

디지털 원자로보호시스템의 성능검증을 위한 기기검증 시험 및 분석

Equipment Qualification Test and Analysis of Digital Reactor Protection System for Performance Validation

권중수, 신현국, 이창재, 최용석, 이남훈
한국전력기술(주)
대전광역시 유성구 덕진동 150번지

요약

국가지정연구를 통하여 공통유형고장을 배제한 디지털 원자로보호시스템이 개발 중이다. 기능 및 성능 시험을 위하여 제작된 시제품에 대하여 기기검증 시험을 수행하였다. 기기검증 시험은 원자력 발전소의 안전계통에 요구되는 내환경, 내지진 및 내전자파 시험을 포함 하였다. 본 논문에서는 이러한 시험을 통하여 얻어진 디지털 원자로보호시스템 시제품에 대한 시험결과를 평가 및 분석함으로써 계통설계 및 기기설계의 타당성을 제시하였다. 디지털 원자로보호시스템의 기기검증 시험 결과 원자력 발전소에 적용되는 요건을 모두 만족하는 것으로 나타났다. 하지만, 캐비닛의 공진주파수의 분석 결과는 캐비닛 하부의 강성 보강이 필요한 것으로 나타났다. 또한 전자파내성 시험은 아날로그 입력 신호의 오차 값이 비록 최대 허용 값을 초과하지는 않았지만, 상대적으로 크게 나타났으므로 실제 발전소에 적용하기 위해서는 차폐 개선이 필요하다.

ABSTRACT

Digital Reactor Protection System (DRPS) to prevent a common mode failure is being developed through the National Research Laboratory Project. The equipment qualification test has been performed for the DRPS prototype cabinet assembled for the functional and performance test. The qualification test included the environmental, seismic and EMI/RFI tests which are required for the nuclear power plant safety systems. This paper describes the test results and analyses for the qualification tests. And it shows the validity of the DRPS system and component design. The results of the equipment qualification test of DRPS meet the requirements to apply to the nuclear power plant. However, the analysis of resonant frequency requires to strengthen the stiffness of the lower part of the cabinet. And also, electronic susceptibility test showed that the error values of the analog input signals were comparatively high even though they did not exceed the limit value. Therefore it needs shielding modification in the cabinet to apply to the actual plant.

1. 서론

원자로보호계통의 기기들은 발전소 수명기간에 어떠한 사고 상황 하에서도 원자로를 가동 정지시키고 유지시킬 수 있음을 입증하여야 한다.

종래의 아날로그 보호계통은 그동안 많은 발전소에 적용되었으며, 기기검증에서도 좋은 결과를 보여주었다. 그러나 최근 기존의 아날로그 기기의 제품의 단종이나 감소로 인하여 80년대 이후 급속히 발달한 디지털 기기로 대체되기 시작하였다. 이에 따라 디지털 기기에 대한 기기검증은 새로운 문제로 대두되었으며, 특히 디지털 기기의 대부분이 원자력품질보증체제로 생산된 것이 아니기 때문에 사용자나 설계자가 원전안전계통에 효과적으로 적용하기 위한 많은 노력과 연구가 필요하게 되었다. 본 논문에서는 최근 독자적으로 개발되고 있는 디지털 원자로보호계통 (DRPS)의 디지털 기기의 기기검증을 소개하고자한다.

원전 계측제어 안전계통의 기기검증 시험은 내환경, 내지진 및 내전자파 시험으로 구성되어 있다. 내환경검증 시험은 안전계통의 계측제어 및 전기기기들이 정상, 비정상, 시험 및 설계기준사고 (DBA) 조건과 같이 예상되는 모든 환경 조건하에서 적합한 성능이 보장되도록 설계 되어야하며, 규제지침서 1.89에 의해 인증된 IEEE 323에 정의된 방법론에 따라 검증시험 및 해석이 수행되어야 한다.

내지진검증 시험은 원자로보호계통, 공학적안전설비작동계통, 사고후감시계통의 기기 및 비상전력계통의 작동장치가 안전정지지진 동안 및 그 후에 필요한 보호기능을 수행할 수 있는 능력을 보장하고, 안전정지지진 후에 안전계통 운전을 요구하는 사고의 결과를 완화시키는데 필요한 기기로 전력을 공급할 수 있도록 내진범주 I급의 요건에 따라 설계되어야 한다. 선정된 기준, 수행될 시험 또는 해석, 그리고 일반 방법론은 규제지침서 1.100에 의해 승인된 IEEE 344를 만족하여야 한다. 안전기능과 물리적 건전성을 상실하지 않고 5회의 운전기준지진(Operating Basis Earthquake)과 1회의 안전정지지진(Safety Shutdown Earthquake)의 누적된 지진의 영향을 견딜 수 있는지 검증된다. 계통이 설치되는 지점에서의 운전기준지진과 안전정지지진은 요구응답곡선(Required Response Spectra)으로 나타난다. 릴레이와 같이 사용 년도에 따라 노화 특성을 갖는 전자-기계적인 부품은 내진검증을 수행하기 전에 요구되는 동작시험(Component Cycling Test)을 수행한다.

내전자파검증 시험은 기기가 발전소 전자파환경 하에서 안전계통 기능을 상실하지 않고 설계사양서의 기능 요건을 만족하는 지를 입증하여야한다. 전기적 서지, 전자기파 장애(EMI), 방사성 주파수 장애(RFI) 및 정전기방전(ESD) 환경에서 계통 기기들이 적절히 동작하여야하며, 시험종류(Specific Tests), 시험방법(Test Methods), 시험레벨(Test Levels) 및 민감도 기준(Susceptibility Criterion)은 규제지침서 1.180, "Guidelines for Evaluating Electromagnetic and Radio-frequency interference in Safety-related Instrumentation and Control Systems"을 따른다.

기기에 대한 민감도 시험(Susceptibility Test) 및 전자파 방출시험(Emission Test)은 전도성 전자파 및 방사성 전자파에 대해 수행된다.

2. 디지털 원자로보호계통의 설계특성

종래의 아날로그 보호계통의 경우 공통유형고장의 발생가능성이 매우 희박하다고 간주되었으며,

비록 공통유형고장이 발생하더라도 기계적, 전기적 마모가 서서히 진행되므로 그 심각성이 훨씬 미미하였다. 그러나 디지털 보호계통은 아날로그 계통에 비해서 코드, 데이터 전송, 데이터, 그리고 공정장비를 훨씬 많이 공유할 수 있는 많은 장점에도 불구하고 공유된 데이터 또는 코드를 이용한 설계는 소프트웨어 오류로 인해서 공통원인 또는 공통모드 고장을 파급시킬 수 있으며, 이는 하드웨어의 다중성을 파기시켜 전체 보호계통의 운전불능 상태를 초래하는 문제가 있다. 이러한 공통유형고장으로 인한 전체 보호계통의 기능 상실을 방지하기 위한 Fault Tolerant System 설계 방법으로 본 연구에서는 디지털 보호계통의 한 채널 내에 이중화 이기종의 컴퓨터와 서로 다른 운영체제(Operating System)를 사용하여 계통을 구성하는 방법을 채택하였다.

디지털 원자로보호계통은 기본적으로 4 개의 채널 (A, B, C, D)로 구성되며, 각 채널은 비교논리 프로세서 (Bistable Processor), 동시논리 프로세서 (Local Coincidence Logic Processor), 계통연계 프로세서 (System Interface Processor), 원자로정지 및 공학적안전설비작동회로 (RT and ESFAS Initiation Logic), 보수시험반 (Maintenance and Test Panel)을 내장하고 있다. 각 채널의 비교논리 프로세서는 공정으로부터 독립적인 공정값을 받으며, 공정변수마다 미리 설정된 트립설정치와 비교함으로써 트립 상태를 결정한다.

디지털 원자로보호계통 프로토타입은 그림 1과 같이 두 개의 랙 (Rack)과 보수시험반으로 구성되어 있다. 소프트웨어 공통유형고장을 방지하기 위해 랙 No.1 은 Intel 계열의 CPU가 내장된 프로세서를 사용하고, 랙 No.2는 Motorola 계열의 CPU가 내장된 프로세서를 사용한다. 한편, 운영체제 다양성을 유지하기 위해 랙 No.1의 프로세서의 운영체제는 QNX가 내장되며, 랙 No.2의 운영체제는 VxWorks가 내장된다.

랙 No.1에는 2 개의 동일한 Intel CPU, 관련 입출력 모듈 및 통신모듈로 구성되며, Intel CPU No.1은 비교논리 프로세서 No.1을 할당하고, Intel CPU No.2에는 동시논리 프로세서 No.1이 할당된다. 한편, 랙 No.2는 2 개의 동일한 Motorola CPU, 관련 입출력 모듈 및 통신모듈로 구성되며, Motorola CPU No.1은 비교논리 프로세서 No.2가 할당되고, Motorola CPU No.2는 동시논리 프로세서 No.2가 할당된다.

아날로그 입력 신호는 기능적 다양성을 유지하기 위해 각기 다른 아날로그 입력 모듈에 할당된다. 디지털 입력 모듈은 비교논리 프로세서의 아날로그 입력 모듈과 하드웨어 및 기능적 다양성을 유지한다.

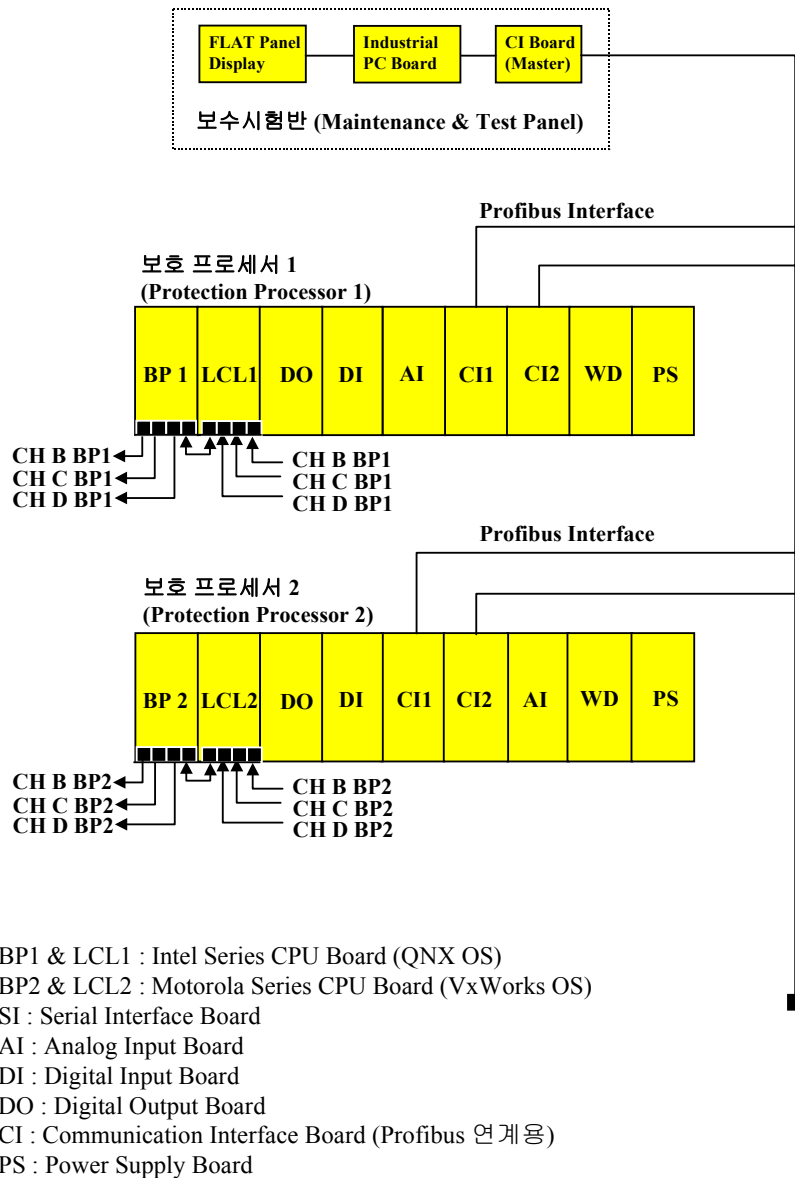
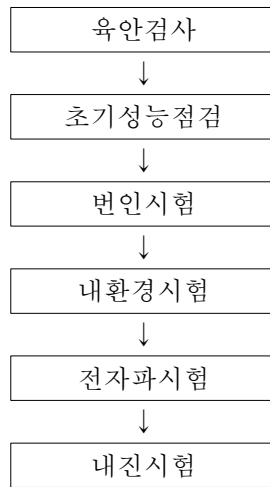


그림 1. 디지털 원자로보호계통 프로토타입 하드웨어 구성도

3. 기기검증시험 방법 및 절차

기기검증의 방법에는 형식시험(Type Test), 운전경험(Operating Experience), 해석(Analysis), 조합된 방법(Combined Methods)이 있는데, 디지털 원자로보호계통의 기기검증에서는 형식시험, 운전경험 및 해석의 조합된 방법을 이용하였으며 다음과 같은 순서로 수행되었다.



시험품이 설계문서와 동일하게 제작되었는지 여부와 시험품의 성능에 영향을 미칠 수 있는 외부 결함이 있는지를 육안검사를 통하여 확인하였다. 시험품이 정상적으로 동작하는지 여부와 이후 실시되는 시험의 기준 데이터로 활용하기 위하여 초기성능점검을 수행하였으며, 각 시험단계마다 성능점검이 수행되었다. 성능점검시 아날로그 신호는 울진 5,6호기의 발전소보호계통 캐비닛 허용 오차 값인 0.3% (Full Scale)의 오차 범위를 적용하였으며, 전자파시험의 경우 EPRI TR-107330에 따라 3.0% (Full Scale)의 오차범위를 적용하였다. 시험품이 조립되면서 발생할 수 있는 초기고장을 제거하기 위하여 번인 시험이 수행되었다.

3.1 내환경시험

디지털 원자로보호계통은 다음 표 1과 같은 사용 환경하에서 그 고유 기능을 정상적으로 수행함을 입증하기 위하여 항온항습기에 설치한 후 그림 2와 같은 시험조건과 그림 3과 같은 입력신호를 적용하였다.

표 1. 사용조건

	정상(Normal) 조건	비정상(Abnormal) 조건
기간 (Duration)	40년	8 시간
온도 (Temperature)	21.1~25 °C	10~40 °C
상대습도 (Relative Humidity)	40~60 %	5~90 %
압력 (Pressure)	0 Psig	0 Psig
방사선 (Radiation)	무시할 수 있을 정도	무시할 수 있을 정도

그림 2의 시험조건은 상기 표에서 나타낸 계통의 사용 환경조건을 포괄할 수 있는 시험조건으로서 사고가 발생하지 않은 정상 상태 최저 온도 10°C에서 사고가 발생했을 시의 최고온도 40°C를 적용하였으며, 이때의 습도는 10 ~ 90%이다. 원자로보호계통의 경우 실제 온화한 환경(Mild Condition)에 설치되므로 비정상 상태 조건이 정상상태 조건과 동일하지만, 본 시험에서는 열악한 환경조건이 발전소에 설치될 수 있음을 고려하여 보다 엄격한 비정상상태 조건을 적용하였다. 그림 3의 입력 신호는 내환경 시험 전, 중 또는 후에 계통이 건전하게 동작하는지를 확인하기 위한

시험 신호로서 아날로그 입력값을 4 ~ 5.5V 까지 변화시키고 디지털 입력은 ON/OFF로 모의하였다.

내환경 검증시 수행되어야하는 응력시험 및 노화시험은 기기의 수명기간 동안 이에 대한 영향이 없는 것으로 고려하였다.

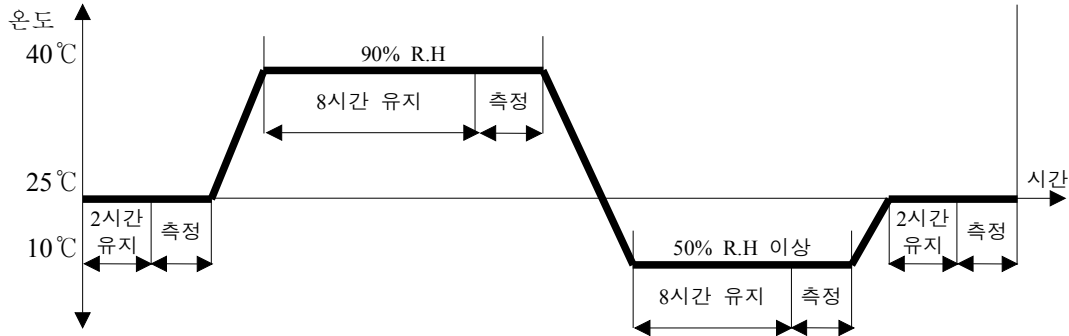


그림 2. 내환경시험 조건

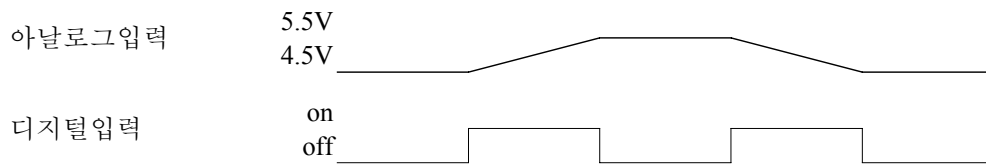


그림 3. 입력신호 형태

3.2 내전자파시험

디지털 원자로보호계통이 전자파환경에서 그 고유기능을 상실하지 않음을 입증하기 위하여 내전자파시험이 수행되었으며 시험항목은 다음과 같다.

- 전자파 장애시험 (EMI : Electromagnetic Interference Test)
 - ① 전도성 방사 CE101(30 Hz ~ 10 kHz)
 - ② 전도성 방사 CE102(10 kHz ~ 10 MHz)
 - ③ 자기장 방사 RE101(30 Hz ~ 100 kHz)
 - ④ 전기장 방사 RE102(10 kHz ~ 1 GHz)
- 전자파 내성시험 (EMS : Electromagnetic Susceptibility Test)
 - ① 복사 자기장에 대한 내성 RS101(30 Hz ~ 100 kHz)
 - ② 복사 전기장에 대한 내성 RS103(10 kHz ~ 1 GHz)
 - ③ 전도 내성 CS101(30 Hz ~ 50 kHz), CS114(10 kHz ~ 400 MHz)
 - ④ 서지에 대한 내성
 - ⑤ 전기적 빠른 과도현상 (EFT)에 대한 내성

전자파 시험의 예로서 전도성 방사시험 장비의 구성 및 배치도는 다음과 같다.

표 2. 전도성 방사 (30 Hz ~ 10 kHz) 시험장비

번호	장비명	기능 및 사양	비고
1	EMI Test Receiver	20 Hz ~ 7 GHz	전계강도 측정기
2	Spectrum Analyzer	100 Hz ~ 2.5 GHz	잡음 전력 및 신호 대 잡음비(S/N Ratio) 결정
3	Preselector	20 Hz ~ 2 GHz	
4	LISN	단상, AC250V/25A 10 kHz ~ 100 MHz	외부전원의 장해전자파로부터 시험품을 분리하기 위하여 사용
5	Current Probe	5 Hz ~ 2 MHz	도선의 유도전류 측정
6	Plotter	N/A	

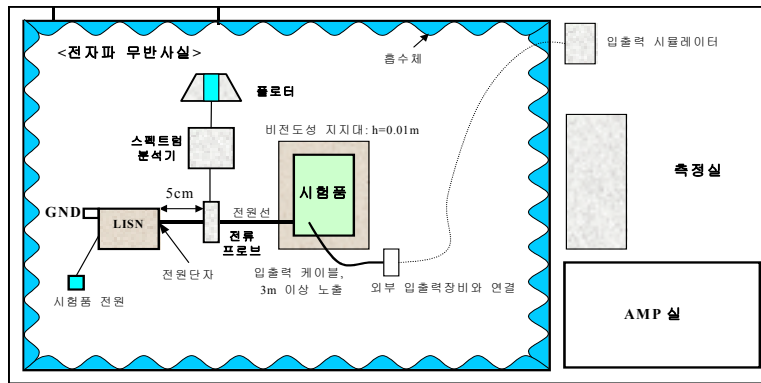


그림 4. 30 Hz - 10 kHz의 전도성 방사시험 배치도

3.3 내지진시험

디지털 원자로보호계통이 지진 전, 동안 및 후에 그 구조적, 기능적 건전성을 유지하는지를 확인하기 위하여 다음과 표 3과 같은 절차에 따라 수행되었다.

표 3. 내지진시험 절차

단계	구분	시험
1	설치위치, 방향, 장착방법 및 부하조건 결정	<ul style="list-style-type: none"> • 지진 입력 부하 결정 • 설치위치 결정 후 장착방법 및 방향 결정
2	사전검사	<ul style="list-style-type: none"> • 육안 검사 • 성능 검사
3	시험 전 공진검색시험	<ul style="list-style-type: none"> • 공진검색시험
4	운전기준지진 시험	<ul style="list-style-type: none"> • 저준위시험 • 고준위시험
5	시험 후 공진검색시험	<ul style="list-style-type: none"> • 공진검색시험
6	안전정지지진 시험	<ul style="list-style-type: none"> • 안전정지지진 시험
7	시험 후 공진검색시험	<ul style="list-style-type: none"> • 공진검색시험
8	사후 검사	<ul style="list-style-type: none"> • 육안 검사 • 성능 검사

4. 시험결과

4.1 내환경시험

초기성능점검결과 기기가 정상적으로 동작되고 있음을 확인하였다. 변인시험은 100시간 동안 진행되었으며 198V 입력전압에서 QNX 시스템의 소프트웨어 프로그램의 장애가 관측되었으나 하드웨어적인 오류는 발생되지 않았다. 상온 초기단계 시험 중 성능점검 데이터는 캐비닛 입력 전압을 220 V, 242 V(정격 전압+10%), 198 V(정격 전압-10%)로 변화시켜 시험을 수행하였으며, 아날로그 입력값을 4V에서 5.5 V로 변화시켰다. 이때 출력 데이터를 측정된 결과 입력 기준 값과 가장 큰 차이가 났을 때는 표 4와 같이 캐비닛 입력전압 242V, 아날로그 입력 전압 5.5V에서 VxWorks의 경우 5.5.051V를 나타내었으며, 이때의 오차는 0.0512% 이다.

표 4. 시험 중 아날로그 입력 성능점검 데이터 특성(입력전압 220 V인 경우)

	QNX	VxWorks	QNX	VxWorks
기준값	4	4	5.5	5.5
Average(V)	4.0002	4.0001	5.5003	5.5002
Max(V)	4.0031	4.0031	5.5034	5.5051
Min(V)	3.9960	3.9969	5.2307	5.2307
Accuracy(%@F.S)	0.0311	0.0311	0.0335	0.0512

고온(40°C), 고습(90%) 상태에서 8시간 유지 후 출력 데이터를 측정된 결과 입력 기준값과 가장 큰 차이가 났을 때는 표 5와 같이 아날로그 입력 전압 4.0V에서 VxWorks의 경우 4.0071V를 나타내었으며, 이때의 오차는 0.071% 이다.

표 5. 고온고습 시험 후 아날로그 입력 성능점검 데이터 특성(입력전압 198 V인 경우)

	QNX	VxWorks	QNX	VxWorks
기준값	4	4	5.5	5.5
Average(V)	4.0018	4.0011	5.5019	5.5012
Max(V)	4.0056	4.0071	5.5038	5.5032
Min(V)	4.0001	3.9996	5.5004	5.4994
Accuracy(%@F.S)	0.0555	0.0710	0.0378	0.0315

저온(10°C) 고습 상태에서 8시간 유지 후 출력 데이터를 측정된 결과 표 5와 같이 입력 기준값과 가장 큰 차이가 났을 때는 표 6과 같이 아날로그 입력 전압 5.5V에서 VxWorks의 경우 5.5065V를 나타내었으며, 이때의 오차는 0.065% 이다.

표 6. 저온 시험 후 아날로그 입력 성능점검 데이터 특성(입력전압 198 V인 경우)

	QNX	VxWorks	QNX	VxWorks
기준값	4	4	5.5	5.5
Average(V)	4.0016	4.0014	5.5019	5.5017
Max(V)	4.0040	4.0036	5.5042	5.5065
Min(V)	3.9987	3.9987	5.4963	5.4972
Accuracy(%@F.S)	0.0399	0.0362	0.0424	0.0646

온도상승시험결과는 항온항습실 온도 변화에 따른 DRPS 내부의 온도는 최고온도 40°C에서 46°C로 약 6°C 정도 상승하였고 전원공급기는 55.5°C로 약 15.5°C 정도 상승하였다.

4.2 내전자파시험

규제지침서 1.180에 따라 4개 항목의 전자파 장애시험과 5개 항목의 전자파 내성시험을 수행하였으며 시험 결과는 다음과 같다.

가. 전도성방사 (30 Hz~10 kHz, 10 kHz~10 MHz)

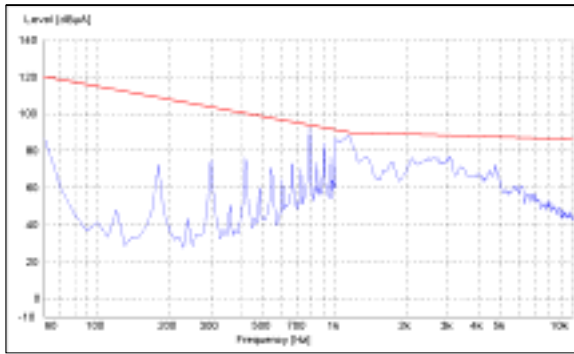


그림 5. 30 Hz ~ 10 kHz 본체 전원선(N) 측정결과

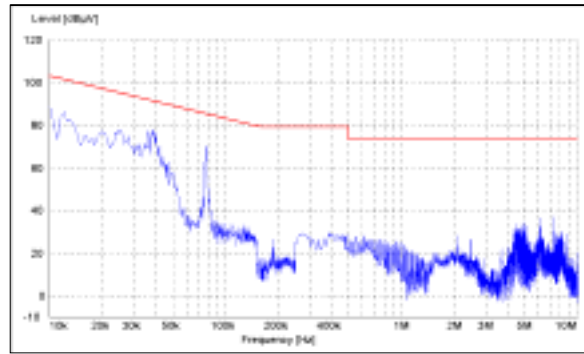


그림 6. 10 kHz ~ 10 MHz 본체 전원선 (L -G) 측정결과

나. 자기장방사 (30 Hz ~ 100 kHz)

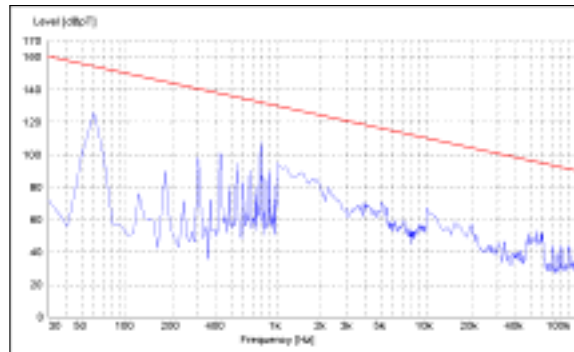


그림 7. 30 Hz ~ 100 kHz 본체 케이블 측정결과 (시험품으로부터 50 cm)

다. 전기장방사 (10 kHz ~ 1 GHz)



그림 8. 전기장 방사 내성 시험 (30 MHz ~ 1 GHz)

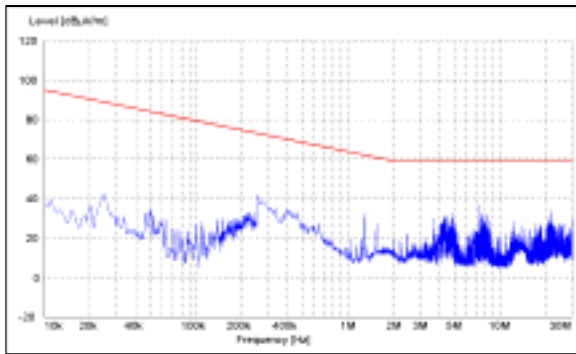


그림 9. 10 kHz ~ 30 MHz 뒷면 측정결과

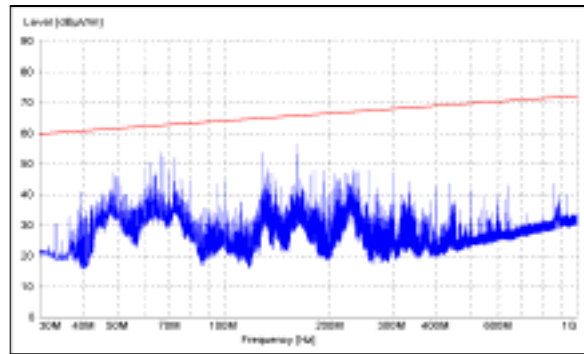


그림 10. 30 MHz ~ 1 GHz 앞면 수평 측정결과

라. 복사자기장에 대한 내성 시험

시험품의 외관 및 케이블이 복사자기장에 노출되었을 때, 기준값과 가장 큰 차이가 났을 때의 시험품의 출력값은 표 7과 같이 아날로그 입력 4V에서 4.0862V로 측정되었으며, 이때의 오차는 0.8623% 였다.

표 7. 복사 자기장에 의한 내성시험 결과

	QNX	VxWorks	QNX	VxWorks
기준값	4	4	5.5	5.5
Average(V)	4.0020	4.0008	5.5021	5.5009
Max(V)	4.0862	4.0792	5.5130	5.5033
Min(V)	3.9924	3.9977	5.4918	5.4988
Accuracy(%@F.S)	0.8623	0.7915	0.1299	0.0326

마. 복사전기장에 대한 내성 시험

시험품의 외관 및 케이블이 복사 전기장에 노출되었을 때, 기준값과 가장 큰 차이가 났을 때의

시험품의 출력값은 표 8과 같이 아날로그 입력 5.5V에서 5.5246V로 측정되었으며, 이때의 오차는 0.2458% 였다.

표 8. 복사 전기장에 의한 내성시험 결과

	QNX	VxWorks	QNX	VxWorks
기준값	4	4	5.5	5.5
Average(V)	4.0035	4.0006	5.5030	5.5007
Max(V)	4.0128	4.0093	5.5095	5.5246
Min(V)	3.9943	3.9987	5.4945	5.4980
Accuracy(%@F.S)	0.1284	0.0930	0.0954	0.2458

바. 전도내성 시험결과

시험품의 외관 및 케이블이 무선전자계에 노출되었을 때, 기준값과 가장 큰 차이가 났을 때의 시험품의 출력값은 표 9와 같이 아날로그 입력 4V에서 4.2268V로 측정되었으며, 이때의 오차는 2.2679% 였다.

표 9. 전도 내성시험(CS114_Analog Line_10KHz~30MHz) 결과

	QNX	VxWorks	QNX	VxWorks
기준값	4	4	5.5	5.5
Average(V)	4.0014	4.0012	5.5029	5.5004
Max(V)	4.2268	4.0659	5.5175	5.5069
Min(V)	3.8084	3.9261	5.4900	5.4883
Accuracy(%@F.S)	2.2679	0.6591	0.1747	0.0685

사. 전기적 빠른 과도현상에 대한 내성시험

전기적 빠른 과도현상의 버스트가 시험품의 전원선에 인가되었을 때, 기준값과 가장 큰 차이가 났을 때의 시험품의 출력값은 표 10과 같이 아날로그 입력 4V에서 4.0155V로 측정되었으며, 이때의 오차는 0.1546% 였다.

표 10. 전기적 빠른 과도현상(EFT)에 대한 내성시험 결과

	QNX	VxWorks	QNX	VxWorks
기준값	4	4	5.5	5.5
Average(V)	4.0018	4.0004	5.5025	5.5004
Max(V)	4.0155	4.0031	5.5210	5.5042
Min(V)	3.9880	3.9774	5.4909	5.4661
Accuracy(%@F.S)	0.1546	0.0307	0.2099	0.0418

4.3 내지진시험

가. 운전기준지진(OBE) 시험전 공진검색시험

공진검색시험은 운전기준지진(OBE) 시험 전후 및 안전정지지진(SSE) 시험이 끝난 후에 수행하였다. 진동테이블의 입력신호 크기는 기기의 손상을 피하기 위하여 진동가속도를 0.2g 정도의 저준위(low-level) 신호를 이용하였으며, 입력신호 범위는 1Hz에서 50Hz까지 광대역 랜덤

(broad-band random) 신호로 하였다. 또한 가진방향은 수평 두 축 및 수직 한 축에 대하여 한 축씩 독립적으로 시험하였다. 공진검색은 진동테이블에 대한 시험품(캐비닛) 측정점 1의 전달함수로 분석하였다. 내지진 시험을 위하여 DRPS 프로토타입을 진동테이블 위에 설치한 사진은 그림 11과 같다.



그림 11. 진동테이블에 DRPS 프로토타입 캐비닛을 설치한 장면

운전기준지진(OBE) 시험전 공진검색시험 결과 시험품의 공진주파수는 표 11과 같다.

표 11. OBE 시험전 시험품의 공진주파수

방 향 \ 차 수	1	2	3	4
X-축	5.1	9.6	-	-
Y-축	5.0	-	-	-
Z-축	21.9	-	-	-

나. 운전기준지진(OBE) 시험

운전기준지진(OBE) 시험에 이용한 요구응답스펙트럼(RRS)은 신고리 NPP Unit 1&2(OBE) 요구응답스펙트럼(RRS)중 댐핑(Damping) 2% 곡선을 기준으로 그림 12와 같이 10% 여유율(Margin)을 적용하였다.

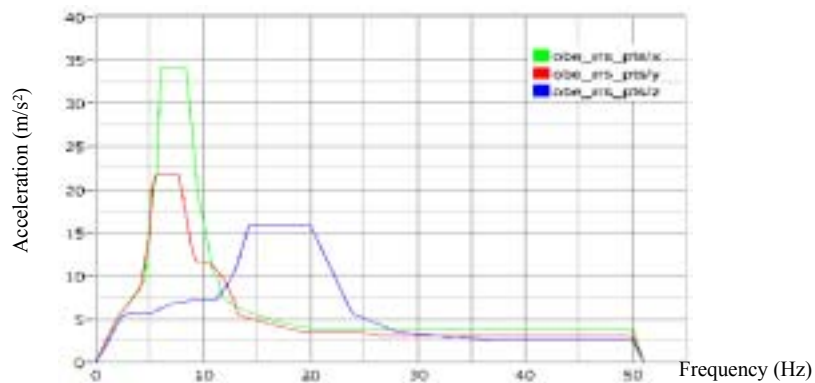


그림 12. OBE_2% Damping에 여유율(Margin) 10%를 적용한 요구응답스펙트럼(RRS)

운전기준지진 시험 후 보호프로세서 2 랙의 동작특성 시험결과는 그림 13과 같으며, 기기의 성능 점검을 위하여 시뮬레이터 입력을 4~5V의 아날로그 입력 신호를 인가했을 경우 디지털 출력이 트립설정치 5V에서 트립상태를 나타내었다. 또한 디지털 출력 모듈의 건전성을 확인하기 위하여 소프트웨어적으로 ON/OFF 모의신호를 출력하여 디지털 출력 모듈의 동작상태를 확인하였다.

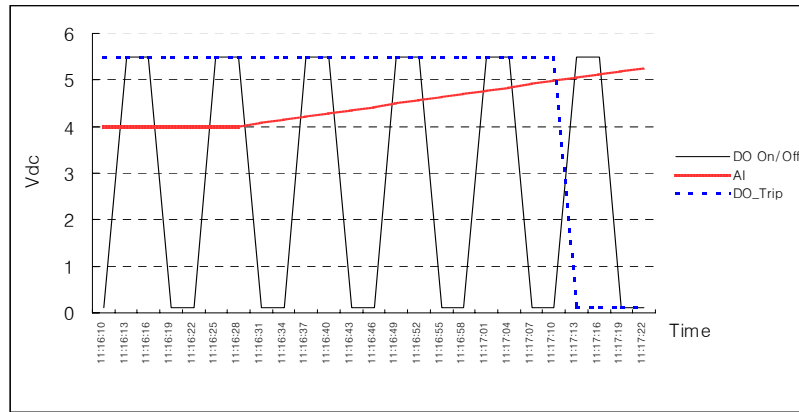


그림 13. OBE 시험의 보호프로세서 2 랙의 동작특성

다. 안전정지지진(SSE) 시험

안전정지지진(SSE) 시험에 이용한 요구응답스펙트럼(RRS)은 신고리 NPP Unit 1&2(SSE) 요구응답스펙트럼(RRS)중 댐핑(Damping) 5% 곡선을 기준으로 그림 14와 같이 10% 여유율(Margin)을 적용하였다.

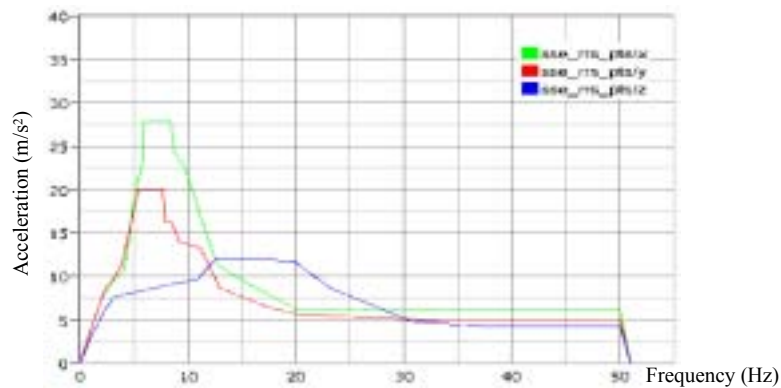


그림 14. SSE_5%에 여유율(Margin) 10%를 적용한 요구응답스펙트럼(RRS) 안전정지지진(SSE) 시험후 공진검색시험 결과 시험품의 공진주파수는 표 12와 같다.

표 12. OBE 시험후 시험품의 공진주파수

방 향 \ 차 수	1	2	3	4
X-축	4.1	7.8	-	-
Y-축	4.2	7.8	29.9	-
Z-축	22.0	27.8	-	-

안전지진 시험 후에도 계통의 건전성을 확인하기 위하여 운전기준지진과 동일하게 기능시험을 수행하였으며 기능이 잘 유지되었다.

5. 시험결과 분석

내환경 시험 결과 아날로그 입력 값은 고온 고습상태에서 8시간 유지 후 입력전압 198V에서 VxWorks 아날로그 입력 4V에 대한 출력값이 4.0071V로 측정되었으며, 이는 아날로그 출력의 정확도가 0.071% (Accuracy @ Full Scale)로서 허용기준인 오차범위 0.3%(Full Scale)을 만족하는 것으로 분석되었다. 또한 캐비닛 온도 상승시험 결과 최고온도 40°C에서 최대 온도 상승을 나타낸 곳은 전원공급기로서 55.5°C로 약 15.5°C 상승하였다. 하지만 전원공급기의 경우 최대 허용 온도가 75°C 이므로 허용 범위 안에 있음을 알 수 있으며, 특히 원자로보호계통의 경우 온화한 환경(21.1 ~ 25°C)에 설치되는 설비이므로 실제 온도 상승은 이렇게 크지 않을 것으로 예상된다.

환경검증 관련 법규인 10CFR50, 50.49절에 따르면 온화한(Non-harsh) 환경에 설치되는 전기기기의 경우 가혹한 환경 (Harsh Environment)에 설치되는 기기와 같은 엄격한 환경검증을 요구하지 않고 있다. 또한 IEEE 323에서 노화(Aging) 해석은 심각한 노화 메커니즘이 없다면 고려하지 않아도 되며, Type Testing을 통하여 기기검증을 수행하는 경우 주기시험/보수가 노화 메커니즘을 고려하지 않을 경우에만 고려되어야 하는 것으로 요구하고 있다. 발전소에 설치되는 원자로보호계통 기기의 경우 주기적인 시험 및 보수가 수행되고 있으며, 이 주기는 각 기기의 노화에 의한 영향을 배제할 수 있을 정도로 주기가 짧다. 따라서 노화 메커니즘의 고려가 불필요하다. 본 시험에서도 DRPS에서 채택한 Single Board Computer가 철저한 품질공정을 거쳐서 제작된 미국의 군용 기기이고, 또한 보호계통 캐비닛의 설치 위치가 온화한 환경이기 때문에 노화해석은 필요 없는 것으로 판단하였다.

규제지침서 RG 1.180에 따라 9개 항목에 대하여 전자파 시험을 수행한 결과 전자파 방사 시험의 경우 시험품의 방사 준위가 시험 기준을 잘 만족하였다. 전자파 내성 시험의 경우 전도내성시험(CS144_Analog Line_10 kHz ~ 30 MHz)시 QNX 아날로그 출력값이 입력 신호 4 V에서 최대오차 0.2268V를 기록하였다. 이는 오차값이 2.268%(Full Scale)로 허용기준 값 3%를 초과하지 않는 것으로 분석되었으나, 오차값이 매우 크므로 실제 발전소에 적용할 경우에는 차폐 개선이 필요한 것으로 평가되었다. 하지만 전반적으로 대상설비가 전자파의 영향을 받지 않으며, 대상설비로부터 방사되는 전자파가 다른 설비에 영향을 주지 않는 범위 내에 있는 것으로 분석되었다.

공진검색시험결과 EW 방향 및 NS 방향의 공진주파수가 운전기준지진(OBE) 시험전에 5Hz 정도이었으며, 안전정지지진(SSE) 시험 후에는 4Hz 정도로 낮게 나타났다. 이렇게 공진주파수가 낮게 나타난 것은 캐비닛과 받침대(BASE) 사이의 체결이 약하기 때문에 발생한 것으로 분석되어, 실제 적용시 캐비닛 하부의 강성을 보강하여(볼트를 이용하지 않고 가능한 일체형으로 하고, 받침대(BASE)와 고정시키는 볼트 체결 지점의 두께를 증가시키는 것 등) 구조적 건전성(structural integrity)을 보다 확고히 하는 것이 바람직할 것으로 분석되었다. 하지만 내진시험결과 구조적 건전성(structural integrity) 및 기능적 운전성(Functional Operability)이 유지됨을 입증할 수 있었으며, RG 1.29의 Seismic Category I 요구조건을 만족시키는 것으로 분석되었다.

6. 결론

디지털 원자로보호계통 프로토타입에 대하여 한 채널 캐비닛 단위로 내환경, 내지진 및 내전자과 시험을 국내 시험대행기관인 산업기술시험원(KTL)에서 수행하였으며, 4절 시험결과 및 5절 시험 결과 분석에서 보이는 것처럼 일부 개선이 필요한 부분도 있지만 모든 요건을 만족함을 확인하였다. 이는 국내에서 제작한 캐비닛 단위의 안전등급 시제품 중 최초로 시험을 통과한 것으로서 그 의미가 크다고 할 수 있다.

알림

본 논문은 과기부가 주관하는 국가지정 연구실 사업 과제 수행의 일환으로 이루어졌습니다. 본 과제를 수행하는데 물질 양면으로 지원을 아끼지 않으시는 과학기술부 및 KISTEP 그리고 KOPEC의 기술진 및 행정지원 관련자 여러분께 깊은 감사사를 드립니다.

7. 참고문헌

- [1] TN0AQ-IC-SR560, Rev. 00, 디지털 원자로보호계통 프로토타입 기능요건명세서
- [2] IEEE 323, Qualifying Class 1E equipment for nuclear power generating stations, 1983.
- [3] IEEE 344, Recommended Practices for Seismic Qualification of Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations, 1987.
- [4] RG 1.29, Seismic Design Classification, 1978.
- [5] RG 1.110, Seismic Qualification of Electric and Mechanical Equipment for Nuclear Power Digital. 1988.
- [6] RG 1.180, Guidelines for Evaluating Electromagnetic and Radio-Frequency Interference in Safety Related Instrumentation and Control Systems, 2000.
- [7] RG 1.189, Environmental Qualification of Certain Electric Equipment Important to Safety for Nuclear Power Plants.
- [8] EPRI TR-107330, Generic Requirements Specification for Qualifying a Commercially Available PLC for Safety-Related Applications in Nuclear Power Plants, 1996
- [9] IEEE C62.41, IEEE Recommended Practice on Surge Voltages in Low-Voltage AC Power Circuits. 1991
- [10] IEEE C62.45, IEEE Guide on Surge Testing for Equipment Connected to Low-Voltage AC Power Circuits. 1992
- [11] MIL-STD-461D, Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Emission and Susceptibility, 1993
- [12] MIL-STD-462D, Measurement of Electromagnetic Interference Characteristics, 1993
- [13] 산업기술시험원, 디지털 원자로보호계통(DRPS)에 대한 성능검증보고서