2000 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

원자력발전소의 인간-기계연계계통 설계검증을 위한 부분-범위 시뮬레이터 개발

Development of Partial-Scope Simulator for Verification and Validation of Man-Machine Interface System

김만우 이진웅 김광추 최종재 최문재
한국전력기술㈜
경기도 용인시 구성면 마북리 360-9

요 약

원자력발전소의 첨단형 인간-기계연계 계통(Man-Machine Interface System; MMIS)에 대한 설계특성 평가, 반복적 설계개발 및 검증을 위한 MMIS 검증용 부분-범위 시뮬레이터를 개발하였다. 이 시스템은 발전소의 공정 계통 모델, 제어 계통 모델과 MMIS 로 구성되었다. 공정계통 모델은 영광 원자력 3,4 호기의 공정계통을 대상으로 하였고, 제어계통모델은 한국형 차세대 원전 제어계통을 모델링하여 적용하였으며, MMIS 로는 한국형 차세대 원전의 감시시스템과 소프트제어 시스템 설계를 적용하여 개발되었다. 개발된 부분-범위 시뮬레이터의 사용성 및 시험성 평가를 위해 발전소의 정상상태와 비정상상태에 대한 모의 운전을 수행하였으며, 모의 운전 결과, 개발된 시스템이 MMIS 검증 목적으로 사용 가능한 것으로 분석되었다.

Abstract

The partial-scope simulator is developed to be used for evaluating specific design feature and to supporting the iterative design and verification and validation (V&V) of the advanced Man-Machine Interface System (MMIS) design process of nuclear power plant. The simulator consists of the plant process system model, control system model and MMIS model. The Younggwang 3,4 nuclear power plant is modeled for process model and the control system of Korean Next Generation Reactor (KNGR) is modeled for the control system model, and the plant monitoring system and soft control system of KNGR MMIS is implemented into the simulator. For the test and suitability evaluation of developed simulator, test operations for normal and abnormal plant status are performed, and the analysis of the test result shows the developed simulator could be useful in the V&V of MMIS.

1. 서 론

컴퓨터 기반의 Compact Workstation 형으로 설계된 첨단형 주제어실은 감시 및 제어정보가 병렬로 산재되어 제공되는 기존의 재래식 주제어실과는 달리 이들의 감시 및 제어가 컴퓨터를 통해 구현된다. 따라서, 첨단형 주제어실 설계시 설계과정에 대한 검증이 중요하게 되며, 국내외 원자력

규제기관에서도 첨단형 경수로 발전소의 MMIS 설계시 안전성을 확보하기 위해서 전 설계공정에 걸쳐 반복적인 설계 특성 평가 및 검증을 통한 설계 개선을 요구하고 있다[1]. 특히, 미국의 원자력 규제기관은 MMIS 설계 및 검증(Verification & Validation)을 강화하는 내용을 포함한 첨단형 MMIS의 규제요건을 NUREG-0700 Rev1, NUREG-0711 등을 통하여 발표하였다. 또한, 첨단형 주제어실의 설계 요건을 미국의 전력연구소 사업자 요건[1]에서도 이를 위해 설계초기에서부터 모의설비 및 시뮬레이터 등을 사용하여 설계 검증을 요구하고 있으며, 첨단형 주제어실 도입 추세에 따라 EPRI-URD를 인증 받고 있다. 따라서, 새로운 원전 설계시 설계된 원전의 시뮬레이터의 개발이 필수적이라고 할 수 있다.

MMIS 설계의 검증용으로 사용될 시뮬레이터의 성능에 대한 요건 ANSI/ANS 3.4 등에서 'Dynamic Task Performance 평가에 적합하도록 동일한 MMIS 구성을 갖추고 설계발전소의 운전특성과 응답을 실시간으로 나타낼 수 있는 시뮬레이터'로 정하고 있다.

본 연구에서는 첨단형 MMIS 설계 및 설계 개선시 설계에 대한 적합성의 평가 및 검증을 지원할 수 있는 원전의 실시간 시뮬레이터를 개발하고, 그 성능을 확인하기 위하여 4 개 계통 및 제어기기들을 정상상태 운전과 비정상상태 운전을 통하여 실용성을 시험 및 검증하였다.

2. 본 론

본 시뮬레이터는 열평형을 기초한 공정계통 모델, 이를 제어할 수 있는 제어계통모델, 이들 모델 상태를 직접적으로 감시, 제어 계통 상태를 강제 조작할 수 있는 강사 조작반, 그리고 운전원이 직접 계통을 감시 및 제어할 수 있는 MMIS 로 구성되어 있다. 그림 1 은 시뮬레이터의 전체 구조를 간략하게 나타낸다. 시뮬레이터는 MMS(Modular Modeling System)Personal Computer(PC), 강사 조작반, 워크스테이션, Gateway PC, Programmable Logic Control(PLC) 그리고 터치식 Flat Panel Display(FPD)로 구성되어 있다. MMS PC 는 공정계통 및 제어 계통 모델을 포함하고 ACSL/Runtime 소프트웨어 모듈에 의해서 실시간 모의된다. 강사 조작반 PC 는 계통의 모든 상태를 감시 및 강제제어 또는 상태를 발생시킬 수 있는 Instructor 소프트웨어를 포함하고, MMS PC 와 직접 실시간 통신한다. 워크스테이션은 MMIS 인 계통감시 시스템과 소프트 제어 시스템을 포함하고 감시계통 화면과 소프트제어 화면, 시뮬레이터의 실시간 통신시스템을 제어 관리한다. 소프트제어화면은 X-terminal 를 통하여 FPD 에 디스플레이된다. 설계 변경 또는 새로 설계된 제어논리 및 제어 알고리즘을 실제로 테스트하기 위해 모디콘 PLC 를 Gateway 를 통하여 연결하였다.

시뮬레이터의 각 소프트웨어 모듈간의 데이터통신 계통은 TCP/IP 를 기반으로 하는 객체지향적 통신개발 도구인 Software Bus 와 TCP/IP Socket 를 이용하여 개발되었다. 이 툴은 실행되는 동안에도 프로세스들 사이의 데이터 공유 및 함수 공유를 통하여 감시시스템, 소프트제어 시스템 그리고 MMS 등 시스템간의 필요한 데이터를 상호 통신한다. 각 모듈의 통신에 필요한 데이터는 SHARED MEMORY 에 저장되어 실시간으로 각 모듈과 필요한 데이터를 주고 받는다. SHARED MEMORY 는 데이터 통신의 중심 역할을 한다.

운전원은 트랙볼, 마우스, 키보드, 터치스크린을 사용하여 운전을 행한다.

2.1 계통 및 제어 모델링

본 시뮬레이터는 원전의 첨단형 MMIS 설계검증을 목표로 계통모델을 영광 원자력 3,4호기의 공정 계통과 현재 개발중인 차세대 제어계통을 적용하여 개발하였다. 발전소 공정계통의 선정은 기 운전되고 있고 설계데이터가 입증되었으며, 주요계통이 차세대 원전과 가장 유사한 모델이라고 판단된 영광 원자력 3,4 호기 계통을 대상으로 하였다[2][3]. 모델링 대상계통은 화학적 및 체적제어계통, 주증기계통, 보조급수 계통, 안전주입계통 등을 주요계통으로 하였다. 제어계통 모델은, 개량형 차세대원전 MMIS을 적용하기 때문에 차세대 원전 MMIS 기능을 지원하기 위해서는 차세대 원전 제어계통을 모델링하여 개발하였다.

본 시뮬레이터 개발에 필요한 공정계통 및 제어계통은 MMS를 이용하여 작성되었으며, 이 MMS는 발전소 동적거동해석을 경제적, 효율적으로 그리고 보다 쉽게 수행하기 위하여 1978년 EPRI에서 개발된 시뮬레이션 전산 프로그램으로서 20여개 이상의 전력회사에 의하여 화력 및 원자력 발전소의 1차 및 2차계통 분석에 다양하게 응용된 바 있다. 현재는 Framatome Technology에서 전세계에 퍼져 있는 30여개사로 이루어진 사용자들과 연계하여 모듈의 개발 및 수정 보완 작업을 수행하고 있다. 한국전력기술㈜에서는 이미 90년대 초반 MMS가 도입되어 표준원전 1, 2차 계통에 대한 동적성능분석, 영광 원자력 3,4 및 5,6호기 화학 및 체적제어계통 설계 및 차세대 원자로용 안전주입 실험장치 모의 등에 이용된 바 있다.

그림 2는 작성된 4개 부분-범위 모델 중 하나인 화학 및 체적 제어계통으로서 계통모델의 한 예를 보여 주고 있다. 화학 및 체적 제어계통은 충전 및 유출 유량을 조절하여 가압기 수위를 제어하며, 원자로 냉각재의 붕산 농도제어 및 원자로 냉각재 펌프의 밀봉수 공급 등의 기능을 수행하는 계통으로서 유출유량 조절밸브, 배압 조절 밸브, 충전펌프, 유출 열교환기 등의 기기로 구성되어 있다. 본 화학 및 체적 제어계통의 단위 모델링은 유출계통, 충전계통 및 밀봉수 주입계통으로 구성되어 있으며, 붕산수 계통에 대한 모델링은 제외하였다. 그림 2의 (가)는 모델링시 고려된 화학 및 체적제어 계통에 대한 개략도이며, 그림 2의 (나)는 그림 2의 모델 개략도를 토대로 MMS를 이용하여 작성된 화학 및 체적제어 계통에 대한 공정계통 모델이다. 그림 2의 (다)는 그림 2의 (나)의 각종 밸브 및 기기들에 연결되어 있는 제어계통 모델 중 한 예를 도시하고 있다.

2.2 강사조작반

강사조작반은 시뮬레이터의 감시, 제어 등 모든 상태 제어를 할 수 있다. 강사요원은 팝-업 그래픽화면을 통하여 감시되는 발전소 주요변수 값, 초기상태, 기기제어 등을 직접적으로 설정할 수 있고, 강제로 밸브, 펌프 등 제어기기를 포함한 각종 오기능(Malfunction)을 발생시킬 수 있다.

2.3 인간-기계연계 계통

본 시뮬레이터에는 현재 개발이 진행중인 차세대원전의 MMIS를 적용하여 개발하였다. 차세대 MMIS는 기존의 원자력발전소 제어와 달리 디지털컴퓨터 기술을 적용한 첨단형으로 개발하고 있다. 본 연구에서는 첨단형 MMIS의 특성을 구현할 수 있는 시뮬레이터의 개발을 주안점으로 접근하였으므로 감시계통과 소프트제어계통만을 1차적으로 적용하였다.

감시계통은 발전소의 주요 및 제어 변수를 감시하고 운전원의 감시, 제어 및 운전 절차 등의

모든 운전행위가 이 계통을 중심으로 이루어진다[4]. 이 계통은 다음과 같은 2 개층의 계층적 구조로 구성되어 있다

- 통합화면(1 차 계통, 2 차 계통, 전기계통 등 포함)
- 계통감시화면(4 개 계통 10 개화면)

통합화면에서는 원하는 계통감시화면으로 선택하여 이동할 수 있고, 계통감시화면에서는 계통의 각종 공정변수와 제어변수의 상태를 감시하고 또한, 제어기기를 선택하여 소프트제어계통을 통하여 기기를 직접 제어할 수 있다. 발전소의 상태 및 제어기기 변수들은 계통모델로부터 수신되여 21"모니터 화면에 나타난다. 그림 3 은 본 시뮬레이터에 구현된 감시계통 화면의 한 예이다.

소프트제어계통은 단일 VDU 장치로부터 연속적이거나 불연속적인 제어를 가능하게 시스템이다[5]. 소프트제어계통은 기존 원자력발전소의 제어 판넬에 있는 여러 가지 스위치와 아날로그 제어 장치를 모의하기 위하여 터치식 FPD 를 사용하고, 운전원은 12.1" FPD 의 터치 화면에 소프트웨어로 만들어진 그래픽 화면 제어기를 이용하여 직접 운전한다. 소프트웨어로 구현된 소프트제어계통은 운전원에게 하나의 FPD 로 모든 발전 제어기에 접근 및 제어를 가능케 한다. 이 시스템은 감시계통 시스템과 통신하여 운전원이 감시화면에서 제어기기를 선택했을 때, 그 제어기기가 포함된 제어화면이 소프트제어 FPD 에 디스플레이한다. 본 시스템에 구현된 제어 화면은 4 개 계통 200 여 페이지로 구성되어 있다. 그림 4 는 본 시뮬레이터에 구현된 화학 체적제어 계통의 제어화면의 한 예이다.

3. 시험 및 검증

새로 개발된 시뮬레이터에 대해서 시뮬레이터 성능을 평가하여 그 실용성을 검증해야 한다. 먼저, 시뮬레이터 모델의 동적특성과 제어상태의 적정 여부를 확인 검증하기 위해 다음과 같은 단계별 시험을 수행하였다.

- 강사조작반 및 운전원 제어반 시험
- 정상상태 시험
- 과도상태 시험
- 오기능 시험

시뮬레이터의 계통모델과 MMIS 와의 연계를 통한 실용성을 확인하기 위해 사용된 시험 시나리오는 다음과 같다.

- 비상시험 시나리오 : 증기발생기 튜브 파단
- 비정상상태 시나리오 : 각 계통 기기의 오기능 등 12 개

그림 5 는 부분-범위 시뮬레이터 모델 중 화학 및 체적제어 계통에 대한 유출 유량의 감소에 따른 각종 제어기들의 상태를 분석한 결과이다.

위 테스트 시나리오는 4개 계통에 한하여 수행되었으며 그 결과 MMS의 Runtime Module의 특성이 정밀하지는 않으나 실시간 시뮬레이터가 갖추어야 할 동적특성을 제공 하고 있음을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 첨단형 MMIS 설계 및 개선시 설계의 적합성 평가 및 검증을 지원할 수 있는 원전 실시간 시뮬레이터를 개발하였다. 본 시스템을 개발하기 위해 영광 원자력 3,4호기의 공정계통에 차세대 제어계통을 적용하여 모델을 개발하였다. 이 모델을 보다 효율적으로 확인 검증하고 실용성을 확인하기 위해 차세대원전 인간-기계연계 계통을 적용하여 확인하였다.

이와 같이 개발된 시뮬레이터를 모의 운전한 결과, 계통 성능 특성 및 평가 결과가 개발 목적에 충분한 것으로 확인되어 이를 실제 차세대 원전 MMIS 설계 특성 및 제어 논리 설계 등에 활용하고 있으며, 또한 본 시뮬레이터는 첨단형 MMIS 검증 외, 디지털 제어계통의 튜닝, 운전원 교육 및 훈련용으로 활용 가능하다. 본 시뮬레이터는 이미 개발된 4개 계통 외 나머지 계통들에 대해서도 개발을 진행되고 있으며, 감시화면과 제어화면 외에 경보화면 등의 전 MMIS 분야로 확장 개발되고 있다.

5. 참고문헌

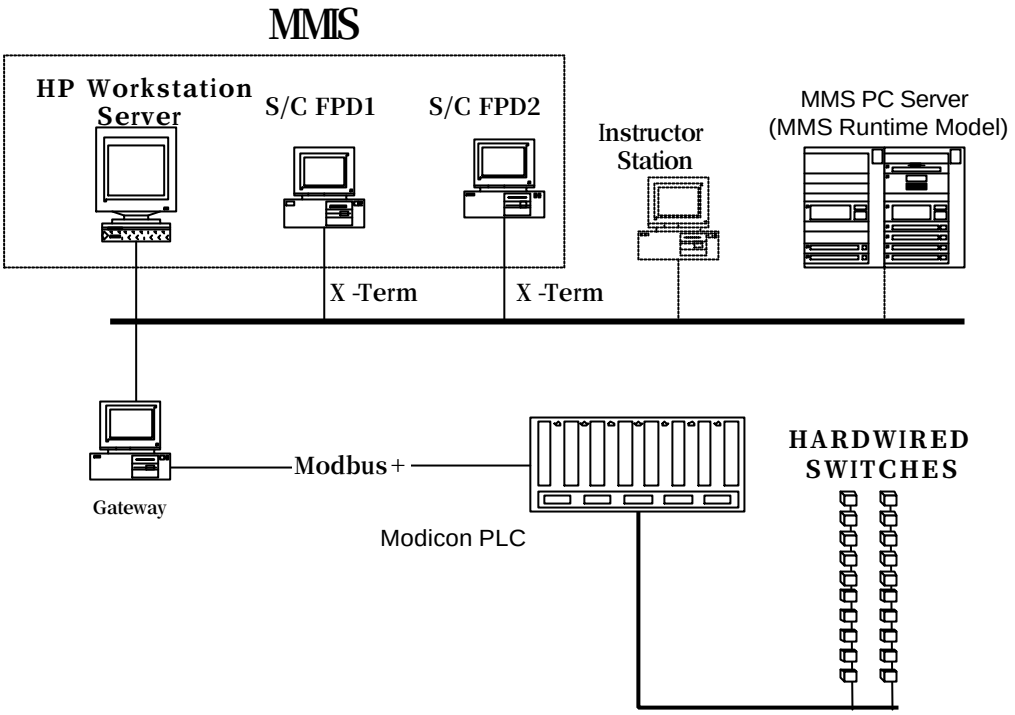
[1] Man-Machine Interface Systems for ALWR, EPRI URD Chapter 10 Rev 7 1995

[2] 표준원전의 동적 성능분석 연구(II), 기술개발 최종보고서 한국전력기술㈜ 1995

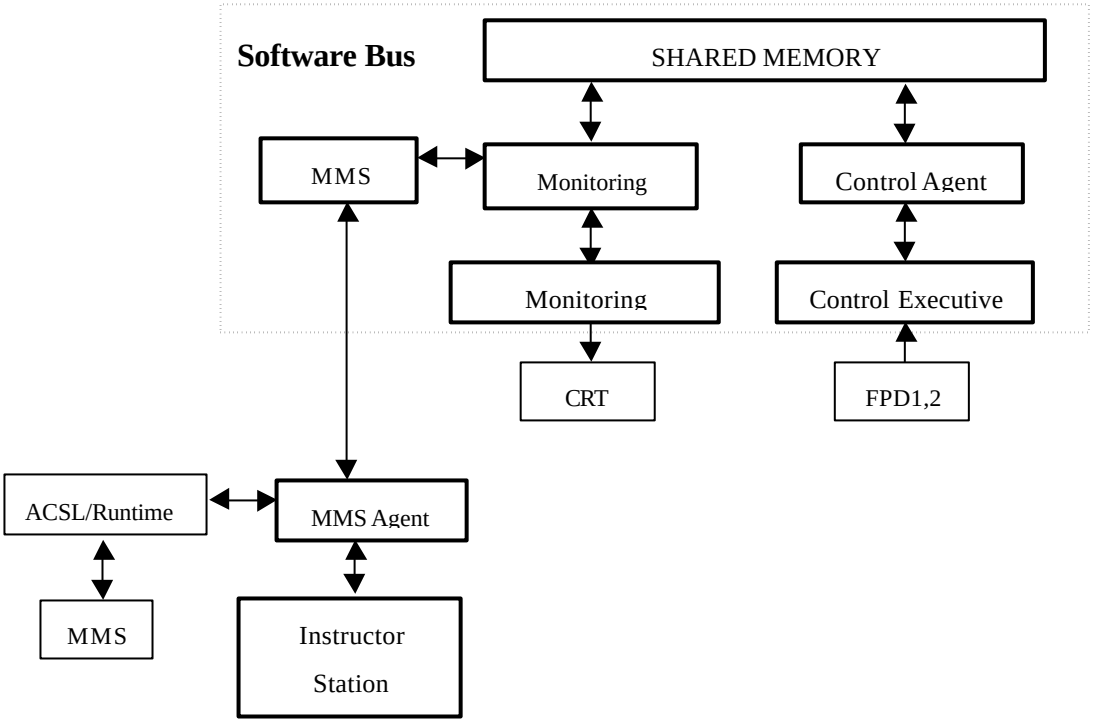
[3] PFS Response to Data Request for YGN 3&4, CE, K-PFS-89-091, 1989

[4] System Design Requirement for the Information Processing System for Korean Next Generation Reactor, N0797-IC-SR710-00

[5] Design Guideline for the Soft Control Display for Korean Next Generation Reactor, N-750-EJD460-051

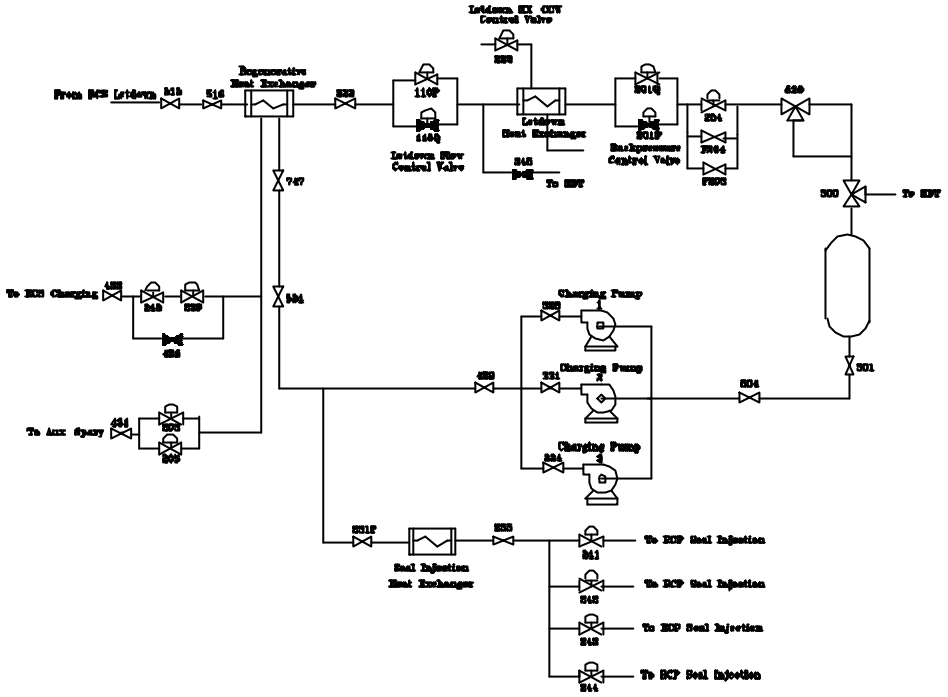


(가) 하드웨어 구조

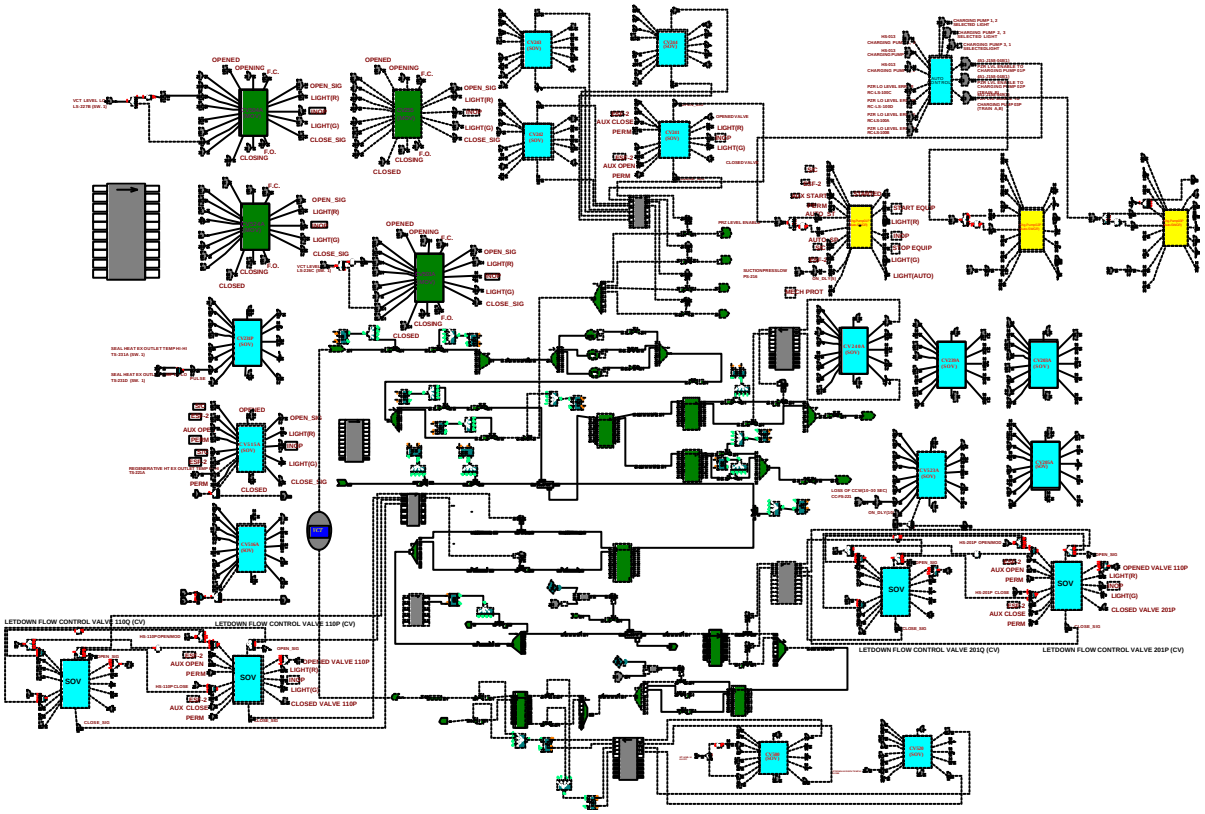


(나) 소프트웨어 구조

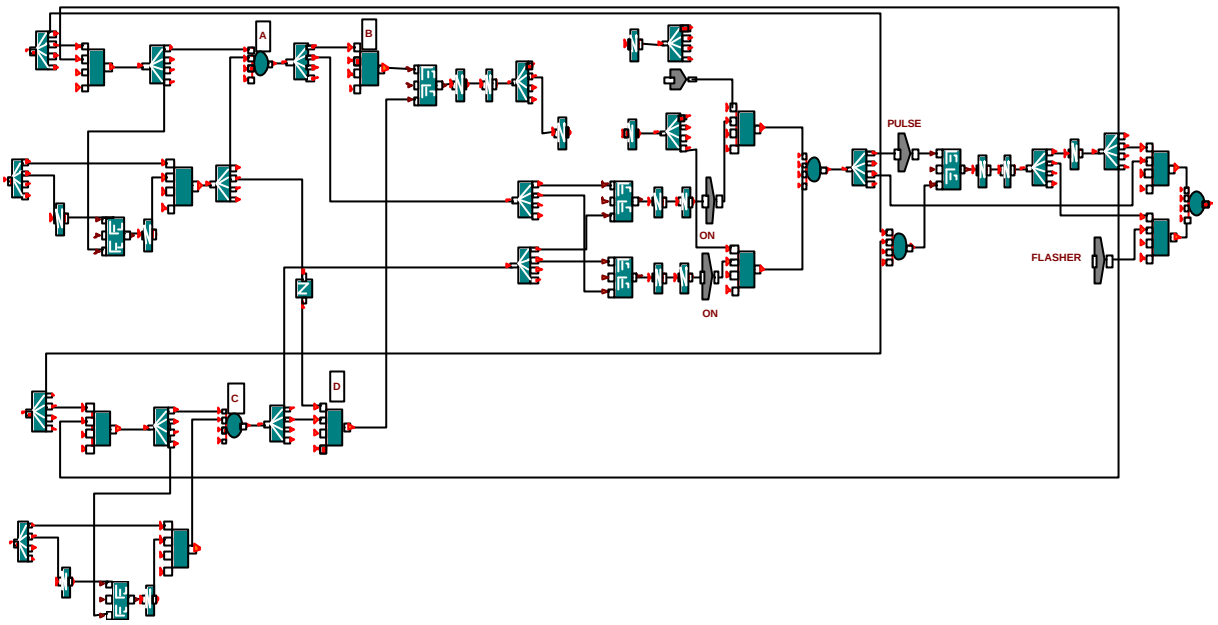
그림 1. 시뮬레이터 구조



(가) 화학 및 체적제어 계통 구성도

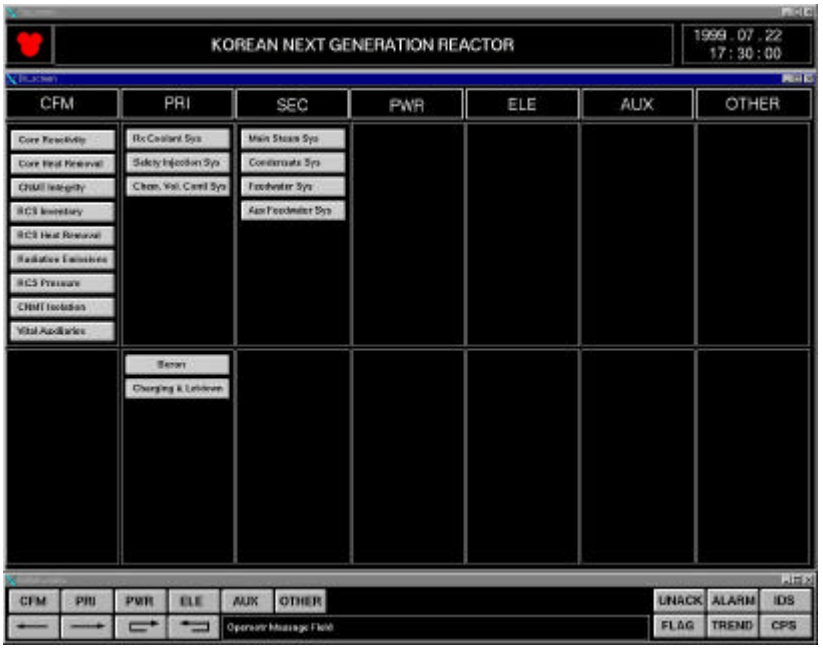


(나) 화학 및 체적제어 공정계통 모델링

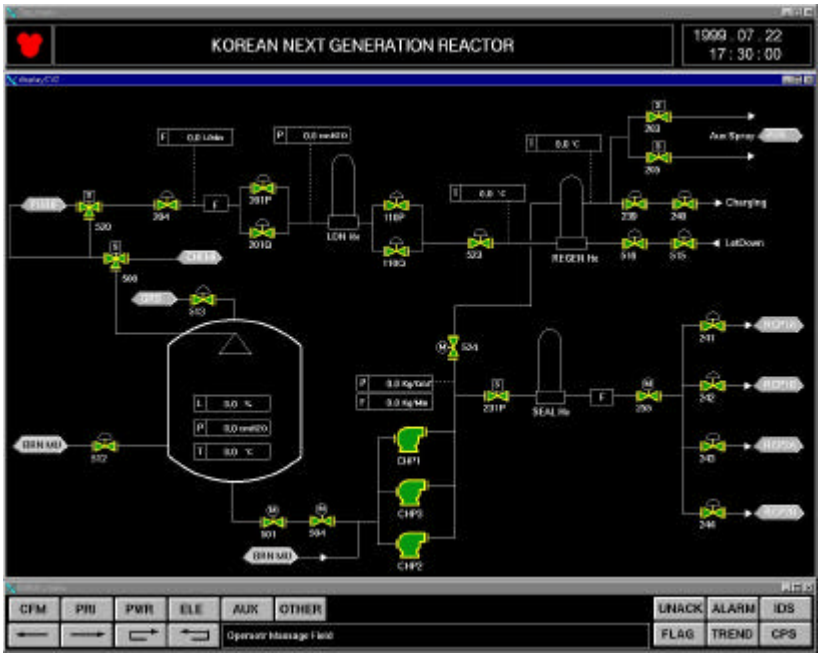


(다) 화학 및 체적제어 제어계통 모델링

그림 2. 계통 모델링의 예



(가) 통합감시화면



(나)계통감시화면

그림 3. 감시계통 화면의 예

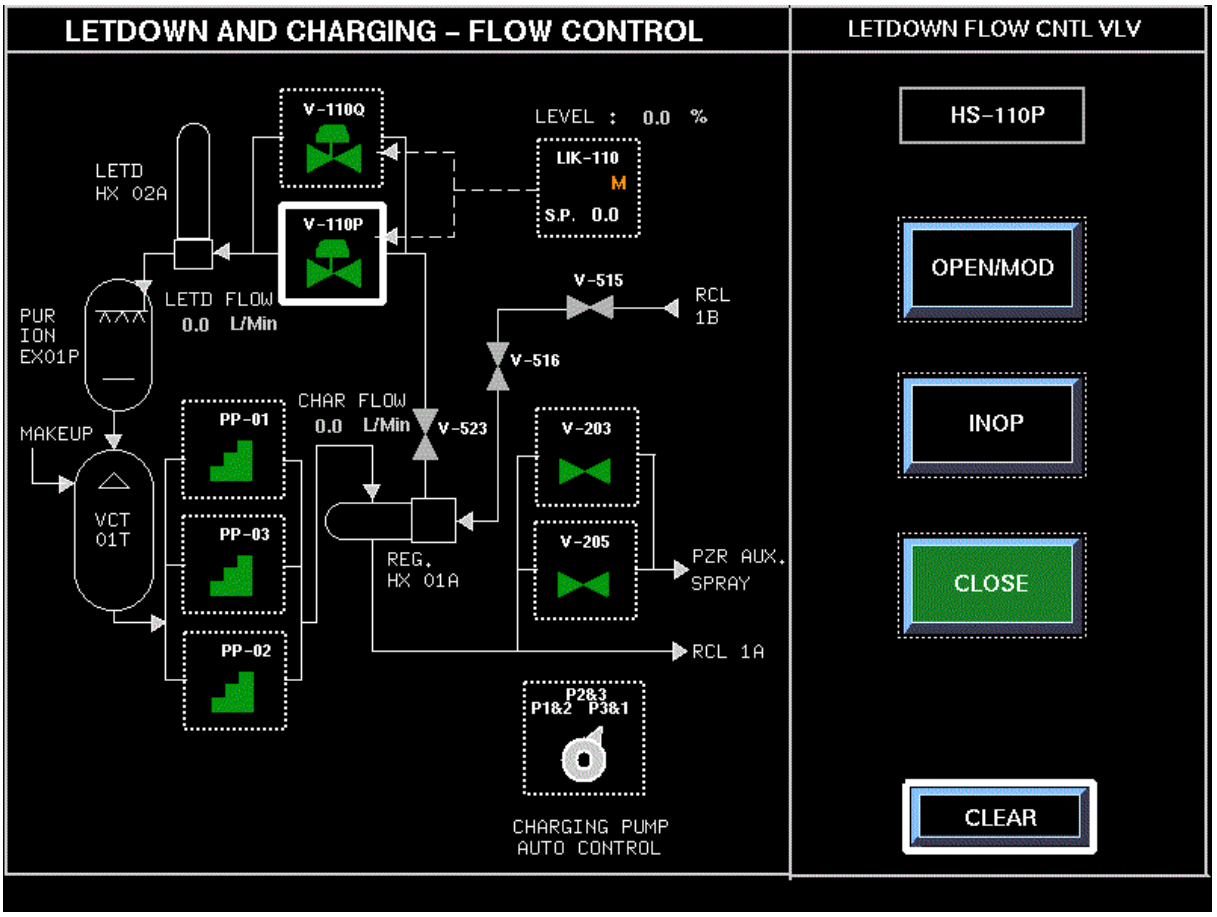
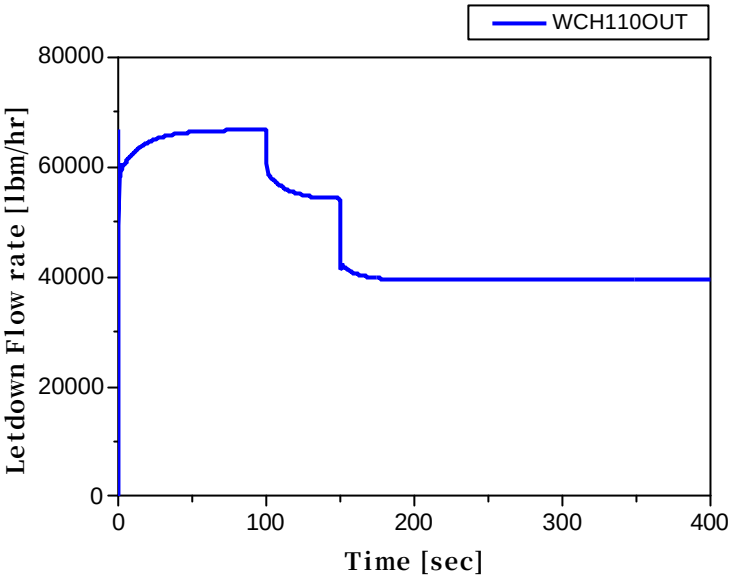
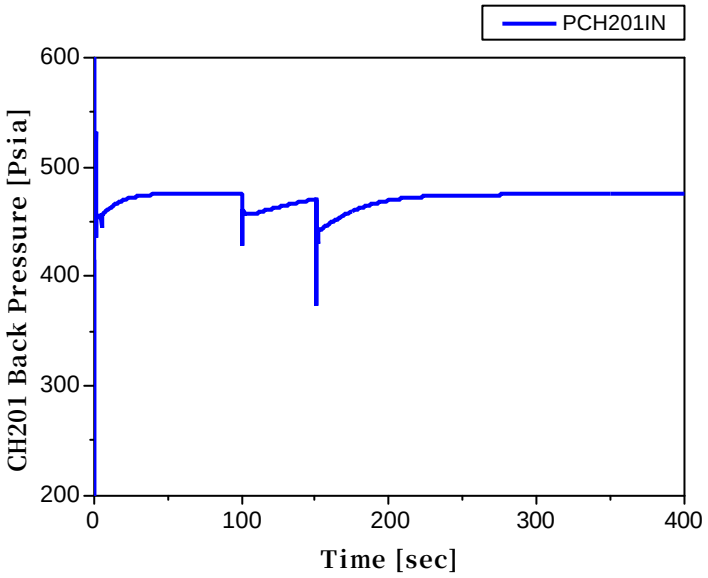


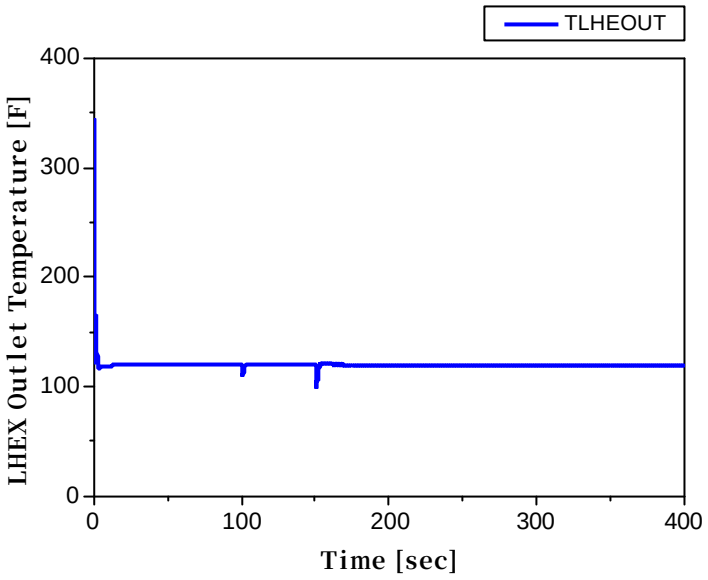
그림 4. 소프트제어계통 화면의 예



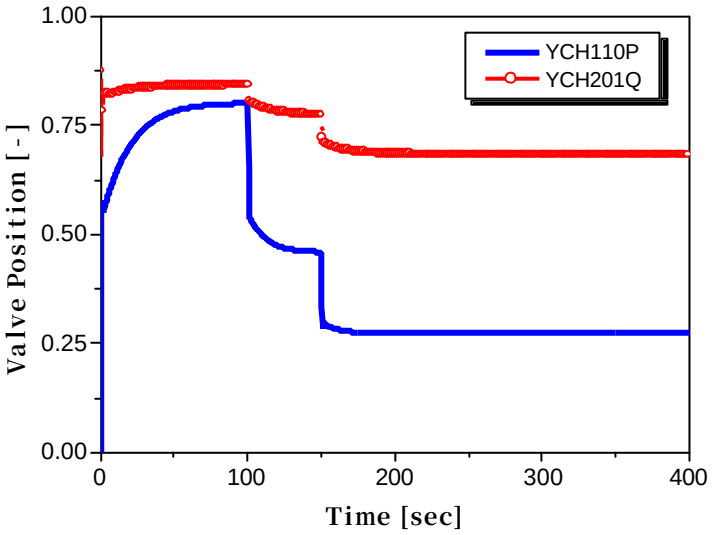
(가) 유출유량 조절밸브의 후단 유량



(나) 배압조절 밸브의 전단 압력



(다) 유출 열교환기의 후단 온도



(라) 유출유량 조절밸브 및 배압 조절밸브의 개도

그림 5. 화학 및 체적제어 계통 모의 결과의 예