



계측 제어 계통 검증 및 인간공학 연구용 시뮬레이터 개발과 응용

권 기 춘

한국원자력연구소 계측제어 · 인간공학연구부 책임연구원

국

제원자력기구(IAEA)에서 기술 협력 사업으로 발주한 원전 인간공학 연구용 시뮬레이터 프로젝트를 기술 선진국과의 경쟁을 통하여 성공적으로 수주하고, 연구용 시뮬레이터를 개발하여 브라질 IEN 연구소에 설치하고 관련 인간-기계 연계 기술 개발 도구 및 시뮬레이터 운영 기술을 수출하였다.

또한 동급의 시뮬레이터에 제어 봉 구동 장치 제어 관련 모델링 수 정과 하드웨어 인터페이스 기술을 추가하여 계측 제어 시험 검증이 가능한 시험 검증용 시뮬레이터로 성능 향상시켜 두산중공업 기술연구원에 기술을 이전하여 제어봉 구동 장치 제어 계통 성능 검증에 활용하였다.

나아가서 시뮬레이터 수학적 모델링, 강사 조작반 및 인간-기계 연계를 위한 소프트웨어를 서울대학교 · 조선대학교 · 한국과학기술

원 및 한양대학교 원자력공학과에 제공하여 학생들의 수업, 관련 실험 및 연구에 활용되고 있다. 다음은 이 내용을 정리한 것이다.

서론

원전 운전 요원 훈련용 시뮬레이터는 실제 원전의 제어반과 같은 기능을 수행하는 모의 장치로서 실제 원전에서는 경험하기 어려운 사고에 대한 훈련과 각 단계별로 다양한 운전 상태의 경험 또는 운전이 가능하다.

또한 지나갔던 운전 상황을 반복하여 재현하거나, 현재 상태를 정지 및 천천히 동작시켜 계통의 변화를 이해 또는 분석할 때 상당한 도움을 준다.

나아가서는 원전 운전 요원뿐만 아니라, 원전 · 운영 보수의 감독자 · 연구원이나 규제 기관의 운영 감독 요원 등의 기본 교육에도 활용

할 수 있다.

최근에 와서는 원전의 계측 제어 계통이 점차 고도화되면서 그 기능이 복잡하면서도 다양해지고 있으며, 원전 주제어실에서도 컴퓨터 및 Visual Display Unit(VDU)의 채용으로 인간공학적 적용이 현안으로 등장하고 있다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 계측 제어 계통 개발과 검증, 그리고 인간공학 연구용으로 시뮬레이터를 적극적으로 활용하고 있는 추세이다.

외국 및 국내에서의 사례를 보면 다음과 같다.

프랑스는 EdF(프랑스전력공사)를 중심으로 1980년대 초반부터 동적 Mock-Up을 제작하여 디지털 보호 계통의 기능, 안전성 및 신뢰성을 시험하고 검증한 후에 비로소 디지털 보호 계통을 실제 발전소에 적용하였다.

프랑스는 디지털 보호 및 제어 계

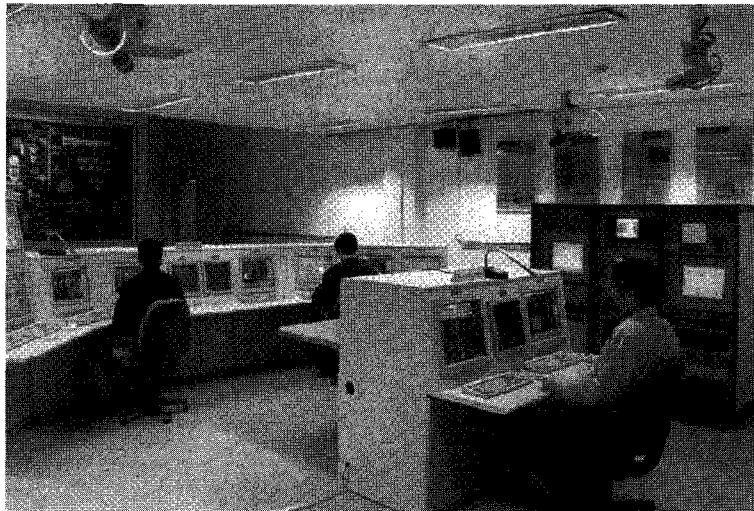
통을 실제 발전소에 적용한 후에 나타난 문제점을 분석하고 인간공학적 개념을 적용하여 디지털 기술 및 운전원 지원 설비 등 신기술의 원전 적용을 시험 및 검증할 수 있는 검증 설비를 N4 주제어실과 연계하여 제작하여 활용하였다.

노르웨이에 있는 OECD 할덴 프로젝트(Halden Reactor Project)에서는 인간-기계 연계와 관련된 여러 연구를 수행하고 있으며, 이러한 인간-기계 연계 계통에 대한 연구 결과는 전규모 시뮬레이터에 연결되어 그 기능이 검증되고 있다.

이 시뮬레이터는 인간공학 연구의 실험적 검증을 주로 수행하기 위해 실제 규모의 모의 원전 주제어실인 HAMMLAB(Halden Man-Machine Research Laboratory)에 설치된 검증 시뮬레이터로 디지털 기술을 적용한 제어 및 보호 모듈은 물론 운전원의 운전과 관련된 운전 지원 계통 등 신기술이 적용된 계통의 기능을 검증하는 데 활용중이다.

미국의 Oak Ridge National Laboratory(ORNL)은 과도 상태 시기기와 운전원의 부담(stress)을 감소시키기 위한 새로운 감독자 제어(supervisory control) 개념을 고안했다.

이러한 새로운 제어 알고리즘과 개념은 실제 원전에 적용되기 전에 원전의 실제적인 환경에서 완벽하-



〈그림 1〉 Integrated Test Facility

게 검증되어야 한다.

따라서 ORNL은 감독자 제어 기법을 연구하고, 개발하고, 검증하기 위한 시험 및 검증 설비를 개발하게 되었다.

국내에서도 계측 제어 시스템 개발시 검증용 시뮬레이터를 개발하여 활용한 사례로 한국원자력연구소에서 Functional Test Facility(FTF)를 개발하여 자동 기동 시스템, 동적 경보 시스템, 경보 원인 추적 시스템, 그리고 사고 진단 시스템의 개발 및 검증에 활용하였다[1].

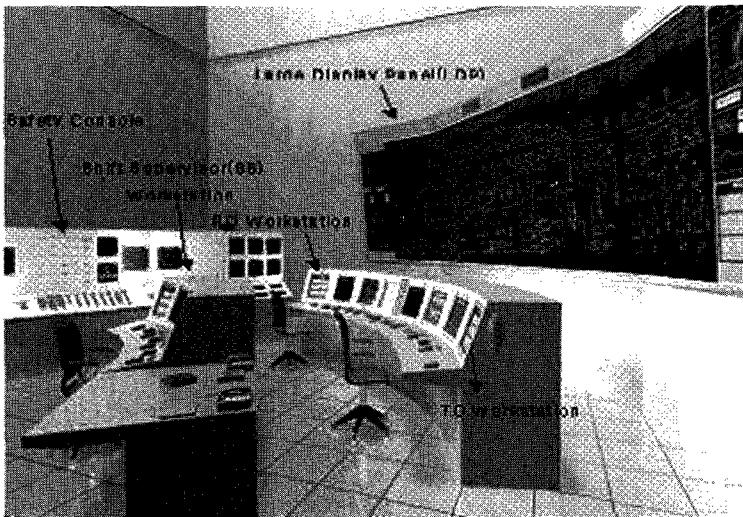
또한 인간공학 연구용 시뮬레이터로 한국원자력연구소에서 Integrated Test Facility(ITF)를 개발하여 인간공학 실험 평가 연구에 활용하고 있다.

ITF는 주실험실·실험 분석실·보조 실험실로 구성되며, 주실험실은 표준형 원전의 전규모 시뮬레이-

터를 포함하여 VDU-기반의 제어반, 일부 지정된 경보창을 갖는 경보 판넬, 대형 화면, 그리고 감독자 제어반으로 구성되어 있으며, 또한 시선 측정 장비(Eye Tracking System), 생체 신호 측정 장비 등과 같은 실험 기기와 연계되어 있다. 〈그림 1〉은 ITF의 주실험실 전경이다.

이와 같은 연구용 시뮬레이터는 훈련용 시뮬레이터와는 달리 운전 파라메터, 경보 이벤트 및 운전원 조작 경로가 자동으로 로깅(Logging) 되며, 각종 실험 자료를 통합하여 분석할 수 있는 실험 자료 종합 분석 장비인 DAEXESS Station이 포함되어 있다.

한국수력원자력(주)에서는 운전원의 부담을 줄여 운전의 신뢰도를 향상시키고, 통합적인 계측 제어 시스템 구조와 상용화된 분산 제어 시스템을 적용하는 신형 경수로



〈그림 2〉 APR1400 주제어실과 시뮬레이터

(APR1400) 첨단 디지털 주제어실을 개발하는 과정에서 전규모 시뮬레이터를 적극적으로 활용하였다.

시뮬레이터로부터 운전 파라메터를 입력으로 받아 각종 워크스테이션, 소프트제어기, 경보 처리 기법, 그리고 전산화 절차서 등의 기능과 성능을 검증하였다.

또한 주제어실 설계가 인지/인간공학적 원리에 잘 맞고 운전원이 발전소의 안전 및 그 외에 다른 목표를 위해 성공적으로 그들의 직무를 수행하도록 해주는지를 평가하는데 활용하였다[2].

〈그림 2〉는 APR1400 주제어실 Prototype와 연결된 시뮬레이터를 보여준다.

브라질 인간공학 연구용 시뮬레이터

국제원자력기구(IAEA)에서 기술

협력 사업으로 발주한 원전 인간공학 연구용 시뮬레이터 프로젝트 (BRA/4/049 TC project)를 기술 선진국과의 경쟁을 통하여 성공적으로 수주하여 동 시뮬레이터를 개발하여 브라질 IEN(Instituto de Engenharia Nuclear) 연구소에 설치하고 관련 인간-기계 연계 기술 개발 도구 및 시뮬레이터 운영 기술을 수출하였다.

이 사업은 2001년 9월 IAEA가 브라질 앙그라 원전의 인간공학 연구용 시뮬레이터 개발을 위해 국제 입찰을 실시한 결과 미국·프랑스·캐나다·스페인·노르웨이·한국 등 6개국에서 응모하였으며, 한국원자력연구소가 제안한 기술 사양 및 가격 등이 가장 우수한 것으로 판명되어 약 30만불에 사업을 수주하였다.

2002년 2월부터 약 1년 동안 수학적 모델링 수정, 첨단 강사 조작

반과 CRT 기반의 그래픽 사용자 인터페이스 기술을 개발하였다.

2003년 2월 초부터 브라질 IEN 연구소에 시뮬레이터를 설치하고(〈그림 3〉 참조) 2주간의 현장 인수 시험을 무사히 마친 다음, 2003년 2월 21일에 공식적으로 시뮬레이터 준공식 행사를 거행하였다.

이날 개최된 준공식에는 브라질 정부의 과기부 장관 및 브라질 원자력 관련 연구 기관의 기관장, IAEA의 기술 담당관인 강기식 박사, 한국원자력연구소의 장인순 소장 및 브라질 주재 김명배 대사가 참석하였으며(〈그림 4〉 참조), 다음날 브라질 현지의 한국 신문에서 준공식 소식을 보도하기도 하였다.

준공식 후 1주일간의 워크숍을 통하여 시뮬레이터 운영 및 가압경수로 운전 절차 등의 기술을 브라질 기술진에게 전수하여 우리나라 원자력 관련 기술의 우수성을 널리 알리는 계기가 되었다.

인간공학 연구용 시뮬레이터는 운전 요원 시뮬레이터와는 달리 제어반이 없으며, 모든 운전원 조작은 그래픽 사용자 인터페이스를 통하여 운전원이 마우스 조작으로 수행하도록 되어 있다.

인간공학 연구를 위하여 필요한 시선 측정 장비나 생체 신호 측정 장비 등과 같은 실험 기기와 쉽게 연계될 수 있도록 인터페이스를 제공해야 하며, 훈련용 시뮬레이터와

는 달리 운전 파라메터, 경보 이벤트 및 운전원 조작 경로가 자동으로 로깅되며, 각종 실험 자료를 통합하여 분석할 수 있는 실험 자료 종합 분석 계통이 추가되어야 한다.

시뮬레이터 하드웨어는 모델링 프로그램을 포함하는 모든 소프트웨어를 실행하는 HP c3700 워크스테이션, 강사 조작반으로 사용하는 Operator console, 그래픽 사용자 인터페이스가 실행되어 운전원 조작반을 대신 하는 6대의 pc, 그리고 대형 정보 화면을 구성하는 프로젝터로 구성되어 그 구조는 <그림 5>와 같으며, 브라질 IEN의 경우 고정된 판넬없이 자유롭게 이동이 가능하도록 설치되어 있다.

시뮬레이터의 소프트웨어는 크게 수학적 모델링 프로그램, 실시간 실행 프로그램 및 강사 조작반 소프트웨어, 그리고 그래픽 사용자 인터페이스로 구성된다.

수학적 모델링 프로그램은 웨스팅하우스 3 loop형 가압경수로를 모의화한 것으로 일차축 증기발생기를 포함하는 원자로 냉각재 계통은 핀란드의 루비사(Lovissa) 원전 시뮬레이터에 채택된 바 있는 SMABRE(SMALL BREak) 코드를 일부 수정하여 사용하였으며, 나머지 노심부터 화학 및 체적 제어 계통, 주증기, 터빈 및 제너레이터, 복수 및 급수 계통 등은 별다른 모델링 개발 도구 없이 직접 개발한



<그림 3> 브라질 IEN에 설치된 시뮬레이터



<그림 4> 시뮬레이터 준공식

것이다.

실시간 실행 프로그램은 수학적 모델링 프로그램을 1초에 5번씩 실행하도록 하여 실시간 시뮬레이션 이 가능하도록 해준다.

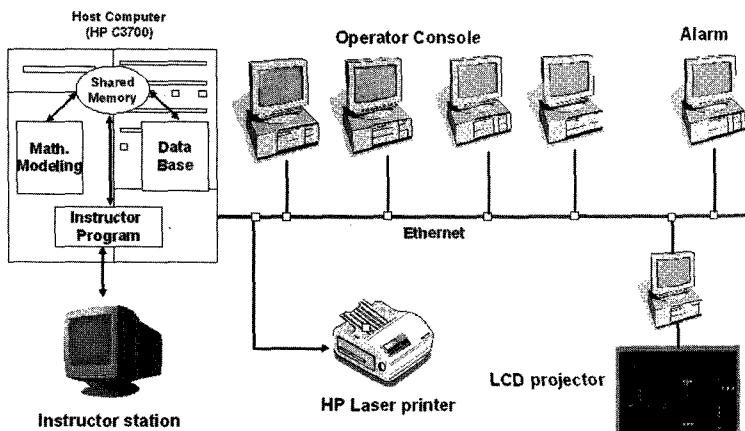
강사조작반 소프트웨어는 시뮬레이터의 다양한 명령을 처리해 주며, 주요 기능은 다음과 같다.

- Run/Freeze: 실시간 시뮬레이션의 시작/일시 정지

- One Step: 수학적 모델링 프로그램을 한번만 실행, 모의화 결과를 천천히 확인

- Snapshot: 현재의 운전 상태를 저장 장치에 저장

- Initial Condition: 초기 조건



〈그림 5〉 인간공학 연구용 시뮬레이터 구조

으로 새로운 운전 상태 제공

○ Back Track: 최대 30분 이전의 과거 운전 상태로 되돌아 가서 모의화 진행

○ Replay: 최대 30분 이전의 과거 운전 상태로 되돌아 가서, 자동

적으로 진행된 모의화 상황을 재생

○ Time Scale: 0.1은 실시간보다 10배 느리게 모의화가 진행되며, 5는 실시간보다 5배 빠르게 모의화가 진행

○ Malfunction: 오동작을 실행하는 기능으로 오동작 번호, 선택 사

항(option) 및 자연 시간 등을 입력

○ Direct Change: 모의화된 변수 값들 임의의 값으로 수정할 수 있는 기능

○ Parameter Log Setup: 최대 100개의 파라미터 값을 1초 이상 임의의 간격으로 저장하는 기능

그래픽 사용자 인터페이스는 강

력한 그래픽 도구인 ILOG View

및 ILOG Chart를 기반으로 하는 그래픽 생성 도구를 자체적으로 개발하였으며, 이 도구의 가장 큰 장점은 그래픽 화면과 시뮬레이션 데이터 베이스의 변수와 쉽게 인터페이스할 수 있다는 것이다.

이 도구를 기반으로 Mimic Display, Overview Display, 창문형 경보 및 텍스트-기반 경보, 그리고 Trend-curve 화면 등을 구성하였다[3]. 〈그림 6〉은 인간-기계 연계를 위한 그래픽 페이지의 예제이다.

현재 인간공학 연구용 시뮬레이터는 브라질 IEN 연구소에서 홀륭하게 운영하고 있다. 최근에는 4대의 pc를 추가하여 확장하였으며, 새로운 경보창, 운전원의 동작(오디오 및 비디오)을 로깅할 수 있는 시스템과 시선 추적 시스템을 추가로 설치하였다 한다.

또한 자체적으로 개발한 신경 회

로망에 근거한 사고 진단 시스템을 시뮬레이터에 연결하여 개발 및 검증을 수행하고 있다.

제어봉 구동 장치 제어 계통 검증 시뮬레이터

이미 개발된 인간공학 연구용 3루프 가압경수로형 시뮬레이터에 2루프 가압경수로형 제어봉 구동 장치 제어 관련 모델링 수정과 하드웨어 인터페이스 기술을 추가하여 계측 제어 시험 검증이 가능한 시험 검증용 시뮬레이터로 성능 향상시켜 두산중공업 기술연구원과 기술 실시 계약을 체결하고 기술을 이전하였다.

이 시험 검증용 시뮬레이터는 전기연구원과 두산중공업이 공동으로 개발한 원자로 제어봉 구동 장치 제어 시스템의 성능과 안전성을 실증하는 데 활용되었으며, 2003년 5월 전기연구원에서 실시된 원자로 제어봉 구동 장치 제어 시스템 국산화 개발 시연회에서도 활용되었다.

제어봉 구동 장치 제어 계통 (Control Rod Control System, CRCS)은 원자력발전소 출력을 제어하는 장치로 지금까지는 외국에서 수입하여 사용하였으나, 두산중공업에서 원자력 중장기 연구 과제로 이 장치를 개발하였다.

이 계통은 원전 기기 등급이 비안전 계통에 속하지만 안전 계통에 준

하는 계통으로 동작 신뢰도가 요구되는 계통이다. 그래서 이 기기의 운전 성능 검증은 매우 엄격히 수행되어야 한다.

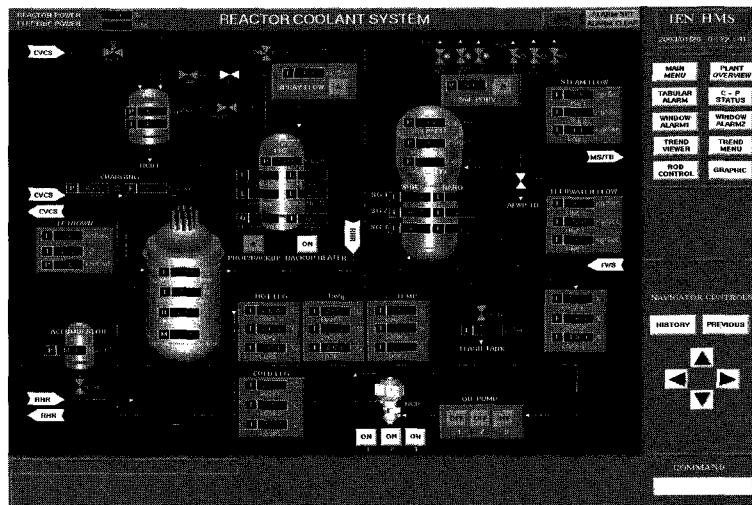
제어봉 구동 장치 제어 계통 성능 검증 장치는 CRCS 개발 초기 단계부터 개발될 계통의 기능 및 성능을 시험/검증하기 위한 설비이다.

개발될 제어봉 구동 장치 제어 계통의 Prototype은 원전의 정상 운전 및 비정상 상태의 신호를 입력으로 받아 적절한 요구 출력 신호를 발생하여 원전의 상태가 정상 상태 또는 운전원이 요구하는 상태로 전환되는지를 확인할 수 있어야 한다.

이와 같은 요구 조건에 부합하는 제어 및 감시 신호를 정상 및 비정상 상태는 물론이고, 사고 상태에서도 제공할 수 있고 다양한 하드웨어 인터페이스 방법을 제공할 수 있는 설비이다.

CRCS 성능 검증 장치의 주요 구성 요소는 네트워크으로 연결되어 있는 주컴퓨터(HP c3700 워크스테이션), 운전원 조작용 컴퓨터, 그레이프 전용 서버 시스템, 그리고 입출력 인터페이스 시스템(Melsec PLC) 등의 하드웨어 설비와 수학적 모델링 소프트웨어, 강사 조작 프로그램, 인터페이스 모듈, 인간-기계 연계 그래픽 디스플레이 모듈, 그리고 제어봉 모형 설비 등이다.

CRCS 성능 검증 장치 인터페이스 시스템은 원전 시뮬레이터에 외



〈그림 6〉 인간-기계 연계를 위한 그래픽 페이지

부 입출력 설비를 장치하여 검증하고자 하는 설비가 필요로 하는 신호를 출력하여 개발한 CRCS의 입력 신호로 사용하고, CRCS 출력 신호를 시뮬레이터의 입력 신호로 사용하므로 실제 원전 CRCS의 운전 환경과 같은 환경에서 검증할 수 있는 소위 Hardware-In-The-Loop 형태의 검증 설비가 되는 것이다.

〈그림 7〉은 제어봉 구동 장치 제어 계통과 검증용 시뮬레이터가 통합되어 기능 시험을 수행하는 장면을 보여 주고 있다[4].

기술 이전하였으며, 이 시뮬레이터는 석사 과정 학생들의 수업 및 관련실험에 활용되고 있다.

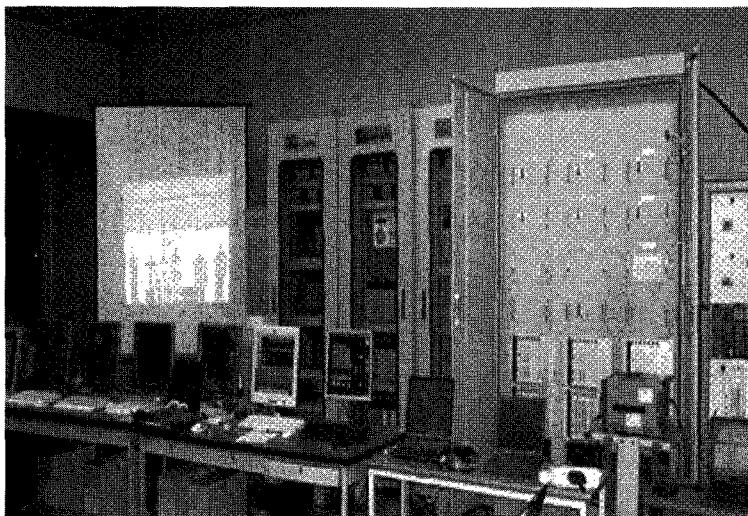
또한 한국과학기술원(KAIST) 원자력 및 양자공학과에도 시뮬레이터 수학적 모델링 소프트웨어를 제공하는 기술 실시 계약을 체결하여 국가 지정 연구실 과제인 「운전원을 포함한 원전 계측 제어 시스템의 정량적 안전성 평가 기술 개발」에 활용하고 있다.

원자력발전소의 감시 및 제어는 원전 계측 제어 시스템과 운전원의 상호 보완적인 협력에 의해 이루어진다.

원전 계측 제어 시스템과 운전원 사이의 이러한 상호 보완적인 협력은 많은 분량의 정보를 처리할 수 있는 원전 계측 제어 시스템의 장점과 논리적인 판단 및 의사 결정을 내릴 수 있다는 운전원의 장점을 적

시뮬레이터의 교육 현장 응용

나아가서 개발된 소형 원전 시뮬레이터의 수학적 모델링 부분을 서울대학교·조선대학교와 한양대학교의 원자력공학과에 무상으로 제공하는 기술 실시 계약을 체결하여



〈그림 7〉 제어봉 구동 장치 제어 계통과 검증용 시뮬레이터

절하게 조화시킨 것이다.

이는 원자력발전소의 감시 및 제어를 수행함에 있어서 원전 계측 제어 시스템과 운전원을 별개의 개체가 아닌 서로 상호 작용(interaction)을 주고받으며 협력하는 하나의 개체로 고려해야 함을 의미하는 것이기도 하다.

이 과제에서는 각종 분석을 통해 이들에 대한 정량적인 안전성 평가 방법을 개발하는 것이다.

개발된 방법을 실제 발전소에 적용하여 검증하면 좋으나, 이러한 실험 또는 연구가 정상 가동을 최대 목표로 하는 실제 원전에서 행해진다는 것은 시간적·경제적으로 매우 어려운 일이다.

따라서 이런 경우에 시뮬레이터를 활용하는 것이 가장 효과적이며, KAIST에서는 평가 방법 개발 및 검증에 제공한 시뮬레이터를 적극

활용하고 있다.

KAIST에서는 제공된 수학적 모델링 프로그램을 기본으로 〈그림 8〉과 같이 네트워크으로 연결된 5대의 PC에서 운전원이 조작할 수 있는 그래픽 사용자 인터페이스를 추가하여 고정된 캐비넷에 설치하여 실제 원전의 주제어실과 유사한 환경을 만들어 연구에 활용하고 있다.

■ 시뮬레이터 관련 연구 실적

이와 같은 업적을 달성하기까지 1980년 한국원자력연구소 입소 이후 24년간 원자력 계측 제어 분야에서 근무하여 왔으며, 특히 교육 훈련 및 연구용 시뮬레이터 분야에서 많은 연구 실적을 달성하였다.

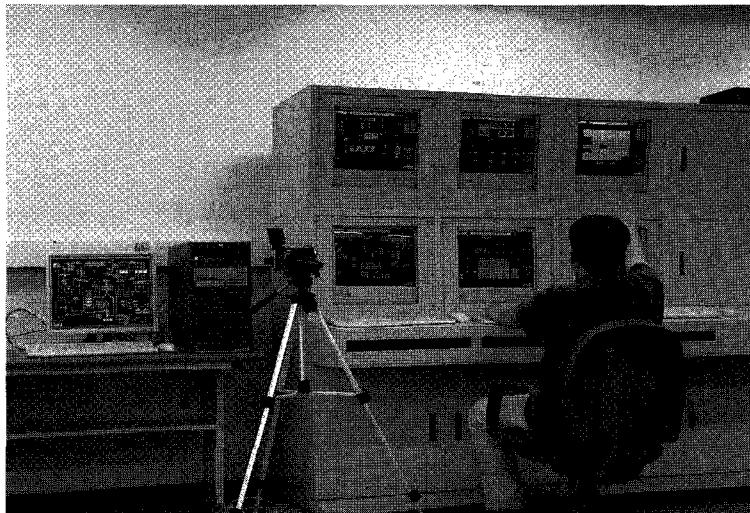
1981년부터 약 2년간 미국에 체재하면서 미국의 시뮬레이터 개발

전문 기업인 Singer Link Div.와 공동으로 개발한 삼천포 화력 발전소 운전 요원 훈련용 시뮬레이터 개발 프로젝트에 참여하여 화력 발전소 시뮬레이터의 핵심 부분인 보일러를 포함한 일차 계통 수학적 모델링 업무를 수행하였다.

당시 현장에서 수행된 현장 인수 시험(Site Acceptance Test) 시 Singer Link Div.의 기술진 없이 기술을 전수받은 순수 국내 기술진만으로 인수 시험을 성공적으로 마무리하여 우리의 기술력을 인정받은 바 있다.

이 때 축적한 기술력을 바탕으로 1987년부터 약 1.5년간 스웨덴에 체재하면서 현재 한국원자력연구소 연수원에서 교육 훈련에 활용되고 있는 소형 원전 시뮬레이터(Compact Nuclear Simulator)를 스웨덴 Studsvik 연구소와 공동으로 개발하는 데 주역으로 참여하여 성공적으로 시뮬레이터 개발 업무를 수행하였다.

1994년부터 3년간은 원자력 연구 개발 중장기 사업으로 이 소형 원전 시뮬레이터의 수학적 모델링 부분을 기반으로 실시간 실행 소프트웨어 및 강사 조작용 소프트웨어를 기반으로 하드웨어 인터페이스 기술을 접목하여 원전 계측 제어 시험 검증 설비를 개발하여 원전 자동 기동 시스템, 원전 고장 진단 시스템, 경보 원인 추적 시스템 및 동적



〈그림 8〉 KAIST에 설치된 연구용 시뮬레이터

경보 시스템 개발 및 검증에 활용하였다.

또한 1997년부터 3년간은 연수원의 소형 원전 시뮬레이터를 순수한 국내 기술로 인터페이스 하드웨어 및 주전산기 교체와 그에 따른 소프트웨어 변경 업무를 성공적으로 완수하였다.

결론

원전 인간공학 연구용 및 계측제어 계통 시험·검증 설비로 활용되는 시뮬레이터는 기술적으로 완전 국산화가 달성되었으며, 앞으로 국내 소요분은 전량 국내 기술로 공급이 가능하다.

이와 같은 연구용 또는 시험·검증용 시뮬레이터는 한 호기당 수억 ~수십억에 상당하므로 엄청난 외화 절감 효과가 있다.

국산 수요뿐만 아니라 가격 경쟁력을 갖출 경우 수출도 가능하며, 현재도 IAEA를 통한 가압중수로(CANDU) 시뮬레이터의 수출 가능성을 모색하고 있다.

이러한 원자력 기술 수출의 의의는 우리가 개발한 원자력 기술 성과를 공인된 국제기구에서 인정받음으로써 향후 우리 기술의 해외 진출의 전기를 마련했을 뿐만 아니라, 남미 및 동구권을 비롯한 타개도국에 원자력 기술을 수출할 수 있는 기반을 조성하였다.

그리고 원자력 선진국과의 공정한 경쟁을 통하여 국제원자력기구의 기술 협력 사업을 수주한 것은 이를 통해 우리나라가 세계 원자력 5대 강국(G5)으로 자리 매김하는 기틀을 다렸다고 볼 수 있다.

끝으로 원자력기술상을 수상하면서 받은 상금을 원자력연구소에서

홍보용으로 발행하는 격월간 잡지인 <원우>지를 통한 불우 이웃돕기 성금과 카이스트(KAIST) 발전 기금으로 쓰게 되어 개인적으로는 큰 보람이 되었다고 생각한다.

마지막으로 수상에 도움을 준 원자력산업회의 관계자 여러분과 함께 연구하고 좋은 연구 결과를 낼 수 있도록 도와준 동료들에게 감사의 말씀 드린다. ☺

[참고 문헌]

[1] Kee-Choon Kwon, et al., "The Real-Time Functional Test facility for Advanced Instrumentation and Control in NPPs," IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol.46, No.2, April 1999.

[2] 이정운 외, "주제어설과 인간공학," 전기의 세계, Vol.52, No.9, pp.56~64, 2003. 9.

[3] 권기춘 외, "Development of the Human-System Interface Laboratory Simulator," 제2회 원자력학회-전기학회 계측제어 기술 Workshop, 서울교육문화회관, 2002. 11.

[4] 육심균 외, "원자력 제어봉 구동장치 제어기기 검증에 관한 연구," 제3회 원자력학회-전기학회 계측제어기술 Workshop, 창원호텔, 2003. 11