

## Compact Nuclear Simulator 성능향상 기술개발

### Equipment and Performance Upgrade of Compact Nuclear Simulator

박 재창, 권 기준, 이 동영, 황 인구, 박 원만, 차 경호, 송 순자, 이 정운  
한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

김 봉건, 김 현장  
한국전력공사 원자력연수원  
울산광역시 울주군 서생면 신암리 991

#### 요 약

한국원자력연구소 원자력연수원이 보유한 시뮬레이터가 사용시간과 내구연한이 지남 따라 장비의 노후화, 소모품 확보 및 비싼 가격, 오래된 장비를 다룰 경험 있는 인력이 제한되는 문제점이 발생되어 원자력 관련 교육 및 연구에 활용하지 못하고 있다. 따라서 본 연구는 이들 문제점을 해결하기 위하여 시뮬레이터를 구성하고 있는 구성 부품을 교체하기 위한 기술적 설계를 하고, 구성품을 교체하여 시뮬레이터의 기능을 살리는 것이다. 구성품을 교체하고 시험한 결과 기능을 상실하기 이전의 상태와 같은 시뮬레이션 결과가 나타났으며, 추가된 그래픽은 교육에 효과적이며, 정비보수가 수월하였다. 연구의 결과물은 국내 원자력발전소 운전원 훈련을 위하여 도입된 원전 시뮬레이터의 노후화 및 부품의 품질로 기능이 상실된 시뮬레이터의 문제점을 해결하는데 기술적 지침이 된다는 점에서 의의가 크다고 할 수 있다.

#### Abstract

The simulator at Nuclear Training Center in KAERI became old and has not been used effectively for nuclear-related training and researches due to the problems such as aging of the equipment, difficulties in obtaining consumables and their high cost, and less personnel available who can handle the old equipment. To solve the problems, this study was performed for recovering the functions of the simulator through the technical design and replacement of components with new ones. As results of this study, our test after the replacement showed the same simulation status as the previous one, and new graphic displays added to the simulator was effective for the training and easy for maintenance. This study is meaningful as demonstrating the way of upgrading nuclear training simulators that lost their functioning due to the obsolescence of simulators and the unavailability of components.

## I. 서론

국내 전력 수요의 증가로 원자력발전소 건설은 계속되고 있다. 따라서 운전원 훈련을 위한 원전 시뮬레이터를 원전 설계 회사로부터 도입하여 원자력발전소 및 원자력 산업체 종사자들에게 교육 훈련용 또는 연구용으로 이용하고 있다[1][2]. 원자력연구소는 소원 교육과 연구용으로 2대의 시뮬레이터를 보유하고 있다.

그러나 이들 시뮬레이터는 사용시간과 내구연한이 지남에 따라 ①장비의 노후화, ②소모품 확보가 어렵고, 비싸다, ③오래된 장비를 다룰 경험 있는 인력이 제한되는 문제점이 있다. 이런 문제로 소원 교육용 시뮬레이터가 기능을 상실하여 원자력관련 교육에 활용하지 못하고 있다.

본 연구에서는 시뮬레이터의 기능을 살리기 위한 Compact Nuclear Simulator (CNS)의 시스템을 분석하고[3], 시뮬레이션 코드의 이식 방법을 검토하였으며, 인터페이스 시스템을 구현하기 위한 기술적 설계의 개념을 확정하였다. 그리고 그래픽은 할덴에서 개발한 피카소(Picasso)라는 툴을 이용하였다.

기술적 검토를 바탕으로 Micro-VAX II에서 구동되던 시뮬레이션 코드와 시뮬레이션 코드 구동을 위한 감독자 프로그램을 HP 워크스테이션으로 이식하고, HP와 운전원 조작 패널간 인터페이스 시스템은 PLC를 이용하여 CNS 시스템을 Fig. 1과 같이 구축하고, PLC 로직 프로그램을 작성하였다. 또한 교육생이 원자력발전소 계통 및 운전상태를 이해하기 쉽도록 계통도와 운전에 필요한 변수를 그래픽으로 처리하여 제공하도록 그래픽 시스템을 설계하고, 그래픽 작업을 하였다.

성능향상을 위한 시뮬레이터 시스템을 구성하고 성능 시험을 수행하였다. 성능 시험은 소프트웨어, 인터페이스 시스템 그리고 그래픽 시스템이 설계한대로 동작되는지를 실험하였으며, 최종적으로 원전의 종합운전 절차서에 따라 상온정지상태에서 100% 전 출력까지 시뮬레이션 운전을 하였고, 비상운전 운전하였다. 그 결과는 시뮬레이터 기능 상실 이전의 상태와 같은 결과를 얻었으며 실제 원자력발전소 특성과 유사하였다.

## II. 시뮬레이터 시스템 분석

### 2.1 소프트웨어

CNS 소프트웨어는 우선 순위에 따라 실시간 프로그램과 background 프로그램으로 나눌 수 있고, 실시간 프로그램은 고정된 우선 순위를 가지며, background 프로그램은 시분할 시스템에 연결되어 변하는 우선 순위를 갖는다. 동적 계통모의화 프로그램은 실시간 프로그램이며, 데이터 프로그램은 background 프로그램이다.

CNS 소프트웨어에는 계통모의화 프로그램, 감독자 프로그램으로 나누어지며, 모의화 소프트웨어는 기능에 따라 초기화 부분, 사용자 인터페이스 부분, 실시간 실현부분, 계통모의화 부분 및 패널구동 부분으로 나누어진다. 계통모의화 부분은 정적프로그램과 동적프로그램으로 나누어지고, 정적프로그램은 다시 초기화 루틴과 indata 파일로 나누어지며, 정적 프로그램은 계통별 하위 모듈로 구분되어 있다. 감독자 프로그램 부분은 backtrack, replay, snapshot, display service 그리고 계통모의화 값 표시등 강사 조작반에 관련된 역할을 하는 소프트웨어이다. 초기화 부분에서는 패널 초기화, 계통모의화 변수의 초기값 부여, 감독자 프로그램 초기화등 다른 부분의 소프트웨어를 초기화한다.

전체 가압경수로 계통은 원자로 냉각수 계통을 포함하는 SMABRE(SMALL BREak) code, 원자로용기, 가압기 압력 및 수위 제어, 증기발생기 수위제어, 화학 및 체적제어 계통, 보조계통, 주 증기계통, 터빈계통, 전기계통, 급수 및 복수계통 그리고 원자로 보호계통으로 구분되어 있다.

## 2.2 하드웨어

인터페이스카드는 운전 조작패널상의 아날로그나 디지털계기 및 그래픽 디스플레이 시스템 등에 정보를 전달하거나, 패널상의 각종 스위치들의 정보를 컴퓨터로 읽어 들이도록 하는 중간 역할을 하는 시스템이다.

컴퓨터 인터페이스 카드와 정보를 주고받는 인터페이스 카드를 기능에 따라 분류하면 푸쉬버튼의 램프, LED, 경보를 구동하는 디지털 출력, 지시기 구동신호를 발생하는 아날로그 출력, 4-디지트 디스플레이를 구동하는 디지털 디스플레이 그리고 각종 스위치의 상태를 컴퓨터로 전달하는 디지털 입력 등으로 나누어진다. 컴퓨터 인터페이스카드는 A, B, C, D 네 개의 16-비트 포트에 구성되어 있으며 각 포트의 입출력 선택은 소프트웨어로 이루어진다. A 포트의 비트 0-3은 4개의 strobe 신호에, B 포트의 비트 0-7은 출력데이터에, C 포트의 비트 0-15는 입력데이터에 할당되었으며, D 포트는 사용하지 않았다.

디지털 입력 카드는 운전 패널상의 푸쉬버튼, 토글스위치 등의 상태를 컴퓨터로 전달하는 기능을 하며 각 카드는 3개의 16비트 워드로 구성된 전체 48개의 디지털 신호를 컴퓨터로 전송한다.

디지털 출력 카드는 컴퓨터에서 전송된 신호를 패널상의 푸쉬버튼, 경보창, 램프, LED, 구동신호로 변환하는 장치로 각 카드는 6\*8비트의 디지털 신호를 발생한다. 컴퓨터에서 전송된 8비트 어드레스, 8비트 데이터 및 strobe 신호중 UA11-UA15는 카드 어드레스를, UA8-UA10은 EN0-EN7의 local 어드레스를 decoding하기 위해 사용한다. Decoding된 EN0-EN5 신호는 6개의 8비트 출력 레지(latch)(74LS377)를 enable 시키고, active low strobe 신호에 의해 8비트 데이터가 74LS377로 레지되며 ULN-2803을 사용하여 램프 구동 신호로 변환한다.

아날로그 출력신호는 컴퓨터에서 발생한 디지털 신호를 패널상의 지시기용 아날로그 신호로 변환하기 위해 8비트 데이터 레지를 내장한 DAC UP8BC 디지털/아날로그 변환기를 사용하고 각 카드는 16개의 아날로그 출력 채널로 구성되어 있다. 디지털 디스플레이 출력 카드는 4디지트로 BCD 표시기의 구동신호를 발생하며, BCD 디스플레이 레지 및 BCD 코드 변환기를 내장한 HP5082-7300BCD 계수기가 사용되었다.

## 2.3 그래픽 시스템

그래픽 시스템은 3개의 동일한 디스플레이 채널로 구성되어 있고, 각 채널은 1Mbyte의 내부 메모리를 가진 CPU카드, 디스크 제어카드, 그래픽 디스플레이 제어카드 통신 카드, 그리고 19" 컬러 모니터로 이루어져 있고, 또한 3채널이 공유하는 플로피 디스크 드라이브와 하드디스크 드라이브, 하드 카피 유닛으로 되어 있다. 각 디스플레이 채널은 2개의 버스 시스템으로 구성되어 있는데 그중 한 버스는 하드디스크와 통신하기 위한 것이고 다른 하나는 Micro VAX II 컴퓨터와 통신하기 위한 것이다.

모든 그래픽 디스플레이 프로그램은 TURBO PASCAL로 짜여져 있으며, 실행속도를 향상시키고 시스템 내부 하드웨어에 access하기 위한 루틴은 Z-80 어셈블리 언어로 짜서 파

스칼 프로그램에서 호출한다.

### III. 성능 향상을 위한 시스템 설계 및 구성

#### 3.1 하드웨어구성

하드웨어는 시뮬레이터 주컴퓨터로는 HP-UNIX 10.20 운용시스템을 탑재한 HP 사의 C200 workstation을, 그래픽 화면을 처리하기 위한 3대의 x-terminal을 사용하였으며, 또한 PLC는 Q4AR로 구성하였다. 이들 시스템에 설치된 이더넷 인터페이스 모듈을 10BASE2 동축케이블로서 연결하고, TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol) 프로토콜을 사용하여 데이터를 주고받는다. PLC는 AJ71QE71 이더넷 인터페이스 모듈을 사용하고, 상태정보 및 변수 값을 표시하기 위해 MY71 모듈을, 아날로그 계기 구동을 위해 A616DAI, 경보창 및 램프구동을 위해 MY42, 그리고 누름 스위치 및 토글 스위치의 입력을 받아들이기 위해 MX42 모듈을 사용하고 있다.

#### 3.2 프로그램 이식

컴퓨터의 실행용량 때문에 SMABRE코드는 단독으로 KAERI II 컴퓨터에서 수행되고, 슈퍼바이저 프로그램과 SMABRE 코드를 제외한 수학적 모델링 프로그램은 KAERI I 컴퓨터에서 수행되고 있다. 그러나 대체되는 HP Workstation은 실행용량이 충분할 것으로 예상되므로 하나의 Workstation에서 SMABRE 코드를 포함하는 모든 수학적 모델링 프로그램과 슈퍼바이저 프로그램이 실행되도록 하였다.

시뮬레이터 기동시 수행되는 실행 프로그램은 SMABRE를 포함하여 14개의 프로그램이며, 이식되어야 하는 대상 프로그램은 실행 파일을 만들기 위하여 필요한 모든 프로그램과 COMMON Data File(CDF) 작성을 위한 관련 프로그램, 공유메모리 작성과 이용에 관련된 프로그램의 소스프로그램과 각종 데이터 파일을 이식하였다[4][5]. 수학적 모델링 프로그램은 FORTRAN으로 프로그래밍 되어 있으므로 다른 컴퓨터로 옮기더라도 별 다른 조치 없이 컴파일만 다시 하면 된다.

#### 3.3 인터페이스 시스템

주컴퓨터에서 모의화한 변수 값은 운전 제어패널로 전달되고, 운전원의 조작에 의해 변화된 운전 제어패널의 상태는 다시 주컴퓨터로 전달된다. 주컴퓨터와 운전제어 운전 제어패널과의 데이터 교환은 이더넷 환경에서 PLC를 통해서 이루어진다. PLC의 기본 베이스(main base unit)는 sequence 프로그램을 운용하는 CPU, 주컴퓨터와 통신하는 이더넷 인터페이스 모듈, MY42 디지털 출력모듈(24V) 및 MY71 디지털 출력모듈(5V, LED 구동용)이 있다[6][7]. 여기에 제1 확장 베이스(extension base unit)에는 MX42 디지털 입력모듈 및 BCD 계수를 표시하기 위한 MY71 모듈이 설치하고, 또 제2 확장 베이스에는 A616DAI 아날로그 출력 모듈이 설치하여, 60개의 경보 및 밸브상태 정보와 24개의 BCD(Binary Coded Decimal) 변수 값은 6장의 MY71 모듈을 통해, 121개의 아날로그 미터 구동신호는 8장의 A616DAI를 통해, 또한 280여 개의 경보 상태, 펌프상태 및 기타 발전소 상태정보들은 5장의 MY42 모듈을 통해 운전원 제어패널로 전달된다. 그리고 운전원에 의해 조작되는 누름 스위치 및 토글 스위치의 상태 값은 4장의 MX42 모듈을 통해 주컴퓨터로 전달된다. 각 베

이스에는 각각의 전원모듈을 설치하여 전원에 의한 파급 영향을 줄일 수 있도록 설계하였으며, 인터페이스 시스템 개략도는 Fig. 2와 같다.

### 3.4 그래픽 시스템

그래픽 시스템은 피카소(Picasso)/HP-UX 10.2 환경에서 정적(process status) 및 동적(trends) 그래픽 디스플레이를 구현하였다. 3대의 X-터미널이 시뮬레이션 호스트 컴퓨터와 통신하도록(TCP/IP) 연결된다. 사용자 인터페이스 관리시스템(User Interface Management System: UIMS)인 피카소를 이용하여 3개의 피카소 응용이 피카소 엔진에 의해 사용자(피 훈련자, 교육생) 각각의 요구에 대한 그래픽 정보(프로세스 상태, Trending 등의 정적, 동적 그래픽 형태의 정보)를 해당 X-터미널에 표시한다[8][9]. 현재의 그래픽 구현은 기존 디스플레이 페이지 및 발전소 계통에 대한 P&ID 일부가 추가되었다. 그래픽 시스템의 구성을 Fig.3과 같이 하였으며, 수학적 모델과의 데이터 인터페이스는 시뮬레이션 호스트 컴퓨터의 공유기억공간(Shared Memory)을 통해 이루어지도록 C 언어로 구현되었다. 시뮬레이터 사용자는 마우스를 이용하여 각자의 그래픽 디스플레이를 선택하도록 설계되었다.

## IV. 성능시험 평가

### 4.1 시스템 개별 시험

주컴퓨터에 상주하고 있는 감독자 프로그램에는 훈련시작 전 운전 제어반에 설치된 각종 기기의 동작상태 및 인터페이스 장치인 PLC의 기능을 점검할 수 있는 테스트 프로그램이 있다. 이 테스트 프로그램은 디지털 출력, 아날로그 출력, 십진 변수값의 출력을 테스트할 수 있는 출력 테스트 프로그램과 운전제어반의 상태를 연속적으로 읽어들이 수 있는 입력 테스트 프로그램으로 구성되어있다. 현장시험(site acceptance test)의 일환으로 출력 테스트 프로그램을 이용하여 운전 제어반에 설치된 각종 램프, 기록계, LED, 경보창 및 발전소 상태표시창, PLC의 기능 등을 연속적으로 테스트하였으며, 또한 입력 테스트 프로그램을 이용하여 운전제어반의 누름 스위치 및 토글스위치의 동작여부를 테스트하였다

그래픽 인터페이스 개별 시험은 피카소의 그래픽 에디터인 "ged"를 이용하여 추이 페이지(trending page)들을 편집하여 각 디스플레이 페이지의 그래픽 객체의 배치, 라벨, 메뉴버튼, 디스플레이 스케일 등의 기능성을 시험하고 해당 변수들은 피카소의 시뮬레이터(PsSim)를 이용하여 변수값의 범위(range) 및 추이를 검증하였다.

### 4.2 종합 시험 및 검증

CNS가 모의 할 수 있는 범위는 원자력발전소 핵연료 교체가 끝나고 원자로냉각수 충수 및 배기가 완료된 상태부터 전 출력 상태를 포함한 작은 냉각수 유출사고까지 이다. 그래서 종합시험은 원자력발전소 종합운전절차서, 일부 비정상운전절차서 그리고 비상운전절차서(E-0)로 수행하였다. 절차서를 수행하면서 점검해야할 내용을 작성하였다. 주요 내용은 첫째 실시간 시뮬레이션, 둘째 발전소 상태에 따라 발전소 특성과 모의 특성이 차이가 있는지, 셋째 운전에 필요한 정보의 접근이 쉽고, 실시간 제공 여부, 넷째 시뮬레이터 특수기능이 실행이 되는지 등이다.

종합운전 절차서에 의한 시험은 원자로냉각수가 충수되고 배기가 완료된 상태에서 저온정지상태에서 고온정지상태까지 운전, 고온정지에서 고온대기까지 운전, 원자로기동운전, 원자

로 출력운전 그리고 원자로 출력100%까지 운전을 절차서에 따라 각 단계별로 진행하였다. 비정상운전절차서와 비상운전 절차서에 의한 시험은 CNS의 malfunction기능을 이용하여 원자로냉각수계통 압력저하, 충전 유로 비정상, 증기발생기 수위제어고장, 원자로냉각수 상실 사고 등 훈련에 필요한 계통에 고장 및 사고신호를 입력하여 수행하였다.

위의 점검내용을 점검한 결과 실시간 시뮬레이션으로 운전이 진행되었으며, 시뮬레이터의 일부 로직이 실제 발전소와 다르게 되어 있는 프로세스 프로그램의 수정은 있었으나, 특성의 차이는 없었다. 운전에 필요한 정보는 3개의 화면에 정적 및 동적으로 제공되었으며, 필요한 경우 프린트하여 분석할 수도 있었다. 시뮬레이터의 특수 기능인 snapshot기능, backtrack기능, replay기능, malfunction기능을 수행할 수 있었다.

## V. 결론

본 연구는 기능을 상실한 훈련용 시뮬레이터의 기능을 회복 및 성능 향상에 있으며, 성능 향상을 위한 시스템을 구성하고 성능 시험을 수행한 결과 시뮬레이터 기능 상실 이전의 상태와 같은 결과를 얻었으며 실제 원자력발전소 특성과 유사하였다. 과제를 수행하면서 축적된 기술은 국내 원자력발전소 운전원 훈련을 위하여 도입된 원전 시뮬레이터의 노후화 및 부품의 품질로 기능이 상실된 시뮬레이터의 문제점을 해결하는데 기술적 지침이 된다는 점에서 의의가 크다고 할 수 있다. 또한 Micro-VAX II에서 CNS의 모의화 프로그램이 구동되던 것을 HP-UNIX 10.20 운영시스템에서 구동되도록 하였으며, 향후 계속 연구가 진행되면 개인용 컴퓨터(Personal Computer)에 수학적 모델 프로그램을 이식하여 원전 시뮬레이터를 구성할 수 있을 것이다.

## 참고문헌

- [1] USNRC, Nuclear power plant simulators for the operator training, Reg Guide 1, 149, 1981.
- [2] ANSI/ANS-3.5-1985, Nuclear Power Plant Simulators for use in Operator Training, AN S, 1985.
- [3] 함창식외, 교육훈련용 Nuclear Simulator개발, KAERI/RR-734/88,한국에너지연구소, 1988 12.
- [4] HP Student Workbook, Programming with UNIX System Calls, HP, 1991.
- [5] HP, FORTRAN/9000 Reference manual
- [6] Mitsubishi Programmable Controller Q4ARCPU User's Manual, 1996.
- [7] Mitsubishi Programmable Controller QnA Ethernet Interface Module User's Manual, 1997.
- [8] OECD HRP, The Picasso-3 User Interface Management System Reference Manual , Sep. 1996.
- [9] OECD HRP, The Software Bus Communication System Users Guide, Sep. 1996.

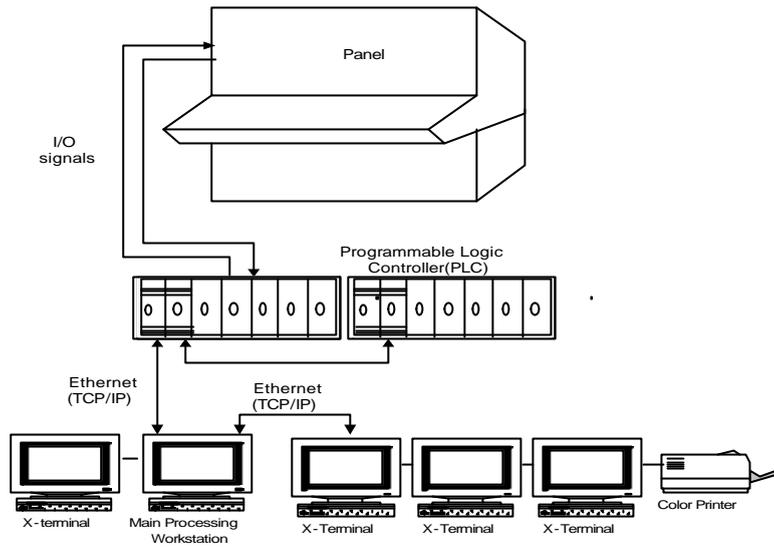


Fig. 1 CNS 시스템 구성도

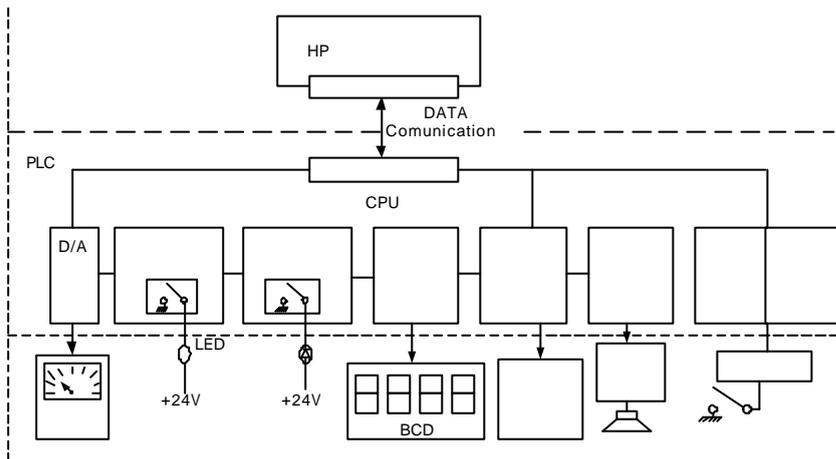


Fig. 2 인터페이스 시스템 개략도

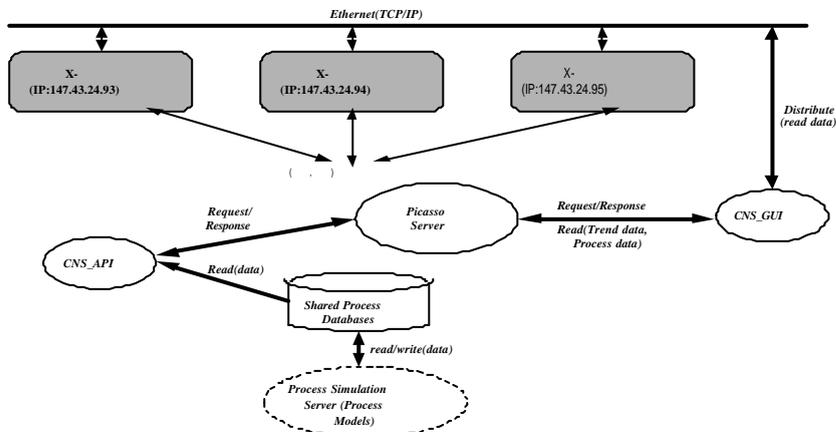


Fig. 3 그래픽 시스템