

발전소 시뮬레이터 기술동향 및 국내 기술자립 계획

○신 영철
한전 기술연구원

이 용관
한전 기술연구원

The Status of Power Plant Simulation Technology and
KEPCO's Plan for Self-Reliance of the Technology

Yeong-Cheol Shin
KEPCO Research Center

Yongkwan-Lee
KEPCO Research Center

ABSTRACT

KEPCO Research Center is carrying out a simulator(full scope replica type) development project for two nuclear power plants(Kori-2, Younggwang-3,4) and one fossil power plant(Poryong-3,4). In this project, we aim not only the installation of high performance simulators at the power plant sites but also the realization of self reliance of power plant simulation technology in Korea. In the course of preparing procurement specification for the 3 simulators, the present status of power plant simulation technology has been surveyed and is presented in this paper.

The fidelity of simulation and the automation of simulation model production has been greatly improved due to the ever increasing computing power of today's workstations. The need and importance of the application of high fidelity simulators to the operator training is refocused since the accident at TMI Nuclear Power Plant, U.S.A.

I 서론

발전소 특히 원자력발전소 운전의 안전성과 신뢰성을 운전원 훈련을 통해 확보, 유지하기 위해 시뮬레이터를 사용하는 것은 현재 세계적으로 일반화되어 있다. 발전소 운전원의 시뮬레이터(전범위 복제: Full Scope Replica) 훈련이 필요한 것은 발전소 안전성과 신뢰성확보를 위해서는 발전소 자동화등의 설계 측면의 개선을 통한 방안 모색도 필요하나, 발전소를 운전, 유지하는 인력의 대처 능력의 강화가 무엇보다 중요하기 때문이다. 그 이유는 첫째 발전소 사고에 있어 크기에 관계없이 대부분의 경

우에 운전원(또는 발전소 기술진)의 부적절한 사고대처에 기인하기 때문이고, 둘째 발전소가 고도의 기술로 건설되었기 때문에 이 기술을 충분히 숙지하고 운전할 때만이 만족스러운 운전결과를 얻을 수 있기 때문이다. 발전소 시뮬레이터는 여러가지 형태가 있으나 모두 컴퓨터 소프트웨어에 의한 모의를 통해 구현되며 국내에 이미 설치되었거나 제작중에 있는 발전소 시뮬레이터들은 대부분 전범위 복제 시뮬레이터이다. 전범위(Full Scope) 복제(Replica) 시뮬레이터는 특정 발전소의 주 제어실을 충실히 모의하며 주제어실에서 운전원이 수행할 수 있는 전 범위(정상운전, 비정상운전 및 사고시 현상)의 운전을 실시간으로 모의해 주는 장치이다.

II 기술동향

최근 컴퓨터의 계산력 향상은 다음과 같은 시뮬레이터 기술 변화를 가져왔다.

- 비능률적이더라도 개발 및 유지보수가 용이한 방향
- 모의폭의 대폭적인 증가, 즉 더 많은 시스템을 모의하고 더 많은 현장운전기능 제공
- 시스템 과도현상 예측의 정밀도 및 신뢰도와 관계 깊은 시스템에 대한 모델의 모의심도를 증가

1. 모의 정밀도(Simulation Fidelity)의 향상

전산기의 계산능력 향상에 따라 실시간 발전소 시뮬레이터에 사용되는 코드는 불과 몇년전에 발전소의 설계에 사용되는 전산코드(Best Estimate Code)의 수준에 도달하거나 경우에 따라서는 더욱 우월한 성능을 나타내고 있다. 따라서 시뮬레이터를 이용한 훈련의 폭과 깊이 그리고 범위에서 큰 진보가 있었다. 최근의 실시간 전범위 훈련용 시뮬레이터는 물리적 보존법칙(질량, 에너지 및 운동량)을 충실히 만족시키는 동적 시뮬레이터로서 운전

원 훈련수단뿐만 아니라 다음과 같은 Engineering 시뮬레이션 이터로서의 역할도 충분히 가능하다.

- 사고 해석
- 운전절차서 검증 및 개발
- 제어 기법 사전검증 및 제어시스템 상수 최적화

가. 열유체역학적(Thermohydraulic) 모델링

- Local Pressure 실현 : 과거에는 시스템내의 압력이 동일하다고 단순화시키고 열유체역학적 성질을 모의하였으나 이 방식은 많은 경우에 성공적으로 적용되나 원자력발전소의 대형 냉각재 상실사고등과 같이 시스템의 위치에 따라 압력차이가 현격한 경우에는 엉뚱한 모의결과를 가져왔다. 그러나 최근 동향은 이러한 문제점을 극복한 시스템 각 부분의 압력이 다르고 물의 성질이 완전히 압축가능한 모델을 사용함에 따라 원자로내의 정상 및 사고시의 모든 현상을 충실히 모의할 수 있게 되었다.

- 시간 및 공간적 해상도 증가 : 막강한 계산력이 값싸게 얻을 수 있게 되자 더욱 상세히 모델링하기 위해 대상 시스템(보통 원자로나 증기발생기)을 더욱 세밀하게 나누어 모의할 수 있게 되었고 공간적으로 세밀한 시스템 상황을 파악할 수 있게 되었다.

- 수치해석기법의 개선: 시스템을 상세히 모델링함에 따라 종전의 계산방식(Explicit Numerical Integration)은 안정도 및 Time Step Size 면에서 문제점을 드러내게 되어 계산량측면에서는 불리하나 큰 Time Step Size에 대하여도 안정적인 계산을 수행하는 방식(Implicit Numerical Integration)을 채용하게 되었다.

나. 노심 모델

- 3차원 임체원자로 모델 : 과거에 원자노심을 1점으로 간주하여 모델링 하던 때가 있었으나 현재는 노심을 수백개의 노드(Node)로 나누어 모델링 함에 따라 원자로내의 중성자속(Neutron Flux)등의 변수분포를 상세히 모의하게 되었다. 또한 출력계산에 있어서도 시간 및 공간적인 중성자 반응속도에 근거하여 계산하게 되었고 원자로 노심의 변형도 모의할 수 있게 되었다.

다. 전기계통 모델

- 종전에는 발전소 소내전력계통을 각 개소의 가압상태 및 비가압 상태의 2가지 상태중 하나를 나타내고 전기기

기의 과도현상도 정해진 폭선에 따라 동작하는 정적(Static) 모의방식이었으나 최근에는 소내전원계통 또는 외부 전력계통(Grid)의 행렬(Matrix)을 Sparsity Technique등을 사용하여 풀어 전압, 주파수 및 유효/무효전력을 계산한다.

라. 계측제어시스템 모델

- 과거에는 계측제어시스템의 기능적(Functional)인 내용만을 그 시스템이 속해 있는 모 시스템내에서 구현하는 정도 이었으나 최근에 객체지향적 모델링 방식이 출현하고 계측제어시스템 자체에 대한 상세한 모델링을 통해 여러가지 기술적 분석 및 평가의 필요성이 대두됨에 따라 계측제어 시스템을 구성하는 각종 구성요소(예: PID 제어기)를 객체로 만들고 각 객체들간에 발전소의 결선목록(Wire List)에 따라서 입력, 연결하여 입출력 전압, 전류를 모의하는 단계에 도달해 있어 I&C 시뮬레이션 이터로서의 기능을 충분히 가진다.

2. 발전소 시스템 모델소프트웨어 개발과정의 자동화

모든 Engineering 분야에서 컴퓨터의 응용(CAE: Computer Aided Engineering)이 보편화되어 가고 있는 상황에서 시뮬레이터 개발 Engineering과정에 있어서도 시뮬레이터의 가격을 낮추고, 성능을 고도화하기 위한 컴퓨터를 이용한 자동화가 가속화되고 있다. 아직 원자로 중대사고의 경우처럼 모델링이 확립되지 못한 경우도 있으나 대부분 발전소 시스템에 대한 모델이 개발된 상태로서 최근의 시뮬레이터는 새로이 모델을 처음부터 개발한다는 개념보다는 기존의 모델을 재구성(Configuration)하고 상수를 바꾸어서 완성한다는 개념으로 변화하고 있다. 건축분야에서 AutoCAD를 이용한 설계가 보편화되었듯이 시뮬레이터분야 에서도 시뮬레이터 개발 S/W Tool들과 Graphic User Interface가 개발 통합된 환경에서 어느 특정한 발전소에 대한 시뮬레이터 모델 소프트웨어를 프로그램 코딩 및 문서화작업(Documentation) 등을 하지않고 손쉽게 개발, 검증하는 방향으로 갈 것이며 예상되는 효과는 아래와 같다.

- 모델링 및 소스코드작성에 있어 균일성을 제공
- 개발자가 프로그램 작성에 시간을 낭비하지 않고 모델의 시험 및 보정작업에 더욱 많은 시간 허용
- 개발담당자가 중간에 바뀌더라도 커다란 어려움 없이 모델 개발 및 유지보수를 인수 진행 가능
- 시뮬레이터 유지보수를 신속하고 용이하게 수행
- 모델링 담당자가 모델개발후 작성하여야 하는 문서를

자동적으로 생성하여 많은 인력과 시간을 절약

최근 아래와 같은 시뮬레이터 모델 소프트웨어 Tool이 개발되어 확산되는 추세이다.

- Graphic Editor : CAD형의 Interactive Graphic 능력을 가지고 있으며 필요한 객체(Object)를 Icon형태로 등록된 라이브러리에서 선택하여 원하는 위치에 놓고 객체간에 필요한 연결관계를 선을 그어 정의한다. 다음 각 객체의 특성(예를 들면 모터의 각종 정수)을 입력한다. 이렇게 하여 작성된 구성도는 모델 Source Code Generator의 입력으로 제공되며, 또한 모델의 시험시 구성도(Schematic Diagram)상에 동적으로 모의되는 상황을 보고 모델의 Tuning과 Calibration을 수행한다.

- Code Generators : 그래픽 에디터의 출력을 입력으로 하여 모델 소프트웨어의 소스 프로그램과 데이터베이스를 생성시킨다. 지금까지 개발된 발전소 시뮬레이터용 Auto Code Generator는 아래의 시스템에 대한 모델 개발에 대한 적용이 가능하며 모두 물리법칙에 근거한 동적(Dynamic Simulation) 모델 소프트웨어를 생성한다.

- * Single Phase Incompressible Hydraulic system
- * Single Phase Compressible Hydraulic system
- * Two Phase Homogeneous Hydraulic system
- * Two Phase Non-homogeneous Hydraulic system
- * Analog Control system
- * Control Logic
- * Electrical System(Grid포함)

- Integration Test Environment: 그래픽 에디터, 시뮬레이터 Executive System, 제어반 패널 에뮬레이션 및 실시간 디버깅 기능을 이용하여 생산된 모델의 검증용 그래픽 화면을 통해 직관적으로 파악할 수 있는 수단을 제공하여 시뮬레이터 개발 및 보수의 생산성을 증가시키며, 이 기능은 발전소 특정 시스템에 대한 Part Task Trainer로도 응용가능하여 본격적인 시뮬레이터교육 이전에 보조교육에 활용할 수 있다.

3. Configuration Management System(CMS)의 채용

전범위 복제 시뮬레이터는 매우 복잡한 컴퓨터 시스템으로 복잡한 시스템의 유지보수는 매우 면밀한 주의가 요구된다. 부주의한 경우 1개의 문제점을 해결하면서 새로운 문제점을 보이지 않는 곳에 만들 수도 있게 된다. 발전소 시뮬레이터가 이러한 경우이며 기준발전소에 변경이

생겼을 경우 이에 의한 시뮬레이터 변경을 평가하고, 변경이 필요한 곳을 철저히 추적하는 작업을 수작업만으로 수행하는 것은 시간이 너무 많이 소요될 뿐만 아니라 처리하여야할 정보의 양이 엄청나므로 사실상 불가능하다. 이를 해결하기 위하여 최근에는 CMS를 발전소 운전원 훈련용 시뮬레이터에 대부분 도입하고 있다. 원자력발전소 시뮬레이터에 대해 미국에서 적용하는 기준인 ANSI/ANS 3.5에서도 CMS 채용을 요구하고 있다. CMS는 대개 Relational DBMS로 구현되어 있으며 일반적으로 다음의 기능을 가진다.

- 시뮬레이터 설계 데이터베이스를 유지
- 기준발전소와 시뮬레이터의 상이점을 추적하는 수단을 제공
- 확인된 상이점에 대한 해결과정 추적 가능
- 시뮬레이터의 성능인증 (Performance Certification), 성능시험 및 유지보수 결과자료를 기록

4. 이식성(Portability)의 보장

시뮬레이터의 사용연한은 발전소 수명기간(원자력의 경우 30년)과 관계가 있으며, 복수개의 발전소를 위해 1개의 시뮬레이터를 사용할 경우에 시뮬레이터는 약 40년 정도를 사용하여야 한다. 시뮬레이터의 소프트웨어의 경우 수명기간동안 사용이 가능하나 하드웨어의 경우 사용된 하드웨어나 그부품의 생산이 중단되거나, 또한 하드웨어의 가격이 저렴해짐에 따라 새로운 하드웨어의 적용이 타당하게되어 수명기간동안 수차례의 하드웨어 Upgrade를 해야만 한다. 미국의 경우 대략 10년마다 시뮬레이터를 Upgrade한다. 이러한 하드웨어 교체시 원활한 기존 소프트웨어의 그대로 사용하기 위해서는 다음과 같은 여러가지 고려가 설계시 요구된다.

- 사용 컴퓨터 언어 : 이식성을 고려하여 ANSI 전산언어 또는 ANSI Compliant 언어의 사용이 보편화되었다.
- 운영체제 : 기존의 시뮬레이터 운영체제는 실시간 전용의 기능과 고유메모리등을 갖춘 SEL사(후에 GOULD로 바뀌고 또다시 ENCORE사로 변경됨)의 하드웨어에 전적으로 의존하여 왔으나 최근의 WORKSTATION에 비하여 개발속도가 느리고 타기종에의 이식성이 매우 빈약할 뿐만 아니라 성능대 가격의 비에서도 매우 열등하여 최근에는 채택되는 경우가 매우 드물다. 시뮬레이터의 모든 모델관련 및 비모델관련 소프트웨어가 컴퓨터 운영체제의 지원에 의하여 수행되므로 컴퓨터 산업의 표준 OS 또는 표준에 근접한 OS를 사용하여야 한다. 현재로서는 UNIX의 경

우가 이러한 목적에 가장 부합하며, REAL TIME FUNCTION 을 가지는 UNIX를 사용하여 구현된 시뮬레이터가 개발되고 있다. 또한 시뮬레이터 제작사에 의한 OS 수정을 최대한의 역제가 필요하다. UNIX 사용의 다른 장점은 UNIX의 막강한 기능을 개발단계에서 활용할 수 있고, 유지보수인력도 산업계에 풍부하다는 점이며, 효율면에서는 약간 손해이나 매년 같은 가격에 성능은 2배로 증가하는 컴퓨터 하드웨어 발전추세를 고려할 때 거의 문제가 되지 않음

- Graphic User Interface(GUI) : 이식성을 위해서는 X-window, Motif 등의 표준 GUI의 사용 꼭 필요하다.

5. 객체 지향형 시스템 채용(Object Oriented Design)

기존의 전산 프로그래밍 방식이 절차(Procedure)위주의 처리방식인데 반하여 객체 지향형 방식은 데이터(객체)를 문제의 중심요소로 보고 접근하는 다음의 개념을 의미한다

- 대상시스템을 객체(Object)라는 기본 단위로 나누고
- 객체는 타 객체로부터의 메시지에 따라 동작하며
- 객체들은 속해있는 집단(Class)의 기능을 공유하고
- 경우에 따라서는 집단의 기능을 무시하기도 하며
- 상이한 객체들은 동일한 메시지에 상이하게 반응

발전소 시뮬레이터의 경우 객체(Object)라 하면 발전소를 구성하는 단위기기를 의미하며 작게는 1개의 발보를 나타내기도 하고 크게는 증기발전기(Steam Generator)나 원자로 냉각재 시스템(Reactor Coolant System)과 같은 발전소의 큰 부분을 나타내기도 한다. 객체 지향형 시뮬레이터는 아래와 같은 장점을 보유한다.

- 모델링 및 소스코드작성에 있어 균일성을 제공한다.
- 소프트웨어의 반복적인 사용을 통하여 생산성 향상
- 모델링 기법의 표준화를 통한 일관성 확보
- 유사한 종류의 객체를 새로이 생성하는 경우 매우 용이하게 시스템 모델의 수정 또는 확장 가능

현재 기술동향은 객체지향형 기법을 주로 Graphic Display 및 Data Base에 많이 적용하여 상당한 성과를 거두고 있으며 향후 모델링에 사용되는 컴퓨터 언어도 Object Oriented Language(예 C++)의 사용이 보편화 될 것으로 예상된다.

III 시뮬레이터 개발사업 소개

국내에는 아직 발전소 전범위 시뮬레이터를 제작할 능력을 갖춘 전문업체가 없으며 이에 따라 시뮬레이터 1기

도입에 2000만불이상의 외화를 사용하고 있고, 더구나 수시로 발생하는 시뮬레이터 개보수에 있어서도 거의 대부분 외국에 의존하고 있는 형편이어서 경제성 측면은 물론 원활한 기술지원 측면에서도 매우 불리하다. 이러한 상황을 타개하고, 시뮬레이터 기술이 전력산업에 미치는 영향을 고려하여 한전에서는 현재 진행중인 3기 시뮬레이터 개발사업을 통하여 국내에 시뮬레이터 제작업체를 적극 육성할 계획이다. 이를 위하여 고성능의 시뮬레이터의 개발이라는 1차 사업목표외에 다음과 같은 부수적인 사업목표를 수립하여 추진하고 있다.

- 국산화 : 시뮬레이터의 하드웨어 제작을 국내에서 수행하도록 하였으며, 계약금액을 기준으로 영광, 고리 시뮬레이터에 대하여는 50%이상, 고리 시뮬레이터에 대하여는 80%이상의 국산화율을 이루도록 하였다. 또한 영광 및 보령 시뮬레이터 제작단계에서 습득한 기술로서 고리 시뮬레이터 개발을 한전 및 국내계약자의 인력이 담당하도록 하였다.

- 기술전수 : 기술동향에서도 언급한 바와 같이 최근의 시뮬레이터 제작기술은 개발 Tool에 집적되어 있으므로 본사업의 국내계약자는 외국의 우수 시뮬레이터 전문제작업체와 기술제휴토록 하였고, 외국의 전문업체는 국내 업체 및 한전에 발전소 모델 및 개발 Tool(소스프로그램 포함)을 전수하고 훈련을 시행토록 하였다. 기술전수 후에는 국내업체가 시뮬레이터 사업 전반을 수행할 수 있을 것으로 예상되며 한전에서는 전수된 기술을 이용하여 전력기술의 연구개발 사업에 적극 활용할 계획이다.

REFERENCES

1. IAEA Report : "Simulators for training nuclear power plant personnel"(1993) (IAEA-TECDOC-685)
2. C. Clark et al: "The State of Mathematical Modelling for Real Time Simulation", SIMULATORS VII Proceedings of SCS Conference(1990)
3. Janine Faulent, J G. Brooks : " Simulator Configuration Management System" SIMULATORS VII Proceedings of SCS Conference(1990)
4. 한전 모의제어반 기술규격서(1993)