

**원전용 제어봉 제어시스템의 기기검증**

이 중무\*, 김 준경\*, 천 종민\*, 박 민국\*, 권 순만\*, 남 정한\*\*  
 한국전기연구원\*, 두산중공업(주) 기술연구원\*\*

**Equipment Qualification of Control Rod Control System for Nuclear Power Plants**

J.M. Lee\*, C.K. Kim\*, J.M. Cheon\*, M.K. Park\*, S.M. Kweon\*, J.H. Nam\*\*  
 Korea Electrotechnology Research Institute\*, DOOSAN Heavy Industries & Construction\*\*

**Abstract** - This paper describes an experience on the equipment qualification of CRCS(control rod control system) that has been developed for nuclear power plants. A very high level criteria should be satisfied for the equipment to be used for nuclear power plants. We have developed a CRCS that is aimed to be applied to commercial plants. This system adopts a duplex system structure that is based on the state-of-the-art digital technology so that it has higher reliability than the existing systems. The CRCS has been tested at a licensed testing organization and finally qualified. In this paper, the procedures and some trial-and-errors we have been through in the qualification process are explained. It is expected that our experience will be a helpful tips to the industry that are developing various systems for safety-critical plants.

제어봉의 이동방향과 속도는 자동모드일 경우에는 원자로 출력제어계통인 RCU(Reactor Control Unit)로부터 받고, 수동모드일 경우에는 운전원의 조작에 따른다.

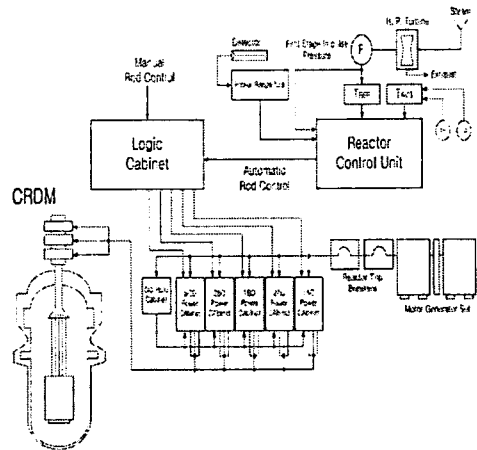


그림 1. 원자로 출력제어 구성도

**1. 서 론**

원자력 발전에 적용하기 위하여 개발되는 제어시스템들은 높은 수준의 신뢰성과 품질활용이 요구된다. 본 논문에서는 원전에 적용하기 위하여 개발된 제어봉 제어시스템의 기기검증 경험에 관하여 기술한다. 기기가 원전에 사용되기 위해서는 높은 수준의 기기검증이 요구된다. 우리는 상업용 플랜트에 적용할 목적으로 제어봉 제어시스템을 개발하였으며, 이 시스템은 현재 운용되고 있는 어떠한 시스템보다도 높은 신뢰성을 가질수 있도록 최신 디지털 기술을 활용하여 이중화 구조를 채택하였다. 제어봉 제어시스템은 공인 검증기관에서 시험을 수행하였으며, 최종적으로 기기검증을 통과하였다. 본 논문에서는 기기검증과정에서의 기준과 절차 및 결과에 대하여 기술하고자 한다.

**2. 본 론**

**2.1 제어봉 제어시스템이란 ?**

제어봉 제어시스템은 그림 1에 나타난 바와 같이 원자로 용기 상부에 설치된 제어봉 구동장치(CRDM, Control Rod Drive Mechanism)를 구동시키는 시스템이다. 제어봉 제어시스템은 CRDM을 구동하여 제어봉을 상하로 움직이며, 핵반응도를 증가시키기 위해서는 제어봉을 상부로 인출하고, 핵반응도를 감소시키기 위해서는 제어봉을 하부로 삽입한다. 한편, CRDM을 구동시키기 위한 전력은 2중화 된 Motor Generator Set로부터 공급을 받는다.

**2.2 제어봉 제어시스템 구성**

제어봉 제어시스템은 크게 제어함(Control Cabinet)과 전력함(Power Cabinet)으로 구성되며, RCU로부터 CRDM의 이동 방향과 속도에 관한 제어신호를 입력받아서 CRDM을 삽입 혹은 인출하여 핵 반응도를 제어한다. 그림 2는 CRCS 시스템 구성을 나타내며, 그림에서 알 수 있는 바와 같이 제어함에는 Hot-standby 형식의 PLC로 구성되는 2중화된 주제어기(MCU : Main Control Unit)와 유지보수용 편의 장치인 LOM(Local Operator Module)이 있으며, 전력함에는 자체 개발한 전력제어기(PCU : Power Control Unit)가 2중화 되어 있다. 제어함과 전력함 사이의 제어 및 중요한 경보에 사용되는 신호들은 Hard-wired로 절연하여 연결되고, 기타 사용자에게 유지보수용 편의를 제공하기 위한 정보들은 2중화된 통신으로 전달한다.

전력함은 발전소의 발전기 용량에 따라 필요한 캐비닛의 수가 다르게 되고, 통상적으로 전력함 1면이 감당할 수 있는 CRDM의 수는 12개이나, 원자로 중심에 설치된 CRDM을 추가로 구동할 수 있도록 설계되어 있으므로 전력함 1면이 13개의 CRDM을 구동할 수 있는 능력을 갖추고 있다고 할 수 있다.

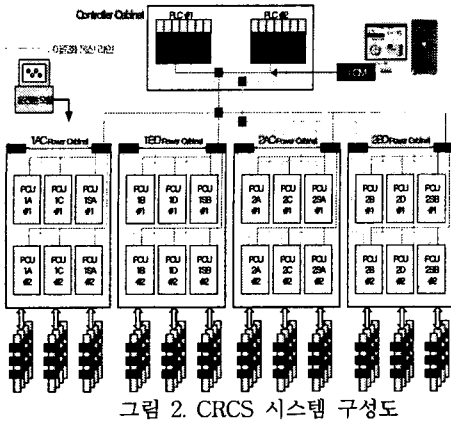


그림 2. CRCS 시스템 구성도

## 2.2 기기검증 기준

### 2.2.1 환경검증 기준

제어봉 제어시스템은 설계수명이 40년으로서 다음 표 1의 환경조건(Environmental Service Condition)에서 운전이 가능하도록 설계되어야 하며 참고문헌 3을 기준으로 검증되어야 한다. 온화한 환경에 설치되는 시스템에 대해 기기의 노화(Aging) 방법을 참고문헌 3이 허용하는 방법에 의거하여 수행하여야 한다.

표 1. 환경 조건

구분	최소	최대
온도	10℃	50℃
상대 습도	7%	90%
압력	Atmospheric	
설치 정보	Mild Condition	

한편, 노화해석의 결과를 기준으로 기기의 주기적 교체 계획, 예방 및 정비 계획을 세워야 한다. 전자-기계형 부품에 대해서는 정상조건에서 예상되는 사이클 수에 여유를 포함한 Cycling Aging이 수행되어야 한다. 내환경 검증은 그림 3과 같은 환경이력곡선(Environmental Test Profile)에 따라 수행을 하며 적절한 성능시험을 통하여 기기의 성능에 영향이 없음이 입증되어야 한다.

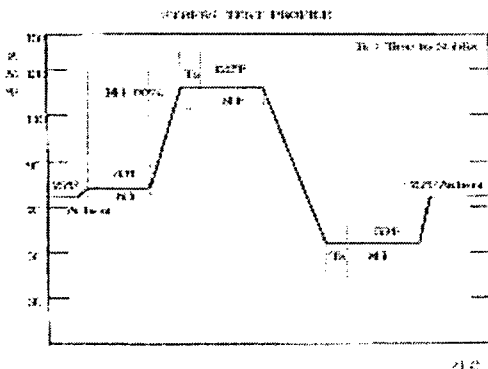


그림 3. 환경 이력 곡선

### 2.2.2 전자기파장해 검증 기준

제어봉 제어시스템은 인입(Susceptibility) 및 방사(Emission)에 의한 영향을 모두 확인하고 방사성 장해(Radiated EMI) 및 전도성 장해(Conducted EMI)에 대해서 참고문헌 1 및 2의 기준에 따라서 입증되어야 한다.

참고로 전자파 내성에 대한 시험기준은 표 2와 같다.

표 2. 전자파 내성 시험 기준

시험 항목	적용 단자	시험 기준
ESD	외함	±8 kV(접촉)
		±15 kV(기중)
EFT	전원선	±3 kV
	신호선	±3 kV
Surge	교류 전원	±3 kV(L-L, L-N)

### 2.2.3 내진검증 기준

지진 조건에서 참고문헌 4에서 요구하는 기기의 구조적 건전성(Physical Integrity)이 유지되도록 설계되었는지 검증되어야 한다. 기기의 내진검증은 1회의 안전정지 지진(SSE)과 5회의 운전기준지진(OBE)로부터 발생한 힘이 가해지는 동안 및 그 이후의 조건에서 검증되어야 한다. 내진검증의 방법은 참고문헌 4에 기술된 요건에 따라야 하며 요구응답스펙트럼(RRS)에 충분한 여유도를 고려하여 수행하여야 한다.

## 2.3 기기검증 수행 결과

### 2.3.1 환경검증 수행 결과

환경시험은 전자기 부품에 대한 Aging을 미리 수행한 상태에서 아래의 순서에 의하여 수행하였다.

- Receiving Inspection
- Baseline Functional Test
- Burn-In Test
- Functional Test
- Stress Test
- Functional Test
- Post-Test Inspection

### 2.3.2 전자기파장해 검증 수행 결과

전자기파장해 검증시 판정기준은 "A"로서 판정기준 "A"는 시험 중이거나 시험 종료 후에도 정상적인 성능 상태를 유지하는 것으로서 상당히 까다로운 판정기준을 적용하였다. 시험 결과 몇 차례에 걸친 수정과 시도 끝에 CE101, CE102, CS101, CS114, RE101, RE102, RS103, ESD, EFT 및 Surge 시험을 통과하였다. 시험항목 중 제어봉을 구동하는 전류필스를 출력하는 전력함의 주전원인 3상 교류전원의 경우 전도성 EMI는 규격을 불만족하였으나 이 전원은 제어봉 제어시스템의 단독 전원이기 때문에 규격을 만족할 필요는 없으며 다행스럽게도 Plant Limit는 만족하였다. 이하 그림 4는 피시험품인 CRCS의 전자파 시험전경이며, 그림 5와 6은 각각 CE101과 RE102의 시험결과에 대한 일부를 보여준다.

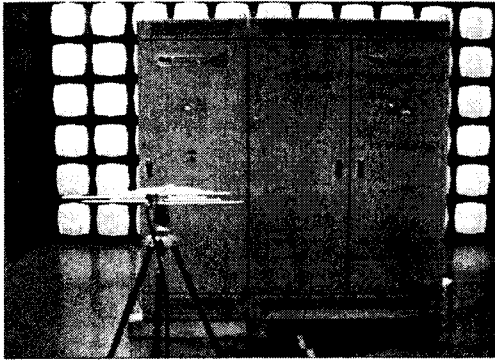


그림 4. CRCS 전자파 시험 전경

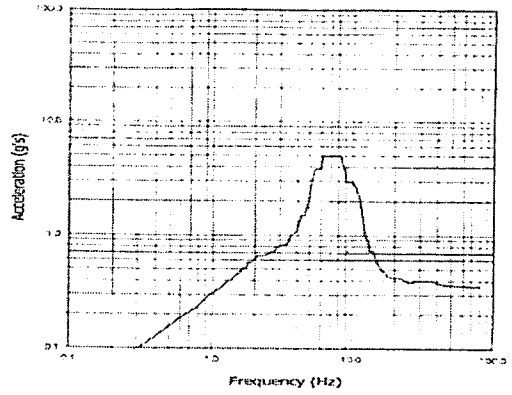


그림 7. 동서방향의 OBE RRS

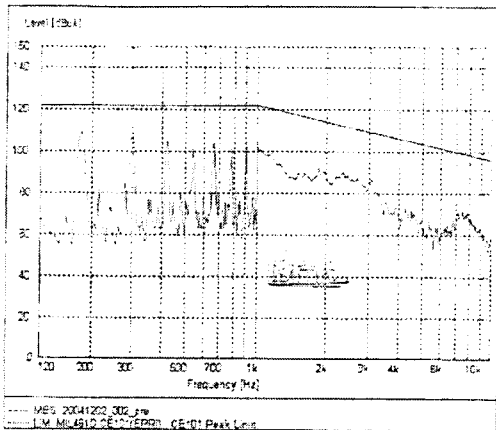


그림 5. CE101 시험 결과

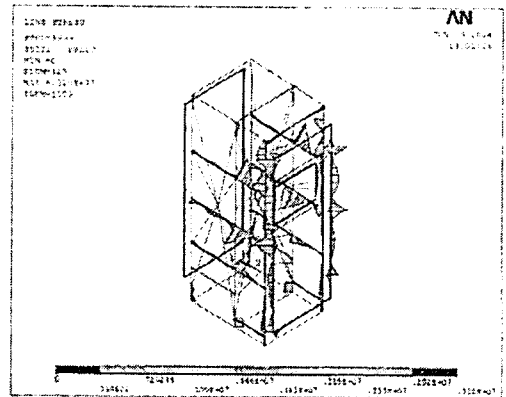


그림 8. 내진 해석 결과

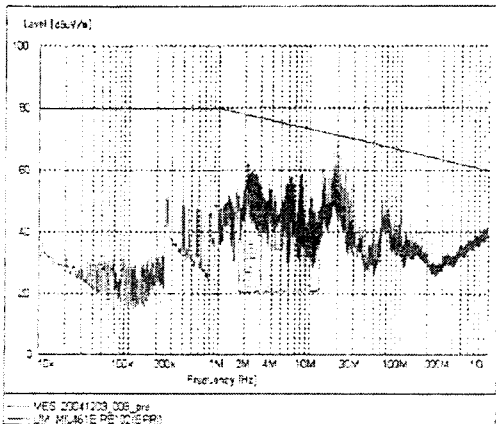


그림 6. RE102 시험 결과

### 3. 결 론

원자력 발전소에 적용하기 위하여 CRCS를 국산화 개발하면서 CRCS 계통이 가지는 원전에서의 중요성을 감안하여 비록 비안전 계통이지만 안전계통에 준하는 기기 검증시험(내환경, 내전자파, 내진 검증)을 수행하고 통과함으로써 사용자에게 CRCS 시스템에 대한 신뢰성을 확고히 하는 계기가 되었다. 끝으로 안전이 매우 중요한 시스템을 개발하는 산업체 개발자들에게 기기검증시 도움이 되기를 바란다.

### [참 고 문 헌]

- [1] EPRI-TR-102323, "Guidelines for Electromagnetic Interference Testing in Power Plants".
- [2] MIL Std 461E, "Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Emissions and Susceptibility".
- [3] IEEE 323, "General Guideline for Qualification Class 1E Equipment for Nuclear Generating Stations".
- [4] IEEE 343, "Recommended Practices for Seismic Qualification of Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations".

**2.3.3 내진검증 수행 결과**  
 내진 검증은 참고문헌 4의 기준에 따라 구조적 건전성에 관하여서만 수행하였으며, 그림 7은 동서 방향의 OBE RRS를 나타내고, 그림 8은 제어함 Beam에 대한 Z 방향 SSE Stress를 나타낸다.