

# 돌발성 이벤트 형태의 고장 시뮬레이션을 위한 화력발전소 보일러 드럼 수위 제어 계통의 다이내믹스 모델링 및 운전 시뮬레이션

論 文

51A-2-3

## Dynamics Modeling and Operation Simulation for the Simulation of Abrupt Faults in the Boiler Drum Level Control System of a Fossil Power Plant

金井根\*·金載和\*\*·張泰奎\*\*\*  
(Jung-Keun Kim · Jae-Hwa Kim · Tae-Gyu Chang)

**Abstract** - This paper presents the dynamics modeling and the operation simulation of the 500 MW drum-type boiler and its control system hosted in the Boryung Power Plant unit #1 and #2. The fidelity of the modeling and the operation simulation is well verified by their agreement with the actual data obtained from the plant operation. As a plant signal generator for the various operation patterns and fault situations, the simulation environment will be utilized to develop the fault detecting signal processing algorithms.

**Key Words** : Dynamics modeling, Dynamics simulation, Power plant, Fault simulation, Drum level control system

### 1. 서 론

복잡한 여러 기기 요소들의 유기적인 동작에 의해 운전되는 대규모 발전소에서는, 운전상황의 상시감시 및 조기 고장진단을 통해 플랜트 trip의 사전예방 등 발전소 이상상태의 파급을 최소화하고 운전의 신뢰성을 유지하는 것이 매우 중요시되고 있다. 특히 power plant 사고와 같은 경우는 인적 물적 안전문제는 물론, 파급되는 경제적 손실이 매우 크기 때문에, 시스템 운전에서 특히 높은 신뢰성을 유지하여야 한다. 최근 컴퓨터 hardware/software기술의 급속한 발달에 따라, 숙련된 전문 운전원에 의존하던 운전감시 및 고장진단을 컴퓨터에 의해 대체시키기 위한 플랜트 고장 진단 및 식별 알고리즘의 개발에 관한 연구는 많은 연구자들에 의해 수행되어 다양한 결과들이 제시되었다.[1][2][3]

본 저자들에 의해 화력 발전소 보일러 플랜트의 드럼 수위 제어 계통에서 발생하는 이상 현상 중 돌발성 event 형태의 고장인 파열기 튜브 파열(tube-rupture), 급수 누수(feed-water leak) 및 수위 제어기 고장(controller-failure) 상황등을 검출 대상으로 하여, 보일러 드럼 수위 계측 신호에 나타나는 특징 파형 패턴을 구분하고 이를 관련된 고장

과 연관지워 추론하여 고장을 진단하는 기법이 새로이 제시되어 논문으로 게재된 바 있다.[4] 제시된 고장감지 기법은 드럼수위 계측 신호에서 얻어지는 특징 파형을 검출하여 고장을 구분함으로써 숙달된 전문 운전원의 고장 진단 기능을 직접적으로 묘사하는 방식이라는 점에서 복잡한 플랜트 계통의 해석적 모델을 얻기 어려운 경우에 적용이 가능하다는 장점이 있다 하겠다.

논문[4]에서는 고장검출을 위한 신호처리 알고리즘을 중점적으로 기술하기 위한 목적이어서, 알고리즘의 검증에 위해 수행한 플랜트 다이내믹스 모델링 및 운전 시뮬레이션에 대한 내용은 포함되지 않았다. 이에 본 논문에서는 논문[4]에서 제시한 고장감지 알고리즘의 대상 플랜트인 보령화력 1,2호기의 발전출력 500MW 정격의 드럼형 보일러 시스템을 대상으로 보일러 플랜트 자체의 dynamics와 Bailey 820 ACS(analog control system)의 보일러 연료제어, 터빈 주증기 제어, 수위제어 등의 subloop제어기에 대해 수행한 modeling과 simulation 결과를 기술하였다. 본 논문에서 제시하는 운전제어 시뮬레이터는 논문[4]에서 제시된 고장 진단 알고리즘에서 중요한 관심 대상인 증기의 압력과 flow에 대한 응답특성과 water/steam의 포화 특성을 반영하는데 필요한 부분을 모델링과 시뮬레이션의 주요 범위로 설정하였다. 보일러 플랜트 계통의 운전 상황을 가능한 정확하게 반영하는 시뮬레이션을 위해서는 보일러 플랜트 계통의 상세한 다이내믹스를 반영하는 모델링 기법을 적용하는 것이 바람직한 사항이다. 그러나 규모가 크고 복잡도가 큰 보일러 플랜트의 경우는 계통의 섬세한 다이내믹스를 반영하는 수학적 모델을 얻는 것은 광범위하고 구현의 복잡도가 큰 것이 사실이다. 따라서 본 논문에서 제시한 바와 같이 시뮬레이션의 목적에 부합하도록 간략화된 플랜트 구성요소의 모델을 적용하여, 응답 특성의 섬세도를 만족하고, 구현의 복잡도 또한 줄일 수 있는 모델을 적용하는 것이 일반적인

\* 正 會 員 : 中央大學 電子電氣工學部 博士課程

\*\* 正 會 員 : 中央大學 電子電氣工學部/現 三星電子  
DM 研究所 · 工博

\*\*\* 正 會 員 : 中央大學 電子電氣工學部/차세대 전력기술 연구센터 教授 · 工博

接受日字 : 2001年 6月 15日

最終完了 : 2001年 12月 27日

로 채택될 수 있는 유력한 방법이라 하겠다.

본 논문에서 제시된 플랜트 다이내믹스 모델링 및 운전 시뮬레이션의 타당성을 보이기 위하여 정특성 및 동특성 시뮬레이션 결과를 보령화력 1,2호기의 설계 파라미터 및 시험 운전 데이터와 비교하여 제시하였다. 정특성 시뮬레이션 출력은 거의 동작점에 대한 실제 운전조건과 일치하며, 보일러 동특성 및 부하변동시험의 비교 결과는 실측치와 거의 동일한 시정수 반응 및 응답특성을 보여 줌을 확인하였다. 또한 본 논문에서는 실제 플랜트 운전과 같은 다양한 운전 상황들에 대한 출력신호들을 얻을 수 있도록 turbine-boiler 협조제어에 의한 자동운전, manual운전, governor free운전, 운전 동작점을 광범위하게 변경시켜주기 위한 set-point maneuvering 운전, 보일러 동특성 시험 운전모드 등, 다양한 운전 패턴들을 조합한 통합운전 시뮬레이션을 수행한 결과를 함께 기술하였다.

## 2. 보일러 다이내믹스 모델링

보일러 플랜트 제어 계통에 대한 시뮬레이션은 크게 보일러 자체의 dynamics를 모델링하여 압력, 온도, 증기 흐름을 등 보일러 동작에 관계되는 변수들의 관계식들을 구하는 부분과, 급수 제어, 연소제어, turbine 주증기 밸브 제어 등 보일러를 운전하기 위한 주요 구성요소들에 대한 제어기들을 시뮬레이션 하는 부분으로 크게 나뉜다. 본 절에서는 보일러 자체의 다이내믹스 모델링에 대해서 기술하고자 한다.

보일러 자체의 다이내믹스 모델링 및 시뮬레이션 기법에 관한 연구는 많은 연구자들에 의해 수행되어 상세 다이내믹스의 반영 정도에 따라 여러 결과들이 제시되었다. [5][6][7][8] 일반적으로 널리 소개된 방법들은 에너지, 질량, momentum 평형식 등의 물리법칙에 근거한 비선형 모델이며, [7]과 같은 경우는 보일러의 연소계통, water-wall의 열전달, 과열기, 드럼 steam flow, 터빈 주증기 flow 등을 등가의 시정수를 갖는 1차 시스템으로 블록별로 모델링하여 이를 조합한 형태로서 mass flow와 압력효과를 표현하는 간략화된 nonlinear 모델로서 동특성을 반영하는 가장 단순한 형태이다.

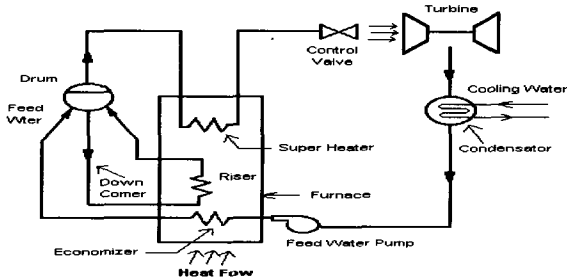


그림 1. 보일러 시스템의 기능상 구성도

Fig. 1 A functional diagram of a boiler system

이러한 모델은 물리법칙에 근거한 보다 정확한 모델링의 경우와 비교하여 전체적인 응답측면에서 매우 근사하다는 것이 보여졌다. 하지만 이와 같이 간략화된 모델의 경우는

전체적인 운전 출력만을 시뮬레이션 하고자 하는 경우와는 달리 다양한 형태의 운전제어 및 고장상황을 시뮬레이션 하는데는 개별적인 플랜트 변수들의 조정이 가능하지 않아 적합하지 않다. 따라서 본 논문에서는 논문[4]에서 중요한 관심 대상인 증기의 압력과 flow에 대한 응답특성과 water/steam의 포화 특성을 반영하는데 필요한 부분을 모델링과 시뮬레이션의 주요 범위로 선정하고, 이를 드럼과 과열기(super heater)에 질량, energy, 체적 평형식을 적용하였고, 플랜트의 온도 변화는 드럼 수위 레벨의 계측 신호에 상대적으로 긴 시간 상의 변화를 가지는 변수이므로, 일정 온도를 가지는 것으로 갖는 것으로 반영시켰다.

## 2.1 보일러 dynamics 모델

드럼 보일러의 dynamics 모델을 얻기 위해서는, 드럼 보일러 내부의 물과 수증기, 금속표면 등에서의 열과 질량의 전달 효율이 매우 높으므로, 열 평형상태를 가정해도 얻어진 모델의 특성이 많은 실험적인 보일러 플랜트 운전결과와 비교하여 타당하다는 것이 보여졌다[5][7]. 이러한 가정 하에서 보일러 드럼 부위, 상승관 및 하강관 부위, 과열기 부위로 나누어서 에너지, 질량, 운동량(momentum), 체적 등의 평형식을 적용한다는 것이 모델링의 기본 골격이다. 즉 드럼내의 압력은 일정하고 모든 순간에 열평형 상태이고 드럼내의 물은 포화 VGB상태에 있으며, 드럼 자체의 금속 온도는 포화 온도와 같다고 가정한다. 또한 물과 증기가 포화되었다고 가정했으므로 포화 수와 포화 증기의 엔탈피 및 밀도는 steam table로 부터 압력에 따른 2차 함수로 근사화 하여 사용할 수 있다. Primary 와 secondary superheater는 하나의 lumped volume model을 갖는 형태로 모델링하였고, 운동량 보존식과 에너지 보존식으로 모델링하였다. 다음에 각 부위에 대한 평형식들을 기술하였다.

### 가. 드럼부위에 대한 모델링

· 에너지 평형식

$$\frac{d}{dt} [\rho_s h_s V_{st} + \rho_w h_w V_{wt} + mc_p T] = Q + q_{fw} h_{fw} - q_s h_s \quad (1)$$

여기서,  $\rho_s$  : 포화 증기의 밀도

$\rho_w$  : 포화 수의 밀도

$h_s$  : 포화 증기의 엔탈피

$h_w$  : 포화 수의 엔탈피

$h_{fw}$  : 급수의 엔탈피

$V_{st}$  : 전체 포화 증기 체적

$V_{wt}$  : 전체 포화 수 체적

$m$  : 드럼, 상승관 및 하강관의 질량

$c_p$  : 금속의 비열

$T$  : 금속의 온도(드럼압력하의 포화온도)

$Q$  : 상승관으로 부터의 열 에너지 흐름을

$q_{fw}$  : 급수 유량

$q_s$  : 증기 유량

식 (1)에서 좌변은 드럼내의 에너지 변화율로, 포화 증기가 가지고 있는 에너지와 포화 수가 가지고 있는 에너지, 그리고 드럼 자체의 급수에 저장되는 열에너지로 구성된다. 우변은 상승관으로부터 유입되는 에너지와 급수에 포함된 에너지와 증기로 빠져나가는 에너지의 차이로 구성된다. 그리고 우변은 입력항으로 설정한다. 여기서 각각의 밀도, 엔탈피 그리고 포화 온도는 압력의 함수이고, 급수는 포화상태가 아니므로 급수의 온도와 압력의 함수이다.

· 질량 평형식

식 (1)에서  $V_{ut}$  과  $V_{st}$  의 관계는 질량 평형식과 상승관에서 포화 증기의 평균 부피 비율  $a_m$  으로 결정된다.

$$\begin{aligned} V_{st} &= V_{drum} - v_w + a_m V_r \\ V_{ut} &= v_w + V_{dc} + (1 - a_m) V_r \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt} [\rho_s V_{st} + \rho_w V_{ut}] = q_{fw} - q_s \quad (3)$$

여기서,  $a_m$  : 상승관에서의 증기의 평균 부피 비율

$v_w$  : 드럼내의 포화 수 부피

$V_r$  : 상승관의 내부 부피

$V_{dc}$  : downcommer의 내부 부피

$V_{drum}$  : 드럼 내부의 부피

실제식 (2)는  $V_{st} + V_{ut} = V_{drum} + V_r + V_{dc}$ 의 조건으로 식(1)과 (3)을 풀면  $V_{st}$ 와  $V_{ut}$ 를 각각 구할수 있다. 그러나 식 (2)로부터는  $V_{st}$ 와  $V_{ut}$ 로부터  $v_w$ 나  $a_m$ 을 유도할수 없다.

나. 상승관 및 하강관의 모델링

드럼의 수위 제어를 위해서는 드럼내의 물 부피를 알아야하므로 상승관 부분을 모델링하여  $v_w$ 와  $a_m$ (증기의 평균 부피 비율)을 구한다. 상승관에서의 증기질  $x$ (혼증기에서 포화 증기가 차지하는 질량 비)는 일반적으로 위치에 따라 다르므로 증기의 부피비  $a_m$ 은 상승관의 위치에 대한 식으로 나타내야 한다. 그러나 본 연구에서는 시간에 대한 상미분 방정식으로만 나타내기 위해 위치에 따른 평균값을 취한다. 증기질  $x$ 를 normalize된 상승관의 위치에 비례한다고 가정하여 아래의 식 (4)로 표현한다.

$$x(\xi) = x_r \xi \quad 0 \leq \xi \leq 1 \quad (4)$$

여기서,  $x_r$  : 상승관 끝단의 증기질

$\xi$  : 상승관의 정규화된 길이

증기질  $x$ 와 부피비  $a$ 의 관계에 의해 식 (5)와 같이 증기의 부피 비율을 증기질과 포화 수와 포화 증기의 밀도에 대한 식으로 나타낸다.

$$\begin{aligned} x &= \frac{\rho_s}{\rho_s a + \rho_w (1 - a)} \\ \rightarrow a(x) &= \frac{\rho_w x}{\rho_s + (\rho_w - \rho_s)x} \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)를 적분하여 평균 증기의 부피비  $a_m$ 을 구하면 식 (6)과 같다.

$$\begin{aligned} a_m &= \int_0^1 a(x_r \xi) d\xi = \frac{1}{x_r} \int_0^1 a(x_r \xi) d(x_r \xi) \\ &= \frac{1}{x_r} \int_0^{x_r} a(x) dx \\ &= \frac{\rho_w}{\rho_w - \rho_s} \left[ 1 - \frac{\rho_s}{(\rho_w - \rho_s)x_r} \ln \left( 1 + \frac{\rho_w - \rho_s}{\rho_s} \right) \right] \end{aligned} \quad (6)$$

· 상승관에서의 에너지 평형식

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} (\rho_s h_s a_m V_r) + \frac{d}{dt} \{ \rho_w h_w (1 - a_m) V_r \} \\ = Q + q_{dc} h_w - x_r q_r h_s - (1 - x_r) q_r h_w \\ = Q + q_{dc} h_w - x_r q_r h_c - q_r h_w \end{aligned} \quad (7)$$

여기서,  $h_c = h_s - h_w$

$q_{dc}$  : downcommer로 내려가는 질량흐름을

$q_r$  : 상승관으로 상승하는 질량흐름을

식 (7)의 좌변은 상승관내의 포화 증기와 포화 수의 열 에너지로 구성되고 우변은 입력 상승관쪽에서의 입력 열량과 하강관으로부터 입력되는 포화 수의 에너지와, 드럼쪽으로 상승되는 포화수와 포화 증기의 에너지 차이로 구성된다. 이때  $h_c$ 는 condensation 엔탈피로 포화 수가 포화 증기로 바뀔 때 흡수하는 단위 질량당의 에너지이다.

· 상승관에서의 질량 평형식

$$\frac{d}{dt} (\rho_s a_m V_r) + \frac{d}{dt} \{ \rho_w (1 - a_m) V_r \} = q_{dc} - q_r \quad (8)$$

식 (8)의 좌변은 상승관내의 질량 변화이고 우변은 하강관으로 부터 상승관로 유입되는 질량흐름율과 상승관을 빠져나가서 드럼으로 유입되는 질량 흐름율이다.

· 상승관에서의 운동량 평형식

하강관로 흐르는 유량은 식 (9)의 운동량 평형식에서 보듯이 포화 수의 밀도와 포화 증기의 밀도 차이에 의해 결정된다.

$$a_m V_r (\rho_w - \rho_s) = \frac{1}{2} K q_{dc}^2 \quad (9)$$

식 (7)과 (8)에서  $q_r$ 을 소거하고 정리하면 식 (9)와 (10)으로 상승관부분의 모델링식을 얻는다.

$$\begin{aligned} h_c (1 - x_r) \frac{d}{dt} (\rho_s a_m V_r) + \rho_w (1 - a_m) V_r \frac{dh_w}{dt} \\ - x_r h_c \frac{d}{dt} \{ \rho_w (1 - a_m) V_r \} + \rho_s a_m V_r \frac{dh_s}{dt} \\ = Q - x_r h_c q_{dc} \end{aligned} \quad (10)$$

식 (1) (3) (10)과 식 (9)식에 의해 상태변수를 드럼 압력 'p', 드럼 내 포화 수의 부피 'v\_w' 그리고 증기 질 'x\_r'로 하고, 입력으로 입력 열량 'Q', 급수 흐름을 'q\_fw' 그리고

고 증기 흐름을 '  $q_s$  '로 하는 3차 state 방정식 식 (11)을 얻는다.

$$\begin{aligned}
 e_{11} \frac{dp}{dt} + e_{12} \frac{dv_w}{dt} + e_{31} \frac{dx_r}{dt} &= Q + q_{fw} h_{fw} - q_s h_s \\
 e_{21} \frac{dp}{dt} + e_{22} \frac{dv_w}{dt} + e_{23} \frac{dx_r}{dt} &= q_{fw} - q_s \\
 e_{31} \frac{dp}{dt} + 0 \frac{dv_w}{dt} + e_{33} \frac{dx_r}{dt} &= Q - q_{dc} x_r h_c \\
 e_{11} &= \left( \frac{d\rho_s}{dp} h_s + \rho_s \frac{dh_s}{dp} \right) V_{st} + \left( \frac{d\rho_w}{dp} h_w + \rho_w \frac{dh_w}{dp} \right) V_{wt} \\
 &\quad + mc_p \frac{dT}{dp} + (h_s \rho_s V_r - h_w \rho_w V_r) \frac{\partial a_m}{\partial p} \\
 e_{12} &= \rho_w h_w - \rho_s h_s \\
 e_{13} &= (\rho_s h_s - \rho_w h_w) V_r \frac{\partial a_m}{\partial x_r} \\
 e_{21} &= \frac{d\rho_s}{dp} V_{st} + \frac{d\rho_w}{dp} V_{wt} + (\rho_s - \rho_w) V_r \frac{\partial a_m}{\partial p} \\
 e_{22} &= \rho_w - \rho_s \\
 e_{23} &= -(\rho_s - \rho_w) V_r \frac{\partial a_m}{\partial x_r} \\
 e_{31} &= \left[ (1 - x_r) h_c \frac{d\rho_s}{dp} + \rho_s \frac{dh_s}{dp} \right] a_m V_r \\
 &\quad + \left[ \rho_w \frac{dh_w}{dp} - x_r h_c \frac{d\rho_w}{dp} \right] (1 - a_m) V_r \\
 &\quad + h_c V_r (\rho_s - x_r \rho_s + x_r \rho_w) \frac{\partial a_m}{\partial x_r} \\
 e_{33} &= [(1 - x_r) \rho_s + x_r \rho_w] h_c V_r \frac{\partial a_m}{\partial x_r}
 \end{aligned} \tag{11}$$

**다. Super Heater 모델링**

과열기에서는 과열기 내부로 spray water를 뿌려서 온도가 일정하도록 한다. 본 논문에서는 온도 제어를 위한 dynamic은 전체 dynamic특성에 영향이 작다고 가정하여 드림에서 유입되는 증기의량은 운동량 보존법칙에 의해 드림과 과열기의 압력차의 관계와 질량 평형식을 적용하여 모델링하였다.

• 운동량 평형식

$$p = p_{sh} + q_s^2 K_1 \tag{12}$$

여기서,  $p_{sh}$  : 과열기 압력

$K_1$  : 마찰 계수

• 질량 평형식

$$q_s - q_{ss} = \frac{d}{dt} [\rho_{sh} V_{sh}] \tag{13}$$

식 (12)를 미분하여 식 (13)에 대입하면 '  $q_s$  '를 새로운 state로 하고 '  $q_{ss}$  '를 입력으로 하는 4번째의 state 방정식을 얻고 이를 식 (11)과 같이 놓으면 전체 plant에 대한 4차의 상태 방정식을 얻는다.

$$e_{41} \frac{dp}{dt} + 0 \frac{dv_w}{dt} + 0 \frac{dx_r}{dt} + e_{44} \frac{dq_s}{dt} = q_s - q_{ss} \tag{14}$$

$$e_{41} = V_{sh} \frac{d\rho_{sh}}{dp_{sh}}$$

$$e_{44} = -2 q_s K_1 V_{sh} \frac{d\rho_{sh}}{dp_{sh}}$$

여기서,  $\rho_{sh}$  : 일정온도에서의 압력에 따른 과열증기 밀도

$V_{sh}$  : 과열기의 내부 부피

$q_{ss}$  : 과열기 출구에서의 증기 흐름율

식 (14)에서  $q_{ss}$  (과열기 출구 증기 흐름율)는 주증기 밸브를 통해 나가므로 control valve의 개도율의 식으로  $q_{ss}$  를 나타낸다. 과열기 출구의 증기흐름율은 식 (15)와 같이 과열기의 압력  $p_{sh}$  와 제어 valve의 개도율의 식으로 나타난다.[부록 A]

$$q_{ss} = k k_1 p_{cv} \sqrt{p_{sp}} + k k_2 \sqrt{p_{sh}} \tag{15}$$

여기서,  $p_{cv}$  : 주증기 valve (제어 valve, governor valve) 개도율

발전기의 출력은 운전 data를 참고로하여 식 (16)과 같이 fitting 한다.[부록 A]

$$MW = a_1 p_{sh} q_{ss} + a_2 p_{sh} + a_3 q_s + a_4 \tag{16}$$

이상을 정리하여 4 차의 상태 방정식과 몇 개의 대수식으로 다음과 같이 boiler plant를 모델링한다.

$$e \cdot \dot{x} = b$$

$$e = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} & 0 \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} & 0 \\ e_{31} & 0 & e_{33} & 0 \\ e_{41} & 0 & 0 & e_{44} \end{bmatrix}, \quad \dot{x} = \begin{bmatrix} \frac{dp}{dt} \\ \frac{dv_w}{dt} \\ \frac{dx_r}{dt} \\ \frac{dq_s}{dt} \end{bmatrix}, \tag{17}$$

$$b = \begin{bmatrix} Q + q_{fw} h_{fw} - q_s h_s \\ q_{fw} - q_s \\ Q - q_{dc} x_r h_c \\ q_s - q_{ss} \end{bmatrix}$$

$$a_m V_r (\rho_w - \rho_s) = \frac{1}{2} K q_{dc}^2,$$

$$a_m = \frac{\rho_w}{\rho_w - \rho_s} \left[ 1 - \frac{\rho_s}{(\rho_w - \rho_s) x_r} \ln \left( 1 + \frac{\rho_w - \rho_s}{\rho_s} \right) \right]$$

$$p_{sh} = p - q_s^2 K_1,$$

$$q_{ss} = k k_1 p_{cv} \sqrt{p_{sp}} + k k_2 \sqrt{p_{sh}}$$

$$MW = a_1 p_{sh} q_{ss} + a_2 p_{sh} + a_3 q_s + a_4$$

**라. 모델링에 사용한 steam table에 대한 polynomial fitting**

컴퓨터 상에서 보일러 플랜트의 dynamics를 simulation 하기 위해서는 포화수 및 증기에 대한 특성 곡선을 동작범

위를 고려하여 함수 형태로 나타내야한다. 포화수 및 수증기의 table을 이용해서 polynomial fitting에 의해 물과 수증기의 엔탈피, 밀도 등을 압력에 대한 함수형태로 나타내었다. 상승관에서 공급된 열량은 드럼 내의 물을 증기로 분리시키고 분리된 증기는 일정온도가 될 때까지 과열기에서 과열되어 energy를 축적한다. 이때 축적된 에너지에 의해 터빈을 돌리고 증기는 물로 되돌아간다. 되돌아온 물은 economizer에서 예열되어 다시 드럼으로 유입된다.

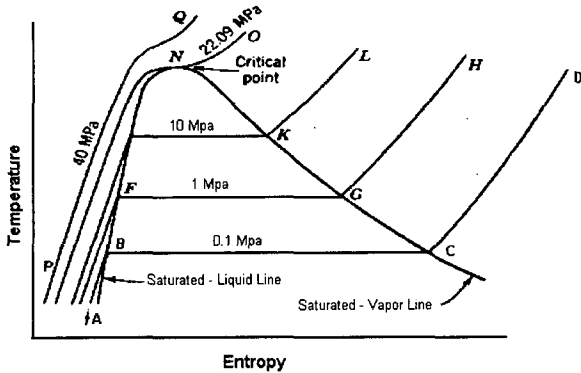


그림 2. Ranking Cycle (가로 : 엔트로피, 세로 : 온도)

Fig. 2 Ranking Cycle(abcissa: entropy,ordinate: temperature)

물을 일정 압력 하에서 가열하게되면 일정 온도까지는 주어진 열량에 비례하면서 온도가 상승하게 된다. 그러나 어느 일정한 온도가 되면 가열을 해도 온도가 증가하지 않고 가해진 열을 수증기로 상태를 변화시키는 데 사용한다. 이때의 온도를 그 압력 하에서의 포화 온도라 한다. 포화 온도에서의 물의 상태는 물과 증기가 혼재된 상태이며 열량을 가할수록 증기의 비율은 높아진다. 포화 온도에서의 물과 증기를 각각 포화 수, 포화 증기라고 한다. 포화 온도에서 포화 증기를 계속 가열하면 이후에는 증기의 온도가 상승하게되고 이때의 증기를 과열 증기라고 한다.

그림 2에서 초기 상태에서 물을 가열하면 일정한 온도가 될 때 까지는 온도가 올라가고(A-B) 어느 일정한 온도가 되면 열량을 가하여도 온도가 증가하지 않게되는데 이 때의 온도를 포화 온도라 한다(B-C). 물이 포화 온도에 있을 때 계속해서 가열하게되면 그때의 열 에너지는 물이 수증기로 상태 변환을 하는데 사용된다. 또한 포화된 증기에 계속 열을 가하게되면 증기의 온도는 올라가며 이 때의 증기를 과열 증기라 한다.(C-D)

그림 2. 에서 보듯이 물의 압력과 포화 온도는 종속 관계이고(Saturated Liquid Line) 포화 상태에서의 포화 수와 포화 증기의 밀도 및 enthalpy는 일정하므로 온도나 압력을 알면 밀도와 enthalpy를 알 수 있다. 이 때의 값들은 steam table로부터 알 수 있다.

### 3. 보일러 운전제어계통 모델링

보령화력 1,2호기의 보일러 플랜트의 제어시스템은 발전

출력 지령치를 결정하는 Unit Load Demand(ULD), 운전모드에 따른 turbine 과 보일러의 demand치를 설정하는 협조제어부, 급수유량제어, 연료제어, 공기량 제어, 주증기 온도제어, 재열증기 온도제어, 노내압제어, 기타 유회유 온도, 점화오일 압력등의 보조계통을 포함한 여러 구성요소들의 제어부로 구성된다.[9][10] 본 논문에서는 보일러 운전제어계통 중 발전소 전체의 운전과 응답특성을 시뮬레이션하는 데 필요한 부분인 coal demand 제어, turbine 주증기 밸브제어, 드럼 수위제어에 대한 subloop를 포함하는 제어기들을 software에 의해 구성하고 시뮬레이션을 수행하였다. 터빈 governor, 발전기를 포함하여 보일러 계통의 연료, 급수 등을 제공하는 구동부들은 시정수를 갖는 1차 모델로 구성하였다.[7][8]

#### 3.1 보일러 제어계통 모델링

각 구동부에 대한 제어 입력은 선택된 운전모드에 따라 제어기로부터 얻어지는 자동 입력에 의해 구동되는 경우와, 수동으로 조작하는 지령치에 의해 직접 구동되는 경우로 구분되어진다. 자동급전지령 시스템(automatic dispatch system)의 출력 증감신호로부터 analog 형태로 변환하여 얻어지는 출력 level에 대한 지령치인 ULD는 보일러-터빈의 협조제어운전을 위하여 동시에 터빈과 보일러 demand 입력으로 가해진다. 하지만 협조제어운전 모드가 아닌 boiler following mode, turbine following mode등 다른 운전모드에서는 ULD는 target steam flow를 연산하여 이 값이 ULD 값으로 사용된다. 본 연구의 대상시스템의 제어구성은 기본적으로 PI제어기로 구성되어있다.[10]

드럼의 수위 제어는 보일러 내 물의 양이 일정하도록 하여 드럼의 물이 넘치거나 모두 말라서 보일러가 과열되는 것을 막는 역할을 하는 제어계에서 매우 중요한 요소이다. 기본적으로 드럼의 수위만을 feed back 받아 setting 값과의 오차로 PI제어기를 통해서 급수 펌프를 제어하는 방법이 있고, 드럼 수위뿐만 아니라 total steam flow와 급수량까지도 feed back받아 제어하는 3 요소 제어가 있다. 본 논문에서는 시뮬레이션 동작 범위에서 제어성능이 상대적으로 우수한 3 요소 제어방법을 적용하였다. 그림 3.에서 보였듯이 급수량은 드럼 수위 오차와, 급수와 증기 유량의 차이를 PI제어기를 통해 command로 받는다. 드럼 수위를 알기 위해서는 드럼내부의 정확한 모양을 알아야 하기 때문에 실제적으로는 공식화하기가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 드럼 수위를 제어하기 위해 드럼내의 물의 양을 제어해서 수위를 간접 제어하였다.[9][10]

Boiler demand 제어기는 부하요구에 따라 연료량과 연소를 제어하고 과열기 출구의 압력이 일정하도록 하는 부분이다. 보일러 demand는, 출력 에러를 PI 제어한 신호와 부하요구를 feed forward 합한 값이 된다. 동시에 과열기 출구의 압력도 PI 제어기를 통해 제어된다. 보일러 드럼부위의 dynamics에 대한 입력 열량인 상승관을 통해 흡수되는 열량은 실제로 연료를 태워서 생성되는 합계 열량 즉 상승관, 과열기, 재열기, economizer등으로 흡수되는 양과 손실되는 양을 합한 열량의 일부이므로 차이가 있다.[9][10]

Turbine 제어는 부하 요구에 대해 control valve의 제어를 통한 증기량 제어로 출력을 제어하는 부분이다. 기본적으로 출

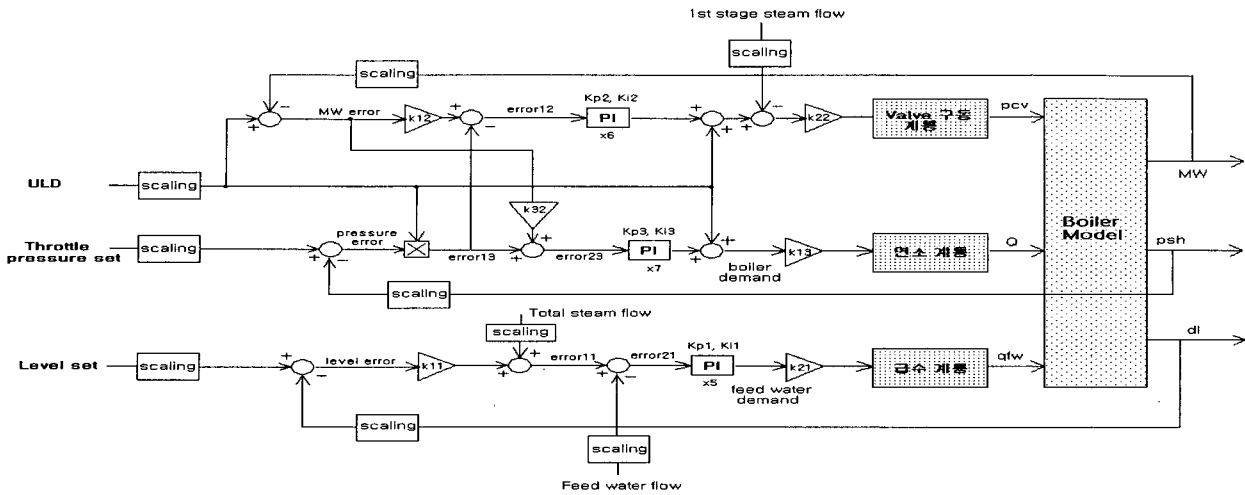


그림 3. 보일러 제어 시스템 구성도(ACS820)  
 Fig. 3 The structure of the boiler drum level control system (ACS820)

력 에러를 feed back받아서 PI 제어를 통한 제어로 이루어지며, 부하 요구와 과열기 출력의 증기 유량을 feed forward받는다.[9][10]

3.2 운전 모드변환

발전소를 운전하는 방식은 목적에 따라 여러 모드로 구분된다. 이에는 자동급전지령 시스템에 의해 보일러와 터빈을 자동으로 운전하는 auto 모드, 터빈을 자동으로 운전하고 보일러를 수동으로 작동시키는 turbine following 모드, 이와 반대로 보일러를 자동운전에 놓고 터빈을 수동 운전하는 boiler following 모드, 이외에 둘 다 수동에 의한 수동운전모드, 계통의 부하를 자동으로 추정하도록 주파수 오차에 의해 터빈 출력을 조정하고 이에 보일러가 자동으로 응답하도록 하는 Governor Free 운전 모드, 일정 출력으로 고정시키고 운전하는 Load Limit 운전 모드 등이 포함된다.[10]

운전모드 변환시 고려대상이 되는 주요한 변수들은 출력 MW 동작값에 따라 변하는 주증기 압력설정치, 주증기 제어밸브 (PCV) 개도, 보일러 연료 지령치와 터빈, 보일러 demand를 출력하여 주는 각 PI 제어기들의 적분기 초기치 들이다. 여기서 출력의 크기를 올리거나 내려서 운전하고자 할 경우 운전모드에 따라 자동운전인 경우는 unit load demand, 수동인 경우는 해당 주증기 제어밸브의 개도 및 연료 지령치를 ramp 형태로 일정한 기울기를 넘지 않게 변환 시켜준다. 이와 같이 하여 줌으로서 원활한 출력의 변화를 기할 수 있도록 하였다.

다양한 운전상황을 시뮬레이션하기 위해서 그림 4.와 같이 보일러의 subloop 제어계통들에 대한 시뮬레이션 외에도 여러 운전모드, 즉 boiler following, turbine following, boiler-turbine협조제어 자동운전, 수동운전, Governor Free 자동운전 등의 각 모드에 대한 시뮬레이션과 이들의 조합에 의한 운전 profile을 만들어 이에 대한 운전 시뮬레이션이 가능하도록 전체 시뮬레이션 프로그램을 구성하였다.

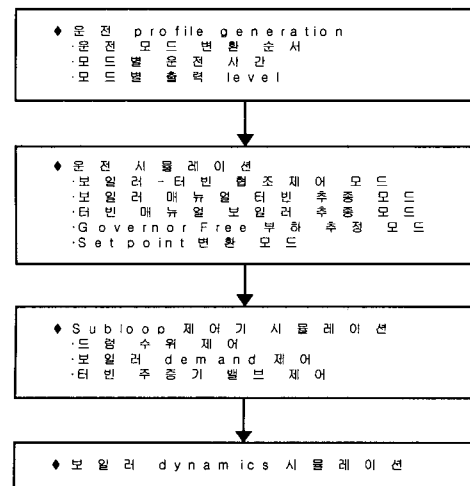


그림 4. 운전 제어 시뮬레이션의 흐름도  
 Fig. 4 A flow diagram of the driving control simulation

이상에서 구현한 시뮬레이터에 대한 성능을 검증하기 위하여 다양한 운전 상황들에 대한 운전 결과들을 얻어 제시하였으며, 이들과 실제 보령화력 1호기의 보일러 제어계에 대한 특성시험에서 얻어진 운전 데이터와 비교실험을 수행한 결과를 제시하였다. 비교 시험에 포함된 내용은 발전소에서 시스템의 보수유지 및 성능개선을 위하여 정기적으로 수행하는 보일러 제어계통 특성시험들로서, 부하운전 범위를 광범위하게 변화시키면서 주요 제어요소치들을 측정하고 분석하기 위한 정특성 시험, 보일러의 모든 조건이 운전 허용 범위 내에서 운전될 수 있도록 제어계의 정밀조정을 하기 위한 연소계, 급수계 등의 step 입력에 대한 출력의 시간지연, 응답성, 속도성 등을 측정하기 위한 부하변동시험, 보일러의 운전 상태를 모두 자동으로 하여 보일러가 계통의 부하를 따라가는 상태를 확인하기 위한 부하추종시험 등이 포함된다.

#### 4. 적용시험 및 비교 검토

이상에서 구현한 보일러 모델링 및 운전제어 시뮬레이션의 타당성을 시험하기 위한 목적으로 보령화력 1호기의 정기적인 특성 시험과정에서 얻은 운전 데이터 일부와 비교 실험을 수행한 결과를 다음에 제시하였다.

##### 4.1 보일러 정특성 시험

보일러의 정특성 시험은 출력 부하의 범위를 광범위하게 여러 동작점으로 변화시키며 정상상태 운전을 수행하고 각 동작점에서의 플랜트 주요 상태 값들을 측정하여 제어설비의 문제점을 분석하고 개선 방안을 제시하여 제어계의 신뢰도와 성능향상을 도모하고자하는 시험항목이다. 본 논문에서 시뮬레이션 검증에 위해 얻은 보령화력1,2호기에서 수행한 특성시험 데이터가 동특성 시험 자료만 포함되어 있는 관계로 이 부분에 대한 비교 실험은 운전지침서[9][10]에 명기된 각 출력점에서의 설정치 및 동작점 데이터와 비교하도록 하였다. 지침서의 설정치들을 적용하여 수행한 운전 시뮬레이션 데이터를 다음의 표 1에 나타내었으며, 비교하여 그림 5, 6에 함께 나타내었다. 이 결과 운전지침서의 동작점 데이터와 거의 같은 수치들을 나타내는 것을 확인할 수 있다.

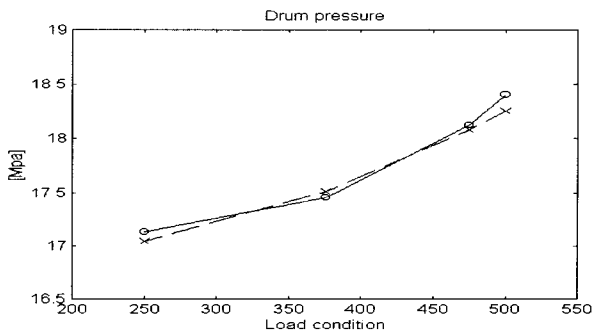


그림 5. 드럼 압력 비교치  
(o : 설계사양치, x : 시뮬레이션 출력치)  
Fig. 5. Comparison of the drum pressure values  
(o : design spec. , x : simulation output)

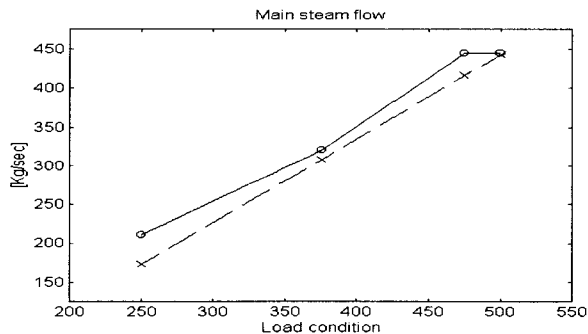


그림 6. 증기 유량 비교치  
(o : 설계사양치, x : 시뮬레이션 출력치)  
Fig. 6 Comparison of the value of the steam flow  
(o : design spec. , x : simulation output)

표 1. 시뮬레이션에 의한 각 동작 점에서의 state 값

Table 1. The state values at each operation points in the simulation

동작점 [MW]	state	drum pressue p [Mpa]	water volum wv [m <sup>3</sup> ]	steam mass ratio xr	total steam outlet qt [Kg/sec]	total feed water qfw [Kg/sec]	input power Q [MW]
250		17.04	16.65	0.1356	198.3	198.3	208.4
375		17.51	16.76	0.2073	333.2	333.2	468.1
417		17.73	16.79	0.2325	378.5	378.5	503.0
450		17.93	16.82	0.2533	414.2	414.2	578.2
475		18.08	16.84	0.2696	441.3	441.3	614.3
495		18.22	16.86	0.2831	462.8	462.8	643.0
500		18.26	16.86	0.2865	468.3	468.3	650.2

##### 4.2 보일러 동특성 시험

본 논문에서는 보일러의 동특성 시험 종류 중, 출력의 크기를 변화시키면서 나타나는 드럼수위, 주증기 압력 등 제어 요소 값들의 과도 범위를 측정하는 부하변동 시험과, 정상상태 운전 중에 연료 (coal demand) 입력을 계단 형태와 같이 급하게 변동을 시켜 주고 이때 나타나는 모든 제어 요소들의 응답이 허용범위 내에서 안정적으로 동작하는가를 확인하고, 시정수, 불감시간 등의 응답을 산출하여 보일러 자동 제어계의 최적 운전 조건을 부여하기 위한 제어계의 조정변수들을 정밀 재조정하기 위한 두 형태의 동특성 시험항목에 대한 실측치와 시뮬레이션 치와의 비교실험을 수행하였다.

부하변동 시험을 위한 운전모드는 보일러 자동모드 (auto), 터빈 manual, load-limit (0.5%/min) 운전이며, 계단 형태의 연료량 증감에 대한 동특성 응답측정시험의 경우는 보일러 manual, 터빈 자동모드(auto), 드럼수위 자동(auto)모드로 운전하며, 최소 10분 이상 안정적인 운전을 수행하다가, 다른 제어치 들은 고정시킨 상태에서 연료 요구량(coal demand)을 ±3, ±5%변동을 시켜주고 정상상태에 이를 때까지의 응답을 측정하는 시험이다.

표 2에 부하변동시험에 대한 실측치들을 요약하여 나타내었으며, 시뮬레이션을 통해 얻은 결과를 표 3에 나타내었

표 2. 동특성 시험 실측치

Table 2. The actual measured values of the dynamic characteristic simulation

측정 변수	출력 변경 (0.5 %/min)시 제어 오차				단위
	480→430	430→370	370→430	430→480	
드럼 수위	-22, +22	-22, +22	-22, +30	-18, +30	mm
주증기 온도	-0, +1.5	+1.0, +1.5	+0, +1.5	+2.0, +1.0	℃
주증기 압력	+1.0, -5.0	-5.5, -1.0	-5.0, -7.0	+0.0, +1.0	Kg/cm <sup>2</sup>
재열증기 온도	-6.0, +2.5	-7.0, -2.0	-11, +6.0	-9.0, +5.0	℃

다. 그림 7는 시뮬레이션에 의해 얻어진 출력의 신호를 나타낸 예이다. 이상의 결과에서 나타난 바와 같이, 드림 수위, 주증기 압력들의 변동 폭은 실측치와 크게 벗어나지 않는 결과를 얻었으며, 비교적 드림수위는 안정적인 동작을 보이고 있는 반면에 주증기 압력은 안정된 값에 이르는 시간이 약 15분 안팎에 이르러 비교적 느린 응답특성을 나타내고 있다. 이는 연료계통에 존재하는 비교적 긴 지연 시간 때문에 boiler master의 적분계수를 키워주는데 제약이 따르기 때문이다.

표 3. 운전제어 시뮬레이션으로 수행한 부하변동시험 (load swing test) 결과치 (표 2의 실측실험과 동일한 패턴으로 수행하였음)

Table 3. The results of load swing test using the driving control simulation(the same pattern as actual measurement experiment shown in the Table. 2 )

측정변수	출력 변경 (0.5 %/min)시 제어 오차				단위
	480→430	430→370	370→430	430→480	
드림 수위	-11, +2	-11.27, +25.60	-10.79, +13.26	-9.45, 12.21	mm
주증기 압력	-1.62, +0.631	-1.81, +2.07	-3.99, +1.20	-3.63, +1.30	Kg/cm <sup>2</sup>

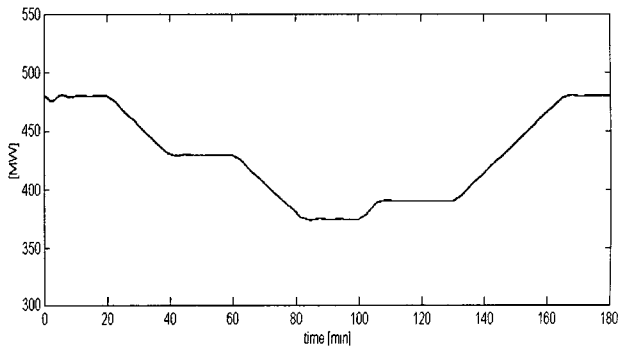


그림 7. 운전제어 시뮬레이션을 통하여 터빈 매뉴얼, 보일러 following 모드로 보일러 계통의 load swing test를 수행한 결과(보령화력 1호기에서 수행한 부하변동 시험과 같은 패턴으로 시험한 것임)

Fig. 7 The results of a load swing test of the boiler system in turbine manual and boiler following mode through the driving control simulation (in the same pattern as the load swing test of Boryung Power Plant unit #1)

보령화력 1호기에 대한 연료 계단입력에 대한 동특성 시험은 연료 량을 ±3%, ±5% 로 step 형태로 가해주고 이때 부터 정상상태에 이를 때까지의 출력 변수들을 측정하였다. 표 4, 5에 시험 결과치를 요약하여 나타내었다.

본 논문에서 수행한 시뮬레이션을 적용하여 동일한 조건으로 수행한 결과는 표 5에 요약하였다. 현재 모델링에서는 추가로 입력된 연료량에 대하여 상승관 부분의 열 흡수량과 과열기, 재열기, economizer등으로 흡수되는 열량과를 구분하여 주는 형태가 아니기 때문에, 실제 실험한 경우와 정상상태에 이르는 출력이 같은 값에 이를 때까지의 시정수를 측정하는 것으로 두 경우에 대한 비교를 수행하였다.

표 4. 연료 계단 입력에 대한 동특성 시험표 (실측)

Table 4. The results of dynamic characteristic simulation by step input of the fuel (Actual measurement)

연료량 변화	연료량 3% 증가		연료량 3% 감소		연료량 5% 증가		연료량 5% 감소	
	대상	전	후	전	후	전	후	후
출력(MW)	460	495	495	460	450	495	495	450
주증기압력 (Kg/Cm <sup>2</sup> )	160	170	170	161	153	170	169	153
주증기 온도(℃)	530	538	519	526	526	537	531	535
재열 증기 온도(℃)	533	539	535	531	516	533	534	533
coal flow (Ton/hr)	170	177	177	170	164	177	177	164

표 5. 열량 시뮬레이션시 계단입력에 대한 동특성 시험표

Table 5. The results of the dynamic characteristics to step input in mass heat simulation

입력 열량 변화	증가		감소		
	대상	전	후	전	후
출력(MW)	450	495	495	450	450
주증기 압력(Kg/cm <sup>2</sup> )	152.8 (14.97Mpa)	176.9 (17.34Mpa)	176.8 (17.30Mpa)	153.0 (15.00Mpa)	153.0
입력열량 (MW)	617.4	639.1	639.1	617.4	617.4

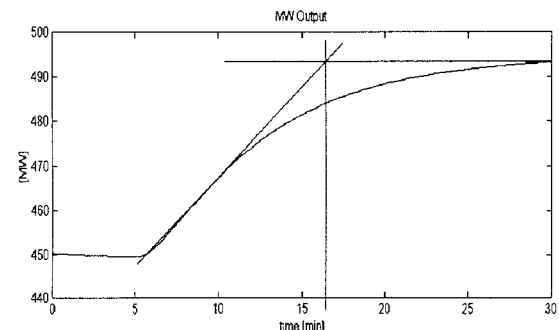
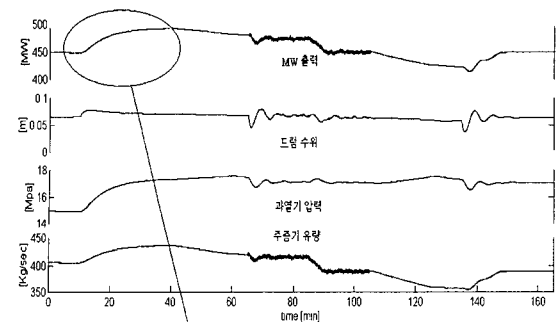


그림 8. 터빈 제어밸브 개도를 고정시킨 상태에서 연료를 +5% 계단 입력으로 증가시켜 얻은 보일러 동특성 시험 결과(출력상승의 시정수 측정)

Fig. 8 The results of boiler dynamic characteristic simulation when the fuel is increased by step input of +5% in the condition that the turbine control valve is fixed. (a time constant of output increase is observed)



그림 8에 나타내었듯이 450MW를 기준으로 5%의 연료 상승을 시켰을 때 얻어지는 시정수는 약 13분으로서 실제 측정치(부동시간 1분 12초, 시정수 13분 48초)와 유사한 시정수 특성을 나타내는 것을 확인 할 수 있다.

### 4.3 보일러 부하추종 시험

본 논문에서 제시한 시뮬레이터의 동작을 보여주기 위하여 운전모드 중 Governor Free운전은 계통 주파수의 error를 feedback 받아 이에 비례하는 형태로 Governor 밸브를 조절하여 터빈의 출력을 제어하여주고 압력의 변화를 feedback 받아 보일러가 부하를 추종하도록 하는 운전 형태이다. 즉 Governor Free운전 상태에서는 보일러는 자동모드에, turbine은 Governor Free상태에, 드럼수위 제어계통은 자동모드로 운전한다. 본 연구에서는 계통부하 변동을 실제 상황과 같이 시뮬레이션 하기는 불가능하기 때문에 일정 출력범위에서 서서히 deterministic하게 변하는 계통부하 변동에 random한 disturbance 형태의 계통부하 변동분을 중첩하고 이에 대해 나타나는 플랜트 신호 값들을 측정하였다. 따라서 본 시험에서는 부하를 추종하는 전체적인 모양을 확인하는데 까지를 목표로 하였다. 그림 9는 출력을 475MW에 고정하고 약 ±20MW 범위의 disturbance를 포함시킨 경우에 대한 시뮬레이션 결과이다.

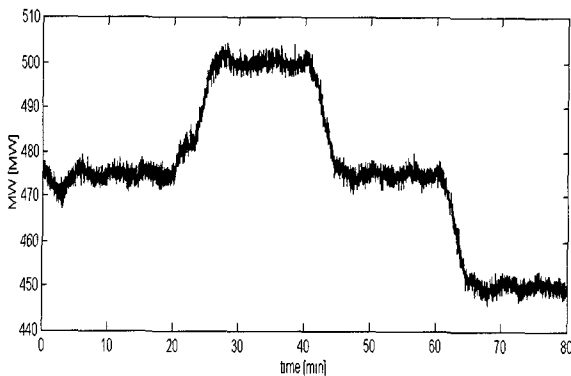


그림 9. Governor Free모드에서의 부하 추종의 예  
Fig. 9 An example of the load following in the Governor Free mode

### 5. 결 론

본 논문에서는 보령화력 1,2호기의 석탄화력 500MW 정격의 드럼형 보일러 시스템을 대상으로 돌발성 이벤트 형태의 고장 감지 알고리즘 개발 및 검증에 위한 보일러 플랜트 자체의 dynamics에 대한 모델링을 수행하였고, Bailey 820 ACS보일러 제어 회로를 대상으로 제어기들에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 본 논문에서 구현한 모델링과 시뮬레이션에 대한 성능을 검증하기 위하여 보령 화력 1,2호기의 실제 파라미터 및 시험 운전 데이터와 비교하였으며, 다양한 운전 상황들에 대한 운전 결과들을 얻어 제시하였다. 보령 화력 1호기의 보일러 제어계에 대한 coal flow step jump에 대해 반응하는 동특성 시험, 터빈 매뉴얼 운전에 의한 부하

변동시험, Governor Free운전 시험 등의 실제 운전 상황과 동일한 시뮬레이션을 수행하여 얻어진 결과를 비교 제시하였다. 시뮬레이션 출력은 거의 동작점에 대한 설계 운전조건과 일치하며, 보일러 동특성 및 부하변동시험의 비교 결과는 실측치와 거의 동일한 시정수 반응 및 응답특성을 보여줌으로서, 본 연구에서 수행한 보일러 계통의 모델링 및 시뮬레이션의 타당성을 보였다.

본 논문에서 제시한 보일러 플랜트 모델 및 시뮬레이션은 현재 운전중인 발전소 및 제어 시스템을 직접적인 대상으로 하여 다양한 형태의 동일한 운전 모드의 구현을 통해 특징 패턴 감지 및 고장감지 신호처리 기법의 적용시험을 위한 운전 및 고장 패턴 신호의 시뮬레이션이 가능하게 하여 주는 바 고 신뢰성을 가지는 보일러 운전 제어 및 고장 감지 시스템의 개발에 기여하는 바가 크다고 할 수 있다.

### 감사의 글

본 논문은 차세대전력기술연구센터 및 기초전력공학 공동연구소의 지원을 받아 수행한 내용임  
(과제 번호 97-075)

### 참 고 문 헌

- [1] P. M. Frank, "Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy: a survey and some results," *Automatica*, Vol. 26, No. 3, pp. 459-474, 1990.
- [2] Janos J. Gertler, "Survey of Model-Based Failure Detection and Isolation in Complex Plants". *IEEE Control Systems Magazine*, December 1988
- [3] E. Y. Chow and A. S. Willsky, "Analytical redundancy and the design of robust failure detection system," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, Vol. AC-29, No. 7, July 1984.
- [4] 김재화, 서열규, 장태규, "Oscillatory 파형감지에 의한 보일러 플랜트 드럼 수위 제어계통의 고장 진단", 대한 전기학회 논문지 A권, 1999년 1월호
- [5] K. J. Astrom, "Simple drum-boiler model," *IFAC Symposium Power System, Modeling and Control Applications*, september 1988.
- [6] J. P. McDonald, H. G. Kwatny, and J. H. Spare, "A nonlinear model for reheat boiler-turbine-generator systems, Parts I and II," *Proc. 12th JACC*, 1971, pp. 219-236.
- [7] F. P. de Mello, "Boiler models for system dynamic performance studies," *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 6, No. 1, Feb 1991.
- [8] M. E. Flynn and M. J. O'Malley "Drum Boiler Model for Long Term Power System Dynamic Simulation" *IEEE Trans on Power Systems* Vol.14 No1 Feb 1999 pp 209 -217
- [9] 보령화력 1,2호기 기본운전지침서 한국전력공사.

[10] Bailey Instruction Book, Bailey 820 analog control system description for KEPCO.

저 자 소 개



**김 정 근 (金井根)**  
 1971년 9월 25일생. 1997년 중앙대학교 제어계측공학과 졸업. 2000년 중앙대학교 전자전기공학부 졸업(공학석사). 현재 동대학원 박사 과정.  
 Tel: 02-820-5318 / Fax: 02-812-1293  
 E-mail: kjjk0301@lycos.co.kr



**김 재 화 (金載和)**  
 1974년 2월 18일생. 1997년 중앙대학교 제어계측공학과 졸업. 2000년 중앙대학교 전자전기공학부 졸업(공학석사). 중앙대학교 전자전기공학부 졸업(공학박사). 2001-현재 삼성전자 디지털미디어 연구소  
 Tel: 031-200-3675 / Fax: 031-200-3147  
 E-mail: jамsoon@intizen.com



**장 태 규 (張泰奎)**  
 1955년 11월 13일생. 1979년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1981년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학석사). 1981년-1982년 현대엔지니어링(주). 1982년-1984년 현대전자산업(주). 1987년 University of Florida 전기공학과 졸업(공학박사). 1987년-1990년 Tennessee State University, Assistant Professor. 1990년-현재 중앙대학교 전자전기공학부 교수.  
 Tel: 02-820-5318 / Fax: 02-812-1293  
 E-mail: tgchang@jupiter.cie.cau.ac.kr

부 록

(1) plant 사양

- 급수온도  $T_{fw}$  : 280 [°C]
- 드럼 부피  $V_{drum}$  (유효값) : 35.58 [m<sup>3</sup>]
- 상승관 부피  $V_r$  : 109.9 [m<sup>3</sup>]
- 하강관 부피  $V_{dc}$  : 45.24 [m<sup>3</sup>]
- 과열기 부피  $V_{sh}$  : 138.2 [m<sup>3</sup>]
- 드럼 및 상승관 금속 구조물의 비열  $c_p$  : 544.0 [J/Kg°C]
- 드럼 및 상승관 금속 구조물의 질량  $m$  : 502632.69 [Kg]
- 상승관과 하강관의 마찰계수  $K$  :  $4.407 \cdot 10^{(-3)}$  [sec/Kg]
- 과열기의 마찰계수  $K_1$  :  $5.048 \cdot 10^{(-6)}$  [1/mKg<sup>2</sup>]

(2) 제어기 계수 setting치

(3) 보일러 다이내믹스 모델 근사식과 근사 계수

- 포화증기의 엔탈피  $h_s$  :  $a_{01} + (a_{11} + a_{21} \cdot (p-10)) \cdot (p-10)$   
 $a_{01} = 2.728 \cdot 10^{(6)}$ ,  $a_{11} = -1.792 \cdot 10^{(4)}$ ,  $a_{21} = -924.0$
- 포화증기의 밀도  $r_s$  :  $a_{02} + (a_{12} + a_{22} \cdot (p-10)) \cdot (p-10)$   
 $a_{02} = 55.43$ ,  $a_{12} = 7.136$ ,  $a_{22} = 0.224$
- 포화수의 엔탈피  $h_w$  :  $a_{03} + (a_{13} + a_{23} \cdot (p-10)) \cdot (p-10)$   
 $a_{03} = 1.408 \cdot 10^{(6)}$ ,  $a_{13} = 4.565 \cdot 10^{(4)}$ ,  $a_{23} = -1010.0$
- 포화수의 밀도  $r_w$  :  $a_{04} + (a_{14} + a_{24} \cdot (p-10)) \cdot (p-10)$   
 $a_{04} = 688.4$ ,  $a_{14} = -17.46$ ,  $a_{24} = 0.081$
- 포화증기의 온도  $t_s$  :  $a_{05} + (a_{15} + a_{25} \cdot (p-10)) \cdot (p-10)$   
 $a_{05} = 311.0$ ,  $a_{15} = 7.822$ ,  $a_{25} = -0.32$
- 급수의 엔탈피  $h_{fw}$  :  
 $h_w + (a_{06} + a_{16} \cdot (p-10)) \cdot (p-10) \cdot (T_{fw} - t_s)$   
 $a_{06} = 5900.0$ ,  $a_{16} = 250.0$
- 과열증기의 밀도  $r_{sh}$  :  $a_{07} \cdot p^2 + a_{17} \cdot p + a_{27}$   
 $a_{07} = 0.0304$ ,  $a_{17} = 2.2870$ ,  $a_{27} = 2.4299$

제어 밸브 개도율과 과열기 압력 관계식 :

$$q_{ss} = k_{k1} \cdot p_{cv} \sqrt{p_{sh}} + k_{k2} \cdot \sqrt{p_{sh}}$$

$$k_{k1} = 0.7966, k_{k2} = 54.39$$

입력 구동계통 시정수 :

- 급수계통 : 3 [sec]
- 터빈밸브 구동 계통 : 0.5 [sec]

k11=1	k12=2	k13=30
k21=50	k22=0.02	Ki3=0.02
Ki1=0.15	k32=0.2	Kp3=3.8
Kp1=0.33	Ki2=1.0	
	Kp2=1.0	

연료연소 계통 : 90 [sec]