

2003년 추계 학술발표회 논문집  
한국원자력학회

영광 원자력발전소 3·4호기 성능분석 지원모듈의 개발  
Development of Performance Analysis Support Modules  
in Younggwang NPP Unit 3&4

허균영, 이성진, 장순홍  
한국과학기술원  
대전광역시 유성구 구성동 373-1

최성수  
(주)엑트  
대전광역시 대덕구 신일동 1688-5번지

최광희, 지문학  
한국전력공사 전력연구원  
대전광역시 유성구 문지동 103-16

허 일  
한국수력원자력(주) 영광 원자력본부  
전라남도 영광군 홍농읍 계마리 514번지

요 약

본 논문에서는 한국수력원자력(주)와 전력연구원, 호서대학교, 그리고 (주)엑트와 공동으로 개발한 영광 원자력발전소 3·4호기 열성능분석 전산 프로그램의 지원모듈인 미측정항목 예측모듈, 성능변화 예측모듈, 그리고 성능변화 원인진단모듈에 대한 내용을 기술한다. 성능분석에서 요구되지만 측정되지 않는 변수에 대한 예측값 생성을 미측정항목 예측모듈이 담당한다. 성능변화 예측모듈은 터빈사이클의 성능저하 원인과 관련된 변수별로 그것들이 전기 출력의 증감에 미치는 영향을 보여준다. 마지막으로 성능변화 원인진단모듈은 성능저하 원인들의 측정 및 분석상의 불확실성을 감안하고 변수간의 상관관계를 토대로 원인별 확신도를 제공한다. 각 모듈을 구성하기 위한 기본 데이터는 터빈사이클 시뮬레이션 툴인 PEPSE를 사용하였다. 미측정항목 및 성능변화 예측모듈은 기본 데이터를 회귀분석하여 미측정항

목 예측상관식과 성능변화 예측상관식을 만들어낸다. 성능변화 원인진단에서는 불확실성과 경험지식을 적절히 모델링할 수 있는 베이지안 네트워크를 사용한다. 검증은 PEPSE로부터 얻어진 시험 데이터를 대상으로 우선 수행되고, 실제 발전소에서 취득한 데이터를 이용하여 현장 시험을 마쳤다.

## Abstract

This paper covers the unmeasured parameter estimation module, the performance degradation estimation module, and the performance degradation diagnosis module that are the supporting modules of the thermal performance analysis program of Younggwang nuclear power plant unit 3&4, PERUPS (PERformance UPgrade System), which was developed by KHNP, KEPRI, Hoseo university, and ACT. The unmeasured parameter estimation module plays a role in the generation of estimated values for the parameters that are necessary but there are no sensors. The performance degradation estimation module shows the impact for electric gain and loss according to the parameters related to turbine cycle performance. The performance degradation diagnosis module provides the belief according degradation causes considering the measurement uncertainty, analysis uncertainty, and correlation among parameters. Reference data for the development of each module was prepared by a turbine cycle simulation tool, PEPSE. The unmeasured parameter estimation module and the performance degradation estimation module make the estimation correlations by the regression analysis using the reference data. In the performance degradation diagnosis module, Bayesian network is used for the modeling of uncertainty and knowledge-base. The validation of the developed modules was performed by the test data generated by PEPSE, and accomplished by the actual data again.

## I. 서론

최근 국내 원자력발전 분야는 전반적인 전력산업구조의 개편과 해외 발전회사와의 경쟁체제로 돌입하는 과정을 겪으면서 발전소 효율 향상에 대하여 이전보다 훨씬 높은 관심을 갖게 되었다. 그러나 원자력발전소는 기저발전을 담당하고 있고, 특성상 한번 연료를 장전하면 한 주기가 끝날 때까지 발전소 정지를 시키지 않기 때문에 터빈사이클의 성능분석에 대한 연구를 수행한 사례는 그렇게 많지 않다.

본 논문은 이러한 국내 환경 속에서 터빈사이클의 정확한 감시 및 분석을 통해 발전소 효율 향상을 꾀할 목적으로 수행되었던 영광 원자력발전소 3·4호기 열성능분석 시스템 개발 연구 중에서 일부 모듈에 대한 설명을 하고 있다. 열성능분석 시스템 (PERUPS: PERformance UPgrade System)의 개발은 한국수력원자력(주)와 전력연구원, 호서대학교, 그리고 (주)엑트와 공동으로 수행되었는데, 이 중에서 본 논문에서 소개될 것은 (주)엑트에서 개발한 열성능분석 시스템의 지원 모듈인 미측정항목 예측모듈, 성능변화 예측모듈, 그리

고 성능변화 원인진단모듈에 대한 내용이다.

PERUPS에서는 미국기계학회 성능시험코드 6에 서술된 정밀급 성능분석을 수행하기 때문에 분석에서 요구되는 계측지점의 수가 매우 많다. 그러나 설계당시 성능분석을 크게 고려하지 않고 설치한 계측기는 정밀급 성능시험에서 부족한 경우가 종종 있다. [1] 이런 경우, 부족한 신호를 ‘미측정항목’이라 정의하며, 미측정항목을 예측하여 성능분석 모듈에 제공하는 것이 미측정항목 예측모듈이 되겠다. 성능변화 예측모듈은 터빈사이클의 성능저하 원인과 관련된 변수에 대하여 그것들이 전기출력의 증감에 미치는 정도를 보여준다. 이 모듈은 어떠한 성능저하 원인으로 인하여 어느 정도의 출력증감 효과가 있는지를 확인할 수 있는 수단이다. 그러나 성능변화 예측모듈이 단순히 변수별 출력증감 수치를 제공하는데 반하여 이 변수가 실제로 출력증감에 관여했는지의 여부는 확신할 수 없다. 그 까닭은 측정상의 불확실성, 분석상의 불확실성, 그리고 변수와 전기출력 또는 열소비율간의 불분명한 상관관계가 존재하기 때문이다. 따라서 성능변화 원인진단 모듈은 각 원인별로 그것이 출력증감에 관여했을 확신도를 제공한다. 성능변화 예측모듈과 진단모듈은 결정론적 측면과 확률론적 측면을 상호보완해 주는 역할을 한다.

제 2절에서는 각 모듈을 개발하는데 이용되었던 이론적 측면을 기술하고, 제 3절에서는 각 모듈별 개발 결과와 시뮬레이션 데이터로 검증된 결과를 설명한다. 제 4절에서는 본 모듈의 활용방안과 앞으로의 개선책에 대하여 언급한다.

## II. 개발 이론 및 구현

### II.1. 기본 데이터의 생성

서두에서 언급하였듯이, 미측정항목 예측모듈은 미측정항목의 예측을 위한 상관식을, 성능변화 예측모듈은 터빈사이클 주요 성능지표와 출력증감과의 상관식을 만든다. 성능변화 원인진단모듈은 터빈사이클 변수들 간의 상관관계가 있어야 구현이 가능하다. 이들 모듈을 신뢰적으로 구현하기 위해서는 분석에 사용되는 데이터가 실제 발전소에서 얻어져야 하지만, 발전소의 성능을 임의로 조정하면서 데이터를 얻을 수 있는 방법은 없기 때문에 이는 불가능하다. 이런 경우 시뮬레이션 코드를 이용하는 것은 보편적인 일이다.

본 연구에서는 미국 ScienTech의 터빈사이클 시뮬레이션 코드인 PEPSE를 이용하여 필요한 데이터를 얻었다. 모델의 정밀도를 높이고 트레인별 분석을 하기 위하여 PEPSE 모델은 다중트레인으로 구성되었고, 기기 수준의 요인에 의하여 성능이 변화된 것을 모사하기 위하여 설계모드를 사용하였다. [2] 현장에서 제공받은 100% 출력에서의 설계 열평형도가 모델링의 기준이 되었으며, PEPSE로 모델링한 모습은 그림 1과 같다.

각 모듈의 신뢰성이 높기 위해서는 각 모듈을 구성할 때 사용되는 기본 데이터의 질이 높아야 한다. 본 연구에서는 이를 위하여 터빈사이클 거동에 영향을 주요하게 미치는 34개의 변수를 선정하여 ‘경계조건변수’라고 정의하고, 이들을 적절한 범위 내에서 변화시키면서 시뮬레이션을 수행하였다. 경계조건변수는 문헌조사 및 공학적 판단에 의하여 결정되었다. [3~4] 경계조건변수의 목록은 표 1에 정리하였다.

### II.2. 회귀분석을 통한 미측정항목 및 성능변화 예측모듈 개발

기본 데이터에서 얻은 자료를 이용하여 미측정항목 예측상관식과 성능변화 예측상관식이 만들어진다. 미측정항목 예측상관식은 다변량 일차 선형회귀모형 이론을 사용하며, 성능변화 예측상관식은 단변량 다차 선형회귀모형 이론을 사용한다. 선형회귀모형은 변량과 차수에 상관없이 동일하다. 다만 설명변수와 반응변수에만 차이가 있는데, 미측정항목 예측상관식에서 설명변수는 측정항목이 되고, 반응변수는 미측정항목이 된다. 성능변화 예측상관식에서는 설명변수가 출력증감이 되고, 반응변수는 경계조건변수가 된다.

### II.2.1. 선형회귀모형 이론

N개의 데이터 세트로부터 m개의 설명변수, X와 p개의 반응변수 Y에 대한 정보를 가지고 있다고 하자. 위의 관계를 행렬을 사용하여 나타내면 다음과 같다. 여기서 각  $\beta$ 는 회귀계수라고 부르며,  $\epsilon$ 은 오차항이다.

$$\begin{aligned}
 Y_{i1} &= \beta_{01} + \beta_{11}x_{i1} + \beta_{21}x_{i2} + \dots + \beta_{m1}x_{im} + \epsilon_{i1} \\
 Y_{i2} &= \beta_{02} + \beta_{12}x_{i1} + \beta_{22}x_{i2} + \dots + \beta_{m2}x_{im} + \epsilon_{i2} \\
 &\dots \\
 Y_{ij} &= \beta_{0j} + \beta_{1j}x_{i1} + \beta_{2j}x_{i2} + \dots + \beta_{mj}x_{im} + \epsilon_{ij} \\
 &\dots \\
 Y_{ip} &= \beta_{0p} + \beta_{1p}x_{i1} + \beta_{2p}x_{i2} + \dots + \beta_{mp}x_{im} + \epsilon_{ip}
 \end{aligned}$$

앞의 선형회귀모형식에서 회귀계수는 최소제곱법을 통하여 추정할 수 있다. 이론을 전개하면 최소제곱추정량은 정규방정식의 해로서 다음과 같은 벡터 형태로 나타난다.

$$\hat{\beta} = [ \hat{\beta}_{(1)} | \hat{\beta}_{(2)} | \dots | \hat{\beta}_{(p)} ] = (X^T X)^{-1} X^T [ Y_{(1)} | Y_{(2)} | \dots | Y_{(p)} ]$$

일단 데이터를 통하여 선형모형이 만들어지고 나면 모형의 적합성 정도를 점검할 필요가 있는데, 가장 널리 사용되는 척도 중의 하나는 다중상관계수 R의 제곱인  $R^2$ 을 사용하는 것이다.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=0}^N (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{\sum_{i=0}^N (Y_i - \bar{Y})^2}$$

이 값은 0에서 1사이에 놓이게 되며 자료가 잘 적합한 경우는 값이 1에 가까워지고 반대의 경우에는 0에 가까이 가게 된다.

### II.2.2. 미측정항목 예측이론

미측정항목 예측상관식에서 설명변수는 측정항목이 된다. 그러나 모든 측정항목이 설명변수가 되지는 않는다. 설명변수가 되는 측정항목은 예측기의 정확성이 높고 미측정항목과 상관

도가 높을수록 유효하다. 본 연구에서는 하나의 미측정항목을 예측하기 위한 설명변수를 최대 세 개로 결정하였으며, 변수들간의 상관관계를 파악하기 위하여 상관계수행렬(Correlation Matrix)을 이용하였다.

측정 항목과 미측정 항목을 모두 포함하는 벡터  $X = (X_1, X_2, \dots, X_p)^T$ 를 생각한다. 두 변수  $X_i$ 와  $X_j$ 의 공분산행렬(Covariance Matrix)  $\Sigma$ 는 크기가  $(p \times p)$ 의 대칭행렬로서

$$\Sigma = E[(X - \mu)(X - \mu)^T] = \{\sigma_{ij}\}$$

$$= \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \cdots & \sigma_{1j} & \cdots & \sigma_{1p} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \cdots & \sigma_{2j} & \cdots & \sigma_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{i1} & \sigma_{i2} & \cdots & \sigma_{ij} & \cdots & \sigma_{ip} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{p1} & \sigma_{p2} & \cdots & \sigma_{pj} & \cdots & \sigma_{pp} \end{bmatrix}$$

으로 나타내진다. 공분산을 표준화하여 얻어지는 상관계수  $\rho_{ij}$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\text{Corr}(X_i, X_j) = \rho_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{\sigma_i \sigma_j}$$

이와 같은 상관계수들로 이루어진 아래의 행렬을 상관계수행렬이라고 부르며, 상관계수행렬은 대칭행렬이다.

$$P = \begin{bmatrix} 1 & \rho_{12} & \cdots & \rho_{1j} & \cdots & \rho_{1p} \\ \rho_{21} & 1 & \cdots & \rho_{2j} & \cdots & \rho_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{i1} & \rho_{i2} & \cdots & \rho_{ij} & \cdots & \rho_{ip} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{p1} & \rho_{p2} & \cdots & \rho_{pj} & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$

다음은 상관계수행렬로부터 최적의 설명변수를 선정하는 작업을 한다. 미측정항목 예측상관식에서 사용한 설명변수 선정기준은 다음의  $R_a^2$  (변형된(Adjusted) 상관도)를 사용하였다.

$$R_a^2 = 100 \left[ 1 - \left( \frac{n-1}{n-p} \right) \frac{SEE_p}{SST} \right], \quad SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2, \quad SST = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$$

영광 3·4호기에서는 총 9개 변수, 트레인을 고려하면 총 21개 항목이 미측정항목으로 분석되었으며, 이에 대한 상관식을 만들어내는 예측모듈이 구성되었다. 수치해석 부분은 공인된 코드인 IMSL 코드를 이용하여 구현되었다.

### II.2.3. 성능변화 예측이론

성능변화의 예측에서 우리가 관심을 가지고 있는 것은 경계조건변수와 전기출력의 증감과의 관계이다. 따라서 성능변화 예측은 단변량 선형회귀분석으로 수행된다. 다만 전기출력과의

관계가 일차식으로만은 표현이 안 될 수도 있기 때문에 최대 삼차식으로 회귀분석을 수행한다. 만일 반응변수를 Y라 하고 설명변수를 X라고 하면 회귀분석으로부터 결정되는 계수  $A_0, A_1, A_2$ , 그리고  $A_3$ 는 다음과 같은 관계를 만족한다.

$$Y = A_0 + A_1X + A_2X^2 + A_3X^3$$

성능변화 예측상관식은 총 34개가 만들어졌으며, 이중에서 이차식 이상으로 회귀분석된 변수들은 복수기 관련 경계조건변수들이었다. 이는 이미 널리 알려진 복수기에 대한 전기출력의 거동과 일치함을 알 수 있다. 수치해석 부분은 미측정항목 예측상관식과 마찬가지로 공인된 코드인 IMSL 코드를 이용하여 구현되었다.

### II.3. 베이저안 네트워크를 이용한 성능변화 원인진단모듈 개발

성능변화 원인분석 모듈에서 사용하고 있는 지식베이스는 추론 과정에서 발생하는 불확실성을 다룰 수 있도록 베이저안 네트워크 (Bayesian Network)를 사용하였다. 베이저안 네트워크는 노드(Node)와 선(Arrow)으로 이루어져 있다. 각 노드는 터빈사이클의 어떤 변수를 의미한다. 전기출력도 하나의 노드로 나타난다. 변수간의 '관계'는 선으로 나타난다. 노드들 사이에 선을 그어주는 작업, 즉 인과관계를 만들어 주는 작업을 지식베이스의 '정성적 구축'이라고 한다.

그림 2는 영광 3·4호기에 대한 정성적 모델링 작업의 결과물이다.

다음은 지식베이스의 정량적 모델링을 수행한다. 정량적 모델링은 부모(Parent)노드가 없는 노드에 확률을 부여하는 작업과 부모노드가 있는 노드에 확률을 부여하는 작업으로 크게 구분 지을 수 있다. 전자의 경우를 사전확률(Prior Probability)이라고 부르며, 후자의 경우를 조건부확률(Conditional Probability)라고 부른다. 지식베이스의 신뢰도는 확률을 어떻게 입력하느냐에 달려 있다. 본 연구에서는 다음과 같이 진행되었다.

#### ○ 사전확률의 입력

사전확률은 총 34개의 경계조건변수에만 부여된다. 사전확률은 각 경계조건변수가 얻어지는 과정에서의 불확실성을 반영하게 된다. 각 경계조건변수의 설계값과 운전값이 차이에 따라 Abnormal의 단계를 다섯 단계로 구분하였다. 표 2는 사전확률 계산 물을 요약한 것이다.

#### ○ 조건부확률의 입력

조건부확률은 터빈사이클의 시스템적인 특성이 반영된다. 즉 전기출력과 경계조건변수를 포함한 모든 변수들 사이의 상관성이 조건부확률에 반영되는 것이다. 이는 실제 정비와 관련한 경험지식을 대신한다고 할 수 있다. 즉 과거의 경험으로 보았을 때, 전기출력 감소가 생길 때마다 원인으로 지적된 변수는 전기출력과의 상관성이 크다고 할 수 있을 것이다. 이러한 개념이 반영되는 부분이 조건부확률이다.

본 연구에서는 다양한 성능저하 상태에서 시뮬레이션을 한 기본 데이터가 있으므로, 이를 상관분석한 결과를 확률값으로 수정하여 입력하였다. 모든 노드는 Abnormal과 Normal 두 개의 상태를 갖고 있으므로, 어떤 하나의 상관계수는 다음과 같은 총 네 곳의 조건부확률을 결정하는데 사용된다.

- 부모노드가 Abnormal일 때, 자식노드가 Abnormal
- 부모노드가 Abnormal일 때, 자식노드가 Normal
- 부모노드가 Normal일 때, 자식노드가 Abnormal
- 부모노드가 Normal일 때, 자식노드가 Normal

상관계수는 앞서 설명한 성능변화 예측모델에서 얻어진다. 상관계수는 그 자체가 확률의 개념은 아니지만, 어떤 두 변수 사이의 통계적 처리에 의하여 도출된 인과관계라는 점을 감안한다면 조건부확률을 대신할 수 있다고 판단된다. 표 3은 조건부확률을 만들어내는 룰을 요약한 것이다.

실제 베이지안 네트워크의 구현은 마이크로소프트의 MSBNx를 이용하여 만들어졌다.

### III. 모듈별 검증

각 모듈을 구현할 때와 마찬가지로 검증에서도 실제 발전소에서 나온 데이터로는 검증이 불가능하였기 때문에 PEPSE로부터 얻어진 시험용 데이터를 이용하여 검증 작업이 수행되었다. 그러나 실제 적용성 여부 검토를 위하여 시험용 데이터를 이용한 검증 작업 이후에 실제 데이터를 이용하여 모듈을 운용함으로써 신뢰성에 문제가 없는지는 다시 검토되었다.

#### III.1. 시험용 데이터의 준비

기본 데이터를 생성하기 위하여 PEPSE로 만들었던 영광 3·4호기 터빈사이클 모델에서 주요 변수를 수정하여 시험용 데이터를 만들었으며, 그 내용은 다음과 같다.

- 경우 1: 해수온도를 67.9°F (설계치)에서 77.0°F (운전치)로 조정하고 동시에 A트레인 복수기 튜브를 5% 플러징
- 경우 2: 6번 및 7번 급수가열기 트레인 A의 튜브수를 각각 3% 플러징
- 경우 3: 1단 재열기 트레인 A의 튜브수를 1% 플러징시키고 2단 재열기 트레인 A의 튜브수는 2% 플러징
- 경우 4: 습분분리기 트레인 A의 습분분리효율을 0.9685 (설계치)에서 0.965 (운전치)로 하향 조정함

#### III.2. 미측정항목 예측모델 검증

표 4는 미측정항목 예측 상관식을 검증한 결과이다. 미측정항목의 참값과 예측상관식에 포함된 측정항목의 값은 시뮬레이션에서 얻은 시험용 데이터로부터 얻고, 측정항목의 값으로 계산된 상관식 계산 결과와 참값을 비교하였다. 결과적으로 최대 3.3%의 예측 오차를 보였다.

#### III.3. 성능변화 예측모델 검증

표 5는 성능변화 예측 상관식을 검증한 결과이다. 시험용 데이터에서 얻은 전기출력과, 시험

용 데이터에서 얻은 경계조건변수의 값을 상관식에 넣어 계산한 전기출력을 비교하였다. 최대 1.0% 이내의 예측 오차를 보였다.

#### III.4. 성능변화 원인진단모듈 검증

표 6은 성능변화 원인분석모듈을 검증한 결과이다. 주요 경계조건변수에 대한 결과만을 요약하였다. 시험케이스 1의 경우, 해수온도의 저하와 복수기 열전달 면적의 감소를 전기출력 감소의 원인으로 75%이상 확신하고 있다. 이는 예상했던 결과와 일치하며 복수기와 관련된 변수들이 다른 경우에 비해 약간씩 높음을 알 수 있고, 이는 복수기 쪽이 출력감소의 원인임을 간접적으로 시사하고 있다. 시험케이스 2의 경우, 6번 급수가열기와 7번 급수가열기의 열전달 면적이 줄어들어서 전기출력이 감소하였다. 앞의 경우와 마찬가지로 6번과 7번 급수가열기 관련 변수들, 그리고 이와 인접한 변수들이 다른 경우에 비해 약간씩 상회하면서 이를 뒷받침해 주고 있다. 시험케이스 3의 경우 1번 재열기는 열전달 면적이 변화하기는 했지만 1% 미만으로 변화했기 때문에 확신도가 높은 값을 갖지 않았다. 반면 2번 재열기는 2%가 감소하면서 확신도가 75%로 나와 전기출력 감소에 직접적인 원인임을 알 수 있다. 시험케이스 4의 모든 원인이 1% 미만으로 변화했기 때문에 특별히 원인으로 지적될만한 변수가 찾아지지 않았다. 이런 경우에도 진단모듈은 출력이 감소되었다는 사실 때문에 원인진단모듈은 출력감소의 원인으로 가장 확신도가 그럴 듯한 것들을 지목하게 된다. 이 때문에 주급수유량, 습분분리효율 등이 나타났다. 그러나 이러한 변수들은 성능변화 예측상관식에서 출력증감의 결과가 매우 낮은 값으로 제시되기 때문에 실제 진단에서는 고려하지 않게 된다.

## VI. 결론 및 토의

본 논문에서는 한국형 표준원자력발전소로 널리 알려져 있는 영광 3·4호기의 열성능분석 프로그램 (PERUPS)의 개발 과정에서 지원 모듈로서의 역할을 수행하는 미측정항목 예측모듈, 성능변화 예측모듈, 그리고 성능변화 원인진단 모듈에 대한 이론적인 배경과 구현, 검증 내용을 기술하였다. 이들 모듈은 열성능분석 과정에서 흔히 발생하는 애로점을 보완하고 열성능분석의 신뢰성과 효용성을 높이는 역할을 한다. 특히 대상 발전소가 변하더라도 모듈별로 변경할 부분이 많지 않으며, 일반적으로 활용이 가능하도록 구현되어 있기 때문에 활용 가치가 클 것으로 기대된다.

아울러 PERUPS는 일정 기간 현장에서 시험 운영되면서, 차차 실제 열성능분석에 활용될 계획이다.

## 감사의 글

본 연구는 한국전력공사 전력연구원 과제의 일환으로 수행되었으며, 한국수력원자력주식회사로부터 재정적인 지원을 받았습니다.

## V. 참고문헌

1. 허균영 외 “원자력발전소 터빈사이클 성능시험 현황과 개선책”, 계측제어기술 워크샵, 2001. 11.
2. 인터넷 URL, <http://www.pepse.com>
3. EPRI, “Thermal Performance Engineer’s Handbook”, TR-107422-V1, 1998.
4. 한국전력기술주식회사, “원전 표준성능관리지침”, 1993. 4.
5. 한국원자력연구소, “한국형 표준원전 계통실무”, KAERI/GP-108/96, 1996.
6. 한국전력공사 영광원자력본부, “영광 원자력발전소 3·4호기 인수성능시험 보고서”, 1995.

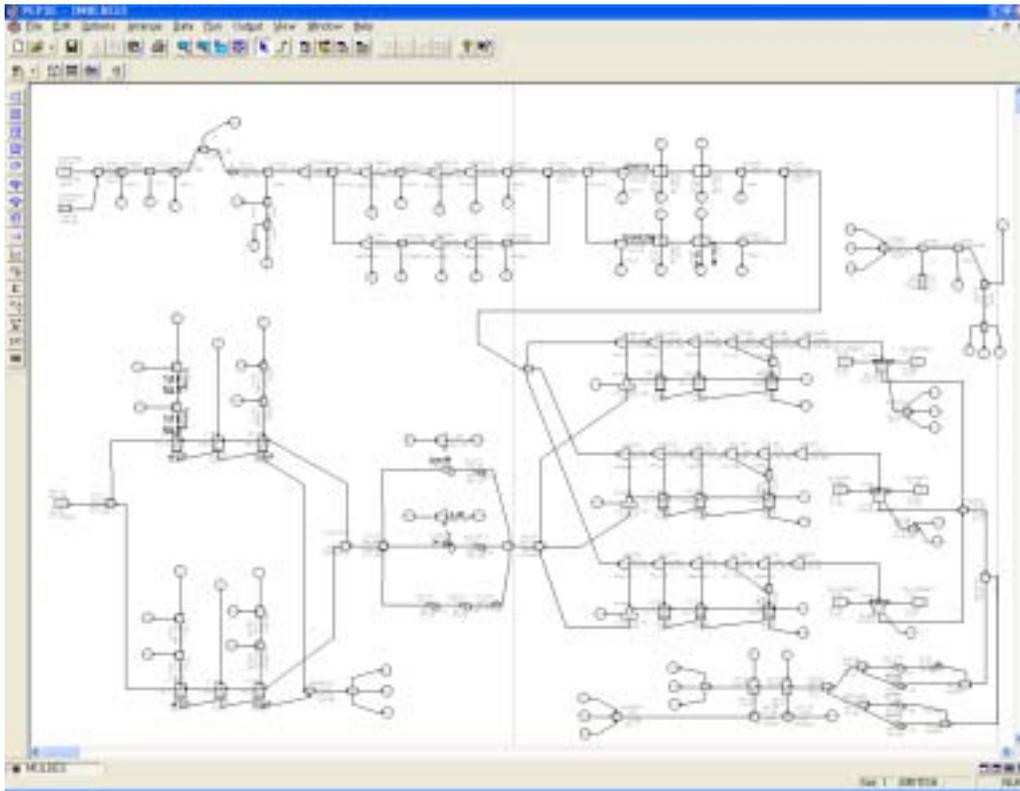


그림 1. PEPSE로 구성된 영광 3·4호기 100% 출력 열평형도 모습

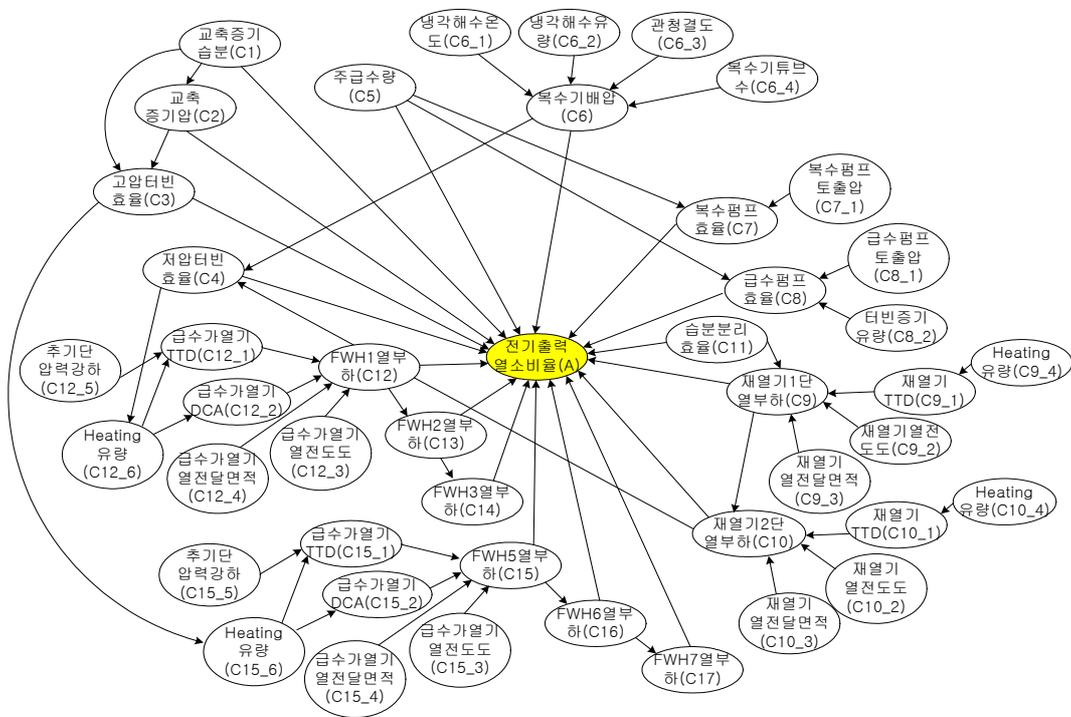


그림 2. 영광 3·호기 지식베이스의 정성적 모델링

표 1. 경계조건 변수 목록 및 변화량

경계조건변수명	단위	설계값	하한값	상한값
교축중기 건도	-	0.9955	0.99	0.999
주급수유량	lbm/hr	6358750	6231575	6422337.5
냉각해수온도	F	67.9	47.53	88.27
냉각해수유량	lbm/hr	1.01E+08	91048500	111281500
복수기튜브수	-	26678	24000	26678
복수기 관칭경도	-	0	0.765	0.935
복수펌프압력	psia	200	180	220
복수펌프효율	-	0.86	0.774	0.86
급수펌프압력	psia	1100	999	1221
급수펌프효율	-	0.8125	0.73125	0.8125
습분분리효율	-	0.9685	0.94913	0.9685
1단재열기 튜브열전도도	btu/hr ft F	12.8	10.24	12.8
1단재열기 열전달면적	ft <sup>2</sup>	58819.5	47055.6	58819.5
2단재열기 튜브열전도도	btu/hr ft F	12.8	10.24	12.8
2단재열기 열전달면적	ft <sup>2</sup>	43520.8	34816.64	43520.8
1번급수가열기 튜브열전도도	btu/hr ft F	8.7	6.96	10.44
1번급수가열기 튜브개수	-	1051	950	1051
2번급수가열기 튜브열전도도	btu/hr ft F	9.2	7.36	11.04
2번급수가열기 튜브개수	-	705	630	705
3번급수가열기 튜브열전도도	btu/hr ft F	9.5	7.6	11.4
3번급수가열기 튜브개수	-	559	500	559
5번급수가열기 튜브열전도도	btu/hr ft F	9.8	7.84	11.76
5번급수가열기 튜브개수	-	2683	2400	2683
6번급수가열기 튜브열전도도	btu/hr ft F	10.2	8.16	12.24
6번급수가열기 튜브개수	-	2456	2300	2456
7번급수가열기 튜브열전도도	btu/hr ft F	10.5	8.4	12.6
7번급수가열기 튜브개수	-	2511	2400	2511
고압터빈 1번 추기단 압력강하	-	0.03	0.03	0.05
고압터빈 2번 추기단 압력강하	-	0.03	0.03	0.045
고압터빈 3번 추기단 압력강하	-	0.03	0.03	0.05
저압터빈 2번 추기단 압력강하	-	0.03	0.03	0.05
저압터빈 3번 추기단 압력강하	-	0.03	0.03	0.05
저압터빈 4번 추기단 압력강하	-	0.03	0.03	0.05
저압터빈 5번 추기단 압력강하	-	0.03	0.03	0.05

표 2. 사전확률 계산 룰

운전값 - 설계값	사전 확률값	
	Abnormal	Normal
5% 이상	1.00	0.00
5% 이하, 1% 이상	0.75	0.25
1% 이하, -1% 이상	0.50	0.50
-1% 이하, -5% 이상	0.25	0.75
-5% 이하	0.00	1.00

표 3. 조건부확률 계산 률

상관계수	조건부확률		
	부모노드 (원인)	자식노드 (결과)	
1.00	Abnormal	Abnormal	1.00
		Normal	0.00
	Normal	Abnormal	0.00
		Normal	1.00
0.50	Abnormal	Abnormal	0.75
		Normal	0.25
	Normal	Abnormal	0.25
		Normal	0.75
0.00	Abnormal	Abnormal	0.50
		Normal	0.50
	Normal	Abnormal	0.50
		Normal	0.50
-0.50	Abnormal	Abnormal	0.25
		Normal	0.75
	Normal	Abnormal	0.75
		Normal	0.25
-1.00	Abnormal	Abnormal	0.00
		Normal	1.00
	Normal	Abnormal	1.00
		Normal	0.00

표 4. 미측정항목 예측상관식 검증 결과

미측정항목	트레인 수	4회 시험의 최대오차 (%)
MSR Separator Drain Flow	2	0.2977
1st R/H Inlet Heating STM Flow	2	2.0060
2nd R/H Inlet Heating STM Flow	2	3.2950
HP1 FWH Outlet Drain Flow	2	0.6934
HP2 FWH Outlet Drain Flow	2	0.2264
HP3 FWH Outlet Drain Flow	2	1.1643
LP1 FWH Outlet Drain Flow	3	0.8352
LP2 FWH Outlet Drain Flow	3	1.1423
LP3 FWH Outlet Drain Flow	3	1.2156

표 5. 성능변화 원인예측상관식 검증 결과

시험 케이스	상관식으로 예상된 전기출력 (MW)	시뮬레이션에서 얻은 전기출력 (MW)	오차 (%)
1	1047.38	1047.62	0.022
2	1052.75	1053.57	0.078
3	1053.67	1053.63	0.004
4	1053.45	1053.29	0.015

표 6. 성능변화 원인진단모듈 검증 결과 (확신도 (%))

변수설명	시험케이스1	시험케이스2	시험케이스3	시험케이스4
해수온도	<b>100.00</b>	53.30	53.30	53.30
주급수유량	71.77	71.77	71.77	71.77
HP1 FWH 열전달계수	51.91	51.95	51.91	51.91
HP2 FWH 열전달계수	50.98	<u>51.09</u>	50.98	50.98
HP3 FWH 열전달계수	50.59	<u>50.67</u>	50.59	50.59
LP1 FWH 열전달계수	27.45	53.17	53.17	53.17
LP2 FWH 열전달계수	51.34	51.36	51.36	51.36
LP3 FWH 열전달계수	50.89	50.89	50.89	50.89
복수기 청결도	<u>53.02</u>	52.65	52.65	52.65
MSR Moisture Effectiveness	68.60	68.60	68.61	<b>68.60</b>
S/G Outlet Steam Moisture	73.79	73.79	73.79	73.79
HP1 FWH Number of Tubes	21.07	21.30	21.07	21.07
HP2 FWH Number of Tubes	50.64	<b>75.48</b>	50.64	50.64
HP3 FWH Number of Tubes	50.48	<b>75.36</b>	50.48	50.48
LP1 FWH Number of Tubes	52.24	52.60	52.60	52.60
LP2 FWH Number of Tubes	50.53	50.54	50.54	50.54
LP3 FWH Number of Tubes	50.33	50.33	50.33	50.33
Condenser Number of Tubes	<b>77.18</b>	52.98	52.98	52.98
1st R/H Number of Tubes	50.12	50.12	<b>50.12</b>	50.12
2nd R/H Number of Tubes	50.24	50.24	<b>75.18</b>	50.24
1st R/H 열전달계수	52.01	52.01	<u>52.02</u>	52.01
2nd R/H 열전달계수	51.30	51.30	<u>51.34</u>	51.30

\* 볼드체: 직접원인, 밑줄: 간접원인