

# 가압경수로 원자력 발전소의 전범위 복제형 시뮬레이터 개발

## The Development of Full-Scope Replica Type Simulator for PWR Nuclear Power Plants

이중근\* · 이명수\* · 김동욱\* · 이용관\* · 한병성\*\*

Lee Jung kun · Lee Myeong Soo · Kim Dong Wook · Lee Yong Kwan · Han Byong Sung

### Abstract

Designing and constructing a proper simulator for real power plants requires extensive research in human engineering and computer science and integration of different fields of technologies such as system analysis, operational knowledge for nuclear plant, etc. A full-scope replica type simulator for nuclear power plant is developed. The simulator has the same feature and operational functions as one in the main control room(MCR) of a reference power plant. The simulator provides the necessary training to recover or reduce damages from accidents that usually are unpredictable. This paper describes the configurations and characteristics for the simulator that is developed for Younggwang Nuclear Power Plant#3,4 which is the basic model of the Korean Nuclear Power Plant. The paper also describes technical aspects of Auto Code Generator that is used for developing the simulator. The successful development of the simulator will contribute to improve safety in operation of nuclear power plants.

## 1. 서 론

1979년에 미국의 TMI-2 원자력 발전소에서 운전원의 판단착오에 의해 발생한 원자로 노심이 용융되는 사고 이후 원자력 발전소의 안전성 확보를 위해 가장 강조되었던 대책중의 하나는 효과적인 사고대처 능력 배양을 위해 전 범위(Full Scope) 시뮬레이터를 이용한 운전원 훈련이다. 현재 국내에서 운영중인 원자력 발

전소 운전원 훈련용 시뮬레이터는 '79년에 미국의 EAI사가 Surry 가압 경수로형을 모델로 개발한 시뮬레이터와 '86년에 미국의 웨스팅하우스사가 영광원자력#1호기를 모델로 개발한 시뮬레이터가 원자력연수원에, '89년에는 울진 원자력 #1호기를 모델로 볼란서 Thomson-CSF사가 개발한 가압경수로형을 울진원자력 훈련센터에 운영중에 있으며, '96년말 캐나다의 가압중수로형을 모델로 개발한 시뮬레이터를 월성원자력 훈련

\* 전력연구원 시스템통신연구소

\*\* 전북대학교 전기공학과

센터에 도입한 바 있다.[1, 2]

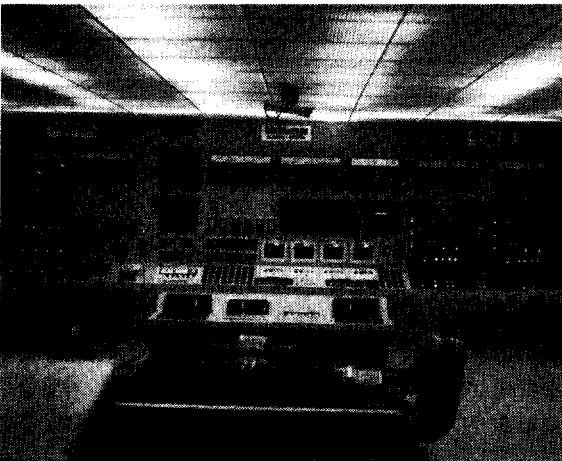
기술의 발달에 따라서 발전설비가 고기능화되어 발전소의 정지 횟수가 줄어들고 운전원들이 운전조작을 할 수 있는 기회가 줄어들어 따라서 발전소 비정상 상태 발생시 긴급대처 능력향상을 위하여 운전원 훈련이 절실히 요구될뿐만 아니라, 시뮬레이터 제작기준(ANSI/ANS 3.5)[3] 및 훈련요건의 강화로 정확한 계통모델이 요구되고, '89년부터는 원자력 발전소 운전원 면허시험(SRO/RO)에 시뮬레이터를 이용한 실기시험이 포함 시행되고 있다.

본 논문에서는 한국 표준원전의 효시인 영광원자력 발전소 #3,4를 모델로 국내에서 처음 개발에 성공한 원자력발전소 운전원 훈련용 시뮬레이터의 구성과 개발 모델의 특성 및 강사 조작반에 대하여 기술하고자 한다.

## 2. 시뮬레이터 구성 및 기능

### 2.1 시뮬레이터의 구성

발전소 운전원 훈련용 시뮬레이터는 크게 보아 기준 발전소의 주제어실의 제어 패널을 그대로 모의한 주 제어실(Main control room)과 운전원에게 각종 훈련상황을 부여하고 훈련결과를 분석, 감시하는 강사 조작반(Instructor Station), 그리고 전산실로 구성되어 있다.



〈그림 1〉 시뮬레이터 주제어반 전경

#### 2.1.1 주제어반(Main control room)

주제어반은 기준 발전소의 제어반과 외형 및 기능이 일치하도록 제작되었으며, 주제어반에서의 운전원 기기 조작은 I/O를 거쳐 주전산기로 전송되고 S/W모델이 구동되어 계산된 값을 I/O를 거쳐 주제어반의 각종 계기에 지시하며, NETWORK를 통해 강사 조작반에 전송된다.

#### 2.1.2 강사조작실

강사 조작반에서는 주전산기의 계통 모델에 명령하여 초기 조건(Initial Condition)의 설정, 기기고장(Component Malfunction), 계통사고(System Malfunction)등을 부여하여 운전원이 훈련에 임할 수 있도록 한다.

#### 2.1.3 전산실

시뮬레이션 전산기는 기준 발전소의 거동을 모사하는 수학적 모델을 구동해 주는 2대의 전산기(Host & Standby Computer)와 강사조작용 전산기(Instructor Station) 및 모델개발 또는 모델 업그레이드용 전산기(Engineering Workstation)로 구성되어 있다.

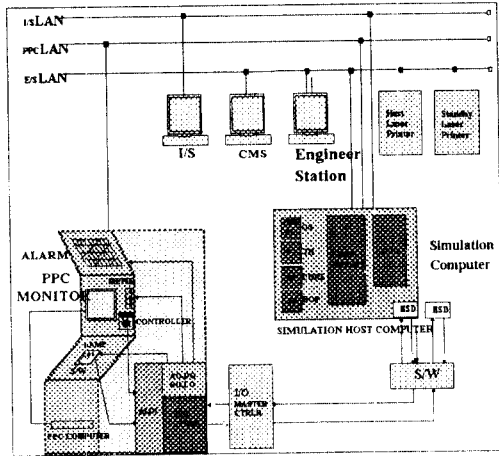
## 2.2 시뮬레이터의 기능

개발한 시뮬레이터는 한국 표준원전의 효시인 영광#3,4호기의 가압경수로형을 모델로 하여 국내 최초로 개발하였으며 시뮬레이터의 컴퓨터 시스템은 실시간(real time) 또는 실시간 보다 빠른 시뮬레이션을 하기 위하여 높은 계산 능력을 갖추었고, 기존의 시뮬레이터 전용 컴퓨터 시스템의 폐쇄성을 극복하고 향후 확장성 및 개방성(open architecture)을 최대한 보장 할 수 있는 UNIX 운영체제를 사용하는 RISC 워크스테이션을 사용하였다. 또한 소프트웨어 개발 및 유지 보수성 증진을 위해 엔지니어 스테이션을 설치하였으며, 기술의 호환성 확보를 위해 같은 회사 제품 동일 계열의 워크스테이션을 사용하며 네트워크로 연결하여 활용성을 증진하였다.

#### 2.2.1 시뮬레이터 하드웨어

컴퓨터는 동일계열의 컴퓨터를 채택하여 기술의 일관성 및 호환성을 유지하도록 하였으며 성능이 우수한

RISC CPU 탑재 Work-station을 채택하였고, X-window based GUI 사용으로 전체 컴퓨터 설비의 통합 환경을 구축하였으며 <그림 2>는 시뮬레이터 하드웨어 구성도이다.

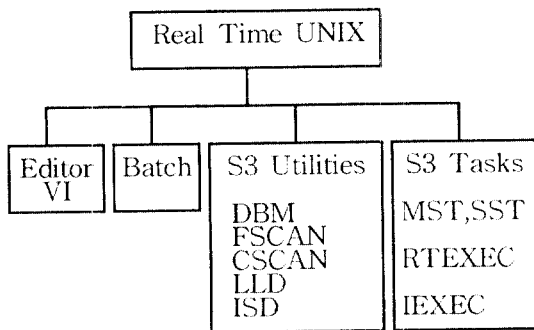


<그림 2> 하드웨어 구성도

2.2.2 소프트웨어

1) 운영 소프트웨어

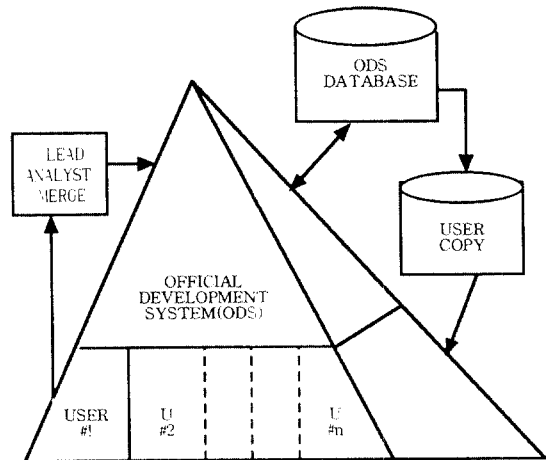
개발에 사용된 소프트웨어는 Unix 환경에서 사용 가능한 US3( Unix Simulation Software Support System)4, 5)을 사용하였으며 그 구성은 <그림 3>과 같다.



<그림 3> US3 소프트웨어 구성

가) US3 소프트웨어

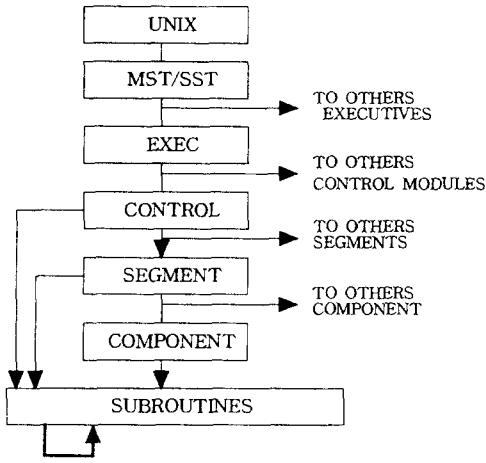
US3 소프트웨어는 시뮬레이션 시스템의 운영 및 개발 환경을 제공하는 종합적인 소프트웨어로서 정교한 데이터베이스 구조와 다층 소프트웨어 및 통제관리기능을 이용한 S/W Configuration Management 개념을 채용하였고, 훈련 모델과는 독립적으로 자신의 모델을 개발, 시험할 수 있으며 이 모델이 시험을 거쳐 승인이 되면 훈련 모델에 포함시킬 수 있다. US3하에서 개발되는 시뮬레이션 소프트웨어는 2층의 레벨로 존재하며, 첫째 ODS (Official Development System)은 개발중인 시뮬레이션 소프트웨어의 최종버전이며, 둘째 UDS (User Development System)는 현재 개발 수정이 진행중인 소프트웨어이고 시뮬레이션 소프트웨어의 수정은 UDS 레벨에서만 가능하고 완벽한 시험을 거친 후 ODS 레벨에 올린다. <그림 4>는 다층 소프트웨어의 구조를 나타낸다.



<그림 4> 소프트웨어 계층구조

나) 프로그램 모듈의 구조

US3는 개별적으로 컴파일, Load 될 수 있는 모듈들의 형태를 정의함으로써 Top-Down 유형의 시뮬레이션 프로그램을 가능케 하며 <그림 5>와 같은 구조를 갖는다.



〈그림 5〉 프로그램 모듈의 구조

### 3. 시물레이션 모델개발

발전소 계통 시물레이션 모델은 기존 발전소의 특성을 잘 나타내면서 모의 정밀도를 높이기 위해 간략화된 모델이나 실험적으로 부적정한 모델 대신에 자연법칙에 입각한 물리적인 모델을 사용하였다. 시물레이터의 일차냉각재 계통의 열수력계통 모의에 Non-Homogeneous, Non-Equilibrium 모델을 사용하였으며, 발전소 계통모델 개발시 소프트웨어의 유지보수성 향상과 편의성 증진을 위해 Auto Code Generator가 포함된 Software Development Tool을 적극 활용하였다. 시스템

모델링 틀은 각 모델의 특성을 고려하여 선정하게 되며 본 시물레이터에는 〈표 1〉과 같은 모델링 소프트웨어 프로그램이 사용되었다.[4, 5]

#### 3.1 원자로심 모델

원자로 노심의 모델은 STK(Space Time Kinetics)[4] 모델틀을 사용하였으며 이 모델틀은 3차원으로 노심 모델링을 수행하고 여러 상태의 연소도에서 정상운전 상태와 사고시의 과도상태를 시물레이션 한다.

노심 모델의 STK 모델틀의 설계 기준 식은 시간의존 중성자 평형방정식으로 부터 유도되었으며 단일에너지 중성자 및 지발중성자 Precursor에 대한 시간의존 중성자 평형식은 다음과 같다.

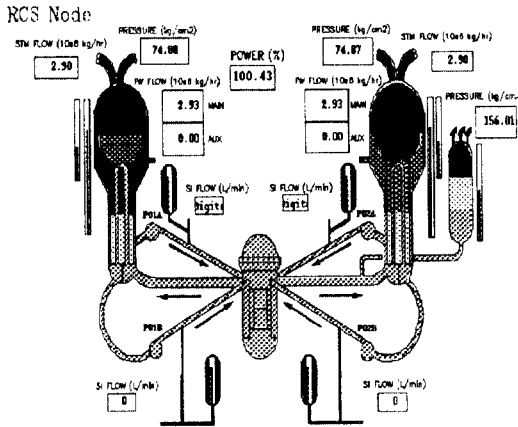
$$l \frac{dS_n}{dt} = (1 - \beta)K_{\infty n} (W_{nn}S_n + \sum_{m \neq n} W_{mn}S_m) + \sum_j \lambda_j C_{nj} - S_n \quad (1)$$

$$\frac{dC_{nj}}{dt} = \beta_j K_{\infty n} (W_{nn}S_n + \sum_{m \neq n} W_{mn}S_m) - \lambda_j C_{nj} \quad (2)$$

유동적인 노달스킴(Nodalization Scheme)에 의한 3차원 중성자속을 계산하고 보론, 제논, 사마리움, 연료연도, 감속재밀도, 기포, 연소도에 따른 반응도 궤환 계산을 하였다. 다음 〈그림 6〉은 원자로 냉각재 계통의 100%출력운전 상태를 나타내고 있다.

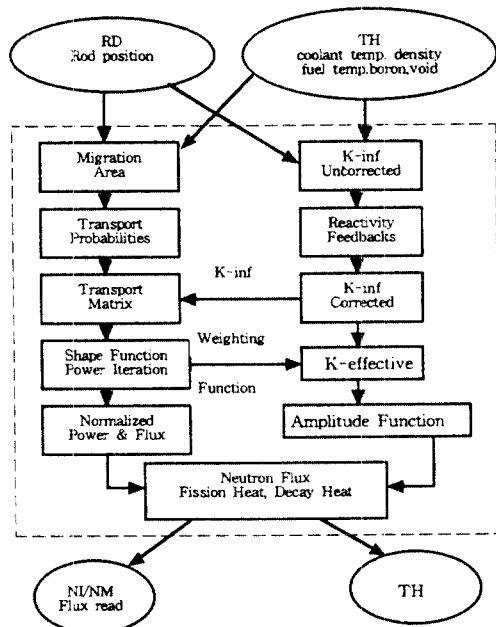
〈표 1〉 모델링 소프트웨어

S/W	적용 계통	특성
STK	NSSS-Neutronics	1.5 Group 3D model
REACT	NSSS TH (2 phase)	5 eqs( 2 mass + 2 Energy + 1 mixture momentum)
PCNET	Containment	multi component 2 phase multi-node
TOPMERET	BOP TH (2 phase)	GUI 2 phase dynamic model tool generator
EDNET	Electrical	Electrical distribution system model
FLOWnet	BOP TH (Single phase)	TEXT mode Single phase dynamic model tool generator
CLASC	logic	GUI logic model tool generator
Generic Component	Component	각종 valve, pump... 등의 제어모델 생성 MACRO code



〈그림 6〉 원자로 출력운전 상태도

노심 계통에 인터페이스(Interface)되는 시스템을 살펴보면 노심에서 발생된 열을 제거하여 수송하고 증기를 발생시키는 열유체(TH)계통, 노심의 중성자속을 감시하고 출력상태를 감시, 제어하는 중성자속 감시계통(NIS), 원자로 출력을 제어하기 위한 제어봉 구동계통



〈그림 7〉 노심 모듈(STK) 블록도

(RD) 등에 연결되어 있으며 원자로심의 제어계통은 〈그림 7〉과 같이 구성되어져 있다.

## 2. NSSS 열수력 모델

NSSS 열수력 모델은 RETACT(Real Time Advanced Core Thermohydraulics) 모델틀을 사용하였다.[4]

원자력 발전소의 실시간 모의를 위하여 도입된 RETACT 코드는 질량보존 방정식, 에너지보존 방정식, 운동량보존 방정식등을 기본으로 단상류(Single Phase Flow) 및 액체와 기체가 공존하는 이상류(Two Phase Flow)에 적용하여 원자력발전소 1차계통의 열수력적 현상을 모의하였다. 열수력 모델에서 구현하는 물리적 현상은 단상류, 이상류, 열전달(Heat Transfer)등으로 구분되는데 단상류에서는 유체의 자연순환(Natural Circulation), 강제순환(Forced Circulation), 분열생성물의 방사능(Fission Product Radioactivity)등이 모의되며, 이상류에서는 증기를 생성하는 증기발생기 2차측과 가압기 등 액상과 기상 이존재하는 모든 지역에서의 유체 흐름을 계산한다.

원자로 냉각재 계통을 원자로(Reactor), 증기발생기(Steam generator), 원자로 냉각재 펌프(Reactor Coolant Pump) 및 가압기(Pressurizer)를 1차원 유로로 모의하였으며, 열전달은 원자로 용기 및 핵연료(Nuclear Fuel)의 온도분포를 계산한다. 열전달을 계산하기 위하여 각각의 증기발생기는 8개의 열평판(Heat Slab)으로 나누었으며, 원자로 용기는 18개로 총 34개의 열평판으로 나누어 5 Equation Model (2질량+2에너지+1Mixture Momentum) 기본 보존 방정식을 사용하여 계산하였다. 〈그림 8〉은 노드화한 열수력 계통의 모델이다.

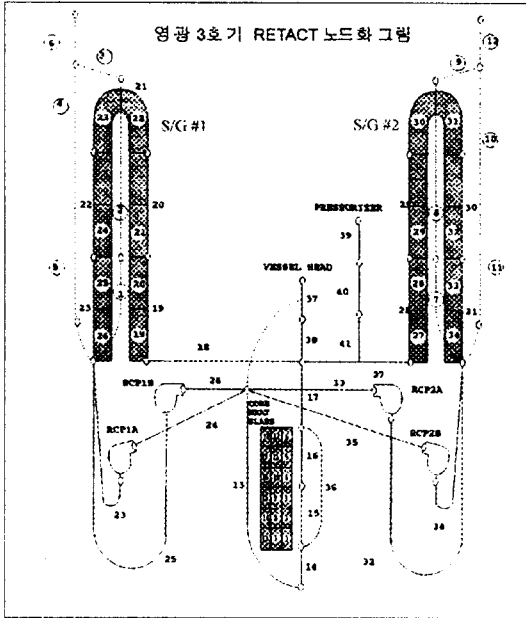
NSSS 열수력 모델의 질량, 운동량, 에너지 보존방정식은 다음과 같다.

- 비응축 가스 및 증기의 질량보존

$$A \frac{\partial (\alpha \rho_n)}{\partial t} + \frac{\partial W_n}{\partial z} = A \Gamma_n + \delta_s S_n \quad (3)$$

- 유체의 질량보존

$$A \frac{\partial}{\partial t} (1 - \alpha) \rho_l + \frac{\partial W_l}{\partial z} = A \Gamma + \delta_s S_l \quad (4)$$



〈그림 8〉 열수력계통 모델 노드화

- 기체의 에너지 보존

$$A1 \frac{\partial}{\partial t} (\alpha \rho_g h_g) + \frac{\partial W_g h_g}{\partial z} = A(\Gamma h_{vsat} + \Gamma_n h_n + \dot{q}_{wg} - \dot{q}_{gi} + \alpha \frac{\partial P}{\partial t}) + \delta_s S_g h_{sg} \quad (5)$$

- 혼합기체의 에너지 보존

$$A \frac{\partial}{\partial t} \rho h + \frac{\partial (W_g h_g + W_l h_l)}{\partial z} = A(q_{wg} + \frac{\partial P}{\partial t}) + \delta_s S h_s \quad (6)$$

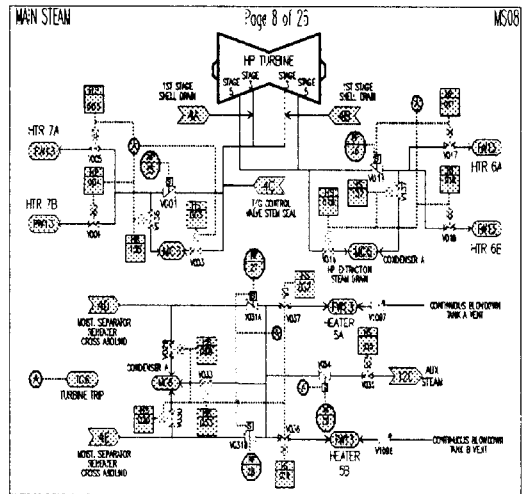
- 혼합유체의 운동량 보존

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} [VW + \alpha(1-\alpha) \frac{\rho_g}{\rho} V_r^2 A] = -A(\frac{\partial P}{\partial z} + F - \delta p \Delta P_p + \rho g) + \delta_s S V_s \quad (7)$$

### 3.3 BOP(Balance of Plant)계통 모델

BOP계통의 모델개발에는 자동코드 생성 프로그램인 FLOWnet[4, 5] 및 TOMERET[4, 5]를 이용하여 모델링

을 하였으며, 이는 발전소 2차계통(BOP) 모델개발을 위한 표준화 및 정형화된 자동코드 생성프로그램으로서 주증기 계통내 다수의 기기들에 대한 유체의 2상 비평형 상태를 구현하며, 평형상태를 가정하지 않고 기본 보존방정식(질량, 운동량, 에너지) 및 물성 방정식 등을 행렬해법등을 사용하여 대상 시스템의 물리적, 동적특성을 정확하고 안정되게 모의해 주는 틀로서 TOPMERET의 구성은 크게 GUI(Graphic User Interface)와 모델 자동생성기 부분으로 이루어져 있으며, 코드를 이용한 모델 개발시의 특징은 GUI를 이용한 대상 시스템의 모의범위 작성 및 대상 시스템의 전체 정보를 하나의 입력파일로 처리함으로써 시스템 모델개발시 입력데이터 관리의 효율성은 물론, 모델개발시 오류의 제거, 검토시간 단축, 사용자간의 일치성, 코드의 반복사용에 의한 생성된 모델프로그램의 균일화, 모델의 확장, 변경 및 유지보수에 유리하고, 변수, 상수명의 자동 제공등의 장점을 가지고 있다. 다음은 계통 모델링에 사용된 기본적인 방정식이다. 〈그림 9〉는 주증기 터빈 계통의 모의화 도면이다.



〈그림 9〉 주증기 터빈 계통도

- 질량 보존

대상 시스템내 각 노드에서의 질량흐름의 균형은 유체의 주경로 및 주변경계의 질량의 입출입 및 노드 자체내에서의 상변화에 따른 각상별 질량의 총합은 0으

로 다음과 같이 모의된다.

$$\frac{dM_{n,k}}{dt} = \sum(x_{i,k} \times F_{n,k}) - \sum(F_{n,out} \times x_{n,k}) + \sum(x_{bn,k} \times F_{n,k}) \pm \Gamma_{n,k} \quad (8)$$

$$\Gamma_f = F_{boil} - F_{cond} - F_{rxn} \quad (9)$$

- 운동량 보존

노드 N에서 운동량 균형은 다음과 같은 방정식에 의하여 모의된다.

$$\frac{dF_f}{dt} = -\frac{\alpha_f \times A}{K_u} \times \left( \frac{dP}{dZ} + f_{f-w} + f_{f-f} + K_u \rho_f \vec{g} - \delta P_{pump} \right) + \sum \delta S_f \vec{\nu}_{src} \quad (10)$$

$$dP = -(f_{f-w} + f_{f-f})dZ - K_u \rho_f \vec{g}dZ - \left( \frac{K_u}{\alpha_f A} \right) \times \frac{dF_f}{dt} dZ + \delta P_{pump} dZ + \left( \frac{K_u}{\alpha_f A} \right) \sum \delta S_f \vec{\nu}_{src} dZ \quad (11)$$

- 에너지 보존

각 노드에서의 에너지방정식은 평형상태를 가정하지 않고 노드내의 기상 및 액상 각각에 대해서 에너지 방정식을 취하여 정확한 2상 비평형상태를 모의한다.

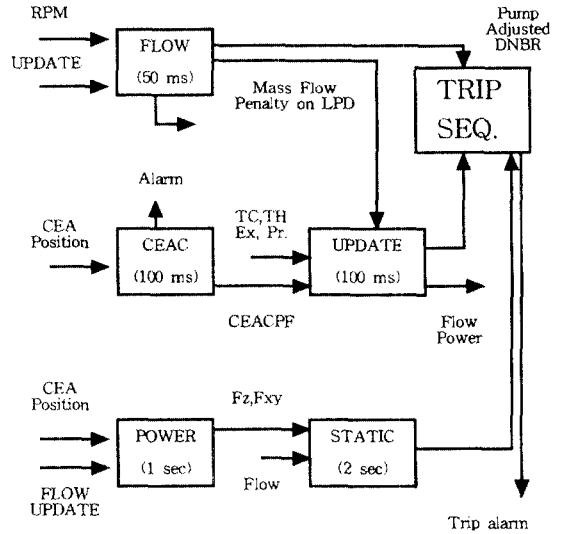
$$\frac{d(M_f h_f)}{dt} = \sum h_{f,i} F_{f,i} - \sum h_{f,out} F_{f,out} + \Gamma_f h_{f,sat} + Q_f - W_{shaft} + V_f \frac{dp}{dt} + \frac{Anu_f}{Ln} dP \quad (12)$$

### 3.4 노심보호, 감시계통(CPC/COLSS)모델

ABB-CE사 발전소의 핵심적인 기술분야인 노심보호(CPC; Core Protection Calculator system) 및 감시계통(COLSS;Core Operating Limit Supervisory System)은 노심상태를 신속,정확하게 분석하여 충분한 운전여유를 가지고 운전하므로써 발전소의 이용율을 향상시킬 수 있는 설비이다.[6~9]

CPC계통은 원자로 보호계통의 일부로서 원자로 운

전 제한치중 핵비등 이탈율(DNBR: Departure from Nucleate Boiling Ratio) 및 국부출력밀도(LPD:Local Power Density)에 대한 원자로 정지신호를 발전소 보호계통에 제공한다. <그림 10>은 CPC 프로그램의 구조이다.



<그림 10> CPC 프로그램 구조

#### 3.4.1 핵비등 이탈율(DNBR)

DNBR은 연료봉 침두계수외에 노심출력,저온관 온도,냉각재 유량 및 가압기 압력을 고려하며 최종적으로 CEAC에서 전송된 DNBR 패널티계수를 곱해서 계산한다.

$$DNBR = q'_{DNB} / q'_{Local} \quad (13)$$

#### 3.4.2 국부출력 밀도(Local Power Density)

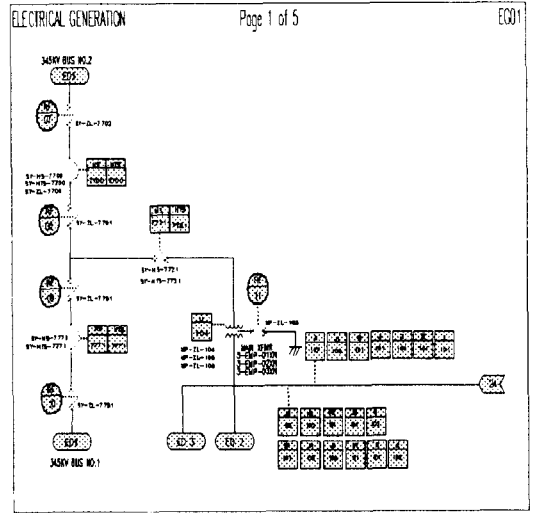
LPD 계산의 주요인자는 3차원 침두계수와 노심출력이며 국부출력밀도는 선형열출력으로 노심 출력과 노심평균 선형열출력의 선형적 비례관계를 이용한 식이다. LPD는 퍼센트 단위로 표시되며 LPD의 원자로 정지 설정치 389%는 침두 선형열출력 21 Kw/ft에 상응한다.

$$LPD = B_{LPD} \times P_{KMX} \times TR \times PF_{LPD} \times BEER3 \times F_2 \quad (14)$$

노심을 감시하는 COLSS 계통[15]의 알고리즘은 독립적인 계산을 수행하는 20개의 블록으로 구성되어 있으며 기능적으로 입력력 신호처리, 발전소 출력계산, 출력분포 계산, 출력운전 제한치 계산 및 운전제한 조건감시의 그룹으로 분류할수 있다.

CPC/COLSS는 Display Task와 Calculation Task의 두 가지 주요한 기능을 가지고 있으며, Display Task는 Current Value Table (CVT)로부터 Symbol(Pump, Valve, ...), Value(모델에서 계산한 온도, 압력, 수위, 유량, ...), Text(Point ID, Description, ...)등의 정보를 받아서 MCB(Main Control Board)에 있는 PDU(Plasma Display Unit) 및 CRT에 지시한다.

Calculation Task에서는 계통 모델로부터 Measured/Calculated Analog/Binary Value나 자체의 Constant로부터 입력을 받아 Shared Memory(CVT Table)에 갖다놓고 알고리즘 부분에서 이를 다시 읽어들여 계산을 수행한다.



〈그림 11〉 발전기 계통도

발전기의 여자전압( $E_{fd}$ )과 여자전류( $I_{fd}$ )는 발전기의 계자 차단기가 개방되면 영(0)이 된다.

### 3.5 전력계통 모델

전력계통의 모델링은 자동코드 생성 프로그램인 EDnet(Electrical Distribution Network) [9]을 사용 하였으며 프로그램에 적용되는 방정식은 키르히호프(Kirch-off's)의 전류, 전압 방정식이 사용되었다.

전력계통의 모델은 대단위 전력계통에 연결된 것으로 모의하는 방법과 하나의 발전기 또는 2개 이상의 발전기가 병렬로 연결되어 운전되는 방식으로 각각 모의할 수가 있다. 〈그림 11〉은 발전기 계통모의화 도면이다.

발전기 계통의 모의에는 Generator 모델이 사용되었으며 발전기의 여자전류( $I_{ex}$ )는

$$I_{ex} = (K_{ex} \times E_{ex} + I_{ex} \times \Delta t) / (K_{ex} + \Delta t) \tag{15}$$

주발전기의 여자전압 및 여자전류는

$$E_{fd} = K_{nr} \times N_g \times I_{ex} \tag{16}$$

$$I_{fds} = K_{fds} \times E_{fd} / R_f \tag{17}$$

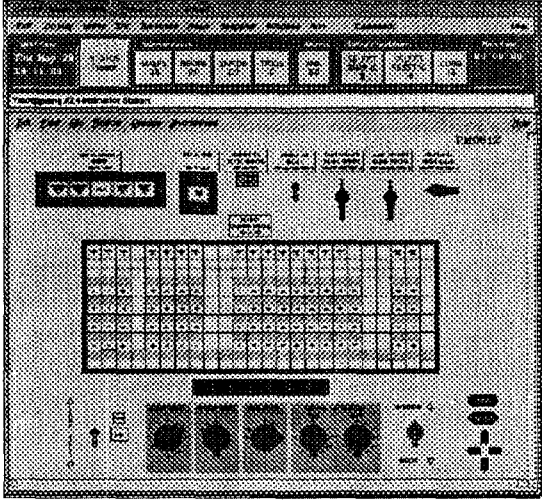
$$I_{fd} = I_{fd} + K_{Tfd} \times (I_{fds} - I_{fd}) \tag{18}$$

### 3.6 강사 조작반 모델

강사조작실 소프트웨어는 사용자가 시뮬레이터의 모든 운전정보를 효과적으로 손쉽게 사용할 수 있도록 하기위하여 Standard C-언어와 X-윈도우 환경을 사용하며 시뮬레이터 주제어실 제어반을 이물레이션(Emulation) 하는 소프트 판넬(Soft Pannel)을 개발하여 제어반 없이도 윈도우 그래픽 제어반을 통하여 시뮬레이터를 운전할 수 있어서 운전원 교육훈련시 강의실에서도 발전소에서 발생할 수 있는 현상을 시뮬레이션하여 현실감 있는 교육을 수행 할 수 있다.[4, 5]

강사 조작반(Instructor Station)은 운전원 훈련을 위한 실습 상황을 부여하고, 각종변수를 감시하며, 발전소의 현장 기기의 조작을 수행하기 위하여, 키보드, 마우스, 터치 스크린, 이동식 리모컨(Remote control unit), 그래픽 칼라 모니터등으로 구성된다. 〈그림 12〉은 강사조작반의 메뉴화면 및 소프트 판넬이다.





〈그림 12〉 강사조작반 메뉴화면

#### 4. 시험 및 결과

##### 4.1 출력운전 열평형시험

출력운전 열평형(Heat balance)시험은 기준 발전소 시 운전 출력증발 운전시 25%, 50%, 75% 및 100% 운전 데이터를 취득하여 기준자료로 활용하였으며, 발전소 설계 자료와 시뮬레이터 운전 데이터를 비교 검토하였고, 시뮬레이터의 허용범위는 주요 운전변수는  $\pm 1\%$ 를 기타 운전변수는  $\pm 2\%$ 를 적용하였다. 〈표 2〉, 〈표 3〉, 〈표 4〉 및 〈그림 13〉, 〈그림 14〉, 〈그림 15〉는 각각 25%, 50%, 75% 및 100% 운전시 주요변수의 열평형 시험 결과로서 값이 허용범위에 있음을 보여준다[3].

〈표 2〉 열평형 시험 결과(NIS power %)

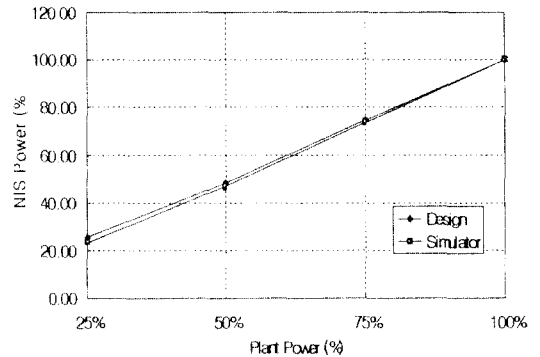
출력	Design	Plant Data	Simulator
25%	25.50	19.94	23.29
50%	48.30	49.77	46.90
75%	74.70	79.92	73.74
100%	100.0	100.69	99.87

〈표 3〉 열평형 시험 결과(RCS Tav<sub>g</sub> °C)

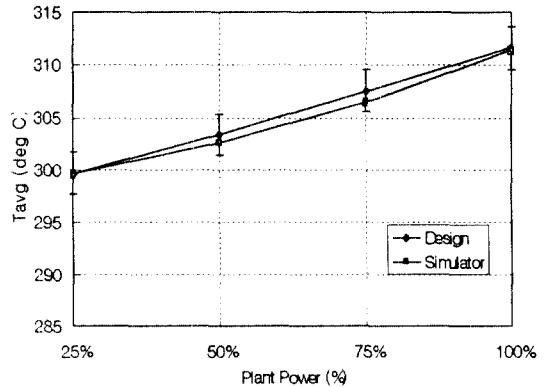
출력	Design	Plant Data	Simulator
25%	299.68	297.04	299.70
50%	303.30	301.86	302.50
75%	307.55	307.00	306.50
100%	311.60	309.22	311.40

〈표 4〉 열평형 시험 결과(RCS Pr. Kg/cm<sup>2</sup>)

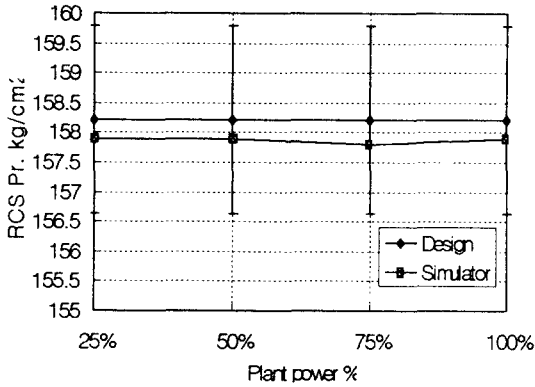
출력	Design	Plant Data	Simulator
25%	158.2	156.8	157.9
50%	158.2	157.7	157.9
75%	158.2	156.6	157.8
100%	158.2	158.7	157.9



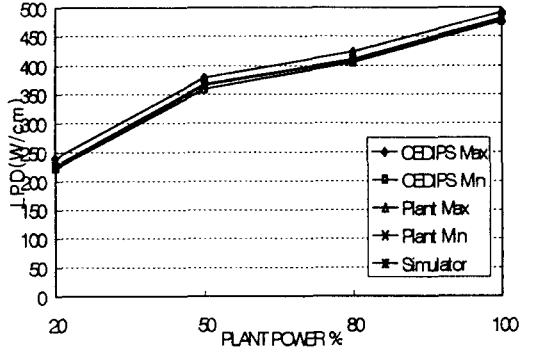
〈그림 13〉 열평형 시험 결과(NIS power)



〈그림 14〉 열평형 시험 결과(RCS Tav<sub>g</sub>)



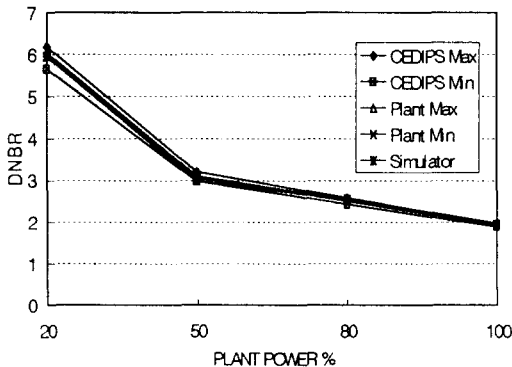
〈그림 15〉 열평형 시험결과(RCS Pressure)



〈그림 17〉 CEDIPS, 발전소 취득값 및 시물레이션 모델의 LPD값 비교

4.2 노심 보호계통 시험

노심보호계통의 모델 성능시험을 위해 기준 발전소의 가동시 20%, 50%, 80% 및 100% 출력운전 데이터를 취득하고 이 데이터를 성능시험 기준값을 계산하기 위하여 개발된 CEDIPS 코드에 입력하여 DNBR 및 LPD의 허용가능한 최고, 최저값을 계산하였으며, 기준 발전소의 출력운전 데이터가 허용범위내에 있는지를 확인한 후, 발전소 데이터의 평균값을 개발된 시뮬레이터 CPC모델에 입력하여 출력된 DNBR 및 LPD값이 요구하는 허용범위 내에 있는지를 확인한 결과 개발된 노심보호계통 모델이 적정함을 확인하였다. 〈그림 16〉.



〈그림 16〉 CEDIPS, 발전소 취득값 및 시물레이션 모델의 DNBR값 비교

〈그림 17〉은 시험결과 DNBR 및 LPD값을 나타내고 있다.

5. 결론

원자력 발전소 운전원 훈련용 시뮬레이터는 원자력, 전기, 전자, 기계, 물리, 전산, 운전제어 등의 종합적인 지식을 바탕으로 자료 수집 및 분석, 전산기구 구성, S/W 개발, 수학적 모델개발, 각종 계기류 설계 및 제어반 제작등의 기술을 확보해야만 제작할 수 있는 종합적인 기술 집약 산업이다. 국내의 발전소 시뮬레이터 기술 수준은 원자력 및 화력발전소 운전원 훈련용 시뮬레이터를 20여년 동안 운영하여 운영기술은 정상 궤도에 올라있으나, 외국 제작사에 의존하여 도입, 설치하므로써 기술의 호환성이 없고 핵심 소프트웨어에의 접근이 곤란하여 성능개선이 어려웠다. 본 시뮬레이터 국산화 개발을 통해 자료 수집 단계에서부터 설계, 모델 개발, 통합( S/W 계통간 통합 및 S/W와 H/W간의 통합). 성능시험의 모든 단계를 통하여 엔지니어링 시뮬레이터와 Super-Simulator등 첨단 종합 기술개발의 기반을 확보하였으며, 개발된 시뮬레이터는 원자력 발전소 운전원 훈련용으로 활용되어 원전의 안전성 향상과 운전성 향상에 크게 기여할 것이다.

참고문헌

[1] 이철언외, “발전소 운전원 훈련용 모의제어반 국산화 개발 적용”, 전력연구원, 「KRC-91I-J03 제 2차 중간 보고서」, 1995

[2] Lee, Yong-kwan etc, “KEPCO's 3 PACK Simulator Development Plan”, Simulators International XII Proceeding, pp 53-57,SCS,1995

[3] ANSI/ANS-3.5 1993 “Nuclear Power Plant Simulators for Use in Operator Training and Examination”, ANS , 1994

[4] S3T Users Manual 「STK, RETACT, TOPMERET, FLOEnet, Generator, EDnet, Instructor Station, US3」, 1993

[5] 이중근외, 「공무 국외 여행 귀국 보고서」, 전력연구원 1994-X.08-7 ,1995

[6] Combustion Engineering, Inc., 「Functional Design Requironments For Core Protection Calculator」, CE-NPSD -35,

[7] Combustion Engineering, Inc., 「Functional Design Requironments For Control Element Assembly Calculator」, April (1988). CE-NPSD-366, April(1988).

[8] Combustion Engineering, Inc., 「Functional Design Requironments For Core Operating Limit Supervisory System for YGN #3,4」, CE-NPSD-423, Dec. (1988).

[9] YGN 3&4, 「CPC/COLSS Verification Test Procedure」, 3S-I-000-18, Sep.(1994).

● 저자소개 ●



이중근

1989년 부산공업대 전기과 졸업  
 1992년 경성대 산업공학과 졸업(석사)  
 1997년 전북대학교 전기공학과 박사과정 수료  
 현 재 한전 전력연구원 책임연구원으로 재직중이다.  
 관심분야 플래트 시플레이션 및 시뮬레이션 응용분야



이명수

1981년 인하대학교 기계공학과 졸업  
 1984년 인하대학교 대학원 기계공학과 졸업(석사)  
 1984~현재 한전 전력연구원 선임연구원으로 재직중이다.  
 관심분야 열수력, Modeling & Simulation, S/W VV, MMI 등



김동욱

1995년 호남대 전산통계학과 졸업  
 현 재 한전 전력연구원 선임연구원으로 재직중이다.  
 관심분야 Power Plant Simulation & S/W Safety V/V, I&C



## 이용관

1975년 연세대학교 물리학과 졸업  
 1977~현재 한전 전력연구원 책임연구원으로 재직중이다.  
 관심분야 열수력, Robotics, S/W VV 등



## 한병성

1975년 전북대학교 전기공학과 졸업  
 1981년 전북대학교 대학원 전기공학과 졸업 (석사)  
 1988년 불란서 Louis Pasteur 대학 졸업(공학박사)  
 1989년 UNESCO material center member  
 1991년 IBM TJ Waston center member  
 1982~현재 전북대학교 전기공학과 교수로 재직중이다.  
 관심분야 초전도 전자장 수치해석 및 응용, 자동제어 등