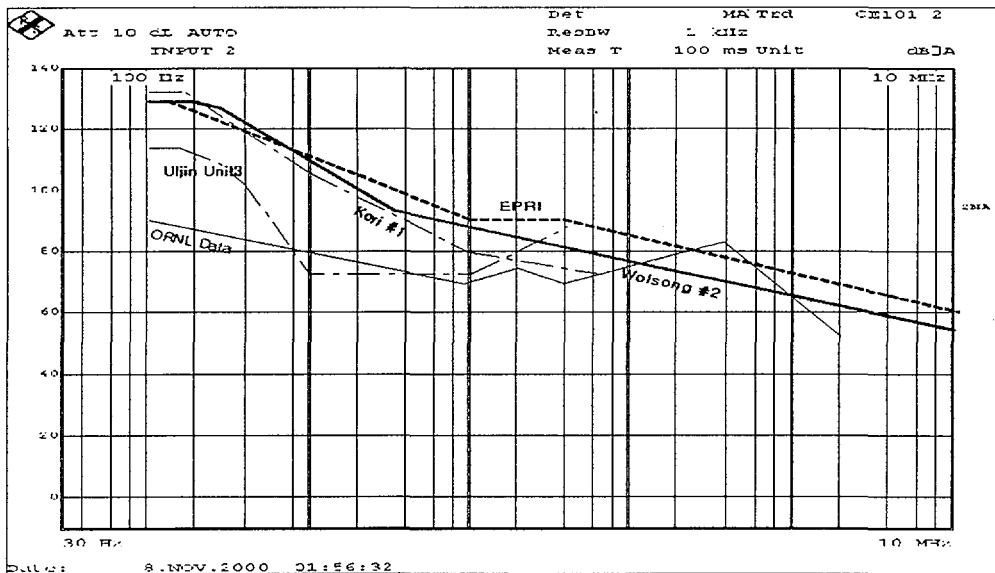


그림28. 원자력발전소의 전도성 잡음분포의 비교

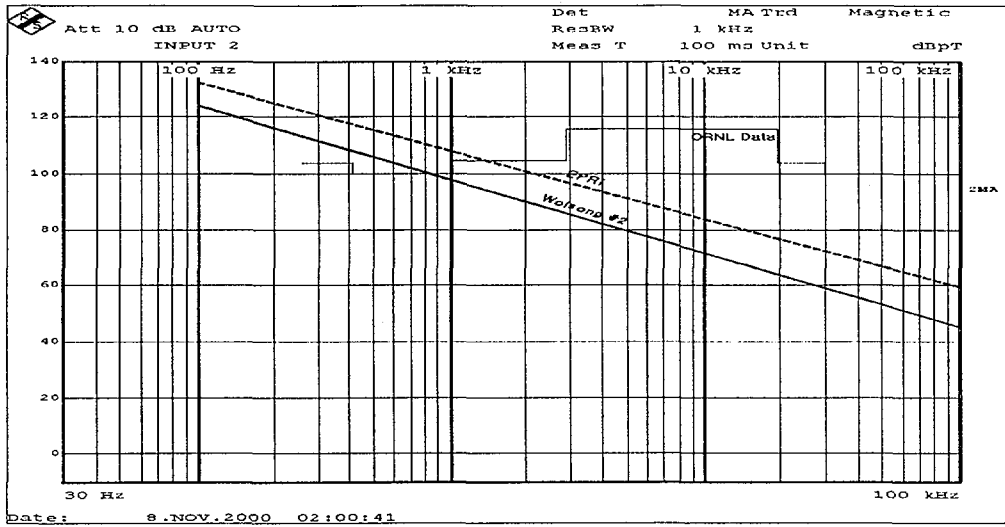


그림29. Magnetic Field의 비교

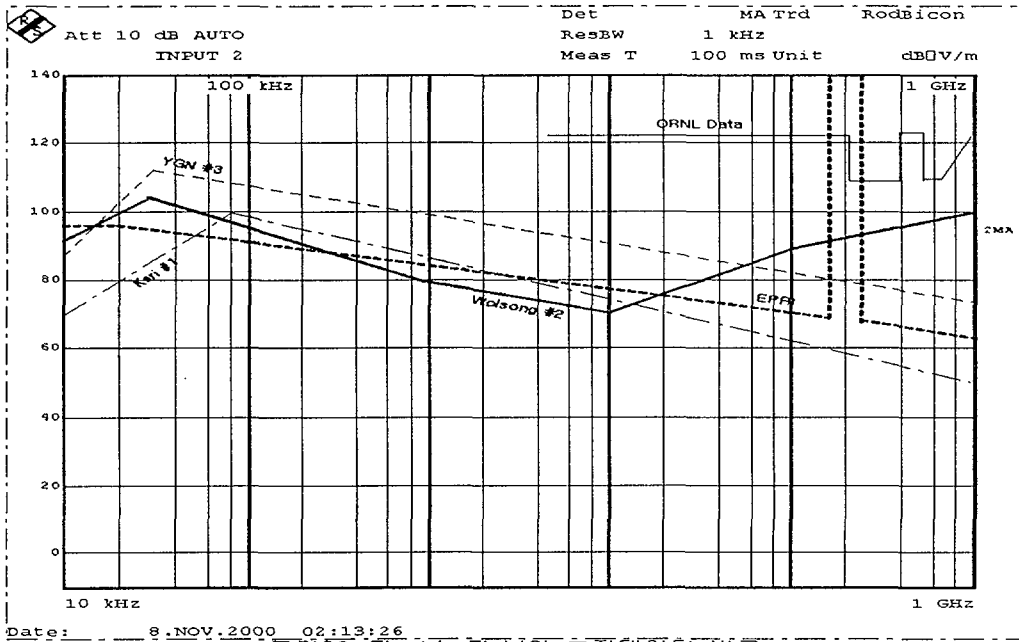


그림30. Electric Field의 측정데이터 비교

위의 그림 28 - 그림 30 에서 EPRI 로 표시된 점선은 EPRI 가 7 개의 미국발 전소에서 측정한 전자기 수준[19]의 최대값들을 Envelop 한 것이고, ORNL 로 표시한 것은 ORNL 이 측정한 미국 8 개 발전소의 데이터중에서 최대치를 표시 한 것이다. 또한 고리#1 으로 표시한 것은 Wyle Lab.이 고리 1 호기의 계기실 전자기환경을 조사한 데이터[23]를 분석하여 표시한 것이다. 각각의 전자기 환 경 수준이 주파수영역을 따라 형태는 비슷한 양상을 띄고 있으나, 크기에 있어 서는 차이가 있음을 알 수 있다.

6. 결론

본 보고서는 전자기파를 포함하는 내환경 인자들의 계측제어장비에 미치는 영향을 연구하기 위하여 관련 국내외 연구 자료를 분석하고 국내 원자력 발전소에 대한 전자기 환경을 수집 수록한 것이다.

디지털기기는 기존의 아날로그 장비보다 더 다양한 고장 메커니즘을 가지고 있다. Elelectromigration, 유전층 손상(dielectric breakdown) 등 집적회로 소자의 독특한 고장유형이 온도 등의 여러 인자와 및 작동시간의 경과에 따라 영향을 받는다. 그러나 시스템의 설계 및 구성단계에서 기기검증시험으로 이러한 모든 고장유형에 대한 내성을 확인하기 어려우므로 제조회사의 성능시험과정과 데이터를 확인하여 소자의 건전성을 확인하고 안전계통의 설계과정에서는 기존의 방법을 사용하여 시스템으로서 검증을 해야 할 것이다.

디지털 소자가 연기(smoke)에 대하여 기존의 아날로그 장비보다 취약함이 밝혀졌지만 현재의 관련 지침이나 방안 등이 smoke 에 대한 검증시험방법을 규정하기 위한 수준까지 충분히 확립되어 있지 않으므로 현재의 방화 및 화재 대책기준을 디지털 장비에도 계속 적용함으로써 smoke 에 대한 대처가 되도록 한다.

내환경 인자 중 습도와 온도는 서로 상승작용(synergistic effect)이 크게 나타남이 밝혀졌다. 따라서 내환경 검증 시험에서는 온도와 습도를 동시에 시험하는 것이 타당하다.

서지를 포함하는 전자기파는 디지털 기기뿐만 아니라 기존의 아날로그 장비도 고장원인을 제공하는 주요인자이다. 디지털 장비의 주요 고장원인은 소프트웨어오류, 인적오류, EMI, 하드웨어고장 등이다.

인위적 가속열화시험(Accelerated Aging)의 경우 Eyring 모델 등이 기존의 Arrhenius 모델보다 더 IC 소자의 열화를 모의하는 데 알맞을 수는 있으나 경험 데이터 등이 적어 적용하기가 용이하지 않고 아직도 미 NRC 는 Arrhenius 모델을 가속열화시험의 방법으로 승인한 상태이므로 디지털 기기에 있어서도 Arrhenius 모델을 사용하는 것이 타당한 것으로 평가된다.

원전의 전자기파환경은 디지털장비의 사용으로 인하여 더욱 주목해야 할 고려사항이다. 국내 원자력 발전소의 전자기파 환경을 조사하고 전자기파의 Site Survey 기술을 확보하기 위하여 가장 최근에 건설된 울진 원자력발전소 3호기의 주 제어실(MCR : Main Control Room)에서 전자시스템으로 구성된 발전소 제어 시스템(PCS : Plant Control System)과 노심 보호 연산기(CPC : Core Protection Calculator)를 대상으로 전도성 전자파 잡음을 측정하고, 월성 2 호기 계기실의 공중과 강도를 중점적으로 측정 분석하였다. 또한 고리 2 호기의 RMS(Radiation Monitoring System)일부 캐비닛의 전도잡음 측정 결과도 기술하였

다.

울진 3 호기의 경우 내부회로의 구성이나 기능면에서 구분될 수 있는 PCS 10 대와 CPC 2 대 등 모두 12 대를 선정하고 그들의 전원 입력단을 측정지점으로 하였으며, 발전소의 출력변화에 따른 잡음의 특성변화도 함께 파악하기 위해 1000MW 급 발전소의 출력이 0%인 시점에서 시작하여 출력을 100%까지 상승시키는 기간과 100% 정상출력을 내는 기간 모두를 포함하여 2 주일 동안 연속으로 이루어 졌다. 측정된 400 여개의 데이터를 분석하여 최대 전자파 잡음 레벨을 그래프로 표시하였다. 전원주파수의 고조파 성분과 일부 고주파 성분에서 잡음의 강도가 대체적으로 크게 나타났다. 또한 릴레이의 접점순간 및 유도성 부하의 차단시에 발생하는 불연속성 과도현상이나 서지(surge)전압은 각 제어시스템에 장애를 초래할 수 있다. 위의 측정기간 동안 이러한 과도전압의 발생여부를 시간영역(time-domain)에서 관측하고 분석하였다. 약 100 여개의 저장된 측정데이터를 분석한 결과 특이한 과도현상이나 비정상적인 전압의 유입은 없었다. 이 측정은 보다 장시간동안 여러 채널을 연속적으로 감시하여 데이터를 취득하여야 할 것으로 판단된다.

월성 2 호기의 경우는 계기실 4 곳과 실외 한 곳에 대한 전자기 환경을 측정 평가하였다. 이번 측정에서는 Conducted Emission 및 Radiated Emission 의 모든 영역에 대하여 KAERI, KEPRI 및 월성 1 발전소 공동으로 Site Survey 가 수행되었다. 측정기간 관계상 고주파 Radiated Emission 을 중심으로 측정하였으며, DCC-Y 의 입력 전원에 대해서는 저주파 및 고주파에 대한 Conducted Emission 을 측정하였다. 원전의 발전소 계기실에는 각종 계기 및 전기관련 기기들이 집중되어 설치되어 있고, 조명을 위한 형광등, 모터, Relay 등의 기기들이 많으므로 고주파 전계강도(Electric Field)에 있어서 주파수 영역에 따라서는 다소 높은 값이 측정되었으나, 장비의 내성기준으로 제시되고 있는 140 dB μ V/m(10 V/m) 에는 훨씬 못 미치고 있으므로 현재 작동되고 있는 계측제어 장비의 작동에 영향을 줄 가능성은 매우 낮다고 할 수 있다. 월성 2 호기의 전자기 환경 특징은 전자기파의 분포특성(Profile)이 시간 보다는 주로 측정 장소에 따라 더 많이 달라짐을 알 수 있었다. Conducted Emission 측정치의 60Hz 에 대한 기수고조파, 그리고 Radiated Emission 의 일부 특정 주파수에서 나타나는 spike 들에 대해서는 주기적인 Site Survey 를 통하여 그 변동 추이를 살피는 것을 고려하는 것이 필요하다.

고리 1 호기의 RMS 의 현장 제어기(LCU : Local Control Unit)에 대한 전기적 잡음분포를 측정한 결과에서는 대부분의 선로에서 전원 주파수(60Hz)및 그의 고조파(harmonics)성분이 나타났다.

결과적으로 전도성 잡음의 경우 많은 선로에 있어서 전원의 고조파 특히 기수 고조파 성분이 존재하고 있으며, 고주파 Radiation Emission 의 경우는 일

부 주파수 영역에서 실험실 검증기준을 넘고 있으나, 내성기준 보다는 낮게 측정되므로 장애를 일으킬 확률은 낮다고 보여진다. 추가적으로 이들 측정 결과와 기존의 국내외 원전의 사이트 잡음 측정 수준을 모아 비교 검토하는 것이 필요하다. 또한 장기적인 관점에서 다양한 장소의 전자기 환경을 측정하여 데이터 베이스화 함으로서 디지털 장비의 설계와 검증과정에서 참고자료로 활용될 수 있도록 하여야 한다.

참 고 문 헌

- [1] NUREG/CR5904, "Functional Issues and Environmental Qualification of Digital Protection Systems of Advanced Light Water Nuclear Reactors," April 1994.
- [2] NUREG/CR-6479, "Technical Basis for Environmental Qualification of Microprocessor-based Safety-Related Equipment in Nuclear Power Plants," January 1998.
- [3] NUREC/CR-6406, "Environmental Testing of an Experimental Digital Safety Channels," NRC, 1996
- [4] Eric J. Lee, "Understanding of EMI/RFI and Digital Updates," Proceedings of 96 ANS Topical Meeting On Nuclear Instrumentation, Control and Human-Machine Interface Technology, 1996.
- [5] Stephen J. Wilkozs, Consulting Report for EMI/RFI Qualification, 1998.
- [6] IEEE Std 7-4.3.2-1993, "IEEE Standard Criteria for Digital Computers in Safety Systems of Nuclear Generating Stations," September 1993
- [7] Regulatory Guide 1.180, "Regulatory Guide 1.180, Guidelines for Evaluating Electromagnetic and Radio-Frequency Interference in Safety-Related Instrumentation and Control Systems," Nuclear Regulatory Commission (NRC), January 2000
- [8] Cristina Antonescu, Paul D. Ewing, Richard T. Wood, "Electromagnetic Compatibility Guidance for Safety-Related I&C Systems in Nuclear Power Plants," *International Topical Meeting on Nuclear Instrumentation, Controls, and Man-Machine Interface Technologies (NPIC&HMIT 2000)*, Washington DC, Nov. 2000.
- [9] Franklin Research Center, A Review of Equipment Aging Theory and Technology, EPRI NP-1558, Sep. 1980.
- [10] NUREG/CR-5679, "Digital I&C Systems in Nuclear Power Plants," NRC, 1998.
- [11] NRC, "Report on Digital System Failures," NRC Home Page, 1999
- [12] Henrique M. Paula, Micheal W. Roberts, Ronald E. Battle, "Operational Failure Experience of Fault-tolerant Digital Control Systems," *Reliability Engineering and System Safety*, Vol.39, No3, p.273-289, Elsevier Applied Science, Essex, England, 1993
- [13] 10 CFR 50 App. A, "General Design Criteria for Nuclear Power Plants," GDC 4, Environmental and Dynamic Effects Design Bases, US NRC.
- [14] IEEE Std 323-1983, "IEEE Standards for Qualifying Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations," June 1983
- [15] Regulatory Guide 1.89, "Environmental Qualification of Certain Electric Equipment

Important to Safety for Nuclear Power Plants,” US Nuclear Regulatory Commission, June 1984

- [16] <http://learn.chem.vt.edu/tutorials/kinetics/collision.html>, Kinetics, Virginia Tech. Chemistry Department, Chemistry Learning Center Web page, 2001
- [17] James F. Gleason, EQ(Environmental Qualification) Management System, Training Course Material held in KAERI, GLS Enterprises Inc., 2001
- [18] Stephen W. Kerchel, “Survey of EMI Ambient Levels in Nuclear Power Plants,” *The ANS International Topical Meeting on Nuclear Plant Instrumentation, Control, and Human Machine Interface Technologies*, Pennsylvania State University, USA, Vol. II, pp.1181-1187, 1996.
- [19] EPRI-TR-102323-R1, Guidelines for Electromagnetic Interference Testing in Power Plants, Rev.1, EPRI, January 1997
- [20] MIL-STD-461D, Requirements for The Control of Electromagnetic Interference Emissions and Susceptibility, Department of Defense, January 1993.
- [21] IEEE Std. 473-1985, “IEEE Recommended Practice for an Electromagnetic Site Survey (10kHz to 10 GHz),” IEEE, July, 1985
- [22] MIL-STD-462D, "Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Emissions and Susceptibility ,” DOD, 1993
- [23] Wyle Lab. Electromagnetic Interference(EMI) Test Report of A Site Survey at Kori #1 MCR in Korea, 1998

서 지 정 보 양 식					
수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드		
KAERI/TR-1809/2001					
제목/부제	원전 계측제어기기에 대한 내환경/EMI 영향평가				
연구책임자 및 부서명 (TR,AR인 경우 주저자)	황 인 구 (미래 원자력 개발단 MMIS Team)				
연구자 및 부서명	이동영, 차경호				
출판지	대전	발행기관	한국원자력연구소	발행년도	2001. 3
페이지	54 p.	도표	있음(V), 없음()	크기	19cm x 26cm
참고사항					
비밀여부	공개(V), 대외비(), __ 급비밀		보고서종류	기술보고서	
연구위탁기관				계약번호	
초록(15-20줄내외)	<p>기존 원자력발전소의 아날로그방식의 계측제어장비는 더 이상 산업계에 서 공급이 되기 힘들므로 디지털기기의 원자력 계측제어설비에 적용하는 것 은 이제 피할 수 없게 되었다. 그러나 디지털장비의 전면적인 원전적용은 지금까지 고려하지 않았던 여러 문제를 제기한다. 대표적인 것이 소프트웨 어의 신뢰성 확보와 아날로그 장비보다 취약할 것으로 예상되는 내환경 및 전자기파 장애에 대한 대책의 두 가지이다.</p> <p>이 보고서는 환경적인 요소가 원자력 발전소의 계측제어기기에 미치는 영향을 조사 분석하여 계측제어기기의 노화(aging)관리 및 설계과정에 참고 가 되도록 하기 위함이다. 또한 국내 원전의 전자기파세기를 측정하여 그 결과를 다른 외국의 데이터와 비교하여 평가함으로써 차세대원전의 설계 및 기기제작과정에 하나의 기술적인 근거가 될 수 있도록 하였다.</p>				
주제명키워드 (10단어내외)	내환경, EMI, 계측제어기기, 디지털, Aging, Arrhenius Model, 하드웨어, Site Survey, 고장유형, 외.				

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET						
Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.		INIS Subject Code
KAERI/TR-1809/2001						
Title/ Subtitle		Survey and Analysis on Environmental and Electromagnetic Effect on I&C Equipment of Nuclear Power Plants				
Project Manager And Department (or Main Author)		In-koo Hwang(MMIS team)				
Researchers and Department		Dong-young Lee, Kyung-ho Cha				
Publication Place	Taejon	Publisher	KAERI	Publication Date	2001. 3	
Page	p. 54	Fig. & Tab.	Yes(V), No ()	Size	19cm x 26 cm	
Note	Research Result Application Support Project					
Classified	Open(V), Restricted(), ___ Class Document			Report Type	Technical Report	
Sponsoring Org.				Contract No.		
Abstract (15-20 Lines)		<p>As the instrumentation and control (I&C) equipment suppliers tend to provide digital components rather than conventional analog type components for instrumentation and control systems of nuclear power plants(NPPs), it is unavoidable to adopt digital equipment for safety I&C systems as well as non-safety systems. However, the full introduction of digital equipment for I&C systems of nuclear power plants raises several concerns which have not been considered in conventional analog I&C equipment. The two major examples of the issues of digital systems are environmental/electromagnetic compatibility (EMC) and software reliability.</p> <p>This report presents the survey and research results on environmental and electromagnetic effect on I&C equipment of nuclear power plants to give a guideline for aging management and design process. Electromagnetic site surveys were conducted to be used as a part of technical basis to demonstrate that I&C systems are compatible with the ambient electromagnetic noise in Korean nuclear power plants.</p>				
Subject Keywords (About 10 words)		Environmental Stressors, Instrumentation and Control(I&C), EMI, Aging, Arrhenius Model, Digital Equipment, Failure Mode, Hardware, Site Survey, etc.				