

# 영광1호기 시뮬레이터 노심모델 및 입력 변환툴 개발

이명수<sup>o</sup>, 홍진혁, 박종은, 박신열, 유현주,  
한진전력연구원

지금까지 국내에서 설치되어 있는 원전 시뮬레이터용 노심(Neutronics) 모델 프로그램은 주로 전산기 성능이 오늘날 비해 낮은 환경에서 실시간으로 노물리 계산을 위해 중성자 확산(Diffusion)현상을 미리 반영한 곡선을 사용하는 등 빠른 계산을 위해 많은 가정과 간략화가 있었다. 본 논문에서는 중성자 물리 계산을 2 Group 3-D로 계산이 가능한 최신의 노심코드(REMARK)를 이용하여, WH사가 공급한 900Mw의 3 Loop PWR인 영광 1호기 12주기를 기준으로 한 시뮬레이터의 노심모델 개발하기 위한 핵설계 전산체계인 APA (ALPHA-PHOENIX -ANC) 시스템의 출력으로부터 자동으로 REMARK 입력데이터를 생성하기 위한 GUI 툴 개발과 개발된 노심모델의 자체 검증 및 원자력발전소 사고해석에 쓰이는 최적평가코드(RETRAN)를 기반으로 하는 최신 실시간 열수력 시뮬레이션(ARTS) 모델과 결합(Integration)되어 원자로 냉각재 펌프 1대 정지 및 터빈정지 시험등 과도시험한 결과를 기술하였으며 개발된 노심 모델은 원자력교육원 2호기 시뮬레이터에 적용될 예정이다.

## I. 서론

유명한 TMI(Three Mile Island)사고 이후 그 필요성이 인정된 원자력 발전소 시뮬레이터는 고도의 안전성과 정밀성을 바탕으로 운전원이 실제 상황과 동일한 환경 하에서 실습할 수 있도록 해주는 모의 훈련장치로서 발전소 운전원 운전능력 배양, 운전절차서 검증 및 개발, 제어기법 사전 점검 및 안전도 분석, 운전방법 개선 등에 광범위하게 사용되고 있다. 특히 미국 NRC에서 원전 운전원 면허(원자로 조종감독자 및 원자로 조종사) 시험에 시뮬레이터를 사용토록 법제화(10CFR55)

하면서부터 원자력 발전소를 운영해야 하는 전력 회사에게 자격있는 운전원 배양해내는 시뮬레이터의 중요성은 날로 커지고 있다.[1,2,3]

이미 경수로(PWR) 및 중수로(PHWR)등 다양한 노형, 다양한 기기 공급자(WH, CE, Framatom, AECL, 한국표준형) 공급의 원자력발전소 14기가 동종중인 우리나라에서도 각 노형별 원자력 발전소 시뮬레이터를 5기 도입 혹은 개발하여 운영 중에 있다.

시물레이터	기준 발전소	노형	공급사	비고
교육원#1	고리#2	W600 2-Loop	KEPRI SDS	1998-
교육원#2	영광#1	W900 3-Loop	KEPRI SDS KAERI	성능 개선중
울진#1	울진#1	F900 3-Loop	SDS	성능 개선중
영광#3	영광#3	CE1000 2-Loop	KEPRI SDS	1997-
울진#3	울진#3	한국 표준형 2-Loop	KEPRI SDS KAERI	성능 개선중

표 1 원자력발전소 시물레이터 현황

이중 최초로 도입되었던 Surry 시물레이터(미국의 Surry 발전소용 복사본임)가 이미 '발전소 운전원 훈련용 시물레이터 국산화 개발과제(일명 3\_PACK Project)'에 따라 1998년 교체되었고, 외국에서 발전소와 함께 도입되었던 2개의 시물레이터(원자력교육원 #2, 울진#1 시물레이터)가 성능개선 작업 중에 있으며 1개의 한국 표준형 시물레이터가 개발 중에 있다.(표1)

본 논문은 전력연구원(KEPRI)에서 추진 중에 있는 '원자력교육원 시물레이터 2호기 성능개선' 과제의 일환으로 추진 중인 노심(Neutronics) 모델 및 주기개선(Cycle Update) 개발 방법론과 그 시험 결과를 다루고 있다.

## II. 본론

### 1. 영광1호기 시물레이터 노심모델 교체 필요성

원자력교육원 #2 시물레이터는 영광 1호기를 기준발전소로 1986년 준공되어 13년 동안 고리#3,4 호기 및 영광#1,2호기 운전원을 효과적으로 훈련시켜왔으나, 기존에 W사에서 공급한 시물레이터 노심모델인 RTC(Real Time Core)는 전산기 용량

등의 문제로 1.5 중성자 에너지 그룹을 사용하는 단순 서브루틴 개념의 프로그램으로 정확도의 한계를 갖고 있었다.

또한 18개월마다 바뀌게되는 기준 발전소 노심 모델의 특성을 반영하는 주기 개선(Cycle Update)절차가 복잡하고 이에 대한 정보가 없는 상태여서 기존의 모델로 주기 개선은 거의 불가능한 상태였다.

이에따라 그동안 기준발전소의 잦은 설계변경과 노심 재장전 패턴이 바뀌어 가면서 - 노심이 표준 핵연료에서 장주기 핵연료(KOFA -> V-5H)로 변경장전 됨- 표준핵연료로 초기노심으로 모델링된 시물레이터의 노심 반응이 기준발전소 현재의 노심 반응과 현저한 차이를 보여 운전원 실습교육에 지장을 초래하고 있었다.

### 2. REMARK 개요[4]

REMARK(Real Time Multigroup Advanced Reactor Kinetics) 는 원자로 노심을 실시간으로 시물레이션 하기위한 노심 모델 개발 툴로서 원자로의 정상 및 비정상 하에서 속중성자 열중성자의 특성을 정확히 모의하기 위해서 2 에너지 그룹을 사용하고 중성자속과 출력분포를 정확히 모의하기위해서 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(homogenous) 원자로는 다중의 균질 원자로로 나뉘어 모의된다.

REMARK의 주요특성은 다음과 같다.

- 중성자속 분포를 구하기위해 Improved Quasi-Static Solution을 사용
- 각 메쉬 셀에서 Six-Group Delayed Neutron
- 각 메쉬 셀에서 Four Isotope :
  - 1-135, Pm-149, Xe-135, Sm-149
- 반응도 케환(Reactivity Feedback) :
  - Fuel Temp.

- Coolant/Moderator Temp.
- Coolant/Moderator Density
- Void Fraction
- 제어봉 위치변화에 따른 반응도 효과
- 봉산 반응도효과
- Incore, Excore Detector에서 중성자속 측정
- 중성자 단면적 사용
- U-235,238, Pu-239로부터의 23 Decay Heat Group 사용

## 2.1 실시간 계산을 위한 단순화 가정

시뮬레이터의 특성상 실시간을 유지하면서 발전소와 같은 효과를 나타내기 위해서는 불가피하게 일부 방정식이나, 일부 변수를 단순화할 필요가 있으며 다음은 이를 위한 주요 가정이다.

가. 중성자 에너지 스펙트럼에서 에너지가 0.625eV 이하에서는 Thermal Neutrons(Group 2)을 취하며, 그 이상에서는 Fast Neutrons(Group 1)을 취한다

나. 핵분열로 부터의 발생된 중성자 및 지발중성자(Delayed Neutron)는 모두 속중성자(Fast Neutron)로 간주한다

### 다. Time Derivative Approximation

모든 방정식에서 시간은 Finite Difference 방법으로 축약된다.

$$df(t)/dt \approx (f(t+\Delta t) - f(t))/(\Delta t)$$

### 라. Six Delayed Neutron Precusor Groups

일반적으로 40개의 Delayed Neutron Precusore가 있지만 이중 그들의 특성이 알려지지 않은 것들이 있어 일반적으로 다 사용하지 않는다. 그중 가장 일반적으로 사용하는 6 Group Delayed Neutron Precusor를 REMARK에서는 사용한다

마. 노심의 구조는 변화하지 않는 것으로 가정한다.

바. 각 메쉬셀에서 제어봉가는 균질 (Homogeneous) 될 것이다.

## 2.2 열수력등 타 시스템과의 연계

REMARK 모델은 다음의 3개의 시스템과 연계된다.

### 가. 열수력(TH) 계통과의 연계

반응도 궤환(feedback) 계산을 위해 열수력 계통으로부터 다음과 같은 데이터를 입력받고 노심 출력을 제공한다.

- Liquid Density
- Vapor/gas Density
- Mixture Density
- Void Fraction
- Liquid Temp.
- Vapor/gas Temp.
- Fuel Temp.
- Clad Inner Surface Temp.
- Clad Outer SurfaceTemp.
- Boron Conc.

### 나. 계측계통 연계

원자로에서 NI/NM 은 In-Core Detector와 Ex-Core Detector로 나뉘어지며 측정기의 위치 정보를 받고 측정기 위치에서의 중성자 속을 제공한다.

### 다. 제어봉 조절계통과의 연계

REMARK 모델 계산은 제어봉의 3차원 구조에 의존한다. 제어봉은 일반적으로 그룹이나 패턴을 이루면 움직이는데 제어봉의 삽입길리와 패턴을 제공받아 중성자 속 계산에 사용한다.

## 3. 영광 1호기 노심모델 개발

영광 1호기 12주기 노심 모델을 위해 다음 그림과같이 반경방향으로 155개 축방향을 12개로 노심을 분할하였다.

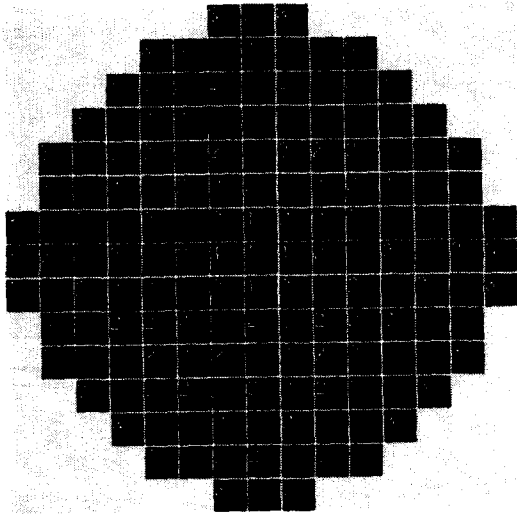


그림 1 영광 1호기 반경방향 노심분할

### 3.1 핵설계코드를 이용한 입력자료 생성

W사의 핵설계코드 체계인 APA (ALPHA / PHOENIX / ANC) 시스템을 이용하여 그림2와 같은 절차를 통해 중성자의 2군 거시 단면적 (Macroscopic Cross Section) 등 REMARK 모델 생성을 위한 기초입력자료를 생성하였고 그 상세 단계는 다음과 같다..

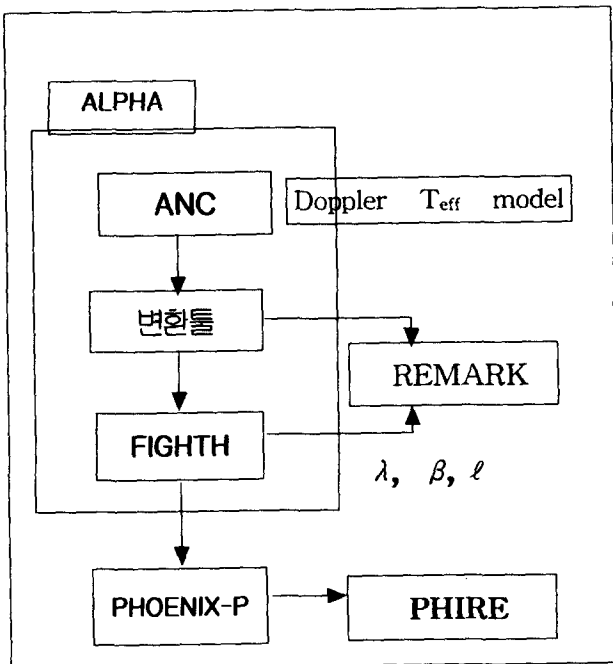


그림 2 핵설계코드로부터 입력자료 생성절차

1단계 : 2군 거시적 단면적 생산

PHOENIX-P 코드를 이용하여 3차원 노심분석코드인 ANC 코드를 위한 연소도, 붕소농도, 연료형태 그리고 온도의 함수의 2군 거시적 단면적을 계산한다. 이것은 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 생산하여 ANC 3-D 모델과 비교, 검증한다.

4단계 : 노심 평균 동특성 인자 계산

FIGHTH 코드를 이용하여 도플러 온도계수를 생산하고 PHIRE 코드를 이용하여 다음의 노심 평균 동특성 인자(지발중성자 분율 등)를 계산한다.

5단계 : 핵설계코드 출력을 이용한 REMARK 입력자료 생성

핵설계 코드를 이용하여 나온 결과(NDR 및 ANC 출력)를 가공하여 REMARK 코드 입력 형식에 맞추어 입력한다.[6,7,8]

3.2 핵설계코드 출력을 이용한 REMARK 입력자료 자동생성 GUI 코드 개발

핵설계 코드를 이용하여 나온 결과(NDR 및 ANC 출력)에서 필요한 자료를 추출하여 배열등

을 바꾸어 REMARK 입력형식에 맞추어 가공하는 것이 시간이 많이 소요되고 또 실수가 발생할 소지가 많기 때문에 이를 가공하여 REMARK 코드 입력을 자동으로 생성하는 GUI 코드(그림3,4)를 개발하여 시물레이터 개발이 끝난 후에 기준 발전소의 연료 교체 등으로 노심 특성이 변경되어서도 운영 부서에서 쉽게 주기개선(Cycle Update)이 가능토록 하였다

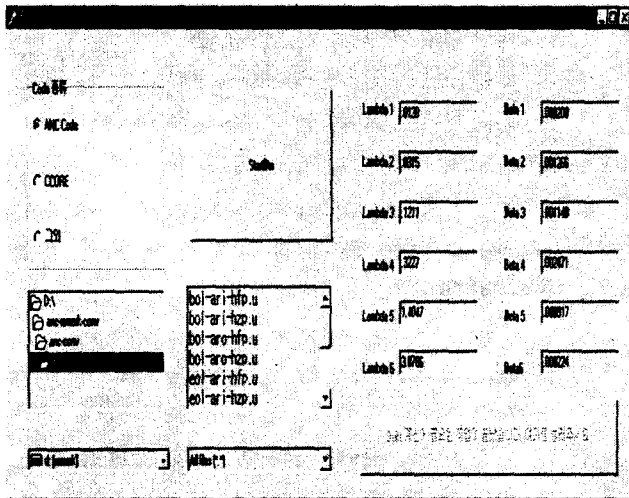


그림 3 ANC 코드 출력으로부터의 자료 생성

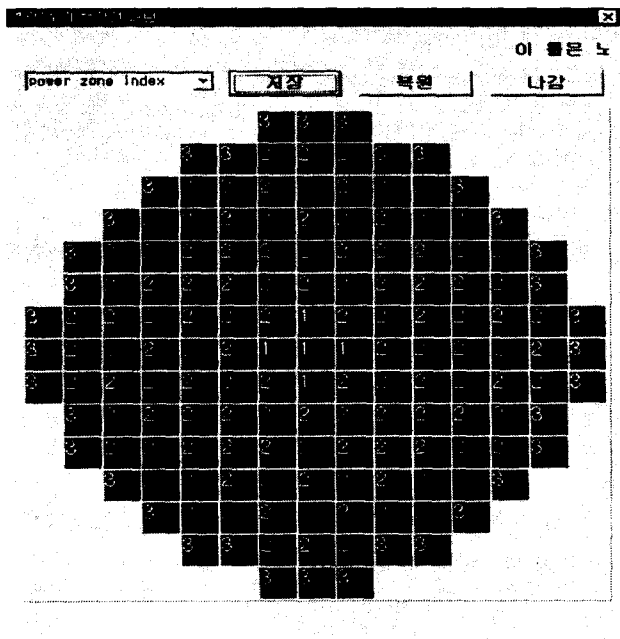


그림 4 NDR로부터의 자료 입력

### 3.3 100% 정상상태(Steady State) 시험

영광 1호기 12주기 노심 모델의 100% 정상상태 (Steady State) 모의 정도를 확인하기 위해 핵설계자료(NDR)결과와 확인하여 각종 기준값이 잘 일치함을 확인하였다. 그림5는 100%정상 상태(ARO)의 축방향 중성자 분포를 보여주고 있다.

### 3.4 과도상태 시험

개발된 노심모델은 최적 평가코드(Best Estimated Code)를 기반으로 ARTS(Advanced Real time Thermal-Hydraulics Simulation) 코드로 개발된 열수력 모델과 결합하여 과도상태를 시험하고 있다. 그림6,7은 RCP 1대 정지시의 과도상태에서 원자로 출력변화를 보여주고 있다.

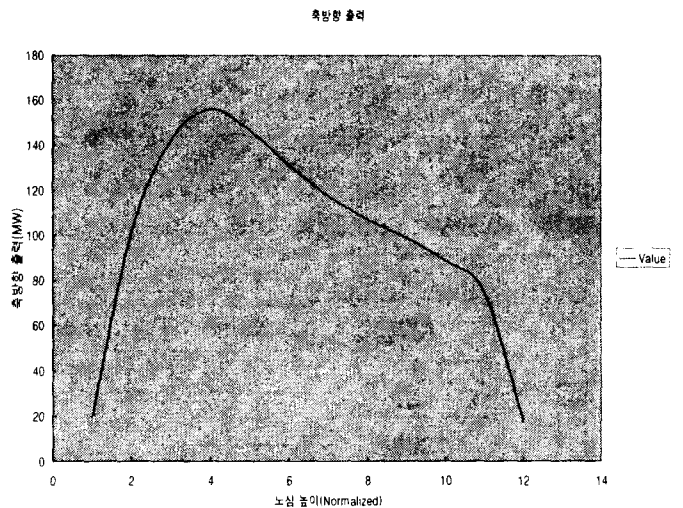


그림 5 100%시 축방향 출력 분포

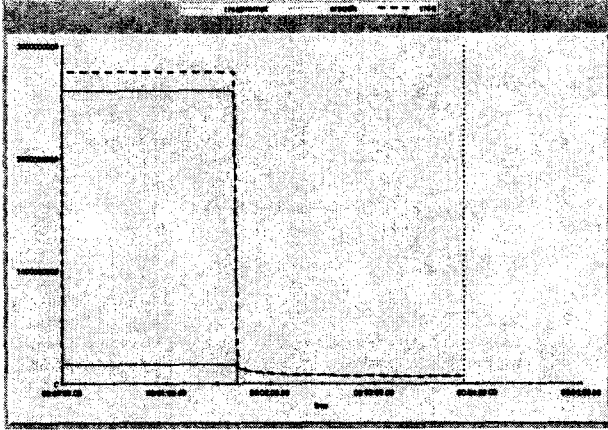


그림 6 RCP 1대정지로인한 원자로정지시 출력변화

### III. 결론

원자력발전소 안전한 운영을 위해서 운전원의 훈련에 소요되는 시뮬레이터의 성능확보는 매우 중요한일이다. 전력연구원은 노후된 원자력교육원 시뮬레이터 2호기의 성능개선을 위해 전산기 교체 및 노심모델(Neutronics 및 열수력 모델)을 최신 성능의 모델로 교체 작업을 하고 있다.

본 논문에서는 최신 2군 3D 노심 시뮬레이션 코드인 REMARK를 이용하여 영광1호기 12주기 노심모델을 생성하기 위해 핵설계 자료로부터 REMARK 입력자료를 자동으로 생성하는 변환툴을 개발하고 그 결과를 검증한 결과를 보였으며 현재 적용된 방법론은 영광 1호기 12주기 노심모델 뿐만 아니라 추후 기준발전소의 노심교체등으로 연료장전 패턴이 변화하더라도 쉽게 시뮬레이터의 노심을 개선할수 있는 유용한 방법이 될 수 있을것이다.

### IV. Reference

[1] ANSI/ANS-3.1, "American National Standard for Selection, Qualification and Training of Personnel for Nuclear Power Plants", 1998.

[2] RG1.149, "Nuclear Power Plant Simulation Facilities for Use in Operator

License Examination", Rev2, April 1996.

[3] 10CFR55, "Operator's Licenses".

[4] REMARK Modeling Manual, GSE, (1999)

[5] "INCORE 3D Programmers Manual for Version 7.4.3", Westinghouse, (1994)

[6] ANC User Manual, Westinghouse, (1994)

[7] PHOENIX-P User Manual, Westinghouse, (1994)

[8] ANC User Manual, Westinghouse, (1994)