

원자력발전소 노내 중성자 분포 측정 설비의 디지털 제어시스템 개발

신창훈, 변승현, 조병학  
한전 전력연구원

Developing the Digital Control System of In-core Flux Mapping System for Nuclear Power Plant

Chang-hoon Shin, Seung-hyun Byun, Byung-hak Cho  
KEPRI

**Abstract** - 노내 중성자 분포 측정 설비는 원자로 내부의 중성자 분포를 측정하는 설비로서 원자로 내부를 이동하는 검출기의 구동 메커니즘 제어와 측정 데이터 취득을 위한 제어시스템이 요구된다. 이 설비는 발전소 건설 당시 도입되었던 제어시스템으로 운전되고 있으나 노후되어 디지털 제어시스템으로의 설비 개선 연구가 착수 되었다. 개발된 제어시스템은 산업표준 Programmable Logic Controller 및 소프트웨어 기반으로 설계되어 기능개선, 설계변경 및 예비품 확보에 유연하게 대처할 수 있고, 진보된 검출기 구동 메커니즘 제어와 검출기 데이터 취득 기능을 통하여 측정 작업의 완전 자동화가 가능하다. 특히, 다양한 진단 기법을 통하여 작업상황 및 설비의 상태를 파악하여 필요한 보호기능과 경보기능을 제공함으로써 설비의 안정적 운영과 정비가 편리하다. 현재 개발된 시스템은 고리1호기에 설치되어 주기적으로 노내 중성자 분포 측정 작업을 수행하고 있다.

1. 설비개요

노내 중성자 분포 측정 설비는 가압 경수로형 원전의 원자로 내부의 중성자 분포를 측정하는 설비로서 이동형 계측기를 원자로 내부의 지정된 통로로 상하 이동하면서 중성자 분포를 측정한다. 측정된 정보는 원자로 열전대 측정 정보와 함께 원자로 노심 설계 변수와 계산된 Hot Channel Factor를 확인하기 위해 사용되며, 과거에 결정된 분석적인 노심 정보와 연계하여 노심주기 동안의 특정 시간에 대한 Fission Power Distribution을 확인할 수 있게 한다. 또한, Fission Power Distribution과 Thermal, Hydraulic 정보는 최대 노심 능력을 결정하며, 노내 중성자 정보는 열전대 정보와 함께 Enthalpy Distribution을 계산하는데 사용된다. 원자로 내부에는 특정 노심 위치에서 중성자 분포를 측정하기 위하여 36~50개의 심블이 설치되어 있어 검출기가 노심 내부에서 상하 이동하면서 측정 작업을 수행할 수 있다.

2. 제어시스템 설계

원자력발전소 계측제어시스템은 설계의 내용이 발전소의 안전에 영향을 주지 않음을 입증할 수 있도록 원자력발전소 표준 설계절차에 따라 설계하여야 한다. 노내 중성자 분포 측정 설비의 제어시스템은 발전소의 안전에 직접적인 영향이 없는 독립 제어설비이지만 원자로 노심의 주요 파라미터를 확인하는 중요기능을 갖고 있으므로 설계, 시험 및 구현단계에서 우수한 품질과 신뢰성이 확보될 수 있도록, 원자력 발전소 표준 설계절차를 준용하였다.

2.1 설계요건

노내 중성자 분포 측정설비의 제어시스템 설계를 위하여 원자력 발전소 표준 설계절차에서 제시하는 다양한 주제에 대하여 검토가 수행되었으며 아래의 주요 설계요건이 도출되었다.

2.1.1 기본요건

제어시스템은 향후 지속적인 관리가 용이하고, 높은 가용성이 확보될 수 있도록 표준화되고 신뢰성이 입증된 기술과 부품을 사용한다.

2.1.2 구조요건

제어시스템은 디지털 제어기로 구현되는 제어부와 컴퓨터 화면으로 표현되는 정보부로 구성되는 계층적 구조를 가지며, 정보부는 이종화 구조를 갖는다.

2.1.3 기능요건

제어시스템이 갖는 기능은 노내 중성자 분포 측정 작업에 필요한 검출기의 제어기능과 정보기능으로 구분된다. 주요 제어기능으로는 검출기의 구동 제어, 통로선택 제어, 기기의 상태진단 및 보호기능, 자동운전 기능 등이 요구된다. 정보기능으로는 작업 수행에 따른 제반 기기들의 입출력 정보, 작업 상태 및 경보 등의 정보 표시기능과 검출기를 통하여 측정된 데이터의 정보 처리기능이 요구된다.

2.1.4 기기 검증요건

제어시스템은 원자력발전소의 품질관리에 따른 주요 기기의 신뢰성을 입증할 수 있도록 기기검증이 수행되어야 한다.

2.1.5 시험요건

제어시스템은 설계의 타당성이 입증될 수 있도록 시험절차에 따른 시험이 수행되어야 한다.

2.2 하드웨어 설계

제어시스템의 하드웨어는 그림 1과 같이 PLC와 산업용 컴퓨터를 이용하여 제어부와 정보부를 구현하고, 개방형 이더넷 통신망으로 통합되어 있는 계층적 구조를 갖고 있다.

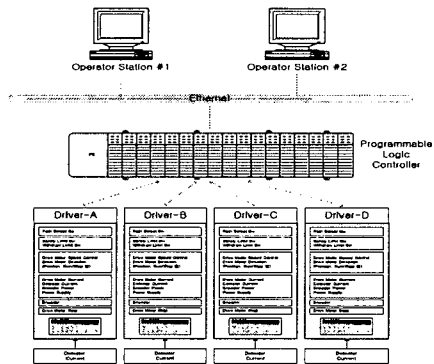


그림 1. 제어시스템 하드웨어 구조

제어부는 4그룹으로 나누어진 구동 메커니즘의 제어를 위하여 로직으로 구현되었으며, 사용된 PLC는 Allen-Bradley사의 ControlLogix 기종이다. 정보부는 노내 중성자 분포 측정 작업에 필요한 제반 화면들의 처리를 위하여 산업용 컴퓨터에 프로그램으로 구현되었고, 화면들은 운전이 편리하도록 계층적 전환 구조를 갖는다. 제어부와 정보부는 이더넷 기반으로 통합되었으며 발전소 소내전선기와 연계되어 측정정보를 공유한다. 아울러, 제어시스템에는 검출기 전원공급기가 설치되어 검출기가 활성영역에서 동작하고 측정신호의 조정이 가능하도록 하였으며, 수동조작반이 설치되어 비상시 긴급조치가 가능하

며, 음향조절기가 설치되어 구동 메커니즘에 설치된 음향센서로부터 전송된 음향신호를 운전원에게 제공한다.

### 2.3 소프트웨어 설계

노내 증성자 분포 측정 설비가 요구하는 고유의 기능과 운전원 MMI 화면을 구현하기 위하여 제어 소프트웨어와 MMI 소프트웨어를 작성하였다. 개발환경 및 운영환경은 상용 소프트웨어와 개발 소프트웨어가 그림 2와 같이 계층적으로 구성되었다.

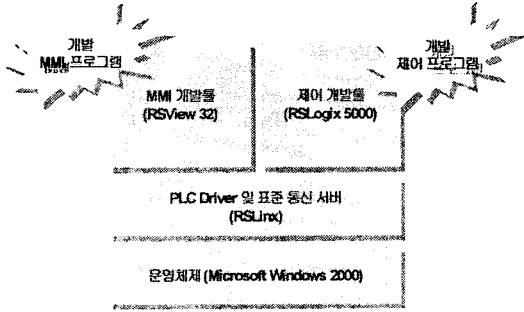


그림 2. 제어시스템 소프트웨어 구조

#### 2.3.1 제어 소프트웨어

설비의 제어기능, 진단기능, 보호기능, 및 경고기능 등을 구현하기 위하여 PLC 개발 개발을 이용하여 구현하였다. 제어 소프트웨어는 연속 스캔 방식의 Main Task 1개와 주기 인터럽트 방식의 Periodic Task 1개로 구현되었으며, 각 Task의 프로그램 모듈은 다음과 같이 구성된다.

##### 2.3.1.1 Main Task 구성

###### ① Automatic\_Mapping Routine

이 프로그램 모듈은 자동운전 혹은 반자동운전 시 각 그룹별로 이미 정하여진 순서에 따라 통로를 선택하고 검출기를 삽입, 스캔, 기록, 인출하는 일련의 과정을 수행할 수 있도록 기능을 제공한다. 작업의 시작과 종료, Thimble의 구성, 외부 인터럽트 처리, 작업 과정의 표시 등의 기능이 함께 제공된다.

###### ② Group\_A(B, C, D)\_Control

이 프로그램 모듈은 자동운전, 반자동운전 혹은 수동운전 시 각 그룹별로 설비의 제반 기기들의 기본적인 동작을 제어하고, 센서로 입력을 토대로 동작변수를 감시, 진단하는 역할을 한다. 각 그룹별 내부통로 선택의 위치제어, 구동기의 구동제어 및 속도제어, 검출기 전원 공급기의 전압제어를 하며, 각 기기의 진단, 보호인터록, 경고 등의 기능을 제공하며, 소내전산기로 현재 운전모드에 관한 신호를 전송한다.

###### ③ Common\_Control

이 프로그램 모듈은 자동운전, 반자동운전 혹은 수동운전 시 그룹 모두에 공통적인 제어기능과 감시 및 진단기능을 제공한다. 외부통로 선택의 위치제어, 각 구동기의 공통 구동명령 제어, 보정모드 중첩진단, CO2 Solenoid Valve 제어 기능 등을 제공하며, 소내전산기로 공통 구동명령 신호를 전송한다.

###### ④ Group\_A(B, C, D)\_Diagnosis

이 프로그램 모듈은 자동운전, 반자동운전 혹은 수동운전 시 A, B, C, D 각 그룹별로 검출기 보호 인터록의 작동에 필요한 검출기 구동속도 저하 진단 기능과, 검출기 스토리지 휠의 회전상태 진단 기능을 제공한다.

###### ⑤ Thimble\_Data\_Exc

이 프로그램 모듈은 자동운전, 반자동 운전 혹은 수동운전 시 Normal, Emergency 1, Emergency 2 각 운전모드에 대하여 A, B, C, D 각 그룹의 작업 Thimble 들이 변경됨에 따라 각 Thimble 들의 상하부 설정치의 변경작업을 수행하는 기능을 제공한다.

#### 2.3.1.2 Periodic Task 구성

##### ① Detector\_Speed

이 프로그램 모듈은 검출기의 삽입 혹은 인출 속도를 검출

하는 기능을 제공한다. 검출기 속도는 검출기 위치전송기로부터 단위마다 위치신호를 입력받아 이전값과의 차이값을 이용하여 계산된다. 이를 위하여 이 프로그램 모듈은 매 100mSec 마다 주기적으로 Main Task에 인터럽트를 요청하여 수행된다.

#### 2.3.2 MMI 소프트웨어

설비의 운전원 인터페이스를 담당하는 MMI 소프트웨어는 설비의 운전이 가능하도록 시스템의 상태 정보를 운전원에게 보여주고, 운전원이 지시하는 명령을 시스템에 전달한다. MMI 소프트웨어는 운전이 필요한 제어 및 감시화면들과 Function File 및 태그 데이터베이스로 구성된다. 주요 운전화면은 다음과 같이 구성된다.

##### 2.3.2.1 주제어 화면 및 보조제어 화면

주제어 화면은 노내 증성자 분포 측정 작업의 주된 운전원 인터페이스 화면으로서, 검출기의 삽입 및 인출 제어, 위치제어, 검출기 전압제어를 자동, 반자동 혹은 수동으로, 그룹공통 혹은 개별로 수행할 수 있도록 화면을 제공하고, 작업상태, 정보 등 운전정보를 표시하며, 기타 보조제어 화면을 제공한다.

- ① Main Control Center 화면
- ② Detector Power Control 화면
- ③ Inside Path Selector 화면
- ④ Outside Path Selector 화면
- ⑤ Map Control 화면

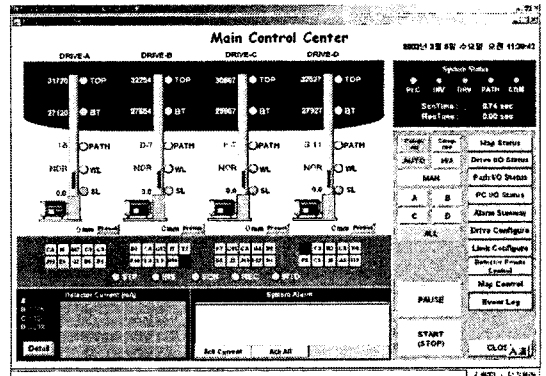


그림 3. 주제어 화면

##### 2.3.2.2 파라미터 설정 화면

작업설정 화면은 작업에 필요한 제반 파라미터의 설정값을 입력하거나, 진단, 보호 및 경고 발생에 관한 설정값 등을 입력하는 화면이다.

- ① Drive Configure
- ② Limit Configure (Normal)
- ③ Limit Configure (Emergency 1)
- ④ Limit Configure (Emergency 2)

##### 2.3.2.3 운전지원 화면

작업 중 운전원이 필요로 하는 제반 운전지원 화면을 제공한다. Mapping 상태, 경고, 검출기 데이터 트렌드 등을 표시하는 제반 화면들로 구성된다.

- ① Map Status 화면
- ② Alarm Summary 화면
- ③ Data Trend 화면

##### 2.3.2.4 정비지원 화면

정비 시 설비와 연결된 PLC 입출력 현황을 파악할 수 있도록 정비지원 화면을 제공한다. 구동기 입출력 상태, 통로선택기 입출력 상태, 소내전산기 입출력 상태 등을 표시하는 화면들로 구성된다.

- ① Drive I/O Status
- ② Path I/O Status
- ③ Plant Computer I/O Status

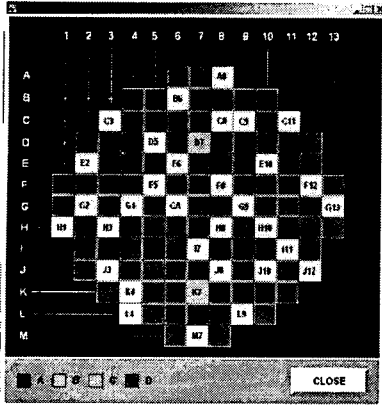


그림 4. 맵상태 화면

### 3. 기기검증

원자력 품질보증 절차에 따른 신뢰성 확보를 위하여 제어시스템의 기기검증 시험이 수행되었다. 시험은 내환경, 전자파 방출, 내지진 분야에 대하여 공인시험기관인 산업기술시험원에서 수행되었다.

#### 3.1 내환경시험

제어시스템이 검증조건하에서 정상적으로 동작됨을 확인하기 위하여 내환경시험 절차에 따라 온도시험, 진동시험, 전원영향시험을 실시한 결과 검증조건을 만족하였다.

#### 3.2 전자파방출시험

발전소 주제어실에 설치되는 제어시스템으로부터 방출되는 전자파가 다른 설비의 기능에 영향을 미치지 않는 수준임을 입증하기 위하여 아래의 전자파 방출시험을 수행한 결과 EPRI TR-102323의 방출 허용기준을 만족하였다.

- ① 전도성 방사 (30Hz~50kHz, CE101)
- ② 전도성 방사 (50kHz~400MHz, CE102)
- ③ 자기장 방사 (30Hz~100kHz, RE101)
- ④ 전기장 방사 (10kHz~1GHz, RE102)

#### 3.3 내지진 해석

지진 발생에 대비하여 제어시스템의 외파에 대한 구조적 건전성이 유지됨을 입증하기 위하여 내지진해석을 수행한 결과 고리1호가 최대가상지진(Maximum Hypothetical Earthquake)에서도 구조적 건전성을 보였다.

## 4. 현장설치 및 실증시험

개발된 노내 중성자 분포 측정설비의 디지털 제어시스템은 고리1호기 제21차 계획예방정비 기간(2002.12.29~2003.2.28)에 주제어실에 설치되었고, 실증시험을 수행하여 설비의 기능, 성능 및 유효성을 최종 검증하였다. 실증시험은 기능 및 성능 시험, 노내 중성자 분포 측정 시험으로 나누어 실시되었다.

#### 4.1 기능 및 성능시험

개발된 제어설비가 노내 중성자 분포 측정 작업에 필요한 검출기 구동메카니즘 제어, 검출기 전압제어, 측정데이터 처리 등의 기능과 정의된 성능을 제공하는 지에 대한 시험이 실시되었고, 기준을 만족함을 확인하였다. 수행된 시험항목은 아래와 같다.

- ① 전원가압시험
- ② 입출력루프시험
- ③ 로컬 운전시험
- ④ 리모트 운전시험(수동, 반자동 및 자동운전)
- ⑤ 검출기 구동속도 측정시험
- ⑥ 소내전산기 인터페이스 시험
- ⑦ 통로별 상하한 설정 시험

#### 4.2 노내 중성자 분포 측정 시험

노내 중성자 분포 측정 작업이 발전소 기동 후 원자로 출력 5%, 75% 및 100%에서 수행되었고, 개발된 설비를 이용하여 성공적으로 데이터를 취득하였다. 그림 5에 원자로 출력 100%시 측정된 노내 중성자 분포를 나타냈다.

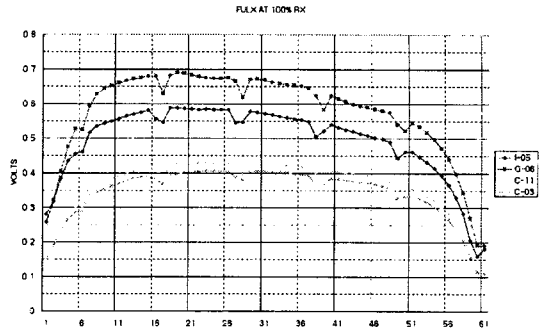


그림 5. 노내 중성자 분포(원자로 출력 100%)

측정 데이터들은 노심 분석 프로그램인 INCORE-3D의 기준 자료로 입력되었고, 해석된 노심변수들은 기존설비를 사용하여 수행되었던 20주기와 비교한 결과 데이터의 일관성이 확인되었다. 표 1에 20주기 및 21주기의 주요 노심변수 분석결과를 비교하여 나타냈다.

표 1. 주기별 주요 노심변수 비교

출력 주기 항목	5%		100%	
	20주기	21주기	20주기	21주기
Fz(측방향 침투 계수) 편차	1.08%	0.82%	0.33%	0.34%
Fq 열속침투계수	2.3497	1.9603	1.9185	1.8374
QPTR 사분출력경사비	1.022	1.025	1.020	1.008
RMS 측정오차	0.030	0.025	0.021	0.012

#### [참고문헌]

- [1] "Technical Manual for In-Core Instrumentation of Korea Electric Company Kori Unit No.1", Westinghouse Nuclear Energy Systems
- [2] "Technical Manual for In-Core Instrumentation of Korea Electric Company. Kori Unit No.2", Westinghouse Nuclear Energy Systems
- [3] "Flux Mapping System Technical Manual for Korea Electric Company Korea Unit 5 and 6", Westinghouse Nuclear Energy Systems
- [4] "Technical Manual for Flux Mapping System Detector Drive Train Standardized for Nuclear Power Plant", Teleflex Inc.
- [5] "고리1호기 노내 핵계측 제어 논리 분석 보고서", 한전 전력연구원
- [6] "노내 핵계측 제어 시스템 개발에 따른 인허가 검토 보고서", 한전 전력연구원
- [7] "노내 핵계측 설비 분석 보고서", 한전 전력연구원
- [8] "원자력발전소 디지털 제어 시스템 설계 요건서 모델 개발", 한전 전력연구원
- [9] "노내 핵계측 제어설비 개발에 따른 PLC 기술평가 보고서", 한전 전력연구원
- [10] "고리1호기 노내 핵계측 제어시스템 구조개발 (PLC 기반 구조)", 한전 전력연구원