

## SMART 안전제어반의 정보표시기 및 제어기 설계 Design of Safety Console Displays and Controls for SMART

이철권, 오인석, 박희운, 구인수, 장문희

한국원자력연구소

### 요 약

SMART 주제어실의 기능중 사고시 원자로 안전정지 및 사고완화를 위한 운전을 수행할 수 있도록 감시 및 제어수단을 제공하는 안전제어반의 정보표시기 및 제어기 설계내용을 기술한다. 안전제어반의 감시기능과 제어기능을 수행하는 정보표시기 들과 제어기를 기능분석 결과로부터 기능중심으로 설계하여 운전성을 개선하고자 하였다. VDU 중심으로 사고후감시를 포함한 정보표시기와 소프트제어기를 이용하여 착석식 제어반을 설계하고, 원자로 정지 및 공학적 안전설비 기기 제어를 위한 하드와이어드 스위치를 제어반 상에 백업으로 설치하여 주제어실 설계관련 인허가에 대처하였다. 뿐만 아니라 주제어반의 정보표시 기능상실시 연속적으로 출력운전을 수행할 수 있는 기능을 부여하여 주제어실의 가용도를 향상시키고자 하였다.

### Abstract

This paper describes the design of safety console displays and controls of the SMART main control room. The safety console provides the control and monitoring functions to safely shutdown the reactor during accidents, as well as to mitigate the consequences of the accidents. The function-based design of information displays and controls for safety console can improve the effectiveness of operation. The console is designed as a sit-down type with VDU-based displays and soft-controllers. The design is intended to cope with the regulatory requirements by adding the hardwired switches as a backup for control of ESF equipment and reactor trip as well as the post-accident monitoring displays on the console. In addition, the function of continuous reactor operation without shutdown during a failure of information display system on the main console, will improve the availability of the main control room.

## 1. 개요

원자로를 운전하기 위하여 운전원이 상주하는 주제어실은 원자로를 안전하게 그리고 효율적으로 유지할 수 있는 감시 및 제어수단이 제공되어야 할 뿐만 아니라 사고시 원자로를 안전하게 정지시킬 수 있는 수단이 제공되어야 한다.[1] 현재 개발중인 SMART(System-integrated Modular Advanced Reactor)의 주제어실은 컴퓨터와 VDU(visual display unit) 기반의 소형 제어반과 대형화면을 위주로 설계되므로 기존의 하드와이어드 기기에 기반을 둔 제어실의 설계개념과 비교했을 때 나열식의 기기배치가 아닌 공통의 기기를 이용한 정보 및 제어수단의 집적화, 계층화된 정보표시를 이용한 정보체계 등으로부터 운전원의 운전성과 운전의 안전성 측면에서 많은 개선효과를 기대할 수 있다. 그러나 이러한 디지털 기기들은 하드와이어드 기기와는 달리 소프트웨어의 안전성확보와 공통모드 고장에 취약점을 지니고 있다. 이는 위에서 언급한 주제어실 설계의 주요 기능 중 하나인 사고시 원자로 안전정지 기능을 수행하기 위하여 일반적으로 안전등급의 주제어실 기기 또는 계통이 할당되도록 요구됨을[2] 고려할 때 인허가측면에서 정상상태에서 원자로 운전을 담당하는 기기나 계통과 동일하게 설계할 수 없다. 따라서 SMART 주제어실 설계는 대형화면 및 다른 여러 시설물과 더불어 정상운전을 담당하는 주제어반과 사고시 원자로를 안전정지시키고 사고완화를 담당하는 안전제어반을 제공하므로써 원자로에서 발생하는 모든 운전상태에 대해 운전원이 감시 및 제어행위를 수행할 수 있는 수단을 제공토록 하였다. 본 논문은 이러한 주제어실 기기 중 안전제어반 설계에 관한 내용을 설명한다.

## 2. 설계개념

SMART 안전제어반의 기능은 기동운전과 비정상운전을 지원하고 사고시 원자로 안전정지 및 사고완화를 위한 감시 및 제어기능을 수행하며, 주제어실의 CRT 기반의 정보처리 및 표시계통의 기능상실시 안전제어반에서 원자로를 정지하지 않고 일정시간 동안 연속운전이 가능하도록 관련 감시 및 제어기능을 수행하는 것이다. 이러한 기능을 수행하는 안전제어반을 설계하기 위하여 다음과 같은 감시 및 제어수단을 제공하도록 설계개념을 설정하였다.

- 모든 설계기준 사고에서 제어 및 감시기능 수행이 가능하도록 제어반을 설계한다.
- 착석식의 제어반을 제공하며, 주제어실에 적용된 인간공학 요소를 반영한다.
- 사고후감시가 가능하도록 전기적, 물리적으로 분리된 두 채널의 표시기를 제공한다.
- 공학적 안전설비 기기 상태표시 등 안전관련변수 및 주요 운전변수 표시를 위한 표시기를 제공한다.
- 비정상운전 지원, 사고시 원자로 안전정지 및 사고완화를 위한 상세 운전정보를 제공한다.

- 정보처리시스템의 기능상실시 원자로 연속운전을 위한 주요 운전정보를 제공한다.
- 사고시 운전을 위한 비상운전 절차서를 제공한다.
- 안전 및 비안전등급의 기기제어를 위한 제어기를 제공한다.
- 기동운전 및 사고시 보호시스템 운전을 위한 운전원 입력수단을 제공한다.

### 3. 설계내용

안전제어반은 운전원의 운전을 위하여 크게 감시기능과 제어기능으로 나누어 설계된다. 감시기능은 상세 운전정보 표시기, 사고후감시 표시기, 안전관련 변수 및 주요 운전변수 표시기로부터 수행되며, 제어기능은 운전원모듈, 소프트웨어, 하드와이어드 스위치에 의해 수행되도록 하였다. 안전제어반의 정보검색 및 제어 수행은 운전원 연계기기의 단순화를 기하고자 터치방식을 사용하며, 터치방식의 연계설계는 인간공학적 측면에서 고려되는 요소들, 즉 버튼의 배치 및 크기, 색깔, 사용문자의 크기, 약어 등을 반영한다.[3] 안전제어반의 정보표시 및 제어기는 SMART 기능분석 결과를 근거로 설계하였다. 기능분석은 MMIS 개발에 인간공학적인 요소를 체계적으로 반영하기 위한 주요 분석업무 중 하나로 SMART 계통을 기능중심으로 분류하여 MMIS에서 수행되는 기능을 운전원 입장에서 파악하고 MMIS 설계요건을 설정하기 위한 기본적인 기능구조를 설정하는 것이다.[4] 분석된 SMART의 기능분석 구조는 3 개의 최상위 목적인 안전성확보, 전력생산, 보조기능으로부터 안전성확보와 전기생산 목적의 8 개의 필수기능(Critical Function)을 정의하고, 각 필수기능은 다시 주요기능(Major Function)으로 나누어지며, 이들은 다시 부기능(Sub-Function)들로 나누어진다. 또 각각의 부기능은 여러 개의 계통기능(System Function)으로 분해된다. 표 1과 2는 각각 전력생산 및 안전성확보 목적의 SMART 기능분석 일부를 나타낸 것이다.

#### 1) 정보표시기 설계

안전제어반에서 제공하는 정보표시 기능은 SMART 주제어실의 정보체계로부터 선정하였다. SMART 주제어실의 정보표시는 운전개관을 나타내는 대형화면, 정상운전을 위한 CRT 기반의 정보표시기, 이상상태 발생을 운전원에게 알려주는 경보표시기와 본 논문에서 기술하는 안전제어반의 기능수행을 위한 정보표시기들로 구성되며, 이들은 기능분석 결과를 기반으로 체계적인 정보표시 구조를 갖도록 운전개관, 필수기능, 계통기능, 기기정보 및 상세진단 기능으로 계층화된다. 동일한 설계개념에서 안전제어반의 정보표시 구조는 비정상운전 지원과 사고시 원자로 안전정지 및 사고완화를 위한 조치를 수행할 수 있도록 SMART 필수기능 중 표 2의 안전기능 수행과 관련한 정보를 최상위로 하여 계통기능, 기기정보 및 상세진단 기능을 상세 운전정보 표시기에서 제공하며, 이 외에도 사고후 감시를 위한 R.G. 1.97 변수표시기와 공학적 안전설비 기기 상태 등

표 1. SMART 기능분석구조 일부 (전력생산 목적)

<b>Function Goal : Power Production</b>			
<b>Critical Function</b>	<b>Major-function</b>	<b>Sub-Function</b>	<b>System Function</b>
Create Fission Energy	Control Reactivity	Control Rod Control Boron	Regulate Shutdown Rod Inject Borated Water Regulate Regulating Rod
	Control Moderator Density	Control Moderator Temp. Control Moderator Pressure	Control FW Flow Control PZR Pressure
Transfer Fission Energy	Maintain Coolant Inventory	Control Coolant Flow	Align V/Vs Control Makeup Water
		Maintain Coolant Purification Maintain Sub-cooled Margin	Connect Filters/Ion Exchanger Control PZR Temperature Control PZR Pressure Control Main Coolant Pumps Regulate Control Rods
	Circulate Coolant	Maintain Forced Circulation Maintain Natural Circulation	Control Main Coolant Pumps Control PZR Pressure
	Maintain Secondary Heat Supply Sink	Feed Water	Regulate Feed Water Flow

표 2 SMART 기능분석구조 일부 (안전성확보 목적)

<b>Function Goal : Safety</b>			
<b>Critical Function</b>	<b>Major-function</b>	<b>Sub-Function</b>	<b>System Function</b>
Isolate Rx Vessel		Isolate safeguard vessel Isolate contain. vessel	Close isolation V/Vs Close isolation V/Vs
Maintain Vessel Environs Below Limited Values	Maintain S.V. environs	Control S.V. Temp. Control S.V. Press. Control S.V. combustible gas Reduce S.V. radiation level	TBD TBD TBD TBD
	Maintain C.V. environs	** Same as "Maintain S.V. environs"	
Maintain Core Sub-criticality		Insert rods Inject Borated Water	Insert Shutdown Rod Regulate Regulating Rod Control boron
Maintain Core Cooling	Maintain integrity of core coolable geometry	Control coolant flow rate Maintain integrity of internal structure	Compensate from ECCS tank Compensate from makeup sys. No support systems
	Circulate coolant	Control forced circulation Maintain passive circulation	Control MCFs Remove heat by secondary sys.
	Remove core heat	Remove heat by secondary sys. Remove heat by passive RHR	Control steam & FW sys. Maintain flow path to ECT

기타 안전관련 변수지시 및 운전예 자주 참조되는 계통의 운전상태나 주요 운전변수를 나타내는 표시기가 제공된다.

#### 가) 상세 운전정보 표시기

P&ID를 근거로 한 물리적인 계통 위주로 설계되어온 기존의 CRT 정보화면 설계와는 달리 플랜트의 기능을 근거로 정보화면을 구성하였다. 이 정보표시기는 크게 네 개의 필수 안전기능-격납용기 격리, 격납용기내부 환경유지, 원자로 미임계 유지, 원자로냉각기능 유지를 최상위 화면으로 표시하여 운전원이 계통 및 기기 수준의 정보를 취득할 수 있도록 구성한다. 그림 1은 원자로냉각기능 유지와 관련하여 설계된 최상위 화면의 예로서, 운전원은 이 기능을 지원하는 모든 계통 및 기기 정보를 하위 화면에서 취득할 수 있도록 계층화하였다. 또한 기동운전시 보호계통의 운전원 모듈을 조작하기 위하여 필요한 상세 운전정보를 취득할 수 있도록 업무기반(task-oriented)의 기동운전 화면과 비상운전을 지원하기 위한 비상운전 절차서를 제공하며, 주제어반 정보화면의 기능상실시 연속운전을 위하여 표 1의 분석결과를 근거로 선정한 운전정보를 제공한다.

#### 나) 사고후감시 표시기

R.G. 1.97에서 요구하는 Category 1 사고후감시 변수를 근거로 선정된 SMART 사고후감시 변수를 물리적, 전기적으로 격리된 두 채널의 고정된 표시기에 나타낸다. 원자로, 격납용기, 안전용기 및 기타(2차계통) 계통별로 구분되어 표시되는 그림 2의 표시기는 선정된 변수의 현재값을 실시간 연속적으로 제공하며, 운전원은 특정변수를 터치함으로써 그 변수의 추이곡선 또는 기기별 운전상태를 볼 수 있다.

#### 다) 안전관련 변수 및 주요 운전변수 표시기

원자로 정지 등 안전기능 수행 및 안전제어반의 다른 기능 수행시 사고후감시 변수중 R.G. 1.97 Category 2 & 3 변수를 포함하여 운전원이 자주 참조하는 안전관련 및 주요 운전변수나 계측제어 계통들의 운전상태, 공학적 안전설비 기기상태 등에 관한 정보를 고정된 표시기에 제공하여 운전원이 신속하게 볼 수 있도록 한다.

### 2) 제어기 설계

운전원이 수동으로 계통기기를 직접 제어하거나 운전원 명령을 입력하는 수단을 제공하는 제어기는 제어되는 기기의 안전등급 설계요건에 따라 설계된다. 따라서 안전제어반에 설치되는 제어기는 주제어반의 정보표시기의 기능상실에 대비한 원자로 연속운전을 위하여 제공되는 비안전등급의 소프트웨어기를 제외하고는 모두 안전등급으로 설계된다.

#### 가) 소프트웨어기

공학적 안전설비 기기제어를 위한 두 계열(2 train)의 안전등급 제어기와 원자로를 포함한 플랜트 운전을 위한 비안전등급의 제어기로 설계되는 소프트웨어기는 기존의 변수단위의 하드와이어드 형태의 제어기가 아닌 VDU 기반의 공통기기를 이용하는 제어기로서, 기능 및 계통 단위로 집산화시켜 운전성을 개선한다. [5] 그림 3의 소프트웨어기 화면은 표제영역, 운전정보 표시영역, 제어영역 및 제어시스템 메뉴영역의 네 개 영역으로 나누어진다. 표제영역은 주요기능 명칭과 함께 원자로 출력과 전기출력에 관한 정보를 표시하며, 운전정보 표시영역은 제어하고자 하는 기기의 제어와 관련한 운전정보를 제공하며, 제어영역은 운전원이 실제 기기의 제어를 위한 행위를 수행하는 영역으로 기기정보가 표시된다. 하단의 제어시스템 메뉴영역에는 운전원이 소프트웨어기 상에서 특정제어기로 접근할 때 사용하는 시스템 단위의 구성기기가 표시된다.

#### 나) 스위치

공학적 안전설비 기기제어에 공통의 기기를 이용하는 소프트웨어기의 기능상실에 대비하고 계통수준의 원자로정지 기능수행을 위하여 하드와이어드 스위치가 제공된다.

#### 다) 운전원모듈

원자로 보호계통과 공학적 안전설비 작동계통 기기들의 제어 및 시험을 위한 운전원 연계기로서, 네 채널의 독립적인 기기가 제공된다. 운전원모듈은 제어기능 뿐만아니라 운전원모듈을 구동하기 위하여 요구되는 공학적 안전설비 구동신호 및 Pre-trip 경보 등에 관한 운전정보를 제공한다.

### 3) 모형 구현

설계와 병행하여 확인을 위하여 개발되는 안전제어반의 모형(prototype)은 착석식의 제어반으로 운전원을 중심으로 전면부는 감시기능을 위한 정보표시기들이 배치되며, 작업영역인 데스크는 제어수행을 위한 제어기들을 그림 4와 같이 배치하였다. 모형에 사용된 정보표시기 화면 및 소프트웨어기 화면개발을 위한 환경은 WIN95 운영체제의 마이크로컴퓨터를 기반으로 GUI(graphic user interface)로서 SL-GMS를 사용하였다.

## 4. 결론

SMART 주제어실 기능중 사고시 원자로 안전정지 및 사고완화를 위한 운전을 수행할 수 있도록 감시 및 제어수단을 제공하는 안전제어반을 설계하였다. VDU 기반의 착석식으로 설계되는 이 제어반의 정보표시는 SMART 주제어실 정보체계에서 할당된 기능을 기능분석 결과를 근거로 구성하고, 제어기는 하드와이어드 스위치를 백업으로 하고 새로운 제어기로 설계되는 소프트웨어기

를 사용함으로써 운전 효율성을 개선할 수 있다. 또한 VDU 기반의 소형 제어반을 중심으로 설계되는 주제어실에서 안전기능 수행을 위한 제반 운전업무를 담당하는 이 제어반은 주제어실 설계 관련 인허가에 대처하고, 뿐만 아니라 주제어반의 정보표시 기능상실시 연속적으로 출력운전을 수행할 수 있는 기능을 부여하여 주제어실의 가용도를 향상시키고자 하였다.

### Acknowledgement

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발사업 일환으로 수행되었음.

### [참고문헌]

1. 구인수 외, "인간기계연계체계개발", KAERI/RR-1706/96, 1997.7
2. IEEE-603, "Criteria for Safety Systems for NPGS", 1991
3. NUREG-0700, "Human-System Interface Design Review Guideline", 1995
4. NUREG-0711, Human Factors Engineering Program Review Model, 1994
5. 이철권 외, "SMART MMIS를 위한 소프트웨어기 개발", '98춘계원자력학회 학술발표회, 1998

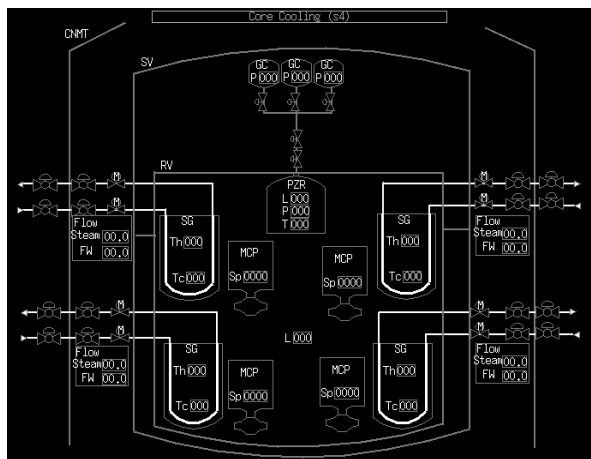


그림 1 상세 운전정보 화면-Level 1 (Typical)



그림 2 사고후감시 표시기 화면 (Typical)

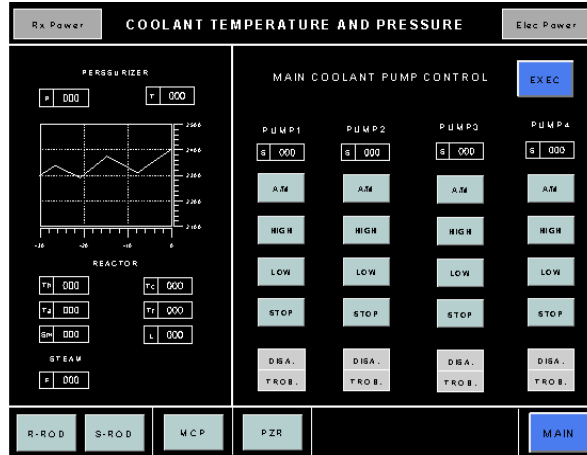


그림 3, 소프트웨어기 화면 (주냉각펌프 제어)

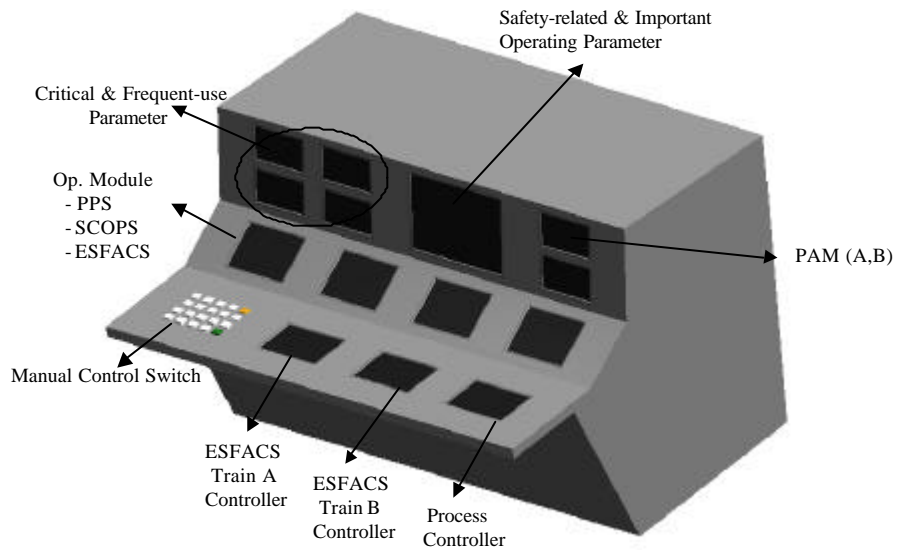


그림 4 안전제어반 기기배치도