

울진 표준형원전 시뮬레이터 PC기반 개인학습시스템 (PCATS) 개발

Development of the Personal Computer Assisted Training System in KSNP Simulator

홍진혁

한전전력연구원

요약

본 논문은 울진 3호기 원자력발전소를 기준발전소로 하여 개발된 울진 표준형원전 시뮬레이터에 탑재된 정밀한 모델들을 갖추면서도 중대사고를 비롯한 여러 가지 사고를 범용 개인용 PC에서 실시간/초실시간으로 다룰 수 있는 PC기반 개인학습시스템 (PCATS)에 대하여 다루고 있다. 특히 3차원 노심모델, RETRAN03 코드 기반의 열수력 모델인 ARTS 모델, MAAP4 코드 기반의 RSAM 모델은 울진 표준형원전 시뮬레이터에 탑재된 모듈을 그대로 사용함에 따라 시뮬레이터의 결과와 유사성을 유지토록 하였으며, 객체 지향 기반의 사용자 연계화면을 통해 대화식 제어 기능을 탑재함에 따라 운전 에 익숙치 않은 훈련원도 쉽게 조작이 가능하도록 하여 운전원 훈련시 사고 분석력 증진 및 교육의 질적 향상을 도모할 것으로 기대한다.

Abstract

The purpose of this paper is to introduce the PCATS-II system in which most all the models included in KSNP simulator are loaded and users can easily handle several accidents including severe accidents in realtime or super-realtime manner. Especially, 3 dimensional neutronics model, RETRAN03-based thermal-hydraulics model (ARTS) and MAAP4-based severe accident model (RSAM) are loaded as it is in the KSNP simulator to consist with the calculations of the KSNP simulator. And also interactive controls enable the novice to easily operate the PCATS system through the object-oriented user interface. Finally the PCATS is expected to greatly help the operator analyze the accidents and improve the quality of education.

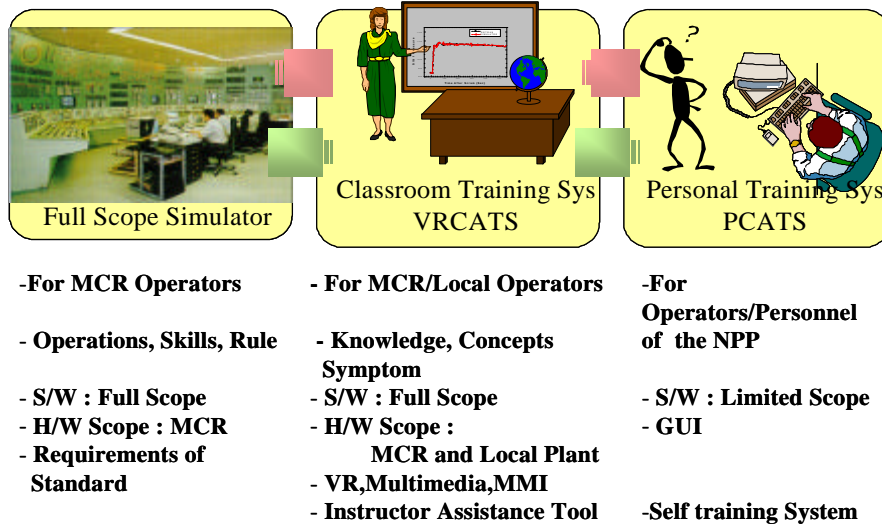
I. 서론

1979년 미국의 TMI 사고는 미국뿐 아니라 이와 유사한 노형을 보유한 국가들에게 원전의 안전성 재고와 사고발단 원인에 지대한 관심을 갖게 하였다. 비상사고가 발생하였을 때 사고를 조기에 충분히 완화시킬 수 있었음에도 불구하고 운전원의 대처능력 부족에 의한 운전원의 실수가 사고를 더 악화 시키게 된 이러한 사례로 말미암아 급박한 상황 하에서 운전원의 적절한 상황판단과 조치의 중요성이 더욱 강조 되었다.

사실 긴급 상황 발생시에 주제어실의 각종 계기의 지시치들을 이용하여 발전소 이상상태를 확인하고 적절한 조치를 취하여야 하는 운전원들의 심리적인 중압감은 매우 크며 이를 위한 시뮬레이터 훈련이 강조되어 오고 있지만 막상 이러한 상황이 닥치게 되면 당황하게 될 우려가 있다. 이러한 경우 운전원들이 해당 사고의 진행

과 주요변수들의 추이 등을 미리 예측할 수 있다면 운전원들은 보다 안정된 심리상태로 침착히 대처할 수 있을 것이다.

이를 위한 발전소 종사자들의 교육 훈련은 크게 발전소 주제어실(MCR : Main Control Room)을 그대로 모사한 전범위 시뮬레이터 훈련과 교재, 강의안 등을 통한 강사의 설명으로 진행되는 강의실 수업, 그리고 자기 스스로 부족한 것을 학습하는 개별 자율 학습으로 나눌 수 있다. 각 훈련 방법들의 특징을 [그림 1]에 비교하였다.



[그림. 1] 원자력발전소 종사자 훈련방식 비교

기존의 시뮬레이터 훈련은 법령에 의한 강제 훈련으로서 주제어실 근무자나 근무 예정자들을 위한 것으로 주로 반복 학습에 의한 운전 조작 절차 숙지를 목적으로 하고 있는 반면에 발전소의 발전 원리나 계통 설명 등 대부분의 교육은 강의실에서 고전적인 방법(구두 설명, 교재, OHP, Beam Project등)을 통해 이루어져 왔으며 개인 학습을 위한 별다른 시스템은 없는 형편이었다. 본 논문에서는 본 울진 표준형 시뮬레이터 개발과제의 일환으로 개발된 개인용 컴퓨터 학습시스템(PCATS: Personal Computer Assisted Training System)에 관해 기술한다.

II. 본론

1. PCATS 모델

일반적으로 원전 분석기(Nuclear Plant Analyzer)는 사고 분석이나 안전성 해석을 위주로 하기 때문에 정교한 모델을 위주로 하고 실시간을 보장 해 주지 못한다. 이러한 원전분석기는 실제 그러한 업무에 종사하는 일부 전문 종사자들에게는 유용하게 쓰이지만 이들 이외의 다른 대부분의 발전소 종사들은 그러한 좁은 분야의 전문적인 해석 결과 보다는 일반적인 여러 사고 스펙트럼을 실시간으로 해석해줄 수 있고 사용자 편의성이 보장된 시스템이 자신의 컴퓨터에 설치되어 있기를 원하는 경향이 있다. PCATS는 이러한 목적에 맞도록 설계되어 원전 최적 해석 열수력 코드인 RETRAN을 기반으로 하는 ARTS등 울진 표준형원전 시뮬레이터에 탑재된 정밀한 모델을 갖추면서도 중대사고를 비롯한 여러 가지 사고를 범용 개인용 PC에서 실시간으로 할 수 있도록 개발되었다.

1.1 RCS 모델

PCATS의 핵심 모델이라고도 할 수 있는 원자로 냉각수 계통의 이상유체(Two Phase Model)을 위해서는 본 과제의 전범위 시뮬레이터에 사용된 RETRAN을 기반으로 그 모의범위를 확장한 ARTS를 탑재하였으며 그 노드도 전범위 시뮬레이터와 동일하다.

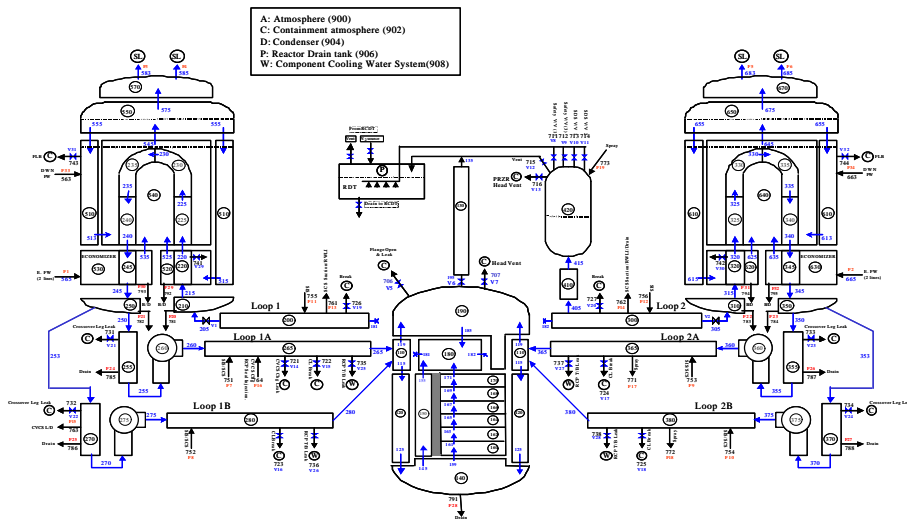
1.2 노심 및 기타 모델

PCATS의 노심 모델도 시뮬레이터의 노심모델과 근본적으로 동일하며 각 연료집합체를 축방향으로 12방향으로 나누었으며 원자로 동특성을 쉽게 알 수 있도록 하기 위해 3D Display 및 각 반응도 인자가 표시되는 화면을 개발하여 설치하였다.

그 외에 주증기 및 주급수 계통등 주요 1,2차 보조 계통을 개발하여 연계하였으며 대형냉각재 상실 사고, 주증기관 파열, 증기발생기 세관 파열, RCP 정지등 중요한 비상사고 운전이 가능하도록 설계하였다.

1.3 중대사고 모델

PCATS의 중대사고 모델도 시뮬레이터(VRCATS)의 중대사고모델과 근본적으로 동일하며 PSA 사고분석에 사용되는 MAAP 코드를 기반으로 하는 중대사고 실시간 모델(RSAM)을 사용하였으며 고온관 파열, 모든 교류전원 상실, 주증기관 파열, 소형 냉각재 상실, 증기발생기 세관 손상 등의 사고로 기인하는 중대사고 시나리오의 자동 운전분석이 가능하도록 설계되어 있다.



[그림 2] ARTS Nodalization

2. PCATS 기능

PCATS의 메인화면은 <그림 3>과 같다. PCATS에서 제공되는 주요 기능은 다음과 같다.

1. 각 계통 실행모듈간의 실시간/초실시간 제어 (1초에 12번 실행)
2. 계통모델의 내부 변수들에 대한 현재값 지시 및 변경
3. 주요계통변수에 대한 실시간 그래프 제공
4. 미믹 (Mimic) 화면 제공
5. 3차원 노심거동 화면
6. 현재 상태 저장/복원 기능
7. 운전원 조작기능

2.1 실시간/초실시간 제어 기능

PCATS는 실시간일 경우 각 계통모델을 1초에 12번 실행하도록 제어한다. 따라서 각 계통 모델은 0.083초에 정확히 한번 호출되도록 제어되어야 한다. 사용자가 빠른 사고 결과를 원하는 등의 경우 초실시간을 선택할 수 있는데, 이때는 컴퓨터가 지원하는 최대의 속도로 각 계통모델을 동기화를 유지하며 실행되도록 개발하였다.

2.2 내부 변수 현재값 제공기능

PCATS에서는 각 모델 프로그램 내부에서 사용하는 변수들의 현재값을 보거나 변경할 수 있도록 하였다. 먼저 위의 메인화면의 ISD버튼을 누르면 <그림. 3>과 같은 화면이 제공된다. 이 화면에서 하단부의 명령창에 각 모델에서 사용되는 내부 변수를 기록하고 리턴키를 누르면 해당 변수가 모델이 실행되면서 바뀌는 값들을 제공받을 수 있게 된다. 또한, 사용자의 편의를 위하여 여러 변수들을 매번 입력하기보다는 미리 입력된 변수 리스트를 호출하게 하거나, Reset/Snap 등 각 버튼들이 제공하는 제어 동작들도 명령어를 통해서 가능하게끔 하였다.

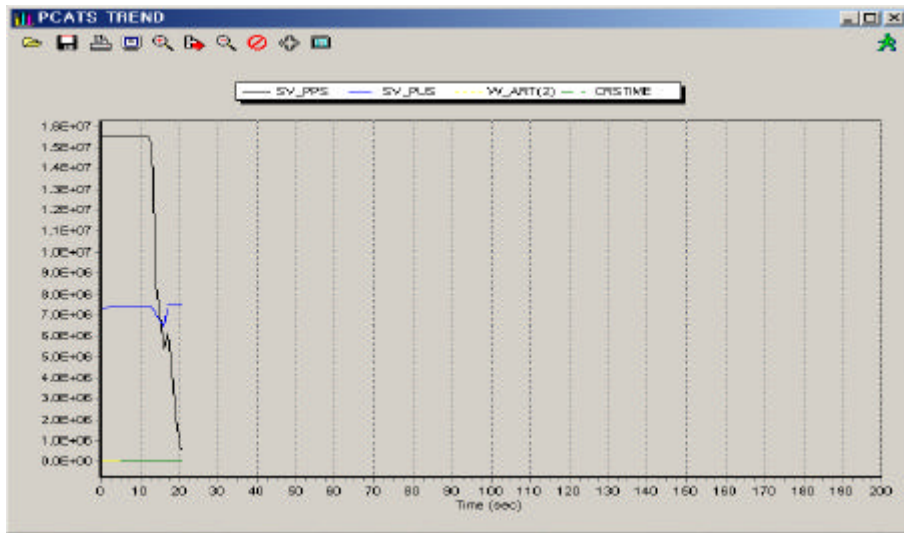
1. CRSTAGE	1	21. CR9TFUELAVG	0.000000E+000
2. CR5INITIAL	false	22. CR5ALFAVG	0.000000E+000
3. CR5AMPL	false	23. CR5DM6AVG	0.000000E+000
4. CR5TUNE	false	24. CR5TMD0AVG	0.000000E+000
5. CR5EQZE	false	25. CR5HE135AVG	0.000000E+000
6. CR5EQSM	false	26. CR5KRFVAVG	0.000000E+000
7. CR5EQDH	false	27. CR5BETA	0.000000E+000
8. CR5EQCG	false	28. CR5NB0RONAVG	0.000000E+000
9. CR505M	false	29. YPFASTZE	1.000000E+000
10. CR50KE	false	30. YPFASTDH	1.000000E+000
11. CR5PEAKSM	false	31. CR5AMPLDIFF1	0.000000E+000
12. CR5TIME	0.000000E+000	32. CR5AMPLDIFF2	0.000000E+000
13. CR5REFP	0.000000E+000	33. CR5AMPL	0.000000E+000
14. CR5DN	0.000000E+000	34. CR5TEST(1)	false
15. CR5QDH	0.000000E+000	35. CR5KRAB16MULTI	6.300000E-001
16. CR5FLUX1AVG	0.000000E+000	36. CR5SPRIDD	0.000000E+000
17. CR5FLUX2AVG	0.000000E+000	37. CR5RHO	0.000000E+000
18. CR5CON	0.000000E+000	38. CR5RHOPCM	0
19. CR5RHOE135	0.000000E+000	39. CR5FLDADJ	1.000000E+000
20. CR5RHO5M149	0.000000E+000	40. CR5QPR0MPT	0.000000E+000

Command:

[그림 3] ISD 및 명령창 화면

2.3 주요 계통변수에 대한 실시간 그래프

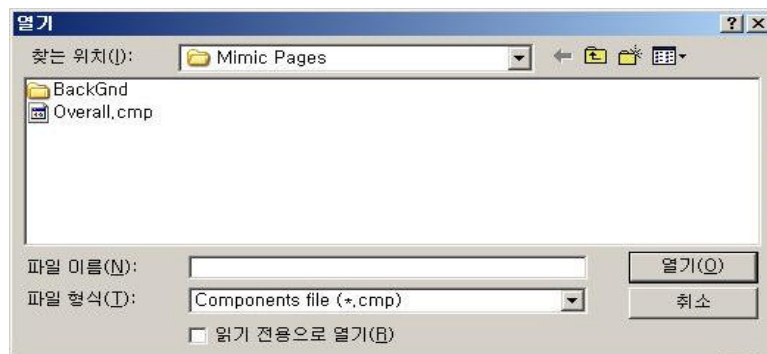
PCATS에서는 가압기 압력, 수위, RCS 온도 등 각 계통의 주요 변수에 대하여 계통과 연계되어 제공되는 실시간 그래프를 제공한다. 메인 화면의 메뉴 상단의 트렌드 버튼을 누르면 <그림. 4>와 같은 화면이 나타나며, 이 화면에서 주요 변수명을 입력하면 해당 변수의 변화를 그래프로 볼 수 있게 된다.



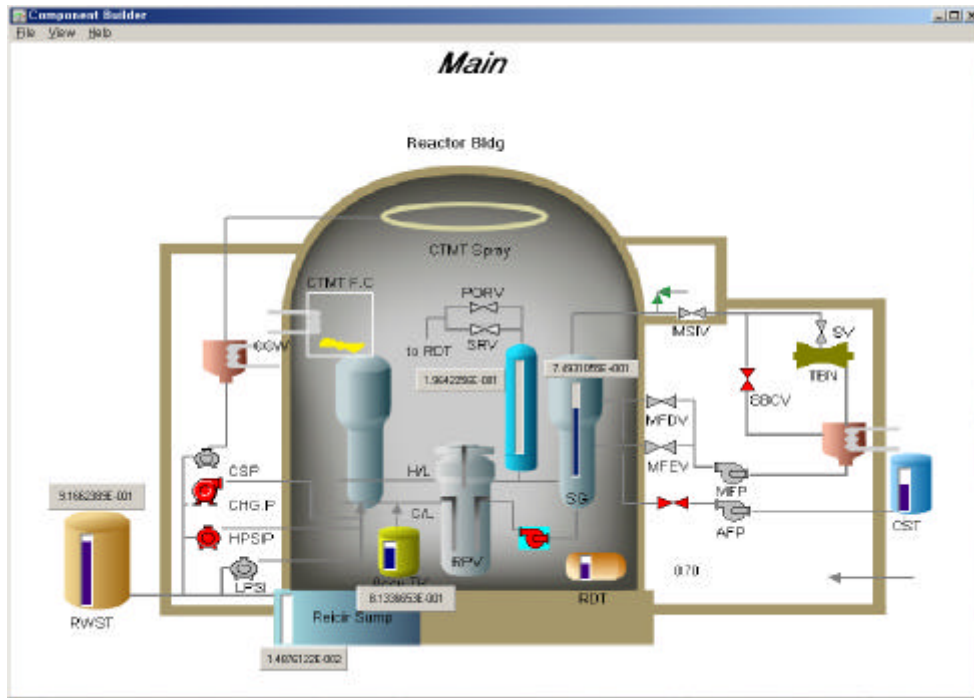
[그림 4] 트렌드 화면

2.4 미믹 (Mimic) 화면

메뉴 상단의 미믹 버튼을 누르면 사용자가 개발하여 변수를 연결하여 저장한 미믹 다이어그램을 불러 올 수 있다. <그림. 5>은 디폴트로 나타나는 화면이다.



[그림. 5] 미믹 불러오기 화면



[그림. 6] 디폴트 메인화면

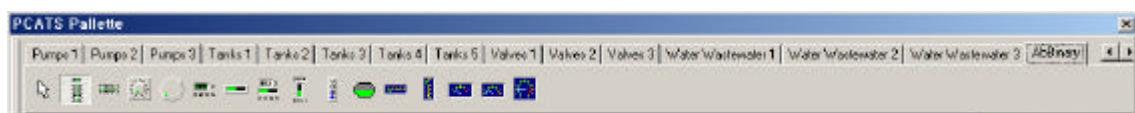
만일 사용자가 자기 고유의 화면을 만들려면 미믹메뉴의 'File/New'를 눌러서 바탕화면으로 원하는 그림 (BMP 혹은 JPG파일)을 선택하거나, 바탕 화면없이 하려면 '취소'버튼을 누르면 된다. 관리자 모드로 들어가기 위해서는 미믹 화면의 빈 화면에서 마우스 오른쪽 버튼을 클릭하여 암호 입력을 하게 되면 들어가는데, 이 모드에서는 계기 및 지시기를 사용자가 원하는 곳에 입력할 수 있게 되어 있다.

관리자 모드로 들어가는 암호를 바꾸기 위해서는 우측 하단부의 관리자 모드 버튼을 선택하고 <그림. 7>의 암호 입력절차를 거쳐(초기 암호는 없다) 자기 암호를 셋업할 수 있다.



[그림. 7] 암호변경 창

관리자 모드로 로그인 후에는 사용자 스스로 Mimic 화면을 구성 할 수 있는 컴포넌트가 그림 5-2-10와 같이 나타나게 되며 각 컴퍼넌트를 사용자가 마우스를 클릭하여서 Drag & Drop방식으로 캔버스에 끌어 놓을 수 있고 <그림. 7>화면의 'View/Palette'메뉴를 선택하여 사용자가 입력하기를 원하는 계기 및 지시기를 선택하여 화면에 놓으면 바탕화면에 선택한 컴포넌트가 생김을 알 수 있다. (<그림. 8>). 또한 오른쪽 버튼을 이용하여 해당변수를 입력할 수 있다.

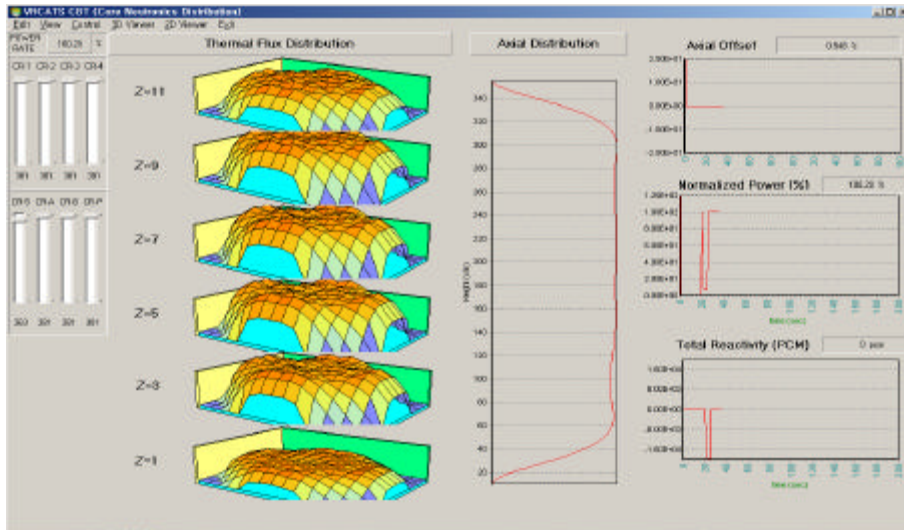


[그림. 8] 계기 및 지시기 사용자 입력모드

2.5 3차원 노심거동 화면

메뉴 상단의 3차원 노심 디스플레이 버튼을 누르면 <그림. 9> 이 나타나며 실시간으로 원자로 내부의 열중성자속, 냉각재 온도 분포, 핵연료 온도 분포를 3차원으로 나타낸다.

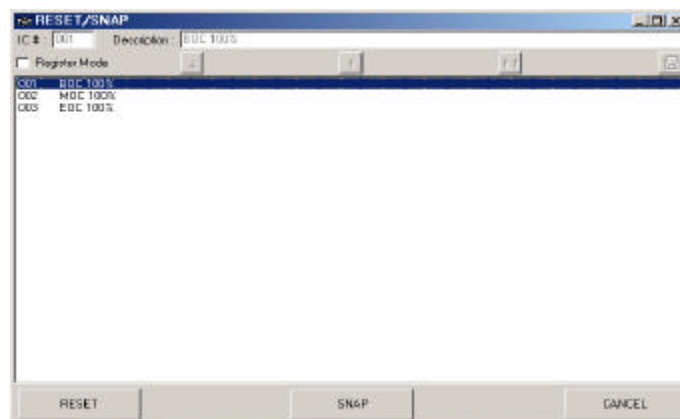
그 외에 각종 원자로 동특성 변수(Xe, Reactivity 등)의 추이를 관찰할 수 있다.



[그림. 9] 3차원 노심 디스플레이 화면

2.6 현재상태 저장/복원 기능

메뉴 우측 상단의 Reset 버튼을 누르면 그림과 같은 초기조건 (IC : Initial Condition) 선정 화면이 나온다.

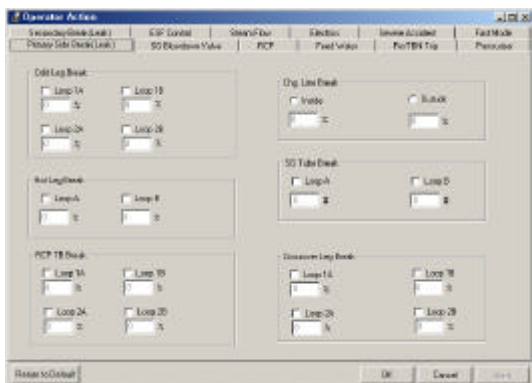


[그림. 10] IC 선정 화면

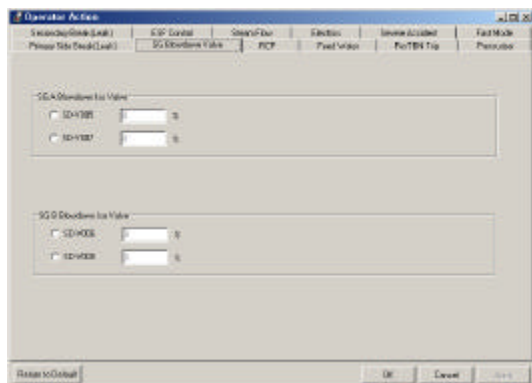
이 화면에서 사용자가 미리 저장해 놓은 초기조건 번호를 선택하고 시뮬레이션 조건을 초기화(reset) 하거나 각 계통모델의 현재상태를 저장(snap)할 수도 있게 하였다.

2.7 운전원 조작기능

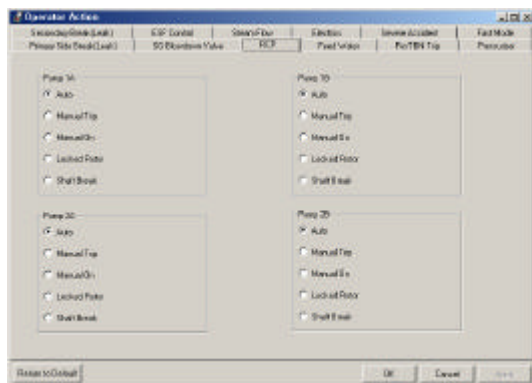
메뉴 상단의 운전원 조작(Operator Action) 버튼을 누르면 <그림. 11>에서 <그림. 22>에 나타나며 각 화면을 통해 시뮬레이션 도중에 운전원 조장을 통해 과도상태를 분석할 수 있도록 하였다.



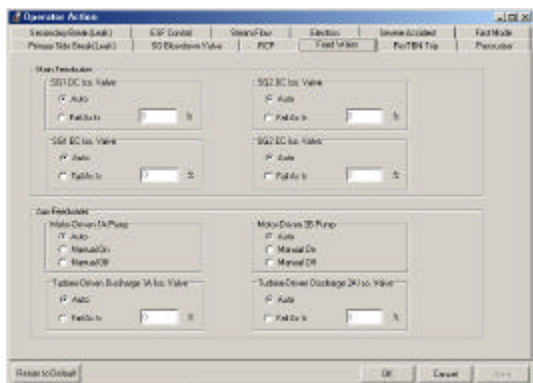
[그림. 11] Primary Side Drain(Leak) 화면



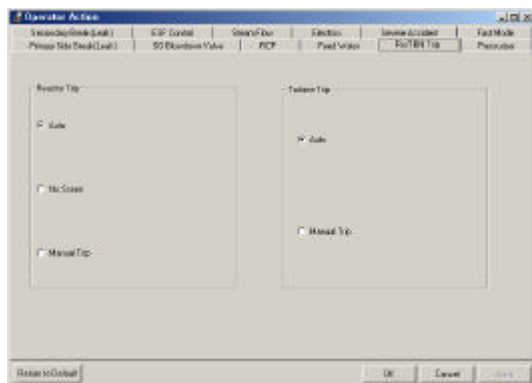
[그림. 12] SG Blowdown Valve 화면



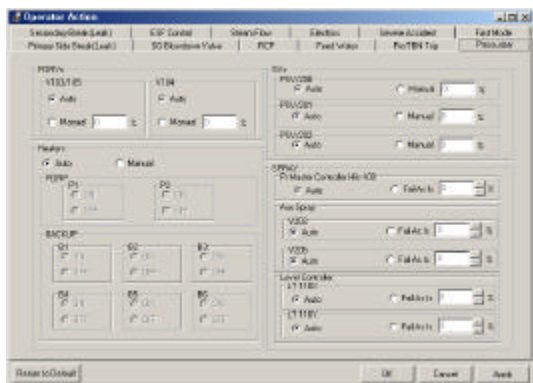
[그림. 13] Reactor Coolant Pump 화면



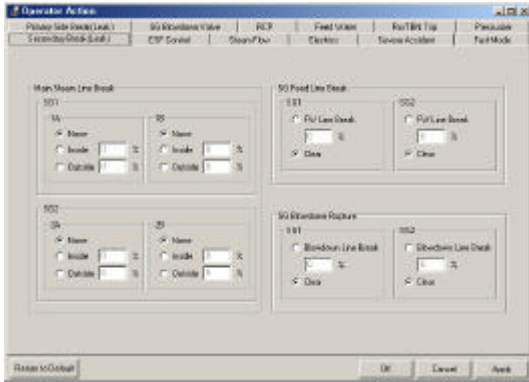
[그림. 14] Feedwater 화면



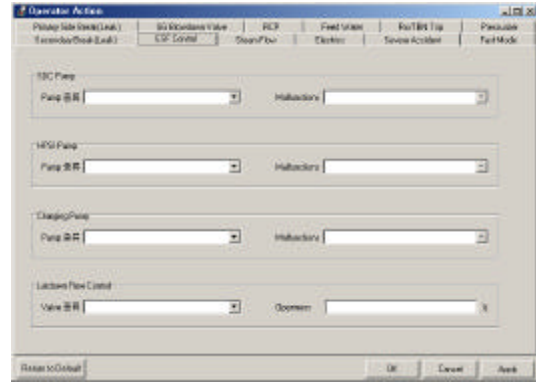
[그림. 15] Reactor/Turbine Trip 화면



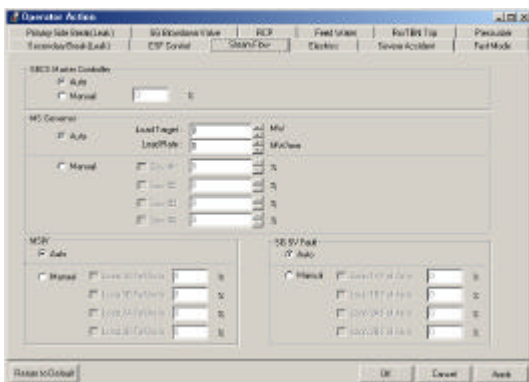
[그림. 16] Pressurizer 화면



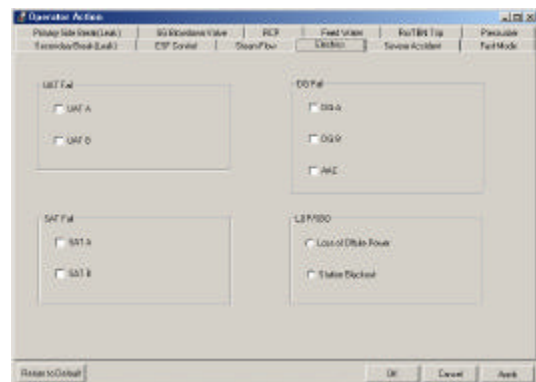
[그림. 17] Secondary Break (Leak) 화면



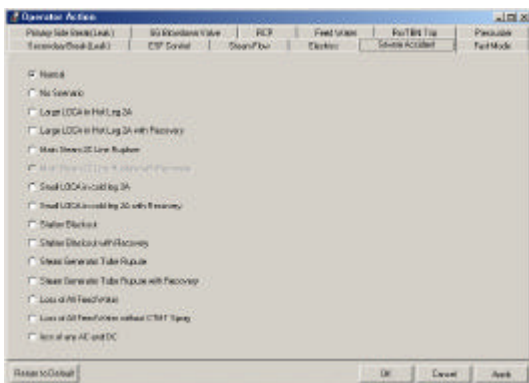
[그림. 18] ESF Control 화면



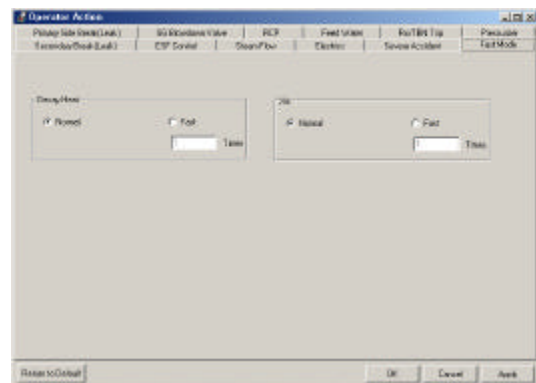
[그림. 19] Steam Flow 화면



[그림. 20] Electrics 화면



[그림. 21] Severe Accident 화면



[그림. 22] Fast Mode 화면

III. 결론

개발된 PC기반 개인학습시스템 (PCATS)는 전범위 복제형 시뮬레이터인 울진 표준형원전 시뮬레이터에 탑재된 3차원 노심모델, ARTS 모델 및 중대사고 모델을 동일하게 사용하여 시뮬레이터의 모의 결과와 유사성을 유지하면서도 개인 PC상에서 구동이 가능하도록 개발하였으며, 기존에 훈련된 전문가들만 사용하던 중대사고 코드의 TEXT 기반 사용자 입출력 방식 (INP 파일)을 객체 지향 (Object-Oriented Program) 기반의 GUI를 통하여 대화식 제어 (Interactive Control) 기능이 가능하도록 하였다. PCATS를 통하여 교육생 개인

이 직접 특정 사고를 각자의 PC상에서 직접 모의할 수 있을 것이며, 시간적/공간적 제약으로 전범위 복제형 시뮬레이터에서 다룰 수 없었던 다양한 사고에 대해서도 사용자가 직접 실시간/초실시간을 제어함으로 인하여 다룰 수 있음에 따라 사고 분석 및 질적인 교육효과에 큰 도움을 줄 것으로 기대한다.

IV. 참고문서

- [1] REMARK, GSE Modeling Technical manual
- [2] The Nuclear Design Report for Ulchin Nuclear Power Plant Unit 3 Cycle 2, KNF-U3C2-99018, KEPCO Nuclear Fuel Co., LTD., July 1999.
- [3] RETRAN-3D -- A Program for Transient Thermal-Hydraulic Analysis of Complex Fluid Flow Systems, NP-7450(A), July 2001
- [4] KEPCO, Ulchin Units 3&4, Final Safety Analysis Report, Chapt. 15, pp 15.0-1.
- [5] KHNP, 영광 3,4호기 중대사고 관리지침서.
- [6] Myeong-Soo Lee etc, The new research activities of KEPRI for KNPEC-2 Simulator upgrade project , ASTC-Advanced Simulation Technologies Conference- 2001 SCS 2001.
- [7] ANSI/ANS-3.5 1993, Nuclear Power Plant Simulations for Use in Operator Training .
- [8] Yong-Kwan Lee etc, KEPCOs 3-Pack Simulator Develop Plan, Proceedings of the 1995 Simulation Multi-conference (Phoenix, AR, Apr.9-13, 1995), SCS, pp. 53-57.
- [9] Myeong-Soo Lee etc, Verification and Validation of the Yonggwang 3&4 Full Scope Simulator 12th European Simulation Multi-conference (June.16-19, 1998), SCS, pp. 246-251.
- [10] Yong-Kwan Lee etc, Performance of the NSSS Model for Design Base Plant Transients of the Yonggwang 3&4 and Kori No. 2 Simulators, 2000 Western Multi-conference (Jan.23-27, 2000), SCS.