

## 원자력 교육원 #2 시뮬레이터 성능개선에 관한 연구(I)

이명수, 유현주, 박신열, 홍진혁  
 한국전력연구원 원자력연구실 원전 I&C 그룹  
 e-mail : fiatlux@kepnr.re.kr

### Research of KNPEC-2 Simulator Upgrade (I)

Myeong-Soo Lee, Hyun-Joo Yoo, Shin-Yeol Park, Jin-Hyuk Hong  
 Nuclear Instrumentation & Control Group  
 Nuclear Power Laboratory  
 Korea Electric Power Research Institute

#### ABSTRACT

원자력교육원#2(KNPEC-2) 시뮬레이터는 1980년  
 도 중반에 웨스팅하우스에 의해 공급되어 계속 사  
 용되어 오다가 현재 성능개선 연구가 진행 중이다.  
 이번 성능개선을 통해 기존의 컴퓨터 시스템  
 (Gould MPX)와 소프트웨어의 전면 교체가 이루어  
 지고 있으며 최적 계산코드를 이용한 실시간 열수  
 력 모델 (ARTS; Advanced Real-Time  
 Thermal-Hydraulics Simulation ) 개발, 2-Group  
 3D 실시간 노심모델(REMARK; REal Time  
 Multigroup Advanced Reactor Kinetics)를 이용한  
 노심 주기개선(Cycle Update), 가상현실 기술등을  
 이용한 컴퓨터 교육지원 시스템(CATS: Computer  
 Assister Training System) 등 새로운 시도가 이루  
 어지고 있으며 본 논문은 이러한 새로운 시도들 및  
 그 결과에 대해 기술하고 있다.

기준발전소(Reference Plant)인 영광 1호기 12주기  
 의 노심모델로 주기개선(Cycle Update)을 위한  
 REMARK의 입력자료 생성을 위해 핵설계 전산  
 체계인 APA (ALPHA-PHOENIX -ANC) 시스템  
 의 출력으로부터 자동으로 REMARK 입력데이터  
 를 생성하기 위한 GUI를 개발하였다.

또 이를 이용하여 개발된 노심 모델은 최적계산코  
 드(RETRAN 3D)의 열수력 해법을 이용하여 개발  
 된 NSSS 열수력코드(ARTS)와 결합(Integration)  
 되어 안정 및 과도 상태 시험에 사용되었으며, 원  
 자로 냉각재 펌프 정지등의 몇 가지 과도 시험 계  
 산결과 기존 해석 결과와 잘 일치하였다.

중앙제어실(MCR ; Main Control Room)내의 운  
 전원 행동만 훈련하도록 되어있는 기존 시뮬레이터  
 의 한계를 극복하기 위해 가상현실(VR) 저작도구  
 를 이용한 발전소 현장 내부를 표현하는 가상발전

소(Virtual Plant), 발전소 현장에 소개하여 기존 시  
 뮬레이터의 모의한계 밖에 있던 패널을 표현한 가  
 상패널(Virtual Panel)등과 강의실에서 발전소 모의  
 훈련을 가능케하기 위해 가상현실 기술을 이용한  
 컴퓨터 지원 교육훈련 시스템(CATS: Computer  
 Assister Training System)을 개발 중이며 일부 개  
 발부분을 소개하였다.

#### 1. 서론

1991년부터 시작된 발전소 전범위 시뮬레이터  
 (Full Scope Simulator) 국산화 개발 계획(3-Pack  
 Project)<sup>(1)</sup>으로 UNIX 기반의 발전소 운전원 훈련  
 용 전범위 시뮬레이터 개발에 성공한 이후 3기의  
 노후화된 기존 시뮬레이터가 성능개선 작업이 이루  
 어지고 있다.<표1>

시뮬레이터	기준발전소	노형	공급사	비고
울진#1	울진#1	PWR950 (F)	삼성 SDS GSE	Rehosting
원자력 교육원#2	영광#1	PWR950 (W)	KEPRI 삼성 SDS KAERI	모델 신규개발
삼천포화력	삼천포#1	드림	HEC	모델 신규개발

표 1 성능개선(Upgrade)중인 발전소 시뮬레이터 현황  
 Table 1 Upgrades of Power Plant Simulator in KOREA

이중 하나인 원자력교육원 #2시뮬레이터는 1980년  
 대 중반에 기준발전소인 영광 1호기 원자력 발전소  
 와 함께 웨스팅하우스로부터 도입된 시뮬레이터로  
 서 그 당시 실시간 계산 능력이 탁월하여 널리 쓰

여겼던 Gould 컴퓨터를 사용하고 있으며 시뮬레이터의 하드웨어 및 소프트웨어 모델이 기준 발전소와 일치된 국내 최초의 발전소 특화(Plant Specific) 시뮬레이터이다. 그러나 당시 컴퓨터 성능으로 실시간 계산을 하기 위한 열수력 모델의 한계로 원자로 냉각재 계통의 배수(Drain) 불가, 이상 유체 유동 모사의 부정확, 부분충수 운전 불가 등의 한계와, 매년 계속된 연료교체로 인한 노심 특성변화, 발전소 설계변경 사항 미반영, 특수 컴퓨터 시스템 운영의 어려움과 유지비 상승, 시스템 노후화에 따른 잦은 고장 등이 발생하여 성능개선의 필요성이 제기되었다.

본 논문은 상기 문제를 해결하기 위해 전력연구원(KEPRI)에서 추진 중에 있는 성능개선 현황과 결과를 소개하고자 한다.

## 2. REMARK 노심모델 개발

REMARK(Real Time Multigroup Advanced Reactor Kinetics)는 원자로 노심을 실시간으로 시뮬레이션 하기위한 미국 GSE사의 노심 모델 개발틀로서 원자로의 정상 및 비정상 하에서 속중성자 열중성자의 특성을 정확히 모의하기 위해서 2 에너지 그룹을 사용하고 중성자속과 출력분포를 정확히 모의하기 위해서 3-D Mesh-cell 구조를 갖는다. Finite Difference 방정식을 사용하여 시간중속 확산이론을 유도하여 계산한다. 이 컴퓨터자원과 실시간 조건이 경계가 되어 Mesh-cell의 크기를 정할 수 있다. 비균질(heterogeneous) 원자로는 다중의 균질 메쉬로 나뉘어 모의된다.

### 2.1 영광 1호기 노심 노드

영광 1호기 12주기 노심 모델을 위해 다음 그림과같이 연료 집합체별로 모두 156개로 나누고 다시 축방향노드(Axial Node)를 12개씩 노심을 분할하고, 열수력 모델과의 연계를 위해서 <그림1>과 같이 반경방향으로 3개의 지역(Zone)으로 나누어 원자로 냉각재 온도 등을 받아서 사용하였다.

### 2.2 핵설계코드 결과를 가공 GUI 프로그램

핵설계 코드를 이용하여 나온 결과(NDR 및 ANC 출력)에서 필요한 자료를 추출하여 배열 등을 바꾸어 REMARK 입력형식에 맞추어 가공하는 것이 시간이 많이 소요되고 또 실수가 발생할 소지가 많기 때문에 이를 가공하여 REMARK 코드 입력을 자동으로 생성하는 GUI 코드<그림2,3>를 개발하여 사용하였다.<sup>[2]</sup>

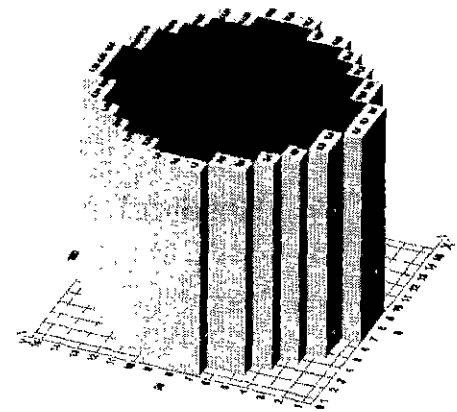


그림 1 영광 1호기 REMARK 노심모델 노드  
Fig. 1 Nodalization of REMARK for YGN-1 NPP

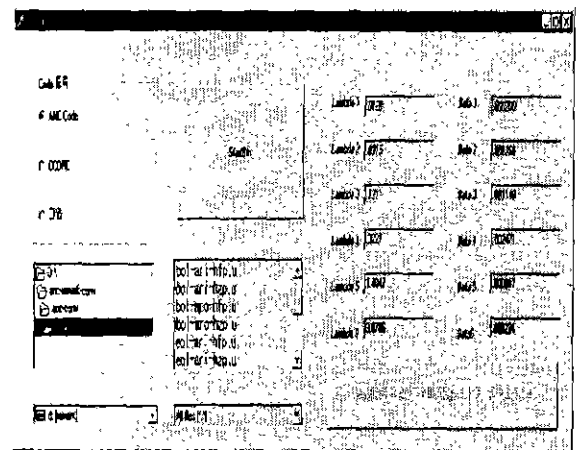


그림 2 ANC 코드 출력으로부터의 자료 생성  
Fig. 2 Input Display from ANC output

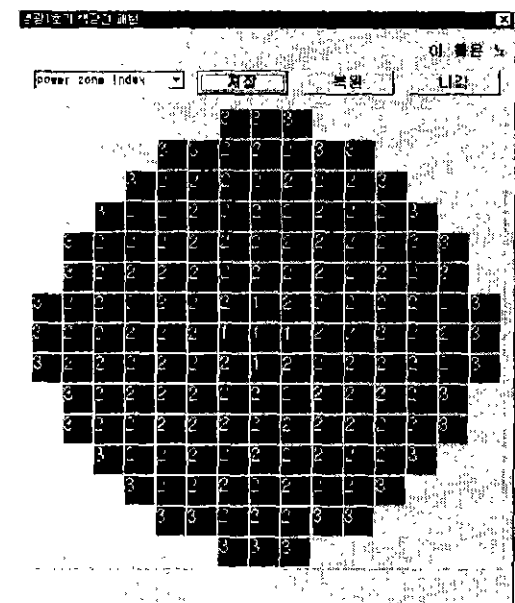


그림 3 NDR로부터의 자료 입력  
Fig. 3 Input Display from NDR

이러한 입력자료 작성용 코드들은 시뮬레이터 개발이 끝난 후에 기준발전소의 연료 교체 등으로 노심 특성이 변경되어서도 운영 부서에서 주기개선(Cycle Update)을 수행할 때 사용되어 운영자의 편의성을 향상시킬 수 있을 것이다.

### 3. ARTS 열수력모델 개발

기존의 시뮬레이터 열수력 코드는 실시간으로 계산하기 위해 원자로 냉각루프의 운동량이 유로 전체에서 보존(Loop Momentum Model)된다는 등 여러 가지 가정을 사용하여 단순화하여 계산하여왔다. 이러한 기존 시뮬레이터의 문제점을 해결하기 위한 노력으로 최적 계산코드(Best-Estimated Calculation Code)를 직접 채택하거나 전환/개발하려는 움직임이 시작되고 있으나 실용화에 성공하여 광범위하게 적용되지 않고 있다.

#### 3.1 RETRAN 코드

RETRAN 코드는 미국의 EPRI(Electric Power Research Institute)가 원자력 발전소의 과도현상 해석을 위해 개발한 최적계통분석 코드이며, 본 연구에서 채택한 RETRAN 3D는 원자로 노심모델을 3차원으로 할 수 있으며 이상유동(Two-phase flow)을 모의하기 위해 5-Equation Model을 채용하고 있다.

#### 3.2 ARTS 코드 개발

한전 전력연구원과 한국원자력연구소는 공동으로 최적 계통분석코드인 RETRAN을 기본으로 영광 1호기 시뮬레이터용 실시간 NSSS 열수력 프로그램(실시간 열수력(ARTS; Advanced Real-Time Thermal-Hydraulics Simulation) 모델을 개발 중이다. 최적코드 RETRAN을 시뮬레이터용으로 개발하기 위해 복잡한 물리적 상관식(Correlations)을 단순화 및 유동영역에 따른 불연속성을 제거하여 코드의 Robustness를 보완함과 동시에 실시간 계산이 가능하도록 개선했다. 다음은 주요 개선 및 보완 사항이다.

1. 유동영역에 따른 불연속성 제거 및 물리적 상관식의 단순화
2. Slip 모델 개선

이상유동에서 액상과 기상의 속도차를 고려하기 위해 액상과 기상의 속도차( $v_l - v_g$ )의 부호(sign)가 양쪽 제어체적의 중심과 정선의 높이 차를 기초로 Slip 속도의 부호를 결정하도록 하여 유동이 왜곡되는 가능성을 배제하였다.

#### 3. 비응축성 가스 모델 보완

#### 4. 일부 전문모델 개발

일반화된 모델보다는 전문화된 모델(Dedicated Models)이 계산시간 및 Robustness 관점에서 유리할 수 있으므로 다음의 기능에 대해서는 전문 모델을 개발했다.<sup>[3]</sup>

- 가압기 방출 탱크 모델
- 붕소수송모델
- 방사성 동위원소 및 기타 물질의 이송
- 보조계산체계(Backup System) 개발

ARTS 코드의 열수력 모델이 실시간 계산이 불가능하거나 계산실패가 발생한 경우에 일차 계통을 HEM(Homogeneous Equilibrium Model)을 사용하여 계산 후, 상세한 유동분포는 추가로 펌프의 angular momentum equation과 Loop momentum equation을 써서 구하여 시뮬레이션 모델의 연속성을 갖고 계산이 수행되도록 한다.

#### 3.3 영광 1호기 NSSS 열수력 모델 개발

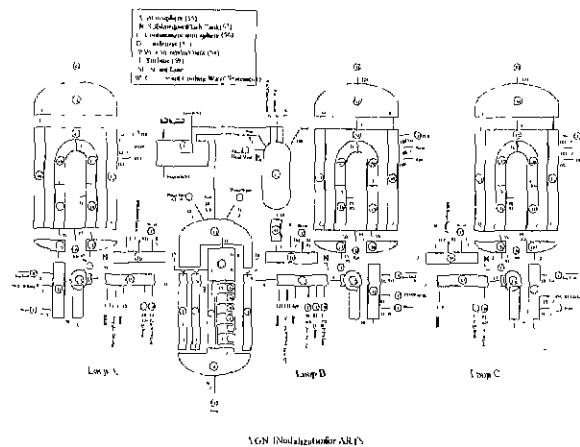


그림 4 영광 1호기 ARTS Nodalization  
Fig. 4 ARTS Nodalization for YGN-1 NPP

영광 1·2호기는 3-루프 Westinghouse형 원전으로 이에 대한 ARTS Nodalization은 그림 1과 같다. 원자로 계통은 62개의 수력적 체적과 125개의 Fill 및 Normal junction으로 구성되어 있으며 상의 변화가 예상되는 수력적 체적에(가압기, 증기발생기 상부등)는 Bubble-rise model을 적용하여 계산시간을 단축하였다.

#### 3.4 과도시험 결과

개발된 ARTS 영광 1호기 모델은 REMARK로 모의된 영광 1호기 제 12주기 노심모델과 결합되어 초당 10회(10 Cycles)의 주기로 실시간으로 계산하도록 GSE 시

플래이더 환경(SSP 3.3; Sim Suite Power 3.3)의 ODS(Official Directory System)에서 과도 시험 중에 있다. <그림5>는 RCP 1대 정지시 원자로 출력과 냉각제 유량 변화를 보여주고 있다.

#### 4. CATS 개발

원자력교육원 #2 시뮬레이터 컴퓨터 지원 교육훈

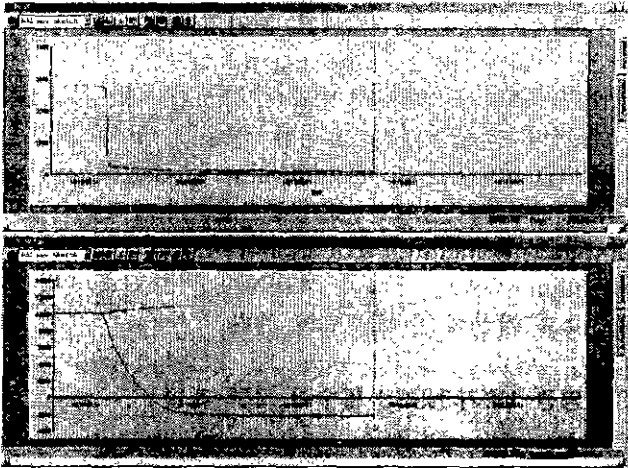


그림 5 RCP A 정지시 원자로 출력 및 유량 변화  
Fig. 5 Reactor Power and Flow with RCP A Trip

련 시스템(CATS: Computer Assister Training System)은 다음과 같은 목적을 수행하도록 개발되고 있다.<sup>[4]</sup>

첫째 중앙제어실(MCR ; Main Control Room)내의 운전원 행동만 훈련하도록 되어있는 기존 시뮬레이터의 훈련한계를 확장하기 위해서 가상현실(VR) 저작도구를 이용하여 발전소 현장 내부를 표현하는 가상발전소(Virtual Plant), 발전소 현장(Local Area)에 소재하여 기존 시뮬레이터의 모의한계(simulation cope) 밖에 있던 현장 패널을 표현한 가상판넬(Virtual Panel) 모의 둘째, 강의실(Classroom)에서 인트라넷(Intranet)을 통해 시뮬레이터 Stand-by 주 전산기(Stand-by Host Computer)에 접속하여 OHP등을 이용한 기존의 정적인 강의에서 실시간으로 사고 상황을 모의함에 따른 동적(Dynamic) 훈련

<그림6>은 가상 발전소의 일부화면이다.

#### 5. 결론

원자력교육원 #2(기준 발전소 영광 1호기) 시뮬레이터의 성능을 개선하기 위해 실시간 NSSS 열수력모델에는 최적 계산코드(RETRAN)를 기반으로

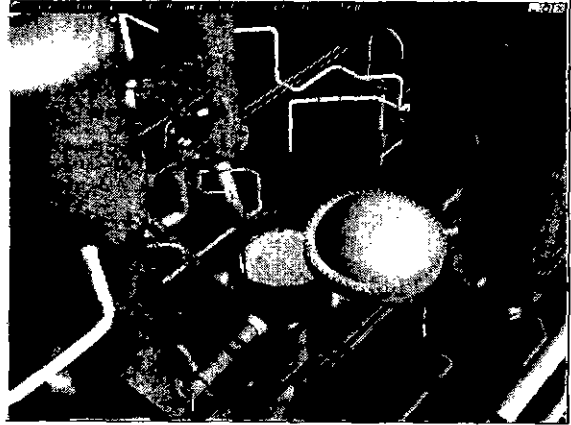


그림 6 CATS 영광1호기 가상발전소 격납용기 내부화면  
Fig. 6 Inside of Containment of YGN-1 Virtual Plant in CATS

한 ARTS 모델을 개발 적용하고, 2-Group 3D 실시간 노심모델인 REMARK를 이용하여 영광1호기 12주기 노심모델 및 입력자료작성용 GUI 프로그램을 개발하였다. 이 두 모델이 결합되어 실시간 시뮬레이션 환경에서 ANS3.5의 기준<sup>[5]</sup>을 만족시킬 수 있도록 정상 및 과도상태 시험 중에 있으며 시험 결과 최적계산 코드 계산 결과와 잘 일치하였다. 또 가상현실(VR) 등 첨단 기술을 도입한 강의실 교육 효과를 극대화한 CATS 시스템을 개발 장착하게 됨에 따라 기존의 공간적 제약에 따른 훈련한계를 극복하고 성능 개선이 완료되면 시뮬레이터가 단순한 모의 조종 장치가 아니고 종합 훈련 시스템의 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다.

#### Reference

- [1] Yong-Kwan Lee etc, "KEPCO's 3-PACK Simulator Development Plan", SCS, Vol. 90, 1990.6
- [2] 이명수 외 "영광12호기 시뮬레이터 노심모델 및 입력변환틀 개발", 2000 춘계 한국 시뮬레이션 학회, pp168-173, 2000.4
- [3] 이승욱 외 "영광원자력1/2호기 시뮬레이터 NSSS 열수력 프로그램 개발(I)", 2000 춘계 한국 에너지 공학회, p101-106, 2000.5
- [4] 유현주 외 "인터넷에서 가상발전소(Virtual Plant) 설계에 관한 연구", 1999 추계 정보처리학회, Vol. 12, 1999.10.7
- [5] ANSI/ANS-3.1, "American National Standard for Selection, Qualification and Training of Personnel for Nuclear Power Plants", 1998.