

원자력연수원 시뮬레이터 2호기 노심모델 개선

신호철, 박종은, 김용배, 이용관, 이상희

한국전력공사 전력연구원

대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

원자력연수원 시뮬레이터 2호기의 노심모델은 도입초기 WH사가 제공한 영광 1호기 노심 데이터를 그대로 사용하고 있어 기준 발전소 노심 반응(제어봉가, 붕소가, 감속재 온도계수 등)과 차이를 보이고 있다. 본 논문에서는 발전소 주기 경과에 따른 노심특성 변화를 시뮬레이터 노심 모델에 반영하여 훈련원들이 실제 발전소와 유사한 상황에서 모의운전을 할 수 있도록 WH사의 핵설계 전산체계인 APA(ALPHA-PHOENIX-ANC) 시스템을 이용하여 영광 1호기 제9주기 노심모델 상수를 생산하고, 개선된 노심모델의 교정을 지원하는 윈도우 프로그램을 개발하였다. 또한 검증 계산결과를 핵설계 보고서와 비교하여 생산된 노심모델이 ANSI/ANS-3.5 성능기준을 만족함을 확인하였다.

1. 서 론

원자력발전소 모의제어반은 실제 발전소에서는 훈련하기 어려운 사고 대비훈련을 숙달함은 물론 발전소 정상·비정상 및 비상운전절차서에 따른 훈련을 반복실습할 수 있는 설비이다. 한국전력공사는 950MW급 원자력발전소(고리 3·4, 영광1·2) 운전원이 실제 발전소와 동일한 운전환경에서 모의운전을 할 수 있도록 1986년에 원자력연수원 시뮬레이터 2호기를 미국의 Westinghouse사로부터 Turn-Key방식으로 도입하였다. 원자력연수원 시뮬레이터 2호기는 원자력발전소 전체를 대상으로 실시간 모의가 가능한 Full Scope Replica Simulator로서 12개의 Panel과 입출력제어장치 및 GOULD 컴퓨터로 구성되었고, 영광 1호기를 기준 발전소로 정하고 제1주기를 기준으로 노심모델이 생산되었다.

영광1호기는 계속적인 노심설계 변경이 있었으며 특히 12개월 표준 운전주기에서 18개월 장주기 운전으로 인하여 핵연료 농축도, 핵연료집합체 장전방법 및 초기 임계 붕소농도 등이 변화했으나, 시뮬레이터 2호기는 도입 초기의 노심모델링 데이터를 그대로 사용하고 있

어 기준 발전소 노심 반응(제어봉가, 붕소가, 감속제 온도계수 등)과 현저한 차이를 보여 운전원 실습 교육에 지장을 초래하고 있다. 또한, 원전 운전원 훈련 및 면허시험(원자로 조종 감독자 및 원자로 조종사)에 사용되는 시뮬레이터의 성능기준을 정한 미국 ANSI/ANS-3.5 (Nuclear Power Plant Simulator For Use in Operator Training and Examination)의 관련 요건을 만족하지 못하므로 이에 대한 개선이 필요하다. 현재 미국 WH사는 노심모델 변경 도구인 EZTUNE 시스템을 개발하여 매주기 시뮬레이터의 노심모델 특성이 기준 발전소와 일치하도록 하는 용역을 유상으로 제공하고 있다.

본 논문에서는 발전소 노심 경과에 따른 특성 변화 내용을 시뮬레이터 노심 모델에 반영하여 시뮬레이터 성능기준 만족과 운전원 훈련을 충족시키기 위해 WH사의 핵설계 전산체계인 APA(ALPHA-PHOENIX-ANC) 시스템을 이용하여 영광 1호기 9주기 노심 모델 상수를 생산하고, 생산된 노심모델의 교정을 지원하는 프로그램을 개발하였다. 또한 검증 계산결과를 핵설계보고서와 비교하여 생산된 노심모델이 ANSI/ANS-3.5 성능기준을 만족함을 확인하였다.

2. 시뮬레이터 #2 노심모델

시뮬레이터는 정상상태 뿐만 아니라 반응도 변화(제어봉 삽입/인출, 붕소농도 변화 또는 원자로 입구온도 변화 등)로 유발되는 과도상태시 노심 핵특성을 정확히 모사할 수 있어야 한다. 그러나 시뮬레이터는 실시간 계산이 요구되므로 3차원 중성자속 분포를 식 (1)가 같이 공간함수인 반경방향 중성자속과 시간함수인 축방향 중성자속으로 분리하여 계산하고 다시 합성함으로써 구한다.

$$\phi(x,y,z,t) = F(x,y) \Phi(z,t) \dots\dots\dots (1)$$

축방향 출력분포를 구하기 위해 식 (2)와 식 (3)과 같이 Modified One Group Diffusion Theory 및 6 Delayed Neutron Precursor Groups을 사용한 Space-time kinetics Equation을 이용한다.

$$\frac{1}{\nu} \frac{d}{dt} \phi = \frac{1}{k} (1-\beta) \nu \Sigma_f \phi - \Sigma_a \phi - \nabla \cdot \bar{J} + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i + S \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{d}{dt} C_i = \frac{1}{k} \beta_i \nu \Sigma_f \phi - \lambda_i C_i \quad i=1,6 \dots\dots\dots (3)$$

식 (2)를 유한차분법을 이용하여 시간과 공간에 대하여 적분함으로써 해를 구하며, 원자로를 축방향으로 16개 노드의 노심영역 및 상·하부 각 1개 노드의 반사체 영역으로 구성한다. 한 Time step 동안 각노드에서의 공간종속 파라메타(ϕ , C_i , Σ , ν , etc.)는 동일한 값을 갖는다고 가정한다. Space-Time Neutron Kinetics 계산을 위해 사용되는 단면적은 reference 감속제 온도와 공명 유효 온도에서 구하여진 거시적 단면적이다. 아래 식 (4)와 같이 중성자 거시적 흡수단면적은 정의 된다.

$$\begin{aligned} \Sigma_a^1 &= \Sigma_a^1(Fuel) + \Sigma_a^1(Rod) + \Sigma_a^1(B^{10}) \\ &\quad + \Sigma_a^1(Water) + \Sigma_a^1(Doppler) \\ \Sigma_a^2 &= \Sigma_a^2(Fuel) + \Sigma_a^2(Rod) + \Sigma_a^2(B^{10}) \\ &\quad + \Sigma_a^2(Water) + \Sigma_a^2(Xe) + \Sigma_a^2(Sm) \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

상기 중성자 단면적들은 냉각재의 밀도변화에 따른 스펙트럼 경화를 고려하도록 식 (5)에 정의된 spectrum hardening correction(SPECT)에 의해 보정된다.

$$(SPECT) = 1 + \alpha \left(-\frac{\Delta\rho}{\rho_{ref}} \right) \dots\dots\dots (5)$$

시뮬레이터 2호기에서는 아래 식 (6)과 같이 1-Group 단면적과 2-Group 단면적에 속중성자속과 열중성자속의 비를 가중한 1-Group 평균 단면적을 이용한다.

$$\begin{aligned} \bar{D} &= \frac{RATIO * D^f + D^{th}}{RATIO + 1} \\ \bar{\Sigma}_a &= \frac{RATIO * \Sigma_a^f + \Sigma_a^{th}}{RATIO + 1} + \bar{D}_1 * B_1^2 \end{aligned}$$

$$\text{여기에서, } RATIO = \frac{\phi^{fast}}{\phi^{th}} = \frac{\Sigma_a^{th} + D^{th} * B^2}{\Sigma_r}$$

본 연구에서는 영광 1호기 9주기를 기준 발전소로 정하고, One Group Space-Time Neutron Kinetics에 사용되는 단면적과 동특성 인자를 WH사의 노심분석 전산체계인 APA (ALPHA/ PHOENIX/ANC) 시스템을 이용하여 그림 1과 같은 절차로 얻었다.

1단계 : 2군 거시적 단면적 생산

PHOENIX-P 코드를 이용하여 3차원 노심분석코드인 ANC 코드를 위한 연소도, 붕소농도, 연료형태 그리고 온도의 함수의 2군 거시적 단면적을 계산한다. PHOENIX-P 코드는 2차원 다군 수송이론 코드로서 ENDF/B-V 라이브러리로부터 생산한 42군 핵단면적을 기초 핵자료로 사용하고 있다. ANC 코드의 연소계산을 위해 Heavy-metal 15종, 핵분열생성물 24종 (유사 핵분열생성물 2종 포함)에 대한 붕괴사슬(decay chain) 계산을 수행한다.

2단계 : 3차원 노심 연소계산

ANC 코드를 이용하여 3차원 노심 연소계산을 수행한다. ANC 코드는 기존의 FDM 코드에서와 달리 계산시간 단축을 위해 핵연료집합체의 1/4을 기본 계산격자로 취급하고 노달 확장법(NEM)을 이용하여 3차원 2군 중성자 확산방정식을 전개한다

3단계 : 1차원 노심모델 균정수 생산

2군 1차원 중성자 확산코드인 APOLLO 코드를 이용하여 시뮬레이터 2호기의 1차원 노심모델 상수를 생산한다. APOLLO 코드를 위한 1차원 단면적은 ANC 코드의 3차원 단면

적을 압축하여 구한다. 이렇게 일차적으로 구한 1차원 단면적을 이용하여 3차원 노심을 정확하게 모사하기 불가능하므로 3D-ANC 계산결과와 일치하도록 하는 버클링 탐색을 수행하고 이를 APOLLO 코드에서 고려한다. APOLLO 1-D 모델 계산결과의 타당성을 검토하기 위해 ANC 3-D 모델과 비교하여 다음 기준의 만족여부를 확인한다.

Boron :	± 5.0 ppm
Delta Difference in axial offset :	± 1.0 %
Percent Difference in midplane power :	± 4.0 %
Percent Difference in axial peaking factor :	± 2.0 %

4단계 : 노심 평균 동특성 인자 계산

FIGHTH 코드를 이용하여 도플러 온도계수를 생산하고 PHIRE 코드를 이용하여 다음의 노심 평균 동특성 인자를 계산한다.

- 지발중성자 분율
- 유효 지발중성자 선형 핵종 붕괴상수
- 즉발중성자 수명
- 지발 중성자 중요도 (Importance)
- 반응도 (기동율의 함수)
- 주기 (for 역시간 방정식)

3. 시뮬레이터 2호기 노심모델 Tunning 프로그램 개발

시뮬레이터의 노심모델은 시간 제약상 1군 1차원 방정식을 채택하므로 3차원 핵설계 코드가 보이는 정확도를 유지하기는 불가능하다. 따라서 노심모델 데이터를 현장에 설치 후 중성자 출력분포와 핵특성이 기준 발전소와 유사하도록 하는 교정작업이 필수적이다. 지금까지 노심모델의 교정은 현장 시뮬레이터를 대상으로 시행착오적 방법에 의해 수행하므로 교정에 많은 시간이 요구되었다. 또한 기존에는 반경방향 중성자 누설율과 축방향 기울기만으로 교정을 하여 무한증배계수와 축방향 출력분포만을 일치 시켰다.

본 연구에서는 전산분야의 각종 응용소프트웨어를 이용하여 사용자 접속부분(GUI)을 구현함으로써 사용자의 편의성을 최대한 고려한 노심모델 교정 프로그램을 개발하였다. 이 프로그램은 동일 윈도우 통합 환경하에서 교정인자 변경 및 교정결과의 시각적 확인이 가능하도록 하였다. 또한 제어봉가, 붕소가, 감속재 온도계수 및 축방향 출력분포의 교정이 가능하도록 하였다. 그림 2는 교정 프로그램의 실행화면의 예이다.

4. 결과 및 결론

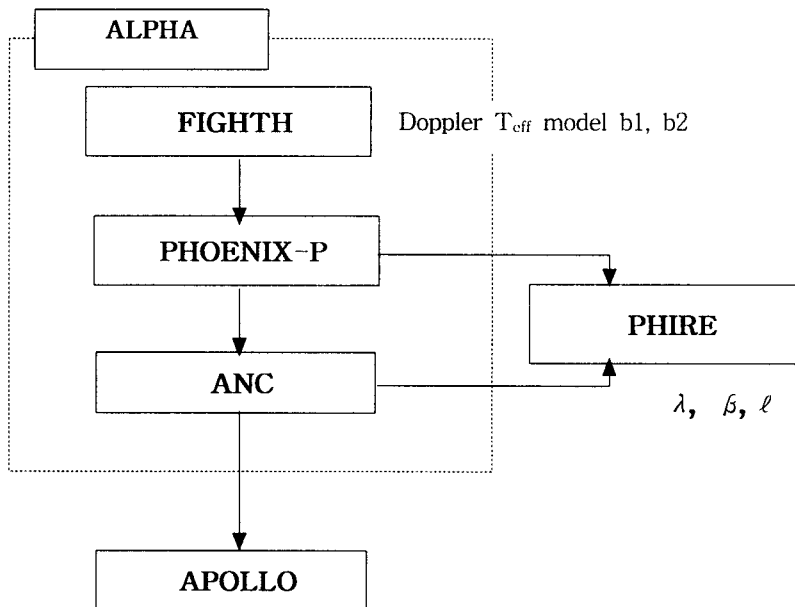
정상상태에서 노심 특성계산의 정확도 확인을 위해 영광 1호기 제9주기에 대해 240 MWD/ MTU에서의 C뱅크와 D뱅크의 제어봉 적분값, 임계 보른농도, 축방향 출력편차 및 미분 붕소값을 계산하였고, 이를 표 1과 그림 3과 같이 핵설계보고서의 설계치와 비교·분석하였다. 개선된 노심모델이 ANSI/ANS-3.5(Nuclear Power Plant Simulator for Use in

Operator Training and Examination)의 Non-Critical Parameter 허용 오차 기준($\pm 10\%$)을 만족함을 확인하였다.

본 연구를 통하여 매주기 시뮬레이터의 노심모델 특성이 기준 발전소와 일치하도록 하는 시뮬레이터 2호기의 노심모델 상수 생산절차 및 교정방법 절차를 자체로 수립함으로써, 훈련원들이 보다 실제 발전소와 유사한 상황에서 발전소 정상·비정상 및 비상운전절차서에 따른 훈련을 반복실습할 수 있도록 하였다.

참고문헌

- [1] INCORE 3D Programmers Manual for Version 7.4.3, Westinghouse, (1994)
- [2] ANC User Manual, Westinghouse, (1994)
- [3] PHOENIX-P User Manual, Westinghouse, (1994)
- [4] Lahey Fortran 5.2 rev. Programmers Manual, (1992)
- [5] "MS Visual Basic Language Reference", Microsoft, (1995)
- [6] "MS Visual Basic Programmer's Reference", Microsoft, (1995)



$$D(z), \sum a(z), \nu \sum f(z), x \sum f(z), \emptyset(z)$$

그림 1. 시뮬레이터 2호기 노심모델 생산 절차도

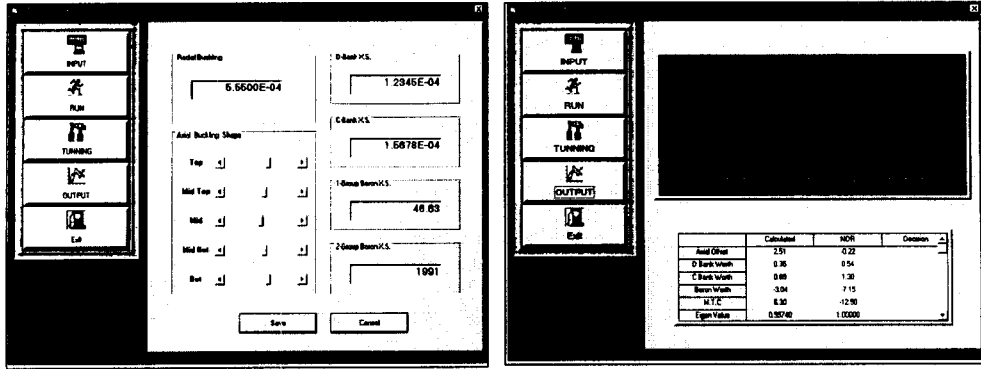


그림 2. 시뮬레이터 2호기 교정 지원 프로그램 출력화면

표 1. 노심특성 주요인자 비교표

구분	해설계보고서 (A)	현 노심모델 (B)	편차율 $= (A-B)/A * 100$	판정
C Bank 적분값 (% $\Delta\rho$)	1.30	1.40	-7.7%	만족
D Bank 적분값 (% $\Delta\rho$)	0.54	0.58	-7.4%	"
미분 붕소값 (PCM/PPM)	-7.15	-7.33	-2.5%	"
MTC (PCM/°C)	-12.5	-12.7	-1.6%	"
ARO 임계 붕소농도 (PPM)	1491	1540	-3.3%	"
측방향 출력편차 (%)	-0.22	1.33	-1.55%	"

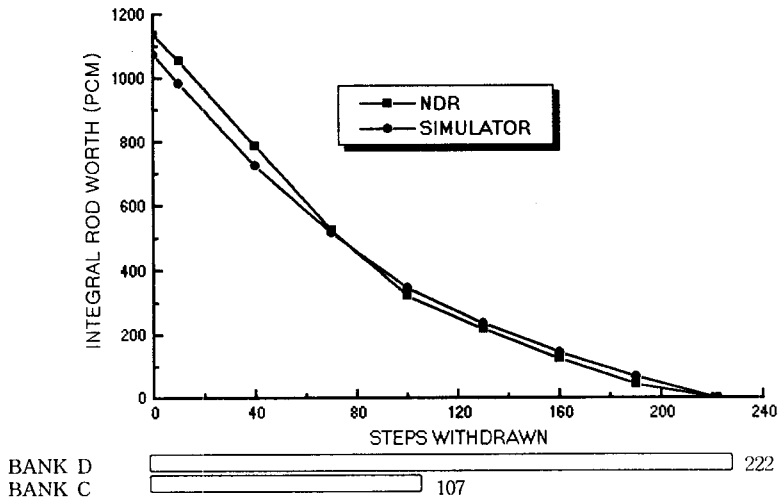


그림 3. D 뱅크와 C 뱅크 중첩 제어봉 적분값 (BOL, HFP and Equilibrium Xenon)