

시뮬레이터를 이용한 원자로 동특성 원격교육 시스템 개발에 관한 연구

이명수*, 홍진혁*, 유현주*, 박신열*

*한전 전력연구원 원자력연구실

e-mail : fiatlux@kepri.re.kr

A Study on Remote Teaching System for Reactor Dynamic Characteristics Using Simulator

Myeong-Soo Lee*, Jin-Hyuk Hong*, Hyeon-Ju Yoo*, Sin-Yeol Park*

* Nuclear Power Laboratory KEPRI

요 약

원자력 발전소의 에너지를 생성하는 원자로의 동특성(Reactor Dynamic Characteristics)은 반응도(Reactivity) 영향인자가 변하여 원자로에 가해지는 외란(disturbances)에 의한 반응도 궤환(feedback)과 부가적으로 변하는 각종 원자로 계통의 설계변수 들에 대한 복잡한 노물리 현상을 통해 결정되며 이러한 현상을 이해하는 것은 원자력 발전소 종사자에게는 무척이나 중요한 일이다.

본 고에서는 가상현실 등 첨단기법을 이용하여 전력연구원에서 개발한 교육지원시스템(VRCATS)의 일환으로 강의실 이론 교육 시에 원격으로 시뮬레이터에 접속하여 각종 반응도 변화를 통한 원자로 노심상태 즉, 노심 내 전체 중성자속분포, 각종 온도 분포를 실시간으로 3 차원으로 보여주며, 시간에 따른 체는, 보론농도 등 반응도 변화 인자 및 총 반응도 변화추이 등을 감시 할 수 있는 컴퓨터 지원 노심설계 및 훈련 시스템(PREMARK) 개발 내용 및 특징을 기술하였다.

1. 서론

핵반응에서 방출되는 에너지인 원자력은 석탄, 석유 등 화석에너지에 비해서 그 역사는 매우 짧지만 원자력의 연료인 우라늄이 핵분열 해서 에너지를 생산할 경우 석유의 약 2 백만 배의 에너지를 발생할 정도로 원료의 에너지 집약도가 매우 높고 매우 저렴하다. 이러한 까닭으로 천연자원이 부족한 현재 우리나라 전력수요의 약 30%정도를 원자력 발전에 의해서 충당하고 있다.

원자력발전소는 발전소 특성상 안정된 출력을 일정하게 계속 유지하면서 운전하게 되므로 평소에는 발전소의 과도상태를 잘 경험 할 수 없다. 그러나 사고나 과도상태가 발생할 경우에 만일 미숙한 대응을 하게 되면 체르노빌 발전소 사고처럼 치명적인 결과를 야기 할 수도 있으므로 운전원이 비상시에 잘 대처할 수 있도록 평소에 훈련이 되어야 한다. 이를 위해 원자력 발전소 종사자들을 위한 원자로 이론, 발전소 계통의 운전 및 정비에 관한 훈련 등이 원자력교육원

및 각 발전소 훈련센터에서 실시되고 있다. 이 중에서도 특히 발전소를 직접 운전하는 운전요원 들을 위해서는 법적 규제 요건으로 매년 원자로 노심 반응도 변화에 대한 훈련을 의무화 하고 있어 이를 만족시키고 안전한 발전소운전을 위해 주제어실 환경 및 설비와 동일한 시뮬레이터를 개발하여 원자력교육원 및 각 발전소 내에 있는 훈련센터에 설치하고 훈련에 이용하고 있다.

원자력 교육원에 설치된 시뮬레이터 2 호기는 1987년 영광 원자력 1 호기와 함께 미국의 웨스팅하우스사로부터 도입되어 운전원 훈련에 사용 중에 있었으나 컴퓨터 용량 부족, 일부 모델의 성능미비 등의 보완 및 모델의 개선을 위해 전력연구원(KEPRI)에서 성능개선을 수행 중이다.[1]

원자력은 핵분열 연쇄반응을 제어하여 원하는 에너지를 내어 발전에 이용하는 만큼 원자력 발전소 종사자들은 원자로 노심(core)내의 입자 물리적 현상과 이론을 잘 이해하여 발전소 안전운전에 만전을 기해야

한다.

본 고에서는 이러한 시뮬레이터 성능개선 기간 중에 전력연구원에 의해 개발되어, 시뮬레이터와 연동, 설치되는 가상현실 컴퓨터 지원 교육훈련 시스템(VRCATS)과 이 중에서 특히 원자로실 내의 복잡한 물리적 현상을 훈련생들이 이해하기 쉽도록 원자로 동특성(Reactor Dynamic Characteristics)을 실시간으로 시뮬레이션 하여 3D 입체로 표현할 수 있는 원자로 다중그룹 노심 전처리기(PREprocessor of the Multigroup Advanced Reactor Kinetics)의 개발에 관해 기술하고자 한다.

2. VRCATS(VR Computer Assisted Training System)

원자력 발전소의 많은 중요기기 및 설비 등이 고방사선 지역 등 평소에 출입하기 곤란한 곳에 위치하고 있으며 또한 출입하더라도 출입자를 보호하기 위해 접점이 가로막힌 콘크리트 구조물로 인해 기기 및 설비의 모습을 볼 수 있는 기회는 그리 흔치 않다.

또한 기존의 시뮬레이터 훈련은 발전소의 주제어실(Main Control Room)과 제어반을 그대로 복제(replica)하여 주제어실 근무 운전자나 근무 예정자들을 대상으로 실시되었으나 비상시 혹은 모를 현장에 위치한 설비들을 조작할 수 있도록 신입사원이나 현장운전원 등 비교적 발전소 운전 경험이 없는 사람들을 훈련할 수는 없었다. 기존에는 이러한 현장에 위치한 각종 패널 및 밸브 등 기구조작을 위해서는 선임자와의 1:1 교육, 경험담 혹은 강사들의 강의실에서의 구두설명으로 교육이 실시 되었으며 이러한 교육만으로는 때때로 발생하는 긴급 상황 시 주제어실 운전원의 구두 지시 수행에 어려움을 겪거나 오조작을 할 우려가 상존하였다.

이러한 문제점을 극복하기 위해 발전소 현장 구조물 및 각종 배관 및 기기 등을 3D CAD 로 데이터로 모델링하고 VR 기술을 이용하여 가상환경으로 구축한 후 발전소 구조물, 각종 주요기기, 밸브 및 배관 과 운전원이 조작하는 MCR 및 현장에 위치한 제어패널 등을 입체로 구현하여 강의실에서 교육시킬 수 있는 컴퓨터 지원 교육 훈련 시스템(VRCATS; VR Computer Assisted Training System)을 개발하였다.[2,3]

3D CAD 파일로부터 VRML 로 변환되어진 발전소 구조물 및 기기 정보는 상용 가상현실 프로그램(DV Mockup)으로 구현된 가상발전소(Virtual Plant)라는 사이버 환경으로 구축되어 Navigation 등을 직접 할 수 있도록 하였고, 각종 고려된 이벤트를 통해 각 계통별 유동 흐름, RCP 동작, 원자로 용기 및 증기발생기 등의 주요기기 내부 등을 프로젝트를 통해 투사된 입체 영상(Stereo Graphic)으로 표현 할 수 있도록 하였다 그림 1,2 는 가상 발전소의 몇 가지 화면을 보여주고 있다.

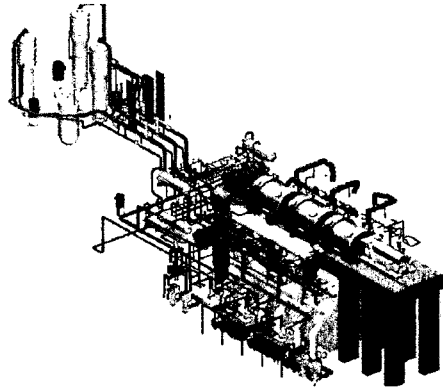


그림 1 VRPLANT NSSS 및 2 차계통 화면

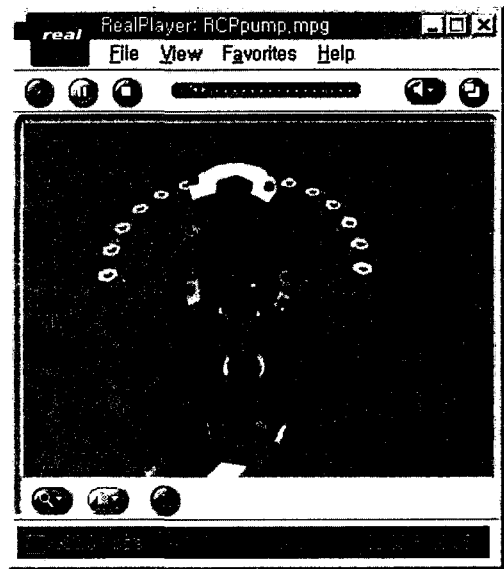


그림 2 VRPLANT RCP 운전 동영상

이와 함께 강의실에서 주제어실 및 현장의 기구조작 패널을 가상환경에서 구현하여 강사가 운전조작 설명에 사용할 수 있도록 하였으며 가상 주제어실의 책장에서 절차서 및 도면을 선택하면 해당 절차가 Acrobat 문서(pdf) 형식으로 팝업되도록하여 강의에 사용할 수 있도록 하였다. 그림 3 은 가상주제어반(Virtual MCR)의 화면을 보여주고 있다.



그림 3 VRMCR 동영상

또한 시뮬레이터와 멀리 떨어져있는 강의실에서 전산실에 위치한 대기(Stand-By)컴퓨터에 시뮬레이터 강사조작반 기능을 이용, 원격 접속하여 각종 사고를 실시간으로 모의, 분석할 수 있는 기능을 보강하였으며 특히 제어봉 낙하 사고나 각종 과도상태에서 원자로의 동특성 반응을 실시간으로 3차원으로 보여줄 수 있는 강의실교육시스템을 개발하였다.

3. 원자로 동특성 원격교육시스템(PREMARK)

기존의 시뮬레이터 훈련은 각종 사고반응과 이에 따른 대응절차를 반복 수행시켜 숙련된 운전원을 만드는 것을 목표로 해왔으나 TMI 사고이후 물리적현상에 대한 깊은 이해와 개념을 정립하여야 올바른 대응을 할 수 있다는 것이 발견되었다. 이를 위해 원자로 이론, 열역학, 열전달, 각종 기기 구조 등 강의실에서 진행되는 수업 및 이를 표현하는 시뮬레이터의 모델의 질적 향상의 요구가 계속되어왔다.

이중에서도 원자로 이론은 해당 전공자 아닌 여러 원자력 종사자들에게 익숙하지 과목으로 상당한 시간을 소요하는 과목이다.

원자로는 항상 정상상태로만 운전할 수는 없고 원자로 기동 시나 원자로 정지 시, 출력증가 및 감할 시 등의 경우에 원자로는 과임계(Supercritical) 또는 미임계(Subcritical) 상태가 되며, 이때 원자로를 표현하는 모든 변수는 시간의 함수로 표현된다. 이러한 원자로의 비임계상태는 제어봉(Control Rod)의 위치를 변화시켜 임계도를 조절함으로써 달성된다. 또한 원자로의 임계도에 영향을 미치는 중요한 요인 중에 하나는 노심 내의 온도이다. 이는 증배계수를 결정하는 여러 물리량 중의 많은 부분이 온도의 함수이기 때문이다. 실

제 원자로에서는 출력이 변화되면 핵연료, 감속재, 구조재 등의 온도가 변하여 원자로 반응도에 영향을 미치는 궤환효과(Feedback Effects)가 발생한다. 한편, 원자로와 같은 대형의 동적계(Dynamic System)에서의 특성을 이해하기 위해서는 입력과 출력 변수, 그에 따른 상태변수 들 즉, 중성자속과 냉각재 온도, 중성자 흡수단면적이 매우 큰 제논(Xenon)과 요오드(Iodine)의 농도분포 등의 변화와 그에 따른 원자로의 변화를 잘 이해하여야 하며 원자로 동특성 묘사(혹은 모의)는 이러한 상태변수들에 대한 보편 방정식을 연립방정식으로 나타낸 동특성 방정식으로 기술된다. 본 고에서는 이러한 복잡한 동특성 방정식의 구체적 기술은 생략한다.[4]

시뮬레이터의 원자로 노심모델을 개발하기 위해 발전소 원자로 노심설계 코드의 출력(OUTPUT)으로부터 시뮬레이션 모델의 블록 데이터를 자동생성 하는 툴을 개발, 적용하였으며 시뮬레이터에 탑재, 연동시켜 실시간으로 구동 되는 노심모델의 노심 내 열중성자속, 핵연료 온도, 냉각재 온도를 3차원으로 6개의 노드별로 형상화하며, 반응도(reactivity), 출력 (Power), 노의 수직출력 경사도 (External Axial Offset), 노내 평균 핵연료/냉각재 온도, 지논/사마리움 반응도를 시간별 2차원 그래픽으로 제공하는 교육시스템을 개발하였다.[5]

또한 각 제어봉의 현재 위치를 지시하여 노심모델이 제공하는 여러 중요 물리적 변수를 동적으로 사용자가 알 수 있게 함으로 노심 현상에 대한 이해를 높이고자 하였다. 이 3차원 형상화 툴은 그래픽의 평행이동, 축소/확대, 회전 등의 여러 옵션을 설정해 둬으로써 사용자가 사용하기에 용이하도록 편의를 도모하였다.

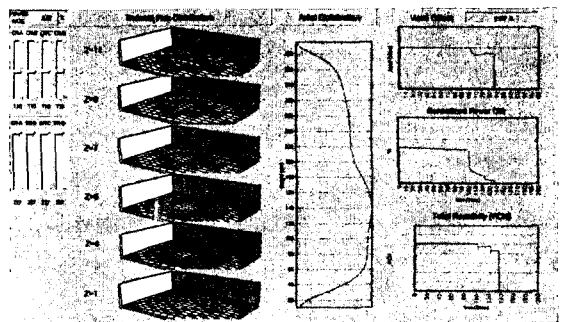


그림 4 원자로 동특성 원격교육 시스템 주화면

그림 4는 영광 1호기 노심에서 만일 조절제어봉(Control Rod)이 사고로 50%(113 step) 삽입될 때 원자로 노심내부의 축 방향으로 6개 위치에서의 열중성자의 반경방향 분포를 3D로 보여주고 있으며 평균 축방향 열중성자 분포와 수직출력경사도(Axial Offset), 원자로 노심 출력변화, 총반응도 변화 등을 보여 주고 있다.

이렇게 시뮬레이터와 연동된 원자로 동특성 교육

시스템이 강의실에서 구현 가능해 짐에 따라 제어관련 사고 시 출력변화 기구(Mechanism)등 원자로 동특성에 대한 직관적인 이해가 용이해 졌다.

4. 결론

전력연구원에서는 발전소 현장의 각종 설비나 기기 위치, 구조 등을 3D CAD 모델링하여 가상공간을 구축하여 강의실 교육에 활용할 수 있도록 하는 가상현실 교육지원시스템(VRCATS)을 개발하였다

또한 강의실 이론 교육 시에 원격으로 시뮬레이터에 접속하여 각종 반응도 변화를 통한 원자로 노심상태 즉, 노심 내 전체 증성자속분포, 각종 온도 분포를 실시간으로 3 차원으로 보여주며, 시간에 따른 제논, 보론농도 등 반응도 변화 인자 및 총 반응도 변화추이 등을 감시 할 수 있는 컴퓨터 지원 노심설계 및 훈련 시스템(PREMARK)을 개발하였다. 이러한 시스템의 개발로

1. 가상발전소, 가상주제어실, 가상 패널 등의 가상환경 구축을 통해 기존의 선임 운전원과의 도제식 1:1 교육이나 강사의 강의실에서 이루어진 두 설명으로 전달되었던 발전소 현장설비나 기기 구조이해 및 조작, 운전 등의 지식을 시각적으로 형상화하여 입체로 보여 줌으로써 강사의 교육을 용이하게 하였으며,
2. 시뮬레이터 반복 교육 시 간과되기 쉬운 물리적현상 특히 원자력 발전소의 출력을 담당하는 원자로 동특성에 대한 직관적 이해를 도울 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] 이명수 외 "원자력교육원 #2 시뮬레이터 성능개선에 관한 연구(I)", 2000 전력전자 학술대회, pp249-252, 2000.7
- [2] 유현주 외 "인터넷에서 가상발전소(Virtual Plant) 설계에 관한 연구", 1999 춘계 정보처리학회, Vol. 12, 1999.10
- [3] 유현주 외 "3D 입체 가상발전소(Virtual Plant)와 가상판넬(Virtual Panel) 모듈구현", 2000 전력전자 학술대회, pp249-252, 2000.7
- [4] REMARK, GSE Modeling Technical manual
- [5] 이명수 외 "영광 12 호기 시뮬레이터 노심모델 및 입력변환틀 개발", 2000 춘계 한국 시뮬레이션 학회, pp168-173, 2000.4