

□ 기술해설 □

실시간 모의제어 시스템(Simulator) 국산화 개발

- 발전소 운전원 훈련용을 중심으로 -

성균관대학교 이 칠 기*

1. 서 론	3.1 개발 주요 과정
2. 개발 배경 및 개발 범위	3.2 개발 환경
2.1 국산화 개발 배경	4. 실시간 시뮬레이션 구현 기술
2.2 시뮬레이터의 구성 및 기능	4.1 컴퓨터 기술
2.3 개발 목표 및 범위	4.2 하드웨어 기술
3. 개발 과정 및 환경	5. 결 론

1. 서 론

일반적으로 시뮬레이션이라 함은 축소모형이나 수학적 모델을 이용한 부분적 모의 실험을 일컬어 왔으나 전자공학과 컴퓨터 과학의 발달로 실제 시스템과의 차이를 느낄 수 없을 만큼 광범위하고도 정교한 상황까지 구현 범위를 넓혀가고 있다. 특히 비행기와 같이 제어장치가 딸린 시스템에 대한 시뮬레이션은 사람과 모델 사이에 각종 계기와 제어기를 통한 상호 반응이 중요한 요소인므로 수식이나 컴퓨터 화면만으로는 많은 한계를 느끼게 되어 사람과 모델 사이의 상호 반응이 I/O 인터페이스를 통해 컴퓨터에 연결되는 시뮬레이터가 등장하였다. 시뮬레이터는 범위에 따라 축소형(Compact Simulator)과 완전형(Full Scope Simulator)으로 나뉘는데 축소형은 기본 동작 원리의 교육 등에 쓰이며 실제 제어 훈련용으로는 완전형 가운데서도 실제 대상시스템과 외관 및 성능이 차이가 없는 완전 복제형(Replica Type)이

훈련효과면에서 뛰어난 것으로 밝혀져 보편화되어 있다.

2. 개발 배경 및 개발 범위

고도의 숙련된 기술을 갖추어야 하는 항공기 조종사나 발전소 운전원들이 실제상황에서 경험할 수 있는 상황이란 제한적일 수밖에 없으며 안전하고 효율적인 시뮬레이터를 통한 반복 훈련, 평가 및 분석을 국내에서도 이미 여러 기관 및 회사에서 실시해오고 있으며 적용 대상도 점차 확대되는 추세이다.

2.1 국산화 개발배경

공군과 대한항공, 아시아나 항공에서 운용중인 비행 시뮬레이터 보다는 일반인에게 상대적으로 덜 알려진 발전소 운전원 훈련용 시뮬레이터를 한국전력공사에서는 이미 1979년부터 운영하여 왔다. 그러나 해외에서 일괄도입(turn-key) 함으로 인하여 발생하는 유지보수 및 성능개선시 등의 문제점을 근본적으로 해결하기 위해 1994년 초에 한국전력공사 기술연구원, 삼

*비회원

성전자 그리고 미국의 S3 Technologies사의 연구원들이 원자력 및 화력발전소용 시뮬레이터의 공동 개발에 착수하였다.

대상시스템에 대한 정확한 이해와 고도의 소프트웨어기술을 요하는 시뮬레이터 개발을 위해 발전소 전문 인력과 소프트웨어 전문 인력이 한팀을 이루어 발전소 주제어반(main control room)의 모든 기능을 실시간으로 시뮬레이션 하는 시스템을 개발중이다[1].

2.2 시뮬레이터의 구성 및 기능

발전소 운전원 훈련용 시뮬레이터는 실제 주 제어반과 똑같이 구현된 모의제어반과 운전원에게 각종 훈련상황을 부여하고 훈련결과를 분석하는 강사조작반(Instructor Station), 그리고 컴퓨터실로 구성된다.

실제 발전소의 주제어반은 그림 1에서 보듯 주듯이 원자로나 보일러 등 발전계통과 연결되지만 모의제어반의 모든 계장제어 장치는 시뮬레이션 컴퓨터(이하 컴퓨터로 약칭)로 연결되며 컴퓨터는 발전계통 모델을 수행시킨 후 결과를 다시 모의제어반으로 보낸다. 강사는 강사조작반을 통하여 임의의 상황을 모의제어반에 나타나게 하고, 운전원은 주어진 상황에 대처해야 하는데 운전원의 대처 상황은 모두 컴퓨터에 기록되며 이 기록은 추후 평가자료로 쓰인다.

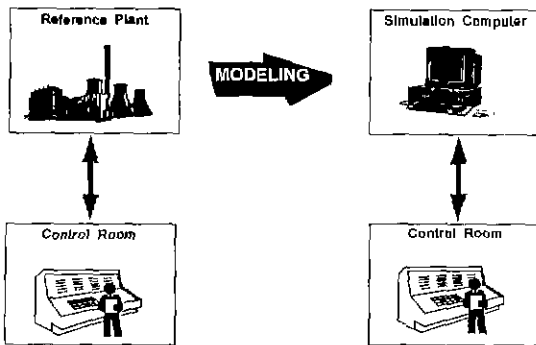


그림 1 시뮬레이터의 개념도

임의의 상황에는 정상 운전 및 비정상 운전을 비롯 각종 설비의 성능 저하, 고장 등으로 인

한 비상사태까지도 포함되며 이러한 상황 부여 및 결과 분석을 위한 주요 기능으로는 표 1에 정리되어 있는 초기조건(initial condition) 설정, 이상(malfunction), 고속/저속(fast/slow) 시간, 역추적(backtrack), 재현(replay), 동결(freeze) 등이 포함된다[2, 3].

표 1 시뮬레이터의 주요 기능

initial condition	: 실시간 시뮬레이션 시작조건
backtrack	: 어느 이전 시간으로 되돌아 감
fast/slow time	: 실시간 대비 1/10~10 배의 속도
malfunction	: 발전소 부속장비의 고장 및 성능저하
replay	: 동일한 시뮬레이션 환경 재생
override	: 모델 및 계기의 데이터 수정
snapshot	: 어느 순간의 환경을 저장
freeze	: 시뮬레이션의 의도적 정지

2.3 개발 목표 및 범위

개발 대상시스템인 원자력 발전소(영광 3, 4 호기, 고리 2 호기)와 화력발전소(보령 3, 4 호기)의 모든 계통들을 모델링하여 정상 및 비정상 운전상태 등을 시뮬레이션하기 위한 완전복제형 시뮬레이터 개발을 목표로 하였으며 국제적으로 널리 적용되고 있는 ANSI/ANS-3.5 [3] 기준을 충족시키는 실시간 기능을 구현하기 위한 모델링 및 시뮬레이션 기술을 95% 이상의 국산화를 목표로 진행중이다. 아울러 주 제어반의 미터, 스위치, 정보기, 제어용 컴퓨터 등을 포함하는 각종 계기 및 제어기의 동작과 내부구조를 시뮬레이션 목적에 맞게 분석, 개조할 수 있는 기술확보도 포함된다.

3. 개발 과정 및 환경

3.1 개발 주요 과정

시뮬레이터의 개발은 모델구축과 시뮬레이션 수행을 통한 시스템의 검증으로 나눌 수 있는데 모델 구축은 자료수집, 기초설계 및 상세설계를 거치며 검증은 독자검증(Non-Integrated Test) 및 통합연동검증(Integrated Test)으로 나누어 차례로 진행된다.

자료수집 대상은 발전소 구성요소에 대한 도면, 운영절차서, 운전기록 등을 포함하며 기초

설계 단계에서는 수집된 자료들을 바탕으로 1, 2차 계통 및 컴퓨터 시스템을 분석하여 구성요소별 (표 2, 3, 4 참조) 시물레이션 범위 및 기능을 확정하고 시물레이션 Diagram을 도출해 낸 뒤 Configuration Management System이라 불리는 일종의 데이터베이스를 구축한다.

상세설계 단계에서는 기초 설계에서 완성된 구성요소 모델에 실제 데이터를 입력시키어 모델 및 해당 데이터에 대한 보다 세부적인 검증을 수행하면서 최종 데이터베이스를 구축한다. Coding은 Autocode Generator 등을 활용함으로 상세 설계 과정의 일부로 간주된다.

표 2 원자력 발전소 1차 계통 모델

Reactor
Reactor Coolant System
ECCS(Emergency Core Cooling System)
RHRS(Residual Heat Removal System)
Nuclear Instrument System
Reactor Control System
Reactor Protection System
Containment

표 3 원자력 발전소 2차 계통 모델

Main Steam System
Feed Water System
Main Condensate System
Circulating Water System
Main Turbine
Main Generator
Electrical Distribution System
Instrument Air System
Heating & Ventilation
Fire Protection and Detection

표 4 컴퓨터 시스템 관련 모델

Plant Process Computer
Turbine Supervisory System
Core Protection Calculator/
Control Element Assembly Calculator
Inadequate Core Cooling Monitoring System
Radiation Monitoring System
Fire Protection System
Daily Operated Readiness Test
Annunciator System

3.2 개발 환경

시물레이션용 컴퓨터 기종은 대형 호스트 중심에서 Workstation으로 다운사이징 되고 있으며 이러한 경우 UNIX에 실시간 기능들이 추가된 운영체계를 채택하고 있다.

새로운 알고리즘에 대한 분석 등 On-line Process 정도만을 필요로 하는 시물레이션에서는 SIMAN, SLAM, Simscript 등 시물레이션 언어를 주로 사용하고 있으나 실시간 시물레이션의 경우 수행시간의 최적화를 고려하여 Assembler, C, C++ 등이 많이 사용된다[4, 5, 6].

발전소 시물레이터에서는 수식계산은 FORTRAN, 제어계통은 Assembler, 일반 프로그램은 C로 주로 이루어지며 사용자 편의를 강화하기 위해 X-Window환경에서 개발하고 있다.

4. 실시간 시물레이션 구현 기술

4.1 컴퓨터 기술

발전소 시스템과 같은 복잡한 시물레이션에서는 모델의 종류가 표 2, 3, 4에서 나타나듯 작업의 다양함과 방대함으로 인하여 일반 프로그래밍보다는 Modular 프로그래밍, 데이터 함축(abstraction), 작업(task) 분리 등을 포함한 객체지향형 환경이 여러 면에서 유리하다[7, 8].

특히 실시간 환경에서 운용되는 시물레이터에서는 해당 컴퓨터 계산의 정확한 결과를 정확한 시간에 도출해야 하는데 전체적인 컴퓨터 환경은 적절히 동기화된 반독립적 작업(synchronized semi-independent task)들로 구성되며 각 작업의 동작은 Event-Driven Scheduling에 의해 조정된다[6].

운전원 훈련 및 면허시험에 적용되는 발전소 시물레이터에 관한 기준인 ANSI/ANS-3.5에 의해서 시물레이션의 주요 변수별 허용 오차범위를 엄격히 제한하고 있으며 표 5에 나타나듯 안정기간(static period)의 경우 노심 관련 온도, 압력, 출력 등에 대해서는 1%, 증기(steam) 등 유체역학적 부분은 2%를 시물레이터 검증 기준으로 삼고 있다[3]. 표 5에 명시되지 않은 항목에 대해서는 10%를 기준으로 하는 한편 과도기간(transient period)에 대해서는 숙련된 운전원이 실제 시스템과의 차이를 느끼지

못할 만큼 유사하여야 한다.

이러한 기준을 충족시키기 위해서는 Time Based Scheduling에서와 같은 간단한 interrupt service routine만으로는 부족하며 외부의 비동기 event의 우선순위에 따라 현재 수행 중인 작업을 pre-empty 시킬 수 있는 Priority Event Driven Scheduling이 필수적이다. 상호 배제(mutual exclusion)에 관련된 interrupt를 처리하는 기능은 주로 Assembly 언어로 짜여지기 때문에 C언어와의 인터페이스 과정에서 해당 컴파일러에 대한 이해도 필요하다[6].

표 5 주요 변수의 허용오차 범위

1%	온도-평균, 고온, 저온 출력(MWe) 노심 흐름(feed flow) 노심 냉각시스템 압력 증기발생기 압력
2%	증기발생기 유체 흐름(feed flow) 노심 냉각시스템 유체 흐름 충전 흐름(charging flow) 증기 흐름 터빈 1단 압력

4.2 하드웨어 기술

시뮬레이터의 하드웨어 부문은 모의제어반에 부착된 각종 계기, 제어기 및 이를 컴퓨터로 연결하는, 대략 20,000에 달하는 신호점을 처리하는 입출력 제어 시스템을 포함하며 각종 기기의 특성을 분석하여 이것들을 시뮬레이션 목적에 맞게 수정, 설계할 수 있는 능력이 관건이다. 실제 발전소에서와는 달리 시뮬레이터에서는 모의제어반의 기기들을 컴퓨터로 연결시키기 위해서 마이크로 프로세서가 내장된 지능형 입출력 제어기가 반드시 필요하다. 이러한 제어기는 모든 신호를 실시간으로 처리하고 신호검증 및 시뮬레이션 컴퓨터와의 인터페이스를 단순화시킴으로써 컴퓨터의 오버헤드(overhead)를 줄여주는데 신호의 변환, 즉 아날로그와 디지털 신호간의 상호변환 기능을 포함한다. 일반적으로 CPI, VMIC, DIGI-3 등의 제품이 통용되고 있으며 하드웨어 기술자들은 기기 및 소요 전력 등을 감안하여 기기의 신호들을 모

듈별로 묶은 후 상세 배선 설계도까지 작성해야 한다. 대상 시스템 가운데 소프트웨어로 구현하기 매우 어렵거나 소프트웨어 구현시 처리 시간 등이 시뮬레이션의 실시간 범위를 벗어나는 경우는 주요 제어 부분에 실제 제어기를 사용하는 Stimulation 방법도 병행되고 있다[9, 10].

5. 결 론

이번 발전소 운전원 훈련용 시뮬레이터 국산화 개발을 통해 축적된 기술력을 바탕으로 기존 발전소 가운데 시뮬레이터가 설치되지 않은 곳이나 향후 건설되는 발전소에 대한 시뮬레이터 공급이 용이해지며, 적용 범위를 훈련용에서 신규 개발에 적용할 기술용(engineering simulator)으로 확대할 수 있어 차세대 원자로 설계 시 이에 대한 안정성 및 경제성 제고에도 일익을 담당하리라 기대한다. 발전소 외에도 제어과정이 중요시되는 첨단 군사장비 및 화학공정 분야 등에도 본격적인 완전복제형 시뮬레이터를 우리 기술로 개발 활용할 경우, 기술형 시뮬레이터에서 중요한 요소의 하나인 가시화(visualization) 등 공통분야에서 시너지 효과가 기대된다[11, 12]. 또한 현재의 교육 여건하에서 실습시설이 충분치 못한 대학, 전문대학의 전기, 전자, 컴퓨터, 제어 및 원자력 관련 학과의 실습용으로는 축소형 시뮬레이터가 가까운 시일 내에 널리 보급될 수 있을 것이다. 끝으로 본 논문의 작성에 많은 협조를 해주신 한국전력공사와 삼성전자 그리고 개발에 열중하고 있는 양사의 연구원들에게 감사를 드린다.

참고문헌

- [1] 이철연, 이철기 외, 발전소 운전원 훈련용 모의제어반 국산화 개발 적용, 한전기술연구원, 1994.
- [2] 김성일, 원자력 발전소 운전원 훈련용 시뮬레이터 운영, 제2회 모의훈련체계 세미나 및 전시회, pp. 229-235, 1994.
- [3] American Nuclear Society Standard Committee, "ANSI/ANS-3.5:Nuclear Power Plant Simulators for use in Operator

Training and Examination," ANS, 1994.

- [4] Crawford, A. B. and Bauer, C. K., "Simulation Study Aids Halon Replacement Effort for Combat Aircraft," Simulation, Vol. 63, No. 5, pp. 283-291.
- [5] Borden, A. and Hooff, J., "Evaluation of a Classification Algorithm by Simulaton," Simulation, Vol. 63, No. 5, pp. 292-294.
- [6] Auslander, D. M. and Tham, C. A., Real-Time Software for Control, Prentice Hall, 1990.
- [7] Kim, T. G., Lee, C., Christensen, E. R., and Zeigler, B. P., "System Entity Structuring and Model Based Management," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 20, No. 5, 1990.
- [8] Zeigler, B. P., Object-Oriented Simulation with Hierarchical, Modular Models, Academic Press, 1990.
- [9] Starland, R. C., "Simulation Versus Stimulation," XI Annual Simulator Conf., Vol. 26, No. 3, pp. 15-17, 1994.
- [10] Yin, M. S., "Integration of Fisher-Porter Micro-DCI Supervisor-PC Systems," XI Annual Simulator Conf., Vol. 26, No. 3, pp. 33-35, 1994.
- [11] Oudot, G., "Visualization Systems for Power Plant Simulator," XI Annual Simulator Conf., Vol. 26, No. 3, pp. 138-144, 1994.
- [12] 최철일, 김주일, 윤석준, 시뮬레이션 창밖세계 실시간 처리에 관한 연구, 제2회 모의훈련체계 세미나 및 전시회, pp. 25-49, 1994.

이 철 기



1980 성균관대학교 전자공학과 졸업
 1979~1983 한국 방송공사 근무
 1985 Arizona State University 전기 및 컴퓨터 공학과 석사
 1990 University of Arizona 전기 및 컴퓨터 공학과 박사
 1990~1995 삼성전자 수석연구원
 1995~현재 성균관대학교 제어계측 공학과 조교수
 관심분야: 컴퓨터 시뮬레이션, 객체지형 모델링, 공장 자동화, 전문가 시스템