

설계해석코드 기반의 원자력발전소 훈련용 시뮬레이터 개발전략 Development Strategy of Nuclear Power Plant Training Simulator based on Design Analysis Codes

박근옥, 이종복, 서용석, 구인수
한국원자력연구소

Abstract

원자력발전소의 과도상태와 불시정지에 대한 운전원의 진단 및 대응능력을 향상시키기 위하여 활용되고 있는 훈련용 시뮬레이터는 운영중인 발전소를 모델링하여 이를 응용 소프트웨어로 개발한 후 컴퓨터와 하드웨어 장비에 통합시킨 방식으로 개발되어 왔다. 이러한 개발방법은 훈련용 시뮬레이터 개발에 상당한 비용과 시간을 요구한다. 특히 시뮬레이션 소프트웨어 개발에 대한 상당한 투자가 요구된다. 본 연구에서는 원자력발전소 설계 시에 시스템 해석을 위하여 사용되는 열수력 및 안전해석 코드를 이용하여 훈련용 시뮬레이터를 단기간에 저비용으로 개발하는 전략을 제시한다.

1. 서론

원자력발전소는 어떠한 사고 또는 기기 고장의 경우에도 안전하게 운전될 수 있도록 설계된다. 발전소 설계과정에서 안전성을 입증하기 위하여 신뢰성 있는 각종 해석 코드가 사용된다. 해석은 발생 가능성이 극히 낮은 사고에 대해서도 수행된다. 원자력발전소는 안전해석에 근거한 설계결과를 바탕으로 건설되고 운영된다.

해석을 통하여 안전한 운전특성을 갖도록 원자력발전소가 건설되고 운영되지만 운영의 주체가 사람이므로 인적오류(Human Errors)에 의한 사고의 가능성은 존재한다. 연구결과에 따르면 국내의 경우 운전작업자의 인적오류에 의한 원자력발전소 불시정지 비율이 높은 것으로 나타났다[1][2]. 운전작업자의 지식과 숙련도를 향상시킴으로써 인적오류의 가능성을 최소화시키기 위해 운전작업자에 대한 광범위한 훈련이 정기적으로 실시되고 있다. 훈련에 사용되고 있는 가장 강력하고 효과적인 도구는 훈련용 시뮬레이터이다.

훈련용 시뮬레이터는 현재 상업 운전되고 있는 원자력발전소 중앙제어실(Control Room) 환경과 동일하도록 설계되고 제작된다. 훈련용 시뮬레이터는 훈련받는 운전원이 원자력발전소 중앙제어실에서 작업하고 있는 것과 같은 느낌을 갖도록 각종 인간기계연계(Man Machine Interface) 하드웨어와 부대설비를 갖추고 있다. 훈련용 시뮬레이터를 개발하는 과정에서 가장 부담되는 작업은 시뮬레이션 소프트웨어의 개발이다. 시뮬레이션 소프트웨어란 원자력발전소가 갖는 실시간 동적 특성을 특정한

프로그래밍 언어로 구현한 응용 소프트웨어(시뮬레이션 코드)이다. 훈련용 시뮬레이터에서 시뮬레이션 코드는 중앙제어실을 제외한 모든 원자력발전소 설비가 없어도 운전작업자가 실제의 원자력발전소가 존재하는 것처럼 느끼게 해주는 중추적인 역할을 담당한다. 개발이 완료된 시뮬레이션 코드는 훈련용 시뮬레이터를 구동하는 컴퓨터 장비에 실행적재된다. 본 연구에서는 기존의 훈련용 시뮬레이터에서 사용하던 방법과는 다른 전략으로 시뮬레이터를 개발하는 방안을 제시한다.

2. 기존 개발방안 고찰

해외의 원자력발전소 훈련용 시뮬레이터를 포함하여 국내에서 운영 중인 시뮬레이터들은 상업 운전 중인 발전소 환경을 모델링하고 이를 기반으로 시뮬레이터를 개발하는 방법을 사용하였다. 그림 1은 기존의 시뮬레이터 개발과정을 개념적으로 표현한 것이다. 여기에서는 개발과정에서 수행된 작업내용을 개념적으로 고찰한다.

2.1 시뮬레이터 개발 요구사항 수집

원자력발전소는 복잡 거대한 시스템이므로 시뮬레이터를 사용하여 운전작업자를 훈련시키는데 필수적인 요구사항이 수집된다. 이는 시뮬레이터 개발 요구자(일반적으로 전력회사)와 시뮬레이터 개발자(일반적으로 소프트웨어 개발회사)의 공동작업이다. 원자력발전소는 특별한 운영환경을 가지므로 이 과정에서 시뮬레이터 개발자는 관련 요건(참고문헌 [3], [4]등)과 개발 요구사항을 이해하는데 어려움을 갖게 되며 상당한 시간을 소요하게 된다.

2.2 단순화 및 모델링

운전작업자 훈련을 위하여 원자력발전소의 모든 구성요소가 반드시 요구되지 않으므로 원자력발전소의 구성을 이해하기 쉬운 형태로 단순화시키는

작업이 수행된다. 즉, 발전소 설계 데이터, 운전이력 경험을 반영한 모델링 작업이 수행된다. 이 작업의 수행결과는 원자력발전소의 P&ID(Pipe and Instrument Diagram)와 유사한 형태로 나타난다.

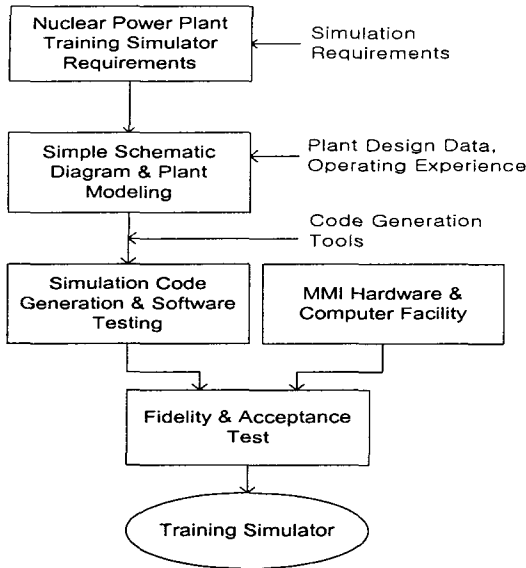


그림 1 전형적인 개발과정

2.3 시뮬레이션 코드 생성 및 시험

시뮬레이터 개발자는 모델링의 결과를 시뮬레이션 코드로 생성하는 작업을 수행한다. 코드는 복잡한 수학 방정식 형태로 표현되므로 이 과정에서 상용 코드 생성 도구가 사용된다. 코드 생성 도구는 원자력발전소의 동적 특성을 구현하기 위하여 개발자가 직접 수학 방정식을 사용하지 않아도 되며, 단순히 코드가 제공하는 기능을 조합하면 된다는 강점을 갖는다. 그러나, 현재까지 개발자가 구입하여 사용할 수 있는 상용 코드 생성 도구는 고가이며 도구의 사용방법을 습득하는데 장기간의 시간이 요구된다. 또 다른 문제점은 상용 코드 생성 도구의 사용을 위하여 흔히 특정한 컴퓨터 환경이 충족되어야 한다는 점이다.

생성된 코드는 잠재된 오류를 발견하기 위하여 개발자에 의하여 시험된다. 일반적으로 상용 코드 생성 도구가 완전한 원시코드를 생성하지는 못하므로 시험과정에서 개발자에 의한 수작업 코딩이 이루어진다.

2.4 시뮬레이터 운영환경 조성

원자력발전소 중앙제어실과 동일한 환경을 갖도록 훈련용 시뮬레이터의 하드웨어 장비가 제작되고 시뮬레이터가 위치할 장소에 설치된다. 시뮬레이터 중앙제어실에 사용되는 제어패널, 스위치, 지시기, CRT 화면, 트랙볼, 키보드 등과 같은 인간기계연계 장치는 실제의 원자력발전소 중앙제어실과 동등하다. 그러나, 인간기계연계 장치 이외의 모든 설비의 기능은 시뮬레이터를 구동하는 컴퓨터가 제공하도록 시뮬레이터 운영환경이 구축된다.

원자력발전소에는 없으나 훈련용 시뮬레이터가

갖는 독특한 시스템은 강사작업반(Instructor Station)이다. 강사작업반은 하드웨어 설비와 응용 소프트웨어로 구성된다. 하드웨어 설비는 컴퓨터, 훈련반은 운전작업자의 행위관측 장비를 포함한다. 응용 소프트웨어는 강사가 시뮬레이션 코드의 실행을 제어할 수 있게 하고 운전작업자를 훈련시키는데 필요한 추가기능을 갖는다. 강사는 응용 소프트웨어가 제공하는 기능을 이용하여 시뮬레이션 속도를 고속, 실시간, 저속 등으로 실행시킬 수 있으며 원자력발전소의 특정 시스템 또는 구성 기기가 고장난 것처럼 시뮬레이터를 운영할 수 있다. 강사작업반 응용 소프트웨어는 개발자에 의하여 개발되거나 상용 도구를 구입하여 수정 보완하는 방법으로 개발되기도 한다.

2.5 시뮬레이션 충실도 시험

개발된 훈련용 시뮬레이터가 실제의 원자력발전소와 같은 동적 특성을 가지며 운전작업자 훈련에 효과적으로 사용 가능한지에 대한 충실도(Fidelity) 시험이 행하여진다. 이 시험은 흔히 시뮬레이터 개발 요구자와 시뮬레이터 개발자의 공동작업으로 수행된다. 충실도 시험을 위하여 ATP(Acceptance Test Procedure)가 개발되며 이에 따라 시험이 수행된다. ATP는 시뮬레이터가 가져야 할 특성을 반영하여 작성된다[5].

3. 해석코드 기반의 개발방안

최근에는 LAN(Local Area Network)을 기반으로 한 분산처리 환경으로 훈련용 시뮬레이터를 개발하려는 시도가 이루어지고 있다[6][7]. 본 연구에서는 원자력발전소를 설계할 때 사용하였던 해석코드를 활용하고 이를 분산처리 환경에서 운영하는 훈련용 시뮬레이터 개발방안을 제안한다.

3.1 해석코드의 활용 가능성

원자력발전소를 설계할 때 다양한 해석 코드를 사용하여 발전소를 구성하는 각 계통이 안전성, 효율성을 만족하는지 검증된다. 이러한 해석 코드는 코드 자체가 신뢰성을 가지며 방대한 데이터를 바탕으로 정교한 수치연산을 수행하는 특징을 갖는다. 해석 코드들이 훈련용 시뮬레이터 개발에 직접 사용되지 못하였던 가장 큰 이유는 고성능 컴퓨터를 사용하여도 설계의 결과로써 건설되고 운영되는 원자력발전소와 같은 동적 특성을 실시간으로 처리하지 못한다는 점이었다. 불과 몇 년 전 만해도 원자로 노심(Reactor Core)의 동적 특성을 컴퓨터로 모의하는데 몇 분에서 몇 시간이 소요되었다.

그러나 현재는 컴퓨터 성능의 비약적인 발전과 코드의 성능개선에 힘입어 설계에 사용하는 각종 코드들이 1 초 이내에 원자력발전소 동적 특성을 충분한 수준으로 모의할 수 있게 되었다. 따라서 해석 코드 자체를 활용하여 훈련용 시뮬레이터를 개발할 수 있는 가능성이 높아졌다.

3.2 새로운 개발전략 설정

본 연구는 그림 2와 같은 절차와 방법으로 훈련용 시뮬레이터를 개발하는 전략을 설정하였다. 이 전략을 통한 본 연구의 최종 목표는 원자력발전소 훈련용 시뮬레이터 개발기술의 완전자립과 원자력발전소 현장 또는 요구기관에 공급 가능한 제품

을 개발하는데 있다.

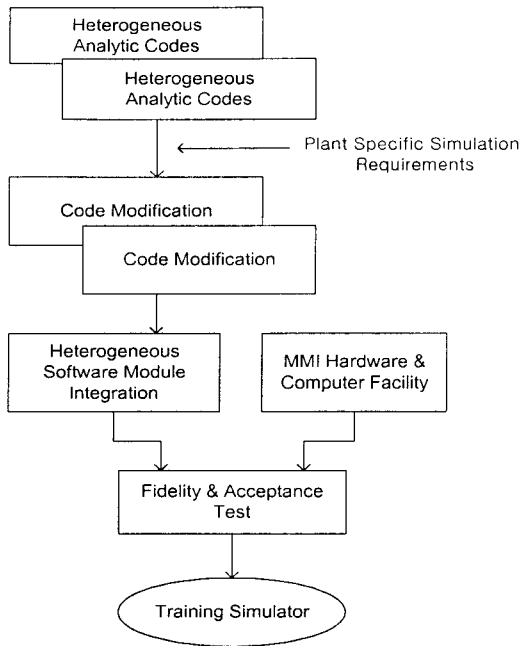


그림 2 새로운 개발전략 설정

3.3 해석 코드의 유형

원자력발전소 설계에서 사용하는 각종 해석 코드는 안전관련 사고해석과 성능관련 사고해석의 관점에서 사용되도록 개발되었다. 안전관련 사고해석이란 원자력발전소의 안전성 유지 관점에서 발전소 설계를 해석하는 것이다. 성능관련 사고해석이란 발전소에서 사고가 발생하여도 안전성 저해에는 영향을 주지 않으며 단지 발전소의 전력생산 운전에 손실을 초래하는 설계부분을 해석하는 것이다. 훈련용 시뮬레이터를 위하여 원자로 노심, 일차계통, 이차계통, 보조계통의 설계를 해석하는 각각의 해석 코드를 사용한다.

3.4 시뮬레이션 요구사항의 수용

완전한 복사본 발전소(Copy Power Plant)가 아닌 한 모든 원자력발전소는 차이점을 갖는다. 이는 훈련용 시뮬레이터도 차이가 나는 발전소 구성 요소를 반영하여 개발되어야 함을 의미한다. 경우에 따라서는 시뮬레이터의 최종 사용자가 특별한 유형의 발전소 사고를 대상으로 운전작업자를 훈련시키려는 의도를 가질 수 있다. 이러한 시뮬레이션 요구사항은 해석 코드의 수정 또는 확장을 통하여 수용한다.

3.5 해석 코드의 통합

해석 코드들은 퍼스널컴퓨터 또는 Unix 워크스테이션이나 서버에 적재 실행되도록 개발된다. 또한 코드 개발자가 각자의 용도에 맞게 개발하여 사용하므로 이를 훈련용 시뮬레이터에 활용하려면 이질적인 코드의 통합이 요구된다. 각각의 해석 코

드들은 물리적 논리적 독립성을 유지하고 있다. 따라서 코드 통합은 각각의 코드 내부구조에 영향을 주지 않도록 통신망을 통한 코드 간 입출력 형태를 취하거나 공유 메모리(Shared Memory)를 이용한 방법으로 통합한다.

3.6 강사작업반 소프트웨어 개발

강사작업반 응용 소프트웨어는 GUI(Graphic User Interface) 기반으로 완전히 새로 개발한다. 기술자립과 차후의 유지보수 확장성을 확보하기 위하여 IEEE/EIA 12207을 준수한 소프트웨어 생명주기에 따라 개발한다. 강사작업반 응용 소프트웨어의 기능은 해외회사로부터 현재 상용으로 구입 가능한 수준을 유지한다.

3.7 인간기계연계체계 구축

Hard-wired 인간기계연계 장치를 갖는 원자력 발전소 중앙제어실이 시뮬레이터 환경인 경우에는 기존과 같은 방법으로 하드웨어를 설계 및 제작한다. 그러나 VDU(Visual Display Unit) 기반의 중앙제어실인 경우에는 GUI 처리가 해석 코드와 완전히 독립적으로 수행되도록 응용 소프트웨어를 구축한다. 해석 코드와 인간기계연계 응용 소프트웨어와의 연계는 통신망을 통한 입출력 요구 형태로 수행한다.

컴퓨터 장비의 사용은 일반 산업계에서 널리 사용되는 개방형 구조를 갖는 상용 제품을 사용하여 유지보수와 확장성에 유연성을 갖게 한다.

3.8 충실도 시험

시뮬레이터 개발에 사용하는 해석 코드 자체가 신뢰도를 유지하고 연산의 정교성도 우수하므로 시뮬레이션 코드에 대한 충실도 시험이 반드시 요구되지 않는다. 충실도 시험은 강사작업반 및 인간기계연계 응용 소프트웨어와의 입출력 시험을 중심으로 수행한다.

4. 결론

훈련용 시뮬레이터의 개발이 전력회사와 원자력 연구기관을 중심으로 1980년대 이후 지속적으로 계속되어 왔다. 본 연구는 기존에 전형적으로 사용되는 개발절차와 방법을 대체하기 위한 새로운 개발전략을 설정하였다. 본 연구의 개발전략에 따라 훈련용 시뮬레이터를 개발하면 다음과 같은 효과를 기대할 수 있다.

- 1) 고가이며 장기간의 사용법 습득을 요구하는 시뮬레이션 코드 생성 도구가 필요 없다.
- 2) 서로 다른 원자력발전소의 동적 특성을 모의하기 위하여 발전소 모델링에 소요되는 노력을 해석 코드 수정으로 대체할 수 있다.
- 3) 시뮬레이터 사용자가 훈련목적에 필요하여 추가로 시뮬레이션 기능 확장을 요구하여도 단순히 코드의 확장으로 대체할 수 있다.
- 4) 해석 코드가 충분한 충실도를 이미 유지하고 있으므로 충실도 시험부담을 크게 감소시킬 수 있다.
- 5) 시뮬레이터 개발에 소요되는 인력, 비용, 시간을 약 반으로 단축시킬 수 있다.
- 6) 새로 개발되는 강사작업반 응용 소프트웨어는 소프트웨어 생명주기를 준수하여 개발되므로 개

발완료 후 기술을 국내 산업계에 쉽게 이전할 수 있다.

본 연구는 새로운 시뮬레이터 개발전략을 바탕으로 훈련용 시뮬레이터 개발에 착수하였다. 현재 시뮬레이터에 사용할 컴퓨터 장비와 LAN 환경 구축이 완료되었으며 시뮬레이터 개발에 적용할 소프트웨어 생명주기가 확립되었다.

(본 연구는 과학기술부에서 시행하는 원자력연구개발사업으로 수행되었음)

참고문헌

- [1] 박근옥 외, 발전정지사례 분석정보시스템의 데이터베이스 설계, 한국원자력학회 1996년 춘계 학술발표회.
- [2] 이정운 외, 국내 원자력발전소 인적오류사례의 추이분석, 대한인간공학회 1996년 춘계 학술 논문집.
- [3] USNRC, Nuclear Power Plant Simulators for the Operator Training, Regulatory 1, 149, 1981.
- [4] ANSI/ANS-3.5-1985, Nuclear Power Plant Simulators for use in Operator Training, 1985.
- [5] NUREG/CR-2353, Specification and Validation of Nuclear Power Plant Training Simulator Response Characteristics, 1981.
- [6] Furht B. 'The design of a real-time system for simulators and trainers', Proceedings of the IEEE Workshop, Real-Time Applications, 1993.
- [7] Guosheng Sun, Xinfeng Wang, 'Computer technology in power system simulator', IEEE Proceedings, Visualize the Future, 1995.