

변압 관류형 초임계압 화력발전소 전범위 시뮬레이터 개발

The Development of Full-Scope Replica Simulator for Variable Supercritical Pressure Once-through Fossil Power Plants

이 중근, 안연식, 정 훈, 이용관, 한병성
(Jung Kun Lee, Yeon Shik Ahn, Hoon Jung, Yong Kwan Lee and Byong Sung Han)

Abstract : A full-scope replica type simulator whose MCR(main control room) has the same features and operation functions as MCR of the reference power plant has been developed for a fossil power plant. This simulator was developed with the model of Poryung Fossil Power Plant #3,4 which is the standard model of the Korean fossil power plant. It is the first localized simulator for the supercritical, variable boiler pressure type fossil power plant. The simulator provides various kinds of accidents which are in normal plant operation and thus enables operators to recover or reduce possible damages. To design and develop this kind of simulator, we need to integrate high technologies such as system analysis, plant operation and system integration of mechanics, physics, computer science. CASE(Computer Aided Software Engineering) tools were used to develop the dynamic model. This simulator will greatly contribute to the improvement of the safety and efficiency of the fossil power plant by implementing operator training. In this paper, the outline of software and hardware configuration and characteristics of the simulator are described, and the results of 30%, 50%, 75%, 100% load operation test will be discussed.

Keywords : plant simulator, software configuration management, US3, UDS, ODS

I. 서론

국내의 화력발전소는 설비운용 특성상 전력계통 네트워크에서 중간부하 담당용으로 설계되어, 부하 주기운전 및 정지, 주말 기동정지 운전모드를 채택하고 있어, 빈번한 기동정지 및 출력 증감발 운전에 대비한 발전소 운전원의 숙련된 운전기술 향상을 요구하고 있으며[2][4], 또한 기술의 발달에 따라서 발전설비가 고기능화되어 발전소의 정지횟수가 줄어들고 운전원들이 운전조작을 할 수 있는 기회가 감소함에 따라서 발전소 비정상상태 발생시 긴급대처 능력향상을 위하여 운전원훈련이 절실히 요구되고 있다[4]. 시뮬레이터의 컴퓨터시스템은 실시간(real time) 또는 실시간 보다 빠른 시뮬레이션을 하기 위하여 높은 계산능력이 요구되고 있다. 따라서 기존의 시뮬레이터 전용 컴퓨터시스템의 폐쇄성을 극복하고 확장성 및 개방성을 최대한 보장할 수 있는 UNIX 운영체제를 사용하는 RISC 워크스테이션을 사용하였다. 또한 소프트웨어 개발 및 유지보수성 증진을 위해 엔지니어스테이션을 설치하였으며, 기술의 호환성 확보를 위해 같은 회사제품 동일계열의 워크스테이션을 사용하여 네트워크로 연결 활용성을 증진하였다[6][8].

운전원훈련용 시뮬레이터는 ISA 77.20 화력발전소 시뮬레이터 기능 요구사항에 따라서 기동, 정지 및 부하 증감발시 시스템 동특성을 충실히 시뮬레이션하며, 발전

소 계통의 고장시를 가정한 153가지의 시스템급 고장과 시뮬레이션계통에 포함된 모든 기기들에 대한 고장을 강사가 입력하여 훈련할 수 있도록 하였다[1].

본 논문에서는 한국표준형 초임계압 관류형, 변압운전형식의 화력발전소인 보령 화력발전소 3호기를 모델로 국내에서 최초로 개발에 성공한 시뮬레이터의 시스템 구성과 발전소 시스템 모델링에 대하여 기술하고, 시뮬레이터에서 부하 증감발 시험 및 과도운전 시험을 실시하고 그 시험 결과를 논하고자 한다[9].

II. 시스템 구성

1. 시뮬레이터의 구성

발전소 운전원훈련용 시뮬레이터는 기준발전소의 주 제어실(main control room)의 제어패널을 그대로 시뮬레이션한 주 제어실과 운전원에게 각종 훈련상황을 부여하고 훈련결과를 분석, 감시하는 강사조작반(instructor station), 그리고 전산실(computer room)로 구성되어 있다[4].

1.1 주 제어반

주 제어반은 기준발전소인 보령화력 3호기의 제어반과 외형 및 기능이 일치하도록 제작하였으며, 주 제어반에서의 운전원 기기 조작은 I/O를 거쳐 주전산기로 전송되고 S/W모델이 구동되어 계산된 값을 I/O를 거쳐 주 제어반의 각종 계기에 지시하며, 네트워크를 통해 강사조작반에 전송된다. 그림 1은 개발된 시뮬레이터의 주 제어반 전경이다.

1.2 강사조작반

강사조작반(instructor room)에서는 주 전산기의 계통모

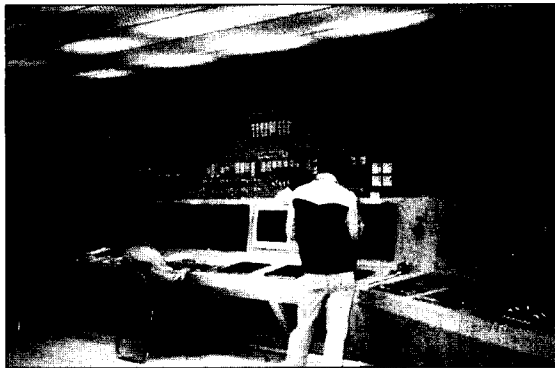


그림 1. 주 제어반 전경.
Fig. 1. Main control room.

텔에 명령하여 초기조건(initial condition)의 설정, 기기고장(component malfunction), 계통사고(system malfunction)등을 부여하여 운전원이 훈련에 임할 수 있도록 한다.

1.3 전산실

시뮬레이션 전산기는 기준발전소의 거동을 시뮬레이션 하는 수학적 모델을 구동해 주는 2대의 전산기(host & standby computer)와 강사조작용 전산기 및 모델개발 또는 모델 업그레이드용 전산기인 엔지니어링 워크스테이션으로 구성된다.

2. 시스템 소프트웨어

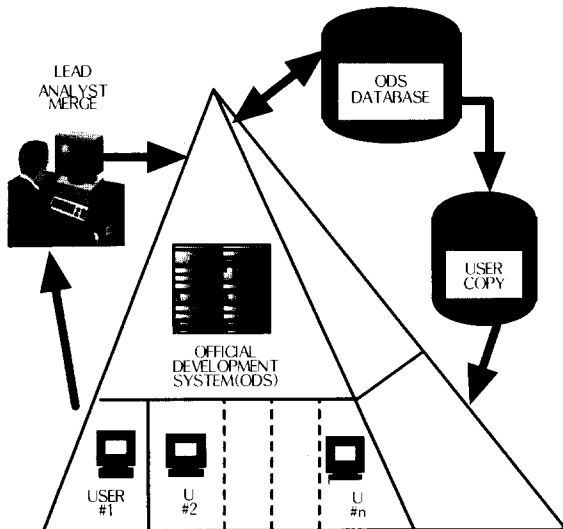


그림 2. 소프트웨어 계층구조.
Fig. 2. Software levels.

시뮬레이터 개발에 사용되는 소프트웨어는 Unix 환경에서 사용 가능한 US3(Unix Simulation Software Support System)을 사용하였으며 시뮬레이션시스템의 운영 및 개발환경을 제공하는 종합적인 소프트웨어로서 정교한 데이터베이스 구조와 다층 소프트웨어 및 통제관리 기능을 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 공식적으로 등록된 시뮬레이션 소프트웨어의 최종버전이며, 둘째 UDS(User Development System)는 현재 개발, 수정이 진행중인 소프트웨어로서 시뮬레이션 소프트웨어의 수정은 UDS 레벨에서만 가능하고 완벽한 시험을 거친 후 ODS 레벨에 올린다. 그림 2는 소프트웨어의 계층구조이다.

2.1 프로그램 모듈의 구조

US3는 개별적으로 컴파일, 로드(load) 될 수 있는 모듈들의 형태를 정의함으로써 top-down 유형의 시뮬레이션 프로그램을 가능케 하며 그림 3과 같은 구조를 갖는다[6].

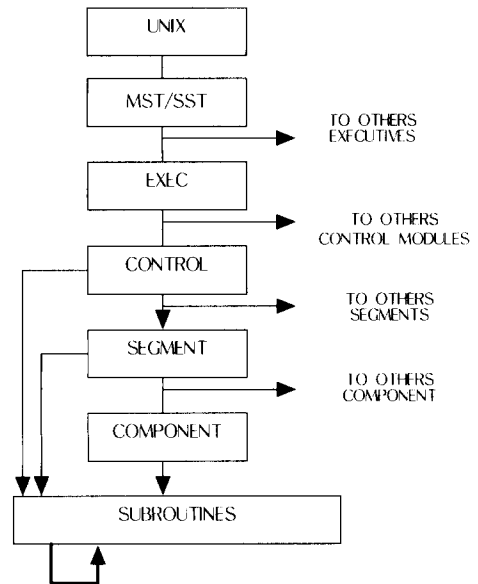


그림 3. 프로그램 모듈의 구조.
Fig. 3. Configuration of program module.

표 1. 모델링 소프트웨어.
Fig. 1. Modeling software.

S/W	적용 계통	특 성
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

2.2 모델링 소프트웨어

발전소 계통 시뮬레이션 모델링은 발전소계통 모델개발시 소프트웨어의 유지보수성 향상과 편의성 증진을 위해 auto code generator가 포함된 software development tool을 활용하였다. 본 시뮬레이터에는 표 1과 같은 시스템모델링 소프트웨어 프로그램이 사용하였다.

III. 시뮬레이션 모델개발

1. 보일러/연소로 모델링

보일러(boiler)계통 모델링은 유체의 압력 및 유량계산을 위해 복잡한 플랜트시스템의 모델링시 일관성을 유지하고 모델개선이 유리하도록 개발된 자동코드 생성 프로그램인 FLOWnet을 사용하고, 보일러내의 물, 증기, 가스, 공기 등 유체의 온도계산은 전도, 복사, 대류에 의한 열전달식을 이용하여 계산하였다. 압력 및 유량계산을 위한 보일러모델과 유체의 온도계산을 위한 연소로(furnace)모델은 매우 밀접하게 연관되어 있어 이를 하나의 시스템모델로 구성하였으며, 보일러의 모델은 33개의 노드로, 연소로 모델은 10개의 노드로 분할하여 모델링하였다. 연소로 모델링의 핵심은 보일러에서 발생한 열량을 여하히 각 노드에 분배하느냐가 관건이 되는데 노내에서의 열분포(heat distribution)는 Gaussian distribution을 활용하였다. 연소로에서의 열분포의 분포식을 정리하면 다음과 같다[6].

$$f = \frac{1}{u\sqrt{2\pi}} \exp\left[\frac{-1}{2} (z - z_0)^2\right] \quad (1)$$

여기서 f는 Gaussian distribution이며, z는 보일러 높이 방향이고, z₀는 z방향의 평균값이다. 보일러에서 연료 및 공기가 연소될 때 노내의 열분포를 Gaussian distribution형태로 나타낼 수 있으며, 연소로 노드 10개 중 노내의 연소영역을 3개의 노드로 분할하였다. 연소영역 각 노드에서의 버너의 배열은 Gaussian distribution 형태가 되도록 배열하여야 하는데, 보령화력 모델의 경우에 가장 아래쪽 노드에는 AB elevation oil burner 및 coal burner A를 배치하고 중간노드에는 CD elevation oil burner 및 coal burner B,C,D를 배치하며, 최상층에는 EF elevation oil burner 및 coal burner E,F를 배치하였다. 즉 Burner j가 어떤 량의 연료-공기 혼합물을 노내에 분사하였다고 하면, 노내의 노드 N, N-1 및 N+1에서의 분포는 다음 (2),(3),(4)로 나타낼 수 있고 이의 분포 형태가 Gaussian distribution이 된다.

$$\phi_{i,n} = \frac{1}{2} \operatorname{erf} \frac{(K_1)}{(\sqrt{2} W_1)} + \frac{1}{2} \operatorname{erf} \frac{(K_2)}{(\sqrt{2} W_2)} \quad (2)$$

$$\phi_{j,n-1} = \frac{1}{2} \operatorname{erf} \frac{(K_3)}{(\sqrt{2} W_1)} - \frac{1}{2} \operatorname{erf} \frac{(K_1)}{(\sqrt{2} W_1)} \quad (3)$$

$$\phi_{j,n+1} = \frac{1}{2} \operatorname{erf} \frac{(K_4)}{(\sqrt{2} W_2)} - \frac{1}{2} \operatorname{erf} \frac{(K_2)}{(\sqrt{2} W_2)} \quad (4)$$

여기서 furnace와 버너의 기하학적 형상에 의해서 $\phi_n + \phi_{n+1} + \phi_{n-1} = 1$ 이 되어야한다.

만약에 N개의 버너가 운전된다면 노드 n에서의 전체 contribution function은 다음 (5)와 같다.

$$\phi_n = \frac{(\sum \phi_{j,n})}{N} \quad (5)$$

또한 노드 n으로 들어가는 연료, 공기 혼합물은 다음 (6),(7)로 표현된다.

$$F_{a,n} = F_{a,tot} \phi_n \quad (6)$$

$$F_{f,n} = F_{f,tot} \phi_n \quad (7)$$

여기서 F_{a,tot}는 노내로 들어가는 전체공기량, F_{f,tot}는 노내로 들어가는 전체 연료량, F_{a,n}는 노드 n으로 들어가는 공기량, F_{f,n}는 노드 n으로 들어가는 연료의 량이다. 이렇게 각 노드에 공급된 연료 및 공기량으로부터 각 노드에서의 열분포가 Gaussian distribution에 의해 정해지고, 이로부터 각 노드의 가스온도를 계산해야 하는데 전체 열발생량중에서 연소영역에 분포된 열량을 제외하고 나머지 7개의 노드는 연소로 영역(대류영역)에 배분하여 열전달 관계식을 적용하는데, 다음의 질량 및 에너지보존 방정식 (8), (9)에 의해 열량을 계산한다.

$$\frac{d(M)}{dt} = F_i - F_o \quad (8)$$

$$\frac{d(MH)}{dt} = F_i H_i - F_o H_o + Q_c - Q_a - Q_{los} \quad (9)$$

여기서 F_i는 노드입구 가스량, F_o는 노드출구 가스량, H_i는 노드입구 가스의 엔탈피, H_o는 노드출구 가스의 엔탈피, H는 흡수 엔탈피, Q_{los}는 furnace 열손실량이다. 위에서 계산한 엔탈피로부터 연소가스의 온도를 다음 (10)에 의해 계산한다.

$$T = f(H, C_p) \quad (10)$$

여기서 T는 노드에서의 혼합가스 온도, C_p는 노드에서 가스의 열용량(heat capacity)이다. 연소가스의 온도가 계산되면, 다음에는 가스에서 보일러 튜브로 열전달 및 유체로의 열전달이 계산되는데 이로부터 다시 온도와 엔탈피 표에 의해서 (10)과 같은 방법으로 유체의 온도를 계산한다. 여기서 열전달은 복사, 대류, 전도가 모두 지배하게 되는데 연소영역에서는 약 95%가 복사, 나머지가 대류에 의해 열전달이 이루어진다. 보일러 내에서 열전달은 2단계로 이루어지는데 관계식을 정리하면 첫째, 연소가스로부터 보일러 튜브로의 열전달량 Q_{gm}은 다음 (11)에 의해 계산한다.

$$Q_{gm} = (brq_{rad} + brq_{con})(T_{gas} - T_{metal}) \quad (11)$$

둘째, 튜브에서 유체로의 열전달량 Q_{ml}은 다음 (12)에 의해 이루어진다. 이 식에서 연소영역에서는 주로 복사와 대류에 의해서 열전달이 이루어지고, 과열기나 재열기에서의 열전달은 전도 및 대류에 의해서 열전달이 이루어진다.

$$Q_{ml} = (brq_{cond} + brq_{conv})(T_{metal} - T_{liq}) \quad (12)$$

여기서 brq_{rad}는 가스에서 metal로 전달되는 복사 열전달 계수, brq_{con}는 가스에서 metal로 전달되는 대류 열전달계수, brq_{cond}는 riser 튜브에서 유체로의 전도 열전달계수, brq_{conv}는 riser 튜브에서 유체로의 대류 열전달 계수, T_{gas}는 노내의 연소가스 온도, T_{metal}은 riser 튜브온도, T_{liq}는 물이나 증기의 온도이다.

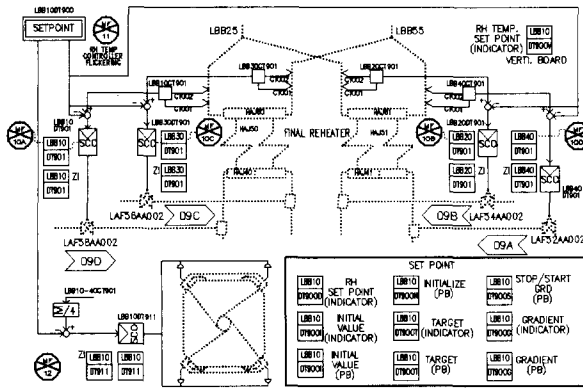


그림 4. 보일러/연소로 시뮬레이션도면.
Fig. 4. Boiler/furnace simulation diagram.

2. BOP계통 모델링

BOP(Balance of Plant)계통의 모델개발에는 자동 코드 생성 프로그램인 FLOWnet 및 TOMERET를 이용하여 모델링 하였으며, 이 프로그램은 발전소계통 모델개발을 위한 표준화 및 정형화된 자동 코드생성 프로그램으로서 주 증기계통내 다수의 기기들에 대한 유체의 2상 비평형 상태를 구현하며, 기본 보존방정식(질량, 운동량, 에너지) 및 물성방정식 등을 행렬해법을 사용하여 대상시스템의 물리적, 동적특성을 정확하고 안정되게 모의해 주는 톨로서 구성은 크게 GUI(Graphic User Interface)와 모델 자동생성기 부분으로 이루어져 있다. 코드를 이용한 모델개발시의 특징은 GUI를 이용한 대상 시스템의 모의범위 작성 및 대상시스템의 전체 정보를 하나의 입력파일로 처리함으로써 시스템 모델개발시 입력데이터관리의 효율성은 물론, 모델개발시 오류의 제거, 검토시간 단축, 사용자간의 일치성, 코드의 반복사용에 의한 생성된 모델프로그램의 균일화, 모델의 확장, 변경 및 유지보수에 유리하고, 변수, 상수명의 자동 제공 등의 장점을 가지고 있다. 그림 5는 주 증기계통의 시뮬레이션 도면이다.

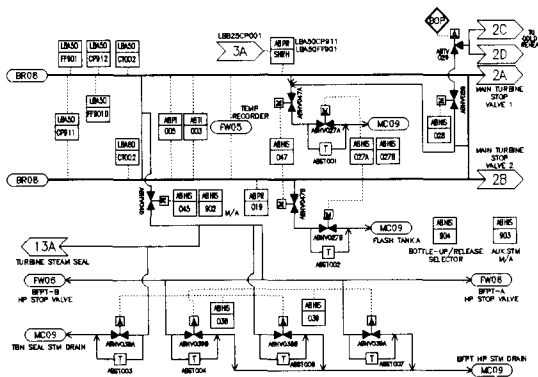


그림 5. 주 증기계통 시뮬레이션도면.
Fig. 5. Main steam system simulation diagram.

2.1 질량 보존

대상 시스템내 각 노드에서의 질량흐름의 균형은 유체의 주경로 및 주변경계의 질량의 출입 및 노드 자체 내에서의 상변화에 따른 각상별 질량의 총합은 0으로 다음

식과 같이 계산된다.

$$\frac{dM_{n,k}}{dt} = \sum(x_{i,k} \times F_{n,k}) - \sum(F_{n,out} \times x_{n,k}) + \sum(x_{bn,k} \times F_{n,k}) \pm \Gamma_{n,k} \quad (13)$$

$$\Gamma_f = F_{boil} - F_{cond} - F_{rxn} \quad (14)$$

2.2 운동량 보존

노드 N에서 운동량 균형은 다음과 같은 식에 의하여 계산된다.

$$\frac{dF_f}{dt} = -\frac{\alpha_f \times A}{K_u} \times \left(\frac{dP}{dZ} + f_{f-w} + f_{f-j} \right) + K_u \rho_f \vec{g} - \delta P_{pump} + \sum \delta S_f \vec{v}_{src} \quad (15)$$

$$dP = - (f_{f-w} + f_{f-j}) dZ - K_u \rho_f \vec{g} dZ - \frac{K_u}{(\alpha_f A)} \times \frac{dF_f}{dt} dZ + \delta P_{pump} dZ + \frac{K_u}{(\alpha_f A)} \sum \delta S_f \vec{v}_{src} dZ \quad (16)$$

2.3 에너지 보존

각 노드에서의 에너지방정식은 평형상태를 가정하지 않고 노드내의 기상 및 액상 각각에 대해서 에너지 방정식을 취하여 정확한 2상 비평형 상태를 다음 식으로 계산한다.

$$d \left(\frac{M_f h_f}{dt} \right) = \sum h_{f,i} F_{f,i} - \sum h_{f,out} F_{f,out} + \Gamma_f h_{f,sat} + Q_f - W_{shaft} + V_f \frac{dp}{dt} + \frac{Anu_f}{Ln} dP \quad (17)$$

위 에너지보존 방정식중 마지막 2개의 항목은 계의 미소한 일로서 무시할 수 있으며 차분화법에 의해서 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{M_{f,n} h_{f,n} - M_{f,n}^{lp} h_{f,n}^{lp}}{\Delta t} = \sum h_{f,i} F_{f,i} - \sum h_{f,out} F_{f,out} \pm \Gamma_{f,n} h_{f,n,sat} + Q_{f,n} \quad (18)$$

위 식에서 +는 기상인 경우이고, -는 액상의 경우에 적용한다. 엔탈피 계산을 위해 사용되는 에너지 방정식은 2가지의 계산방법중 하나의 선택으로 사용할 수 있다.

1) explicit 계산법

각 노드의 개별 체적이 충분히 크고 유체의 밀도가 충분히 클 때는 직전 사이클에서 계산되는 값(last path value)으로만 계산한다.

$$h_{f,n} = \frac{M_{f,n}^{lp} h_{f,n}^{lp}}{M_{f,n}} + \frac{\Delta t (\sum h_{f,i} F_{f,i} - \sum h_{f,out} F_{f,out} \pm \Gamma_{f,n} h_{f,n,sat} + Q_{f,n})}{M_{f,n}} \quad (19)$$

2) implicit 계산법

대상시스템이 작은 체적의 노드를 포함하고 유체밀도가 낮은 경우에는 직전 사이클에서 계산되는 값(last path value)과 자신과의 함수로서 표현되며 안정되고 정밀한 계산결과가 요구될 때 선택한다.

$$h_{f,n} = \frac{M_{f,n}^{lp} h_{f,n}^{lp}}{M_{f,n}} + \frac{\Delta t(\Sigma h_{f,i} F_{f,i} - \Sigma h_{f,n} F_{f,n, out} \pm \Gamma_{f,n} h_{f,n, sat} + Q_{f,n})}{M_{f,n}} \quad (20)$$

$$(M_{f,n} + \Delta t \Sigma F_{f, out}) h_{f,n} - \Delta t \Sigma F_{f,i} h_{f,i} = M_{f,n}^{lp} h_{f,n}^{lp} + \Delta t(\pm \Gamma F_{f,n} h_{f,n, sat} + Q_{f,n}) \quad (21)$$

3. 전력계통 모델링

전력계통의 모델링은 자동 코드생성 프로그램인 EDnet (Electrical Distribution Network)을 사용하였으며 프로그램에 적용되는 방정식은 키르히호프(Kirchoff'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. 발전기 계통의 모의에는 generator 모델이 사용되었으며 발전기의 여자전류(I_{ex})는 다음 식에 의해 계산하였다.

$$I_{ex} = \frac{K_{ex} \times E_{fd} + I_{ex} \times \Delta t}{K_{ex} + \Delta t} \quad (22)$$

주발전기의 여자전압(E_{fd}) 및 여자전류(I_{fd})는 다음 식으로 계산한다.

$$E_{fd} = K_{nr} \times N_g \times I_{ex} \quad (23)$$

$$I_{fds} = K_{fbs} \times E_{fd} / R_f \quad (24)$$

$$I_{fd} = I_{fd} + K_{Tfd} \times (I_{fds} - I_{fd}) \quad (25)$$

발전기의 여자전압과 여자전류는 발전기의 계자 차단기가 개방되면 영(0)이 된다. 그림 6은 발전기계통의 시뮬레이션 도면의 일부이다.

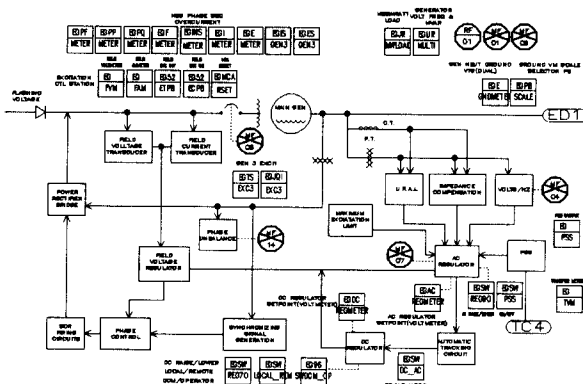


그림 6. 발전기계통 시뮬레이션 도면.
Fig. 6. Generator system simulation diagram.

4. 강사조작반 소프트웨어

강사조작반 소프트웨어는 standard C 언어와 X-윈도우 환경을 사용하며, 시뮬레이터 주 제어실 제어반을 에뮬레이션(emulation)하는 소프트패널(soft panel)을 개발하여 제어반 없이도 윈도우 그래픽 제어반을 통하여 시뮬레이터를 운전할 수 있어서 운전원 교육훈련시 현실감 있는 교육을 수행할 수 있다. 강사조작반(instructor

station)은 운전원훈련을 위한 실습 상황을 부여하고, 각종변수를 감시하며, 발전소의 현장 기기의 조작을 수행하기 위하여, 키보드, 마우스, 터치 스크린, 이동식 리모컨(remote control unit), 그래픽 칼라 모니터 등으로 구성된다. 그림 7은 강사조작반의 메뉴화면이다.

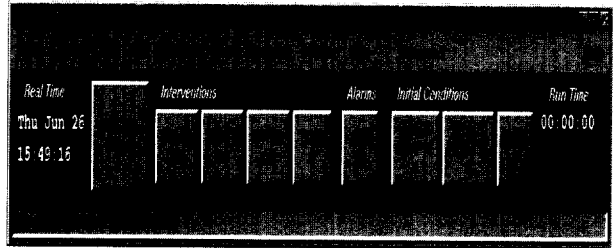


그림 7. 강사조작반 메뉴화면.
Fig. 7. Instructor station menu.

IV. 시험 및 결과고찰

1. 출력운전 시험

개발된 모델의 신뢰성을 검증하기 위해 30%, 50%, 75%, 100% 출력에서 운전을 실시하고 대표적인 8가지 주요 변수에 대해 실제 발전소의 설계 값과 시뮬레이션한 값을 비교, 검토하였으며, 시뮬레이터에 관한 국제기준(ISA 77.20-1993)은 주요 변수의 오차가 2% 범위내에 유지할 것을 권고하고 있다[1]. 표 2와 같이 30% 부하에서의 재열증기 온도가 2.6%, 75% 부하에서의 주 연소 공기량이 2.5%로 오차가 큰 것을 제외하면 대체로 만족할 만한 수준으로 구현되었다고 볼 수 있다. 이 변수들의 오차가 설계값과 비교하여 오차가 2%를 넘은 것은 모델의 튜닝에 사용한 발전소의 운전값이 대단히 많은 외부변수와 외부환경에 민감하게 영향을 받기 때문인 것으로 생각된다. 예를 들어 재열증기의 온도는 온도조절용 분사수의 양과 버너의 분사각도, 연료의 종류 등에 따라 민감하게 변화하며, 주연소 공기량도 기온, 습도 및 연료에 따라 약 5% 정도까지 민감하게 변화하기 때문이다. 기준발전소의 변수와 비교하여 유사하며 연료량에서 기준발전소와 차이를 보이고있는 것은 당시 발전소에서 사용연료의 종류에 따라서 열량의 차이에 의한 것으로 생각된다.

2. 과도운전 시험

과도운전시 시뮬레이션 모델의 거동을 확인하기 위해 보일러의 연소용 공기를 공급하는 P.A. 팬이 트립되었을 때 터빈 런백 시험을 수행하였다. 팬의 트립에 따라 연소용 공기유량은 즉시 감소되었으며, 터빈 런백 신호가 자동발생되어 그림 16과 같이 발전기 출력이 약 270MWe까지 터빈 런백에 의해 감발되었으며, 급수유량은 보일러 급수펌프의 자동정지로 약 100Ton/hr 까지 즉시 감소되었다. 증기유량은 터빈런백에 따라서 해당 출력의 유량으로 감소되었으며, 증기압력이 설정된 압력으로 감소 제어됨을 볼 수있다. 또한 연소가스의 온도는 537℃ 정도에서 출력에 관계없이 안정 유지되어 시뮬레이션 모델이 적절함을 확인할 수 있다.

표 2. 출력별 주요변수.

Table 2. Major parameter of power operation.

구분	출력	design	plant	sim.	오차
증기유량 (Ton/hr)	30%	444.60	450.98	442.50	0.11%
	50%	710.00	717.28	714.20	0.21%
	75%	1088.00	1103.53	1097.60	0.48%
	100%	1512.00	1506.16	1511.30	0.04%
증기압력 (kg/cm ²)	30%	80.00	84.22	84.80	1.60%
	50%	133.60	136.30	133.75	0.05%
	75%	201.00	202.56	200.00	0.33%
	100%	246.00	246.78	246.15	0.05%
증기온도 (°C)	30%	538.00	535.21	540.86	0.72%
	50%	538.00	537.58	541.10	0.78%
	75%	538.00	538.41	540.00	0.50%
	100%	538.00	538.79	539.60	0.40%
총연료량 (Ton/hr)	30%	58.32	59.94	55.74	0.72%
	50%	90.20	87.64	91.02	0.23%
	75%	131.44	129.51	132.60	0.32%
	100%	173.00	165.30	174.20	0.33%
터빈1단 압력 (kg/cm ²)	30%	50.80	54.85	50.19	0.17%
	50%	79.30	81.35	80.30	0.29%
	75%	118.40	118.76	120.10	0.49%
	100%	162.00	164.69	162.50	0.14%
재열증기 압력 (kg/cm ²)	30%	10.30	11.55	10.00	0.50%
	50%	17.90	17.98	17.34	0.93%
	75%	26.60	26.46	25.98	1.03%
	100%	36.00	35.90	35.59	0.68%
재열증기 온도 (°C)	30%	538.00	537.70	527.60	2.60%
	50%	538.00	540.19	533.90	1.03%
	75%	538.00	538.03	540.80	0.70%
	100%	538.00	538.90	541.10	0.78%
주연소 공기량 (Ton/hr)	30%	137.20	136.58	134.32	0.72%
	50%	202.00	205.70	206.00	1.00%
	75%	283.00	294.30	293.00	2.50%
	100%	359.00	360.50	356.00	0.75%

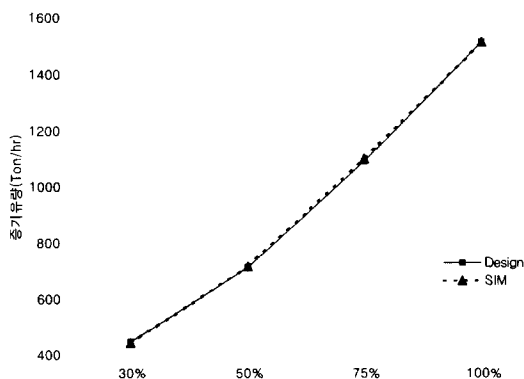


그림 8. 출력별 증기유량.

Fig. 8. Steam flow rate at power level.

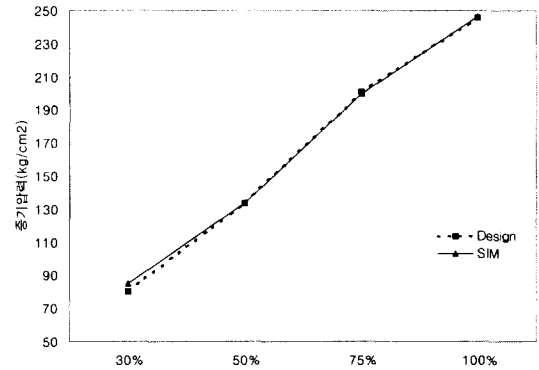


그림 9. 출력별 증기압력.

Fig. 9. Steam pressure at power level.

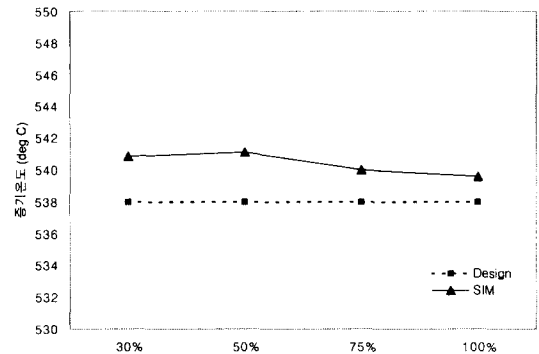


그림 10. 출력별 증기온도.

Fig. 10. Steam temperature at power level.

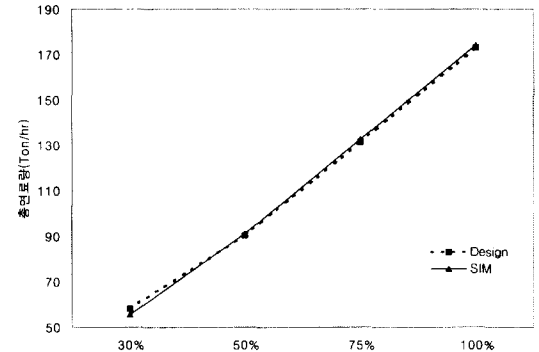


그림 11. 출력별 총연료량.

Fig. 11. Total fuel flow rate at power level.

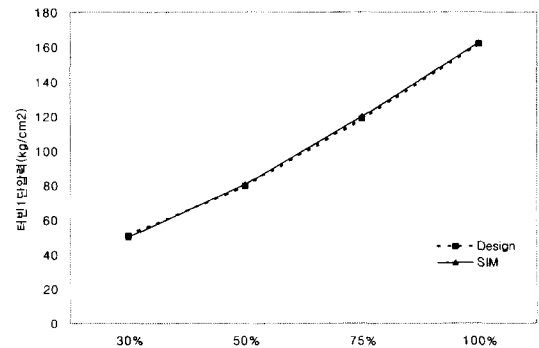


그림 12. 출력별 터빈 1단 압력.

Fig. 12. TBN 1st stage pressure at power level.

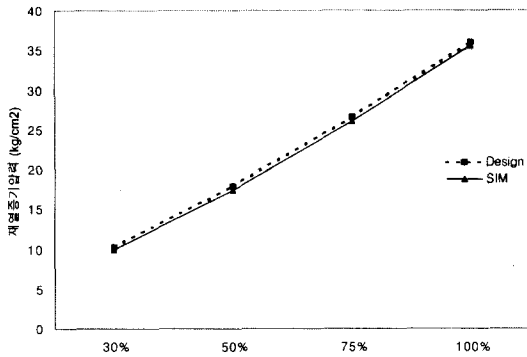


그림 13. 재열증기 압력.

Fig. 13. Reheat steam pressure at power level.

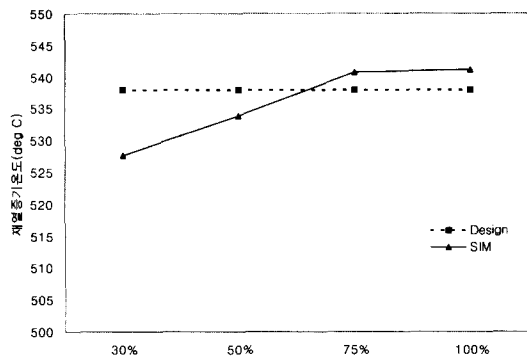


그림 14. 출력별 재열증기온도.

Fig. 14. Reheat steam temperature at power level.

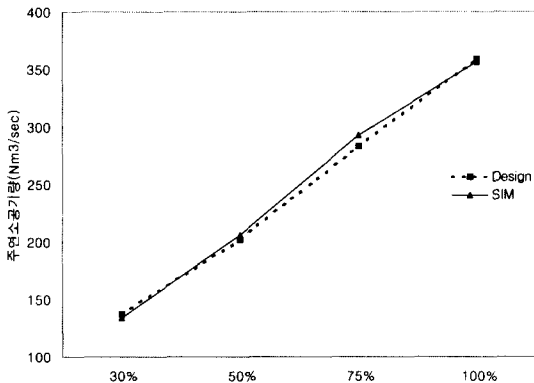


그림 15. 출력별 주연소 공기량.

Fig. 15. Air flow rate at power level.

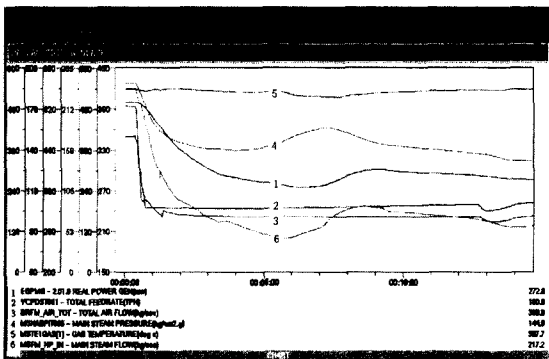


그림 16. P.A. 팬 트립에 의한 터빈런백 시험.

Fig. 16. Turbine runback at P.A. fan trip test.

V. 결론

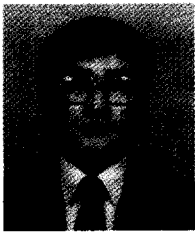
본 논문에서 국내 최초로 개발된 한국표준형 초임계압 화력발전소의 운전원훈련용 시뮬레이터의 개발과정과 모델링 방법에 대하여 기술하였으며 시뮬레이터의 성능시험을 통하여 개발된 모델을 검증하였다. 발전소 시뮬레이터는 열역학, 전기, 전자, 기계, 물리, 전산, 운전제어 등의 종합적인 지식을 바탕으로 전산기 구성, S/W 개발, 수학적 모델개발, 각종 계기류 설계 및 제어반 제작 등의 기술을 확보해야만 제작할 수 있는 종합적인 기술 집약 산업이다. 국내의 발전소 시뮬레이터 기술 수준은 원자력 및 화력발전소 운전원 훈련용 시뮬레이터를 20여 년 동안 운영하여 운영기술은 정상 궤도에 올라있으나, 외국 제작사에 의존하여 도입, 설치함으로써 기술의 호환성이 없고 핵심 소프트웨어에의 접근이 곤란하여 성능 개선이 어려운 문제점을 해결하였다[2][4].

본 논문에서 개발된 시뮬레이터의 성능시험 결과 정상 운전 출력별 주요 운전변수가 실제 발전소의 설계값과 비교하여 시뮬레이터 국제기준에서 요구하는 오차범위내에 유지하였으며, 과도운전 시험에서 보일러의 P.A.팬의 트립에 따라 터빈의 런백이 자동으로 발생되었으며 각종 주요 운전변수가 요구하는 출력에 따라서 적절하게 추종하므로써 개발된 모델이 적정함을 확인할 수 있었다.

끝으로 본 논문에서 개발된 시뮬레이터는 표준 석탄화력 발전소 운전원 훈련용으로 활용되어 화력 발전소의 안전성 향상과 운전성 향상에 크게 기여할 것이다.

참고문헌

- [1] ISA 77.20, "Fossil fuel power plant simulators functional requirements," ISA, 1993.
- [2] Y.-K. Lee, B.-H. Cho, S.-J. Kim and J.-E. Park, "KEPCO's 3 pack simulator development plan," *Simulators International XII Proceeding, SCS*, 1995.
- [3] C.-L. Jen, "Consolidation of various state of the art engineering principles of simulator plat-form a perspective from a simulator manufacture," *RELAP5 International Users Seminar*, 1994.
- [4] 이철언, 이용관, 이증근, "발전소 운전원 훈련용 모의제어반 국산화 개발 적용," 전력연구원, KRC-911-J03 제2차 중간 보고서, 1995.
- [5] 이증근, 이명수, 정 훈, 공무 국외 여행 귀국 보고서, 전력연구원 1994-X.08-7, 1995.
- [6] S3T Users Manual TOPMERET, FLOWnet, Generator, EDnet, Instructor Station, US3, 1993.
- [7] 한국전력공사, 보령 #3,4호기 *Data Book*, 1993.
- [8] S. K. Roll "State of the art compute tools for simulation," *Simulators VII Simulation Series*, vol. 22, no. 2. 1990.
- [9] T. Fukutomi, Y. Imai and M. Hishi, "Development of training simulator for variable pressure operation supercritical once through unit," *火力原子力發電*, vol. 38, no. 12, Dec., 1987.



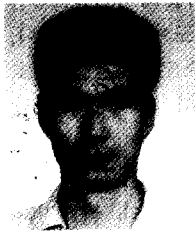
이 중근

1989년 부경대학교 전기과 졸업(공학사). 1992년 경성대학교 산업공학과 졸업(공학석사). 1998년 전북대학교 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 한국전력 연구원 책임 연구원. 관심분야는 플랜트 시뮬레이션 및 시뮬레이션 응용분야.



안 연식

1984년 전남대학교 기계공학과 졸업(공학사). 1998년 8월 충남대학교 기계공학과 졸업예정(열유체전공, 공학석사). 1985년~현재 한국전력 전력 연구원 선임 연구원. 관심분야는 열유체 및 시뮬레이션 응용분야.



정 훈

1988년 연세대학교 기계공학과 졸업(공학사). 1992년~1994년 한국 전력 삼천포 화력본부 시운전 및 발전부 근무. 1995년~현재 한국전력 전력 연구원 선임 연구원. 관심분야는 시뮬레이션 응용분야 및 소프트웨어 분야.



이용관

1975년 연세대학교 물리학과 졸업(이학사). 1977년~현재 한국 전력 연구원 책임 연구원. 주관심 분야는 열수력, 로봇분야 및 소프트웨어 분야.



한 병성

1975년 전북대학교 전기공학과 졸업(공학사). 1981년 전북대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1988년 불란서 Louis Pasteur 대학 졸업(공학박사). 1989년 UNESCO Material Center Member. 1991년 IBM T. J

Watson Center Member. 1982년~현재 전북대학교 전기공학과 교수. 주관심 분야는 초전도 전자장, 수치해석 및 응용 자동제어 분야.