

WH형 950MWe 원전 운전최적분석기 개발

홍진혁

한전전력연구원 원자력연구실 원자로공학그룹 시뮬레이터 개발팀

Development of Westinghouse 950 MWe-type NPA

Hong Jin Hyuk

Nuclear System Engineering Group

Nuclear Power Laboratory

Korea Electric Power Research Institute

요약

본 논문은 안전해석 등에 사용되는 RETRAN-3D 등 최적해석 코드를 기반으로 하면서도 복잡한 하드웨어없이 간편한 GUI (Graphic User Interface)를 이용하여 광범위한 발전소 과도상태를 해석하기 위한 다양한 기능을 통해 시뮬레이션 조작을 쉽게 할 수 있는 웨스팅하우스형 950MW급 최적 원전운전분석기 (Nuclear Plant Analyzer)를 다루고자 한다. WH형 950MW 원전 운전최적분석기는 기존의 단순한 Point Kinetics 모델이 아닌 정교한 3D 실시간 노심모델과 RETRAN 코드를 기반으로 하는 실시간 NSSS 열수력 모델 (ARTS)이 통합된 모델을 갖추고 있으며, 해당형식발전소 (WH 3 Loop PWR Plant : 고리 3,4호기, 영광 1,2호기 원전)의 여러 가지 과도사고를 실시간으로 정상, 비정상, 비상운전 등으로 모의할 수 있도록 개발되었다.

모의결과 주요 과도 상태의 결과가 해석한 결과와 잘 일치하였으며, 해당형식 발전소 과도 분석이나 규제요원 훈련에 이용될 계획이다.

I. 서론

우리 나라의 원자력발전소 발전량은 전체 발전량의 40%를 넘고 있는 매우 중요한 에너지원이다. 현재 가동중인 16개 원전 중 4개호기 (고리 3,4 및 영광 1,2호기) 원자력발전소는 원자력 산업 초창기에 웨스팅하우스로부터 일괄도입(Turn-Key) 방식으로 도입되어 여러해 동안 운전해오면서 여러 가지 다양한 운전경험을 갖고 있다.

이들 원자력 발전소의 운전특성 분석 및 과도상태 해석을 위해서는 발전소 설계시나 안전해석에 사용되는 설계코드를 이용하여 분석하던가 혹은 운전원 훈련용 시뮬레이터를 이용하는 방안이 있다. 전자의 경우 그 계산 결과가 정확한 대신에 입력자료 작성이 까다롭고 또 원하는 특정 초기조건 생성이 매우 어렵다.

후자의 경우는 복잡한 운전 조작이나 과도현상 재현이 비교적 용이한 대신에 시뮬레이터를 이용한데 따른 시간적, 공간적 제약으로 그 이용이 쉽지 않고, 훈련용 실시간성을 강조하다 보니 비교적 그 정확도가 떨어지는 단점이 있다.

본 논문에서는 안전 해석 등에 사용되는 최적 해석코드를 기반으로 하면서도 복잡한 하드웨어

어 없이 간편한 GUI(Graphic User Interface)를 이용하여 광범위한 발전소 과도상태를 해석하기 위한 다양한 기능을 통해 시뮬레이션 조작을 쉽게 할 수 있게 하기 위하여 한국원자력 안전기술원으로부터 수주받아 개발한 웨스팅하우스형 950Mwe 최적 원전 분석기(Nuclear Plant Analyzer)에 대해 소개하고 그 특성을 다루고자 한다.

II. 본론

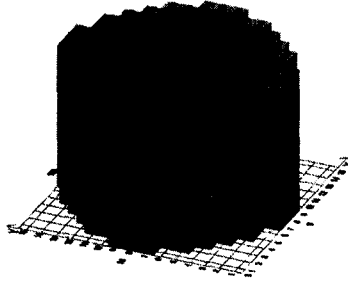
1. 플랜트 시스템 모델링

1.1 Reactor Model

노심모델개발에는 REMARK(REal Time Multigroup Advanced Kinetics) 툴이 사용되었다. REMARK는 원자로노심을 실시간으로 모의하기 위한 노심모델틀로서 원자로의 정상 및 비정상하에서 속중성자 및 열중성자의 특성을 정확히 모의하기 위해서 2에너지 그룹을 사용하고, 노심내의 중성자속과 출력분포를 정확히 모의하기 위해서 3차원 Mesh-cell 구조를 갖는다. 또한 Finite Difference 방정식을 사용하여 시간중속 확산이론을 유도하여 계산된다. 이 컴퓨터자원과 실시간 조건이 경계가 되어 Mesh-cell의 크기를 정할 수 있다. 비균질 원자로는 다중의 균질원자로로 나누어 모의된다. REMARK의 특징으로는 다음과 같다.

- (1) 노심 중성자속 분포를 계산하기 위한 개선된 Quasi-Static 해결방안 도입
- (2) 6군 지발중성자 고려
- (3) I-135, Xe-135, Pm-149, Sm-149 등 4개의 동위원소에 대한 농도 계산
- (4) 핵연료온도, 냉각재 온도/밀도, 기포분율 (Void Fraction) 등의 열수력학적 조건에 기초한 반응도 계환
- (5) 제어봉 궤적에 따른 반응도 계산
- (6) 보론농도 변이에 따른 반응도 계산
- (7) 노내(외) 검출기에서의 중성자속 계산
- (8) 실제 발전소의 노심계산에 사용되는 Lattice 코드 및 설계 코드의 Cross-section 사용
- (9) Fission Power History에 근거한 U-235, U-238, Pu-239로부터 발생하는 붕괴열 분포를 계산하기 위해 23개의 붕괴열 그룹을 도입.

WH 950MWe NPA에서 개발된 노심모델은 원자로심의 연료부분을 축방향으로는 12분할하고, 반경방향으로는 177개로 분할하여 전체 2124개의 노드로 분할하여, 3차원적인 중성자속 및 출력 분포를 계산해내고 있다.



[그림. 1] WH 950 MW NPA 노심모델
Nodalization

1.2 ARTS System

기존 시뮬레이터용 열수력 프로그램은 질량과 에너지로만 각 제어체적에서 보존하고 운동량은 “Loop Momentum Model”을 사용하거나, 정상상태 Bernoulli Equation을 사용하여 루프내의 냉각재 유량을 계산한다. 실제로 “Loop Momentum Model”을 이용한 계산방식은 일차측이 액상 (Single Phase Liquid)에 머무는 과도현상에는 유용하지만, 이상 유동시에는 전혀 타당성이 없는 방법이며, 정상상태 Bernoulli Equation을 사용하는 경우에는 유동의 유동에 관한 관성 (Inertia)이 무시되기 때문에 액상유동시와 같이 관성의 영향이 큰 경우에는 타당하지 못한 방법이므로, 계산결과와 신뢰도가 매우 떨어져 Negative Training을 야기할 수 있다. 반면에 RETRAN03과 같이 각 제어체적내의 질량, 에너지 및 운동량을 보존하는 최적코드를 사용한다면 해석결과의 정확도를 크게 향상시킬 수 있다. 결과적으로 기존의 단순화된 모델에서 비롯되는 저 신뢰도 모의결과 및 이로인한 Negative Training의 가능성에서 탈피할 수 있으며, 시뮬레이터를 최적평가환경에서 운전원의 훈련 및 평가에 활용할 수 있다. 더 나아가 시뮬레이터를 종합사고분석, Scoping Calculation 등의 도구로도 활용가능하게 된다.

가. 모의의 대상

ARTS 모델은 최신 시뮬레이터 제작기준인 ANSI/ANS-3.5-1998에 부합하도록 개발되었으며, 모의 대상인 계통은 다음과 같다.

- 원자로 압력용기
- 원자로 냉각유로 1, 2
- 원자로 냉각재 펌프 1A, 1B, 2A, 2B
- 가압기
- Reactor Drain Tank
- 1차측 증기발생기 1, 2

- 2차측 증기발생기 1, 2 : 출구의 유량제한기까지
- 상기 계통모델 관련 제어 및 보호계통 연계

나. Nodalization

울진 3·4호기는 2-루프 원전으로 이에 대한 RETRAN Nodalization은 <그림. 1>에 나와 있다. 원자로 계통은 62개의 수력적 체적과 126개의 Fill 및 Normal junction으로 구성되어 있으며 각 Volume은 정상운전 상태 및 각종 과도상태에서의 주요 열수력학적 특성을 반영하고 RETRAN 코드의 사용자 지침서의 권고사항을 최대한 반영하여 모델하였다. 특히 RETRAN 코드의 특성상 상(Phase)이 변하는 경우에는 계산시간 간격이 감소하므로 계산시간이 증가된다. 따라서 상의 변화가 예상되는 수력적 체적에는 Bubble-rise model을 적용하여 계산시간을 단축하였다.

1.3 발전소 일반계통

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.

2. Client MMI System

2.1 개요

WH 950MWe NPA MMI는 실시간 형상화 툴(Dynamic Data Visualization Tool)을 사용하여 설계되고 구현되었다. 실시간 형상화 툴은 다음과 같은 주요한 기능이 있으며 설계과정에서 이러한 기능이 활용되었다.

- Real-Time 데이터베이스의 모든 상수가 Fill-In-Blank로 손쉽게 입력 가능
- 탁월한 그래픽기능이 제공되고 현장데이터와의 연결구성이 간단
- 최종 사용자를 포함한 비 전문가도 간단한 교육만으로 수정이 가능
- 동시에 불규칙하게 발생하는 현장상황을 Real-time으로 처리 가능
- 발생되어 기록되어지는 수치들을 요구되는 양식에 적절하게 보고 가능
- 반복적인 프로젝트의 진행에 따른 업무 표준화가 가능

또한, WH 950MWe NPA는 Client/Server환경에서 동작되도록 설계되었다. 따라서 데이터공유가 원활하게 이루어 질 수 있도록 기록은 기존의 상용 Database인 Microsoft Data Engine (MSDE 2000)를 활용하였으며 실시간 데이터는 표준 통신 툴킷인 OPC기술을 활용하여 신속하게 처리 가능하도록 최적화하였다.

각 계통모델과의 연결은 업계표준방식인 OPC(Ole for Process Control)를 통하여 실시간으

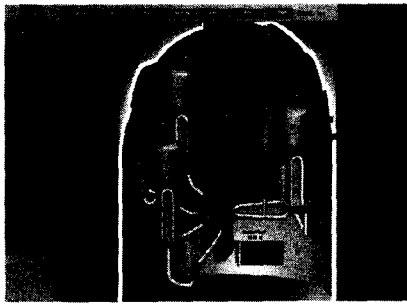
로 이루어진다. OPC Server는 Model Computer에서 동작되며 NPA MMI는 OPC Client기능으로 DCOM을 통한 원격 접속을 한다.

2.2 사용자 인터페이스

사용자 화면은 상단의 화면전환 영역, 왼쪽의 Sub 메뉴화면, 그리고 중앙의 주 화면으로 구성되어 사용자에게 이미 익숙한 기존에 개발된 시스템 구조를 그대로 계승하고 추가기능을 부여하여 사용자 편의성을 증진하였다.

가. Layout

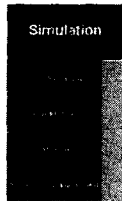
화면은 상단의 화면전환 영역, 왼쪽의 Sub 메뉴화면, 그리고 중앙의 주 화면으로 구성되어 있다.



[그림 2] Layout 화면정보

나. Simulation

Simulation 화면은 Model의 동작특성을 설정하고 simulation에 필요한 상황을 판단하는 화면을 제공하여 다음과 같은 화면기능을 제공한다.



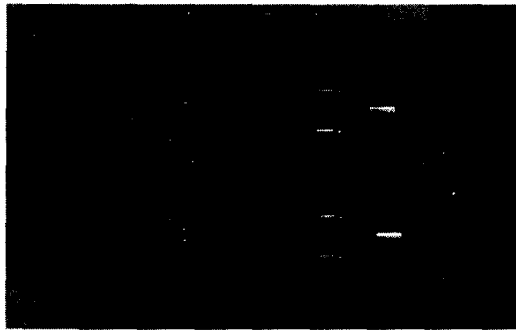
[그림 3] Simulation 화면정보

다. Mimic

Mimic은 Model의 상황을 GUI로 표현하여 운전자에게 일목 요연한 화면정보를 제공한다.



[그림 4] Mimic 화면정보 (I)



[그림 5] Mimic 화면정보 (II)

라. Plot

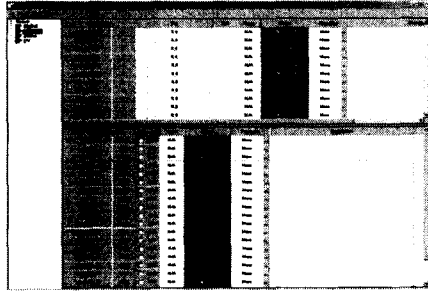
Plot은 연속적인 수치의 변화추이를 살펴볼 수 있는 Chart화면을 제공하며 다음과 같은 정보그룹을 제공한다.



[그림 6] Plot 화면정보

(4) Summary

Summary는 Data수치들의 집합의 현재 값들을 실시간으로 업데이트하는 화면을 제공하며 다음과 같은 화면을 제공한다.



[그림 7] Mimic 화면정보

(5) Alarm

Alarm은 이상상황을 시간의 순서로 정렬하여 자료를 제공하는 화면으로 다음과 같은 그룹을 제공한다.



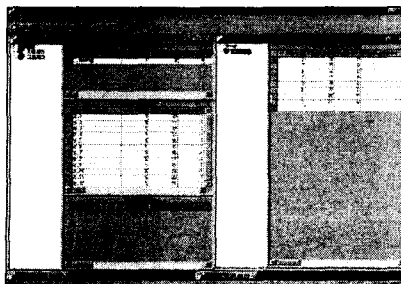
[그림 8] Alarm 화면정보

2.3 부가기능 구현

부가기능으로 Model에서 발생된 신호들을 이벤트로 받은 후에 각각의 용도에 맞게 데이터를 가공하여 처리하도록 하였다. 전체적인 성능에 영향을 주지 않도록 각각의 Thread는 Data가 변화된 경우에만 동작하게끔 설계되어 있다.

가. Event 보기

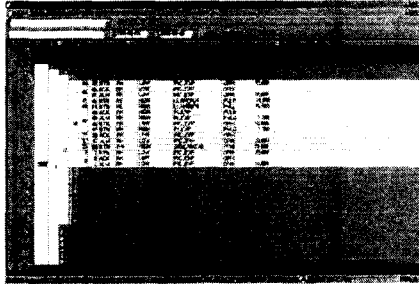
Event는 운전자의 조작으로 인한 상태변화가 있을때 동작되며 Task가 활성화 된 경우에 사용이 가능하다. Event는 메모리에 상주하는 실시간 Event와 Database에 누적되는 Historical Event로 구분되며 실시간 이벤트는 프로그램이 종료되면 내용이 지워지도록 되어 있다.



[그림 9] Event 보기

나. Historical Event

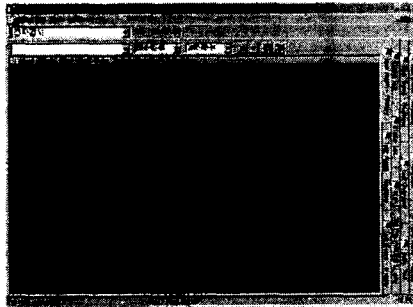
과거 발생한 Event를 보여준다.



[그림 10] Historical Event

다. Alarm보기

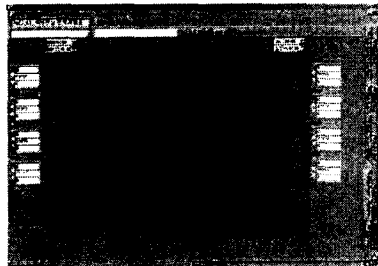
Alarm Task는 누적되어 있는 Historical Alarm과 현재의 Real-Time을 각각 선택하여 볼 수 있다.



[그림 11] Alarm 화면

라. Trend보기

Trend Task는 누적되어 있는 Historical Trend와 현재의 Real-time Trend를 각각 선택하여 볼 수 있다.



[그림 12] Trend 화면

3. 검증 (Verification & Validation)

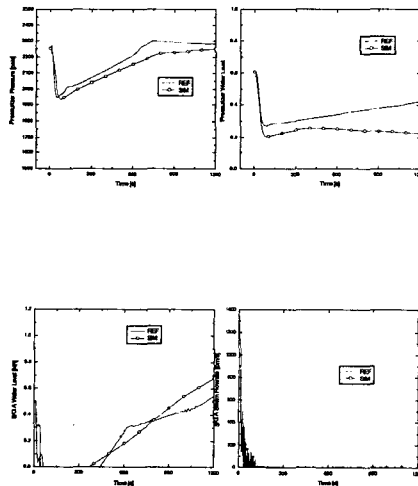
시뮬레이터의 성능을 확보하고 품질을 유지하고 성능확인 및 검증(Verification and Validation)을 위해 다음의 15가지 과도상태에 대한 시험을 인수성능 시험(Site Acceptance Test) 기간 중 시험하였으며 다음의 과도상태에 대한 검증자료를 생성하였다.

- (1) 수동 원자로 정지
- (2) 모든 주급수펌프 동시 트립
- (3) 모든 주증기차단밸브의 동시 폐쇄
- (4) 모든 원자로냉각재펌프의 동시 트립 (자연순환)
- (5) 한대의 원자로냉각재펌프 트립
- (6) 터빈 트립
- (7) 소외전원 상실과 최대 크기의 원자로냉각재 파열 사고(100% Severity)
- (8) 주증기 배관의 격리불능 최대 크기 파열(100% Severity)
- (9) 가압기 압력방출밸브 혹은 안전밸브 고착열림 상태에서 원자로 냉각재 압력이 포화 상태로 서서히 감소함
- (10) 증기발생기 튜브 파열(3개)
- (11) 소형 원자로 냉각재 상실 사고

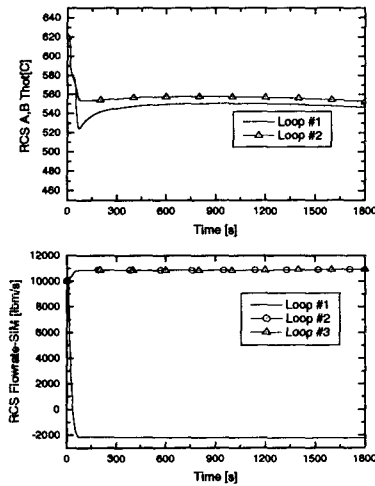
상기 사고에 대해 대형냉각재 사고를 제외한 모든 사고 해석에 RETRAN을 사용하여 기준 발전소(영광1호기) 사고를 모의하였으며 MARS 코드를 사용하여 대형냉각재 상실사고를 해석, 기준 자료를 생성하였다.

원자로계통을 약 300개의 볼륨으로 구성하였으며, 각 볼륨의 열수력적 모델링은 LBLOCA시 계통의 각 부분에서 발생하는 주요 열수력적 특성을 반영하고, MARS 및 RELAP 코드 사용자 지침서[8,9]의 권고사항을 최대한 반영하여 모델하였다.

그림 13, 14, 15는 각 과도 상태 중 터빈정지, RCP 1대 정지, 대형 냉각재 상실 사고시 주요 운전 변수 변화추이를 보여 주고 있다.



[그림. 13] 터빈 정지시 시뮬레이터 주요 변수 변화



[그림. 14] RCP A 정지시 시뮬레이터 RCS 온도 및 유량 변화

[그림.15] 대형냉각재 상실사고시 가압기 압력 및 수위변화

III. 결론

본 과제를 통해 개발된 웨스팅하우스 950 MWe 최적 NPA는 기존의 단순한 Point Kinetics 모델이 아닌 정교한 3D 실시간 노심모델과 RETRAN 코드를 기반으로 하는 실시간 NSSS 열수력 모델 (ARTS)이 통합된 모델을 갖추었으며 해당형식 발전소 (WH 3 Loop PWR Plant)의 여러 가지 과도사고를 실시간으로 정상, 비정상, 비상 운전 모의를 할 수 있도록 개발되었다. 이 NPA는 기존의 유닉스 환경이 아닌 일반 범용 PC 서버와 윈도우즈 환경 (Operating System)이라는 개방형 서버-클라이언트 구조를 채택하여 저렴하고 실용적인 시스템을 구축하였으며, RETRAN 코드의 한계를 초과하는 사고를 모의하기 위한 보조계산 체제를 갖추어 모의사고 영역을 확장하였다. 다양한 색상표현이 가능한 GUI 툴을 이용하여 노심내부의 3D 열중성자속 분포 등 사용자가 직관적으로 알 수 있는 쉬운 구성의 클라이언트 제어 시스템을 개발, 연계하여 사용자의 편의성을 도모하였다.

모의결과 주요 과도 상태의 결과가 해석한 결과와 잘 일치하였으며, 해당형식 발전소 (WH 3 Loop PWR Plant) 과도분석이나 규제요원 훈련에 이용될 계획이다.

IV. 참고문서

- [1] ANSI/ANS-3.5 1998, Nuclear Power Plant Simulations for Use in Operator Training .
- [2] RETRAN3D Code Manual, EPRI NP-7450, Rev. 3, Electric Power Research Institute (1998)
- [3] EC, 1996, Operator Assisting Systems for Accident Management. EUR-16925
- [4] IAEA, 1990. Computer Based Aids for Operator Support in Nuclear Power Plants, IAEA-TECDOC-549
- [5] Bartsoen, L., et al., 1997, "Nuclear Plant Analyzer: An Efficient Tool for Training and Operational Analyses", Proc. 2nd CSNI Specialist Meeting on Simulators and Plant Analyzers, Finland.
- [6] REMARK, GSE Modeling Technical manual
- [7] Myeong-Soo Lee etc, The new research activities of KEPRI for KNPEC-2 Simulator upgrade project , ASTC-Advanced Simulation Technologies Conference- 2001 SCS 2001.
- [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.