

## 고리 원자력발전소 1, 2 호기 원전분석기 개발

### Development of the Nuclear Plant Analyzer for Kori Nuclear Units 1 & 2

서재승<sup>a</sup>, 서경철<sup>b</sup>, 정재준<sup>c</sup>, 김경두<sup>c</sup>, 이윤규<sup>d</sup>, 모상영<sup>d</sup>, 이종배<sup>d</sup>, 강동식<sup>d</sup>  
<sup>a</sup>한양대학교, <sup>b</sup>충남대학교, <sup>c</sup>한국원자력연구소, <sup>d</sup>한국전력공사

#### 요 약

최근에는 전산환경의 발달로 최적계산코드를 NPA(Nuclear Plant Analyzer)의 기본 코드로 채택하는 경향이 있다. 원자력연구소와 한국전력공사 고리원자력본부가 공동으로 개발 중에 있는 고리 원자력 1/2호기 NPA는 미국의 대부분 원전운영자를 사용자로 확보하고 있는 최적계산코드인 RETRAN을 기본코드로 채택했다. 개발된 NPA는 발전소 현장에 설치되어 운전원의 현장교육과 운전절차 및 설비개선을 위한 기초자료로 활용할 예정이다. NPA에서 제공되는 각종 그래픽 화면은 정상 운전 혹은 사고시 발생하는 NSSS(Nuclear Steam Supply System)의 주요 열수력현상의 이해를 도와주며, GUI(Graphic User Interface)환경에서 구현되는 입력작성기의 개발로 발전소 운전원이 쉽게 광범위한 과도 입력을 준비할 수 있도록 하였다. NPA 개발의 기본 전산환경을 Windows 운영체제로 하여 발전소 운전원이 원자력교육원의 Full Scope Simulator를 통하지 않고 개인컴퓨터에서 각종 과도모의를 할 수 있도록 하였다.

#### Abstract

With the rapid advances in computer technology, adopting the best-estimate thermal-hydraulic codes for nuclear plant analyzer is the general trend of the current nuclear plant analyzer. KAERI(Korea Atomic Energy and Research Institute) and KEPCO(Korea Electric Power Company) is developing the nuclear plant analyzer combined with the best-estimate thermal-hydraulic code, RETRAN, for Kori nuclear units 1 & 2. The developed NPA will be installed on the plant site and used for the site-specific training of plant operators and to examine the feasibility of the modification of operation procedures or plant facilities, etc. The various graphic displays of NPA is prepared to help an in-depth physical understanding of the main NSSS thermal-hydraulic phenomena during normal and accidental plant conditions. The computer aided transient input generator with GUI environment is also developed to help the transient input preparation. Windows operating system is selected for the platform of the KORI 1&2 NPA to make it possible to simulate the plant transients in operator's personal computer.

## 1. 서론

원자력 발전소 운전원은 정기적으로 원자력교육원에서 Full Scope Simulator를 이용한 다양한

과도운전 실습을 통해 운전교육을 받고 있지만 발전소 현장에서 수시로 행해지는 운전원 교육에 필요한 교육자료는 문서나 강의에 의존하기 때문에 현장특성에 부합한 현실감 있는 교육이 어렵고 발전소 설비개선이나 운전절차의 개선에 필요한 과도모의는 전적으로 외부 연구기관에 의존하고 있다.

지난 수십년 동안 Full Scope Simulator의 꾸준한 발달로 모의 정확도가 크게 개선되고 모의 범위가 확대되었지만 최적열수력코드와 비교해서 모의정확도는 아직도 큰 격차가 있다. 이런 격차는 Full Scope Simulator는 발전소의 완벽한 구현(Completeness)과 견전성(Robustness) 및 실시간(Real Time) 계산에 역점을 두고 개발되지만, 최적계산코드는 과도모의에서 발생하는 물리적 현상의 재현(Fidelity)을 중점으로 개발하기 때문이다. 최근에는 시뮬레이터에서 사용되는 열수력모델과 최적계산코드의 정교한 열수력모델의 격차를 줄이기 위해 최적열수력코드를 기본으로 하는 NPA를 개발하는 경향이 있다[1, 2]. 이는 NPA의 기능이 발전소의 완벽한 구현이나 실시간 계산보다는 모의 정확도(Fidelity)와 깊이(Depth of simulation)에 중점을 두고 있기 때문이며, 전산환경의 급속한 발달로 최적계산코드가 워크스테이션(Workstation)이나 PC환경에서 수행이 가능하게 되어 적은 비용으로도 실현할 수 있게 되었다. 또한 NPA는 모의 결과를 온라인(On-line)으로 그래픽 처리하여 최적계산코드의 방대한 계산결과를 쉽게 해석할 수 있도록 개발되어야 한다.

국내에서도 NPA개발을 위한 노력은 계속 있었으며 구체적 사례로는 한국과학기술원과 한국전력공사가 공동으로 개발한 훈련용(Class room training) 시뮬레이터인 FISA[3]와 한국원자력연구소가 간단한 계통분석코드를 기본으로 하는 KOSAC[4] 등이 있다. 그러나 사용모델이 지나치게 단순하고 충분한 검증이 되지 못하였거나, 사용자 환경의 부족으로 인한 과도현상 모의범위의 한계 등으로 실용화에는 한계가 있었다. 또한 대우 고등기술연구원에서는 간단한 모델을 사용하는 DSNP(Dynamic Simulator for Nuclear Power Plant)[5]를 기본으로 그래픽 디스플레이 시스템과 연계된 중수로형 엔지니어링 모의기(Engineering simulator)[6]를 개발하였지만 같은 이유로 활용이 제한적이다.

고리원자력본부와 한국원자력연구소가 공동으로 개발하는 NPA는 고리 원자력 1, 2호기를 대상으로 한다. 고리 원자력 1, 2호기는 각각 시설용량 587 MWe와 650 MWe인 웨스팅하우스형 가압경수로로 두 개의 냉각재 유로를 갖고 각 유로는 저온관, 고온관, 증기발생기, 원자로 냉각재펌프로 이루어져있다. 고리 원자력 1, 2호기 NPA의 개발 환경은 Windows로 채택하였고, 그래픽 사용자 인터페이스(GUI)의 개발을 위해 Delphi[11]를 기본 툴로 사용하였다. 운전원이 운전 과도기에서 발전소 NSSS의 열수력현상을 쉽게 이해할 수 있도록 발전소 Mimic 및 Nodalization화면 등을 갖추고 있으며 NSSS 내의 모든 변수의 시간에 따른 변화를 선택하여 볼 수 있도록 하여 계기를 통한 현상 파악만 가능한 원전 시뮬레이터보다 깊이 있는 과도현상 해석이 가능하도록 하였다. 또한 고리 원자력 1, 2호기 NPA는 최적계산코드인 RETRAN[7]을 기본 열수력해석코드로 채택하여 계산의 신뢰도를 높이도록 하였다.

국내에서 사용 가능한 최적열수력코드로는 미국 INEEL에서 개발한 RELAP5/MOD3[8]와 한국원자력연구소에서 RELAP5를 기본으로 코드의 구조(Structure) 현대화 및 모델 성능을 개선한 MARS코드[9]가 있지만 연구용으로 개발되었고 코드내용이 방대하고 복잡하여 발전소 현장에서 사용하기에는 부적합하다. 반면에 미국 EPRI에서 개발한 최적열수력코드인 RETRAN은 미국 규제기관(US NRC)에서 안전해석용으로 인증을 획득했으며, 가장 많은 원전 운영자를 사용자로 확보하고 있어 새로운 기술적 요구나 규제환경의 변화에 따른 대처가 신속하며, 과도모의에 소요되는 계산시간도 비교적 적은 장점이 있으며 국내에서도 1980년대 후반부터 운영되어 왔다.

일반적인 최적열수력코드는 방대한 정보를 포함하는 텍스트 형태의 입력파일을 요구하기 때문에 작성과 수정에 많은 경험과 시간을 필요로 하며, 보편적인 NPA는 미리 준비된 메뉴에서 모의하고자 하는 과도기를 선택하도록 되어 있어 광범위한 과도현상의 모의가 어렵다. 발전소 운전원이 텍스트 형태로 이루어진 입력을 수정하여 원하고자 하는 과도모의를 하는 것은 현실적으로 불

가능하며 이는 최적열수력코드를 기본으로 하는 NPA사용의 장애 요인으로 작용한다. 개발중인 NPA에서는 텍스트 형태를 벗어나 그래픽 객체를 사용하여 발전소 운전원이 손쉽게 입력을 수정하여 광범위한 과도모의를 수행할 수 있도록 GUI 환경에서 구현되는 입력작성기(User aids for input generation)를 개발하였다. 또한 NPA는 Windows환경에서 구현하였으며, 기본코드인 RETRAN은 독립성을 유지하기 위해 부프로그램 형태의 하나인 DLL(Dynamic Link Library)로 작성하였다. 따라서 고가의 전산장비인 UNIX 환경의 워크스테이션에서 수행되는 보편적인 NPA와 달리 운전원이 평상시 사용하던 개인용 컴퓨터로 작업이 가능하도록 하였다.

## 2 고리 원자력 1, 2호기 NPA 기능

### • Output Visualization

기본 코드로 사용하는 RETRAN은 텍스트 형식으로 방대한 량의 출력파일을 생성한다. 텍스트 형식으로 생성되는 출력파일로는 과도현상을 이해하기 어렵기 때문에 그래픽 도구(Software)를 사용하여 계산 결과를 그래프로 표현하여 분석한다. 하지만 이는 계산이 종료된 후에 가능하며 많은 시간과 노력이 요구된다. 고리 원자력 1, 2호기 NPA는 그래프 및 그래픽 객체를 이용하여 사용자와 NPA의 상호 정보 교환이 온라인으로 가능하도록 개발하였다. 따라서 모의 중에 그래프 및 그래픽 객체를 통해 계산 결과를 분석할 수 있으며 일부 밸브와 펌프는 온라인으로 조절이 가능하도록 개발하고 있다.

그림 1은 고리 원자력 1, 2호기 NPA의 기본 화면인 발전소 Mimic 화면으로 사용자가 과도상태를 파악할 수 있도록 개발되었다. 발전소 Mimic 화면에는 기본적인 입력작성과 과도모의 중 제어를 할 수 있도록 사용자 메뉴 및 버튼을 첨가하여 편의를 도모하였다. 발전소 Mimic 화면에는 증기발생기와 가압기 수위를 한눈에 볼 수 있도록 Level Gauge를 설치했으며, 원자로 냉각재펌프의 임펠러(Impeller)를 회전시켜 ON/OFF 상태를 감지할 수 있도록 하였다. 기본화면은 개발단계이기 때문에 과도현상을 파악하기 위한 정보가 부족하지만 차츰 보완할 계획이다.

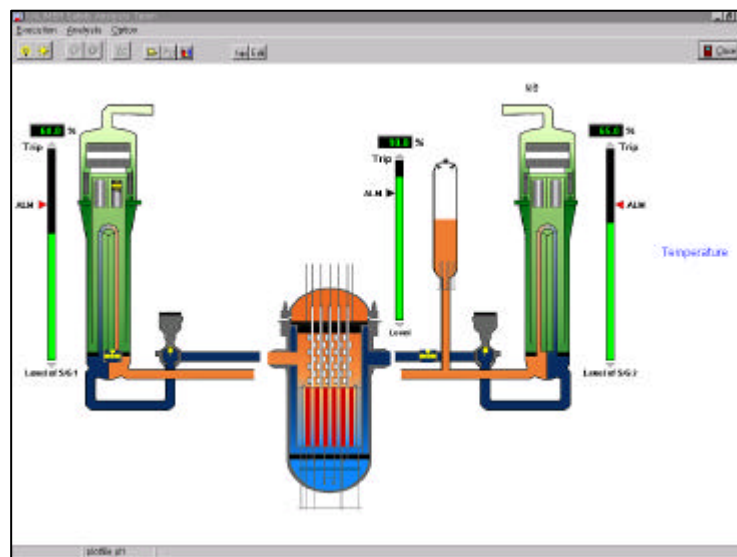


그림 1. 고리 원자력 1/2호기 발전소 Mimic 화면

발전소 Mimic 화면의 사용자 메뉴 및 버튼의 구성으로는 대화상자(Dialog Box)를 통하여 사용자가 미리 작성한 RETRAN 입력파일을 불러올 수 있는 기능을 제공하는 “RETRAN 입력파일 불러오기” 선택 메뉴가 있으며, 사용자가 대화상자를 통하여 선택한 입력파일을 이용해서 사고해석

코드를 실행, 정지 또는 재실행시킬 수 있는 기능을 제공하는 "Start/Stop/Restart" 선택 버튼이 있다. "Mimic/Nodalization 화면" 선택 버튼을 이용하여 발전소 Mimic 화면과 RETRAN 전산코드의 Nodalization 화면을 언제든지 전환하여 볼 수 있다. RETRAN 입력중 Trip 카드는 과도현상 모의를 위해 가장 많이 사용하는 입력카드로 모든 밸브의 개폐와 펌프의 가동/정지 등을 발생시켜 원하는 과도모의를 실행하는데 사용된다. 발전소 Mimic 화면에 Trip 카드 수정 버튼을 첨가하여 현재 사용중인 입력파일에 있는 모든 Trip 카드를 대화상자(그림 2)에서 수정할 수 있도록 하였다. Description List에 나타나는 Trip 카드의 주석을 보고 수정을 원하는 Trip을 쉽게 선택할 수 있으며, 선택된 Trip 카드의 상세 정보는 대화상자의 오른쪽에 나타나도록 하여 사용자가 수정하고자 하는 항목을 선택하고 수정할 수 있도록 하였다.

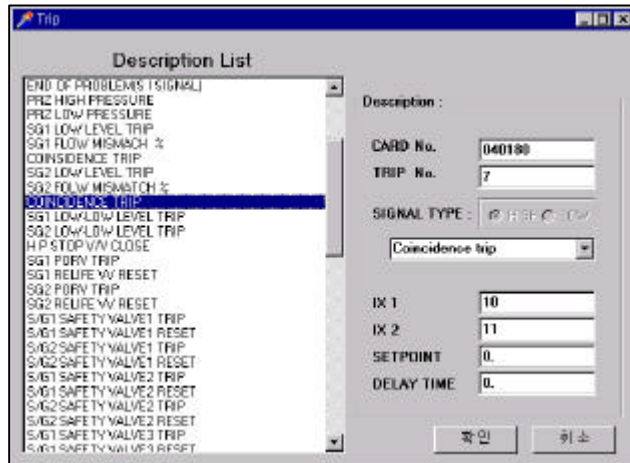


그림 2. Trip 카드 편집 창

발전소 Mimic 화면과 별도로 RETRAN에서 사용하는 고리 원자력 1, 2호기용 Nodalization 화면을 첨가하였다. Nodalization화면에서는 발전소 과도현상 모의 중 계산결과에 따라 각 제어체적의 밀도, 온도와 같은 특정 변수의 값을 색의 밀도를 변화로 나타내어 전체적으로 과도 상태를 파악할 수 있도록 하였다(그림 3).

NPA를 이용한 발전소 과도상태 모의 중 메뉴 바의 그래프 버튼을 선택하면 입력파일에 있는 Minor Editor 변수 중에서 원하는 변수를 선택할 수 있는 대화상자가 나타나며, 원하는 변수를 선택(복수 선택 가능)한 후 확인 버튼을 클릭 하면 선택된 변수의 시간에 따른 계산 결과를 온라인 그래프(그림 4)로 볼 수 있도록 개발하였다.

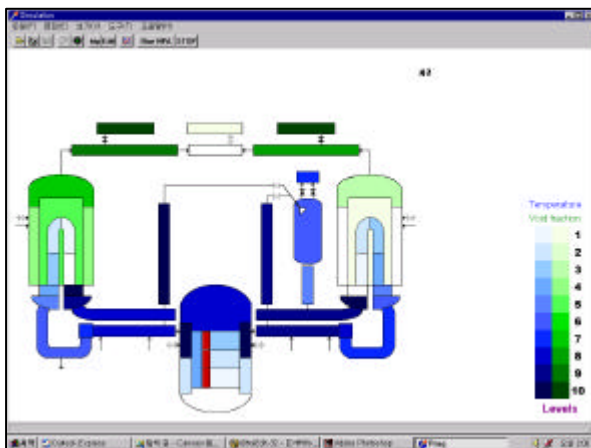


그림 3. 고리 원자력 1/2호기 Nodalization 화면

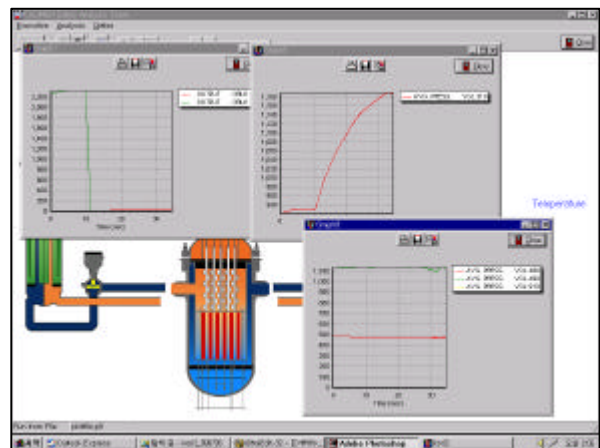


그림 4. 고리 원자력 1/2호기 NPA용 그래프 창

## • 자동 입력작성기

최적열수력코드를 기본으로하는 NPA는 보편적으로 텍스트 형태의 입력을 사용하여 계산을 한다. 이는 사용자가 텍스트 형태의 입력파일을 직접 편집하고 작성해야 하는 번거로움을 지니고 있다. 텍스트 형태의 입력은 해당 발전소의 노드화에 따른 제어체적, 정션, 제어계통 등 NSSS의 모든 정보를 담고 있으며, 발전소 과도상태를 모의하기 위한 사용자 제어값을 포함한다. 사용자가 특정 사고를 해석하기 위해서는 정확한 입력의 작성이 필수적이다. 발전소 운전원이 이와 같은 방대한 정보를 포함하는 텍스트형태의 입력자료를 생성하는데는 많은 어려움이 따른다. 그래픽 객체를 사용한 입력작성기는 사용자가 입력을 쉽게 파악할 수 있도록 하였으며, GUI를 사용함으로써 입력을 수정하여 과도입력작성에 도움을 줄 수 있도록 개발하였다. 또한 NPA에 포함된 사용자 입력 생성기는 그래픽 디스플레이 시스템과 연계하여 사용자가 입력파일을 수정하고 NPA를 재실행할 수 있도록 하였다.

고리 원자력 1, 2호기 NPA의 Nodalization 화면에서 마우스를 이동하여 각 제어체적의 상세 정보를 확인하고 수정할 수 있다. 마우스를 각 제어체적에 접근시키면 팝업(Pop-up) 형태의 메모상자에 제어체적 ID(Identification) 번호가 나타난다. 이때 마우스를 클릭 하면 해당 제어체적의 입력값을 보여주는 대화상자(그림 5)가 나타나며 사용자는 각 제어체적의 입력 값을 확인하고 수정할 수 있다. 제어체적과 같이 고리 원자력 1, 2호기 Nodalization 화면에서 마우스를 제어체적과 제어체적을 연결하는 정션에 근접시키면 팝업 형태의 메모상자에 정션의 ID 번호가 나타나고, 이때 마우스를 클릭 하면 해당 정션의 입력값을 보여주는 대화상자(그림 6)가 나타나며 사용자는 각 정션의 입력값을 확인하고 수정할 수 있다. 발전소의 기하학적 입력인 제어체적 및 정션의 입력은 수정할 필요가 거의 없으며 제어체적 및 정션 입력의 수정 실수로 과도현상의 모의에 문제 발생의 소지가 많아 일반 사용자는 확인 만 가능하고 수정은 관리자만 할 수 있도록 개선할 계획이다.

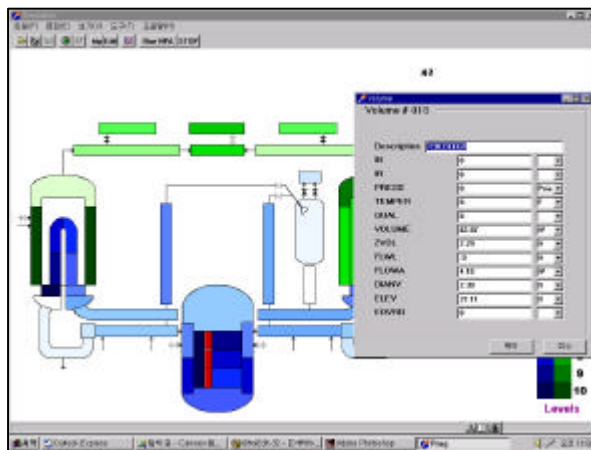


그림 5. 고리 원자력 1/2호기 NPA용 제어체적 편집창

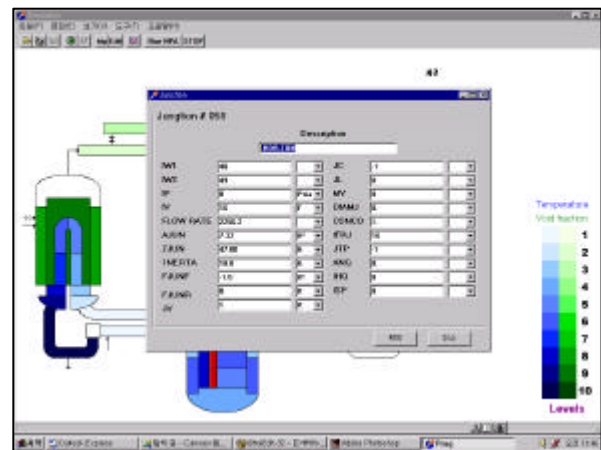


그림 6. 고리 원자력 1/2호기 NPA용 Junction 편집창

최적열수력코드의 입력작성시 가장 복잡한 제어계통의 입력은 발전소의 Setpoint 설정치 변경이나 계기 오동작에 과도상태 모의를 위해 빈번한 수정이 요구된다. 이에 따른 불편을 최소화하기 위해 GUI 환경에 기반을 둔 제어계통 입력 창으로 수정할 수 있도록 개발 중에 있으며, 그중 이미 개발이 완료된 편집 기능은 다음과 같다. NPA는 사용자가 작성한 입력파일의 포함되어 있는 제어계통을 파악하여 논리도(Logic Diagram)의 형태로 제어계통 입력편집창(그림 7)에 보여준다. 편집창에서는 제어요소(Control Component) 간의 연계를 보여주기 때문에 각 제어계통의 파악 및 수정이 용이하다. 제어계통 입력편집창에서 수정을 원하는 제어계통을 클릭 하면 해당 제어계통의





발하였다. 그림 10은 고리 원자력 1, 2호기 입력에 사용된 Nodalization이며, 기본 입력은 정상운전 조건(Nominal Operating Condition)에 대해 작성되었다. NSSS 모델을 위해 사용한 제어체적의 수는 50개이며 정선은 70개로 이루어져 있다. 광범위한 과도 모의를 위해 필요할 것으로 예상되는 각종 밸브와 정선은 계속 추가할 예정이다. 원전의 NSSS모델에 사용된 제어체적 수가 적게 느껴 지지만 RETRAN Model Guidelines[10]에 충실하게 작성되어 대부분의 과도모의에 적합할 것으로 사료된다.

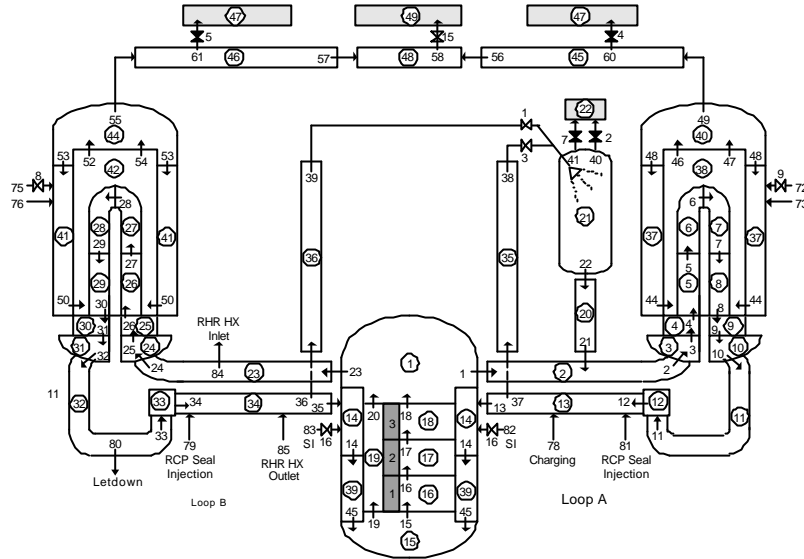


그림 10. 고리 원자력 1/2호기 NPA용 Nodalization

### 3. 결론 및 향후계획

한국전력공사와 한국원자력연구소가 공동으로 최적열수력코드인 RETRAN을 기본으로 하는 고리 원자력 1, 2호기 NPA를 개발하였다. 고리 원자력 1, 2호기 NPA는 Delphi라는 객체지향적 프로그래밍 언어를 기본 툴로 사용하여 발전소의 과도현상의 이해를 도와줄 수 있도록 GUI 환경을 제공하였다. 또한 자동 입력작성기를 개발하여 쉽게 입력을 수정하여 원하는 과도모의를 할 수 있도록 하였다. 또한 발전소 운전경험이 많은 발전소 현장이 원자력연구소와 공동으로 개발하기 때문에 기존 NPA와 비교하여 사용자 요구에 부합되며, 따라서 현장 활용도가 매우 높을 것으로 예상된다.

NPA 디스플레이 화면중 하나인 Nodalization 화면은 NSSS의 입력 보완 작업에 따라 지속적인 보완이 이루어져야 하고, 아직 기능이 미비한 발전소 Mimic화면은 발전소의 과도상태를 파악하기에 충분한 정보를 제공할 수 있도록 보완해야 한다. 이와 함께 시험버전(Draft Version)을 발전소에 사전 설치하고 운영하여 개선점을 도출하고 운전원이 보다 쉽게 과도모의를 할 수 있도록 계속적인 기능보완을 할 계획이다.

### 감사의 글

본 연구는 한국전력공사 고리원자력본부 제1발전소의 지원으로 수행된 것이다.

### 참고문헌

- [1] L. Bartsoen, et al, "Nuclear Plant Analyzer : An Efficient Tool for Training and Operational Analyses", Proc. of the 2nd CSNI Specialist Meeting on Simulators and Plant

- Analysers, Espoo, Finland, September 1997.
- [2] N. Rivero, et al., "Latest Improvements on TRACPWR Six-Equations Thermohydraulic Code", Proc. of the 2nd CSNI Specialist Meeting on Simulators and Plant Analysers, Espoo, Finland, September 1997.
  - [3] 한국전력공사, "퍼스널 컴퓨터를 이용한 훈련용 시뮬레이터 개발", KRC-87N-J02, 1989.
  - [4] 한국원자력연구소, "TASS-NPA 개발", KAERI/TR-1231/99, 1999.
  - [5] D. Saphier, "The Simulation Language of DSNP: Dynamic Simulator for Nuclear Power-Plants", ANL-CT-77-21, Rev. 02, 1978.
  - [6] 과학기술처, "CANDU형 발전시스템 교육, 운전 지원용 Nuclear Plant Analyzer 구현", KAERI/ CM-153/96, 1997.
  - [7] EPRI, RETRAN-3D: A Program for Transient Thermal-Hydraulic Analysis of Complex Fluid Flow Systems, vols. 1, Rev. 03, 1998.
  - [8] RELAP5/Mod3 Code Manual, vols. 1, NUREG/CR-5535, INEL-95/0174.
  - [9] 이원재외 3인, "다차원 최적 열수력 계통 분석 코드 MARS 1.3 개발 및 검증", KAERI/TR-1108/98, 1998.
  - [10] EPRI, RETRAN-02: A Program for Transient Thermal-Hydraulic Analysis of Complex Fluid Flow Systems, vols. 5, 1987.
  - [11] Inprise Corporation, "Borland Delphi Professional", ver. 4.0, 1998.