

드럼형 보일러의 동특성 해석을 위한 모듈 개념의 가상 플랜트 구현

Implementation of virtual plant using module concept for the dynamic simulation of drum type boiler

°남채호°, 권상혁°, 오동한°, 노태정°, 이광식°

\* 삼성중공업 기전연구소 메카트로개발팀(Tel : +82-551-60-8240,8247; Fax : +82-551-60-8228; E-mail : drnam@samsung.co.kr)

\*\* 삼성중공업 기전부문 전장제어팀(Tel : +82-551-60-6941,6952; Fax : +82-551-60-6950; E-mail : advanced@samsung.co.kr)

**Abstracts** The focus of this paper is to implement of virtual plant using module concept for the dynamic simulation of drum type boiler and to simulate the control trends of dynamic characteristics. Matlab & Simulink is used for implement virtual plant & analyzation the dynamics & control trends.

They are available for analyzing the dynamic characteristics of drum type Boiler by means of applying well measured data to virtual plant.

**Keywords** Boiler, PID Control, Dynamic Simulation, Matlab, Virtual Plant

1. 서론

본 논문에서는 발전소 보일러와 같은 공정 제어 시스템의 가상 플랜트 모델 구현 과 시뮬레이션을 통한 동특성 해석에 초점을 두고 있다. 특히, 모듈 개념으로 가상 플랜트를 구현함으로써 각 제어 계별로 분리 또는 통합하여 모의실험이 가능하도록 하였다. 프로그램 Tool로 Simulink와 Matlab을 사용하였고, 제어계별로 각 요소에 따른 동특성 해석 및 제어특성을 실험하였다.

기존의 workstation에서 사용되는 훈련용 시뮬레이터의 기계모델 과 달리 PC에서 사용되며, 설계변경이 용이할 뿐만 아니라 사용자가 쉽게 접근할 수 있다. 즉, 구현하고자 하는 시스템의 입출력 상태변수간의 모델만을 추출하여 모의실험이 가능하도록 구현하였다. 시스템의 모델링을 하는데 있어서는, 각 모듈별 동특성에 따른 지연성분과 적분특성의 곱과 합으로 나타내는 전달함수 수식으로 구현하였다. 그리고, 각 상태 변수간의 상관관계에 따라 상호 연결함으로써 가상 보일러를 구현하였다.

보일러 전체 통합 모델은 6개 입력과 9개 출력의 다 변수 시스템으로 구성하였으며, 상태공간으로 표시하면 시스템 행렬은 33 by 33 행렬로 구현된다. 구현한 가상 플랜트에 대한 제어실험은 각 요소별 제어에 따른, 부하변동(증기 유량 변화)시 출력(증기 온도) 제어 실험, 급수유량 및 증기유량의 변화에 따른 드럼 수위 제어 실험, 증발량과 연료량변화 및 보일러 시정수에 따른 증기 압력 제어 특성 실험으로 이루어 졌다.

2. 모듈개념의 가상 플랜트 구현

모듈개념의 가상 플랜트는 각 모듈별 동특성에 따른 상태변수간에 지연성분과 적분특성의 곱과 합으로 나타내는 전달함수 수식으로 표현되고, 각 모듈을 구성한 뒤 이를 상관관계에 따라 상호 연결함으로써 가상 보일러를 구현하였다.

2.1 증기 온도 제어계의 구현

증기온도에 영향을 주는 요인은 표1과 같고, 증기 온도계의 동특성은 증기 압력계와 달리 분포정수계로 된다. 가열량 변화에 대한 출구증기 온도 응답은 노내 온도가 일정하다고 가정하면 일차 지연요소로 응답하나 입구증기 온도가 변화할 경우 그 응답이 전혀 다르다. 그러므로, 입구 증기 온도를 급변 시켜도 과열관의 열용량이 커서 그 변화가 서서히 전파되기 때문이다. 과열증기 온도의 동특성 해석에 있어서 과열관 내의 축열용량 분포의 이론적 해석이 불가능하므로 아래의 사항들을 가정하여 해석에 사용한다.

- 가정 1: 과열기는 단관으로 한다.
- 가정 2: 증기의 비용적, 비열은 관의 길이 방향으로 일정.
- 가정 3: 관의 길이 방향의 열전도는 없는 것으로 한다
- 가정 4: 관의 길이 방향의 가열분포는 일정한 것으로 한다.
- 가정 5: 관의 두께는 없는 것으로 한다
- 가정 6: 관내의 열전도율은 유량에 따라 변화하나 길이 방향으로 일정한 것으로 한다.

상기의 가정을 고려한 경우 과열증기 온도계의 블럭선도는 그림 1 과 같고, SH Module 1의 내부는 그림 2와 같이 구성하였다. SH Module 2, 3도 같은 방식으로 구성되었다.

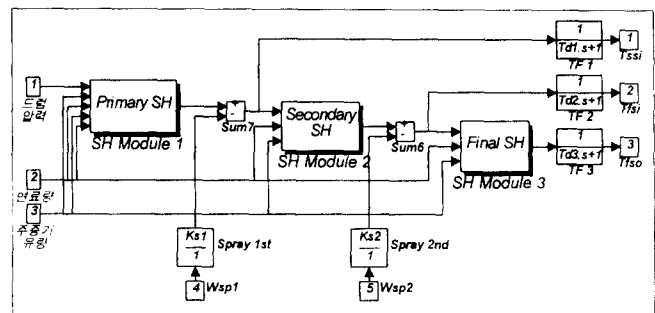


그림 1 과열증기 온도계의 블럭선도

Fig. 1 The block diagram of super heater temp. system

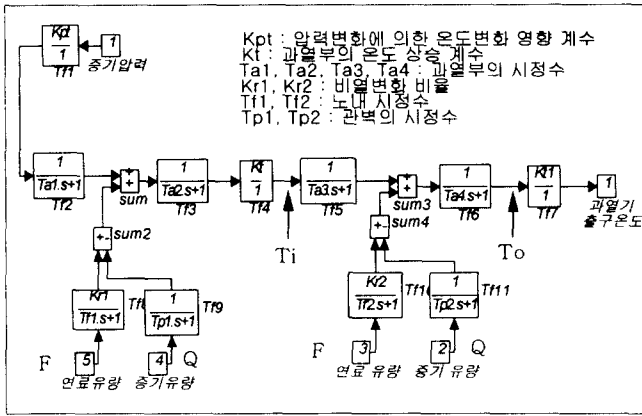


그림 2 과열증기 첫단의 블럭선도

Fig. 2 Block diagram of Primary Super Heater

그림 2의 블럭 선도에서  $T_i$  와  $T_o$  사이의 증기 온도의 전달함수를 구하면 식 1 과 같이 된다.

$$T_o = \frac{1}{T_o4 \cdot S + 1} \left( \frac{K_r2}{T_r2 \cdot S + 1} F - \frac{1}{T_r2 \cdot S + 1} Q \right) + \frac{1}{(T_o3 \cdot S + 1)(T_o4 \cdot S + 1)} T_i \quad (1)$$

표1 외란에 따른 증기 온도 변화

TABLE1 The change of steam temp. by disturbance

외란변화	증기유량	연료유량	공기유량	드럼압력	전열면
공기 온도변화	증가	증가	증가	증가	훼손
방사형 과열기 (복사열)	감소	증가	감소	증가	감소
접촉형 과열기 (대류열)	감소	증가	증가	증가	감소

## 2.2 드럼 수위 제어계의 구현

드럼 수위에 변화를 주는 요인은 표2와 같지만, 큰 영향을 주는 급수량과 증발량 상태변수 요인에 대한 동특성만을 고려한다.

### 2.2.1 급수 유량 변화에 따른 Drum 수위 변화

증발량을 일정하게 하고 급수량만을 변화 시킬 때 드럼 수위의 초기 응답은 일차 적분 요소와 반응 개시시간 요소가 결합된 형태를 갖는다. 일반적으로 급수 온도는 포화온도보다 낮기 때문에 증발부에서 기포발생이 억제되어 실제의 수위 응답은 1차 지연요소도 포함하게 된다. 그러므로, 드럼수위 제어계의 전달함수는 식2와 같다.

$$G_{wL}(S) = \frac{L(S)}{W(S)} = \frac{1}{T_s \cdot S} \cdot \frac{1}{(1 + T_w \cdot S)} \quad (2)$$

### 2.2.2 증발 유량 변화에 따른 Drum 수위 변화

급수량을 일정하게 하고 증발량을 증가시킬 경우 처음엔 증발량이 증가함에 따라 기포가 증가하여 수위는 증발량에 비례하여 증가하나 어느 시간 경과후엔 증발량과 급수량의 차에 비례하여 감소한다. 이는 증발량이 증가함에 따라 보일러의 보수수량이 감소되어 수위가 낮아지는 현상인데 여기서, 증발량이 증가할 때 수위가 일단 상승하는 현상을 수위의 역응답특성이라한다. 따라서, 수위의 동특성은 반응개시 시간요소와 역응답 요소가 결합된 형태로 표시된다. 이때 전달함수는 식3과 같다.

$$G_{qL}(S) = \frac{L(S)}{Q(S)} = \frac{-K_{dr}}{1 + T_{dr} \cdot S} - \frac{1}{T_s \cdot S} \quad (3)$$

## 2.2.3 급수량과 증발량을 고려한 드럼 모델 구현

급수량과 증발량을 고려한 드럼모델은 그림3과 같다.

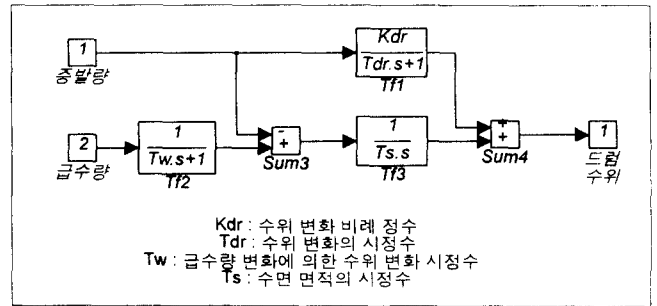


그림 3 드럼 수위계의 블럭선도

Fig. 3 The block diagram of drum level system

표2 외란에 따른 드럼 수위 변화

TABLE2 The change of drum level by disturbance

외란변화	증기유량	연료유량	급수유량	드럼압력	급수온도
	증가	증가	증가	증가	증가
드럼 수위 변화	감소	증가	증가	감소	증가

## 2.3 증기 압력 제어계의 구현

증기 압력에 변화를 주는 요인은 표3과 같지만, 큰 영향을 주는 연료 유량과 증기 유량에 대한 동특성만을 고려한다.

### 2.3.1 연료 유량 변화에 따른 증기 압력 변화

증발부에 가해지는 열량변화에 대한 증기압력의 변화로서 연료 시정수 및 보일러 시정수의 영향을 받아 1차 지연 및 적분요소의 특성을 갖는다. 이때의 전달함수는 식4로 표시된다.

$$G_{pL}(S) = \frac{P(S)}{F(S)} = \frac{1}{(1 + T_r \cdot S)} \cdot \frac{1}{T_B \cdot S} \quad (4)$$

### 2.3.2 증발량 변화에 따른 증기 압력의 변화

증발량이 상승할 경우 증발부의 보유 에너지가 감소하여 증기 압력이 감소할때 1차 적분특성을 갖게 된다. 그리고, 과열기를 갖는 보일러에 있어서는 Drum으로부터 과열기 출구간에 증발량의 2승에 비례한 압력 강하가 생김을 알 수 있는데 이를 증기 압력 강하계수  $K_p$ 로 표시할 경우 전달함수는 식5로 표시된다.

$$G_{vp}(S) = \frac{P(S)}{Q(S)} = -k_p - \frac{1}{T_B \cdot S} \quad (5)$$

### 2.3.3 연료유량과 증발량을 고려한 증기 압력계 모델 구현

연료량과 증발량을 고려한 증기 압력계 모델은 그림4와 같다.

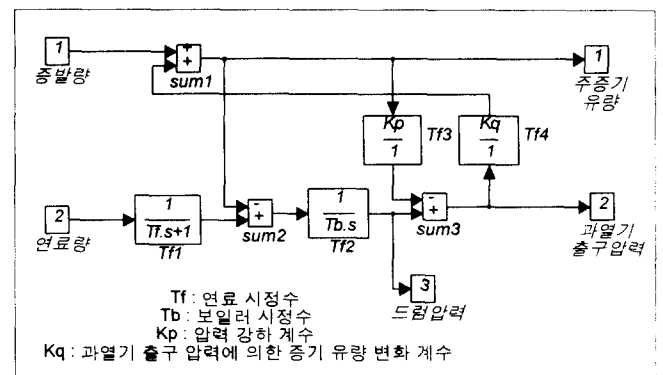


그림 4 증기 압력계의 블럭선도

Fig. 4 The block diagram of pressure system

표3 외란에 따른 증기 압력 변화

TABLE3 The change of steam pressure by disturbance

	증기유 량증가	연료유 량증가	Spray 유량증가	공기유 량증가	급수유 량증가	급수온 도증가
증기압력 변화	감소	증가	증가	감소	감소	증가

보유 에너지에 따라 증기 압력은 변화하고, 변화 폭은 축열 용량이 커짐에 따라 작아진다. 즉, 증기 압력 제어는 보유 에너지를 일정하게 하는 제어로서, 증기 발생에 의해 나가는 에너지와 연소에 의해 얻어지는 에너지의 Balance를 유지하는 제어이다.

2.4 보일러 기계 모델 구현

보일러 전체 모델은 그림2와 같이 6개 입력과 9개 출력의 다변수 시스템으로 구성하였으며, 내부의 구성은 그림5와 같이 각 상태변수의 연관성과 동특성에 따라 5개의 모듈화된 내부 블럭들로 구성하였다.

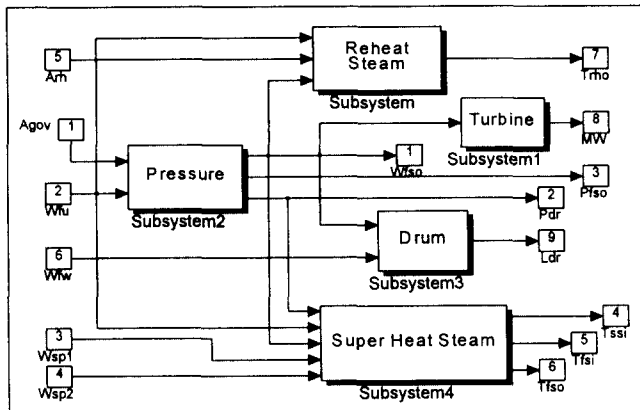


그림 5 가상 보일러 모델

Fig. 5 The Virtual Boiler Model

3. 제어계 구성 및 시뮬레이션

제어시스템 구성 및 해석을 위해서는, 우선 제어대상에 대한 특성을 파악해야한다. 그러기 위해서는 제어계의 시간에 따른 과도상태를 나타내는 동특성해석이 필요하다. 각 모듈별 여러 가지의 PID 제어를 구성하여 응답 특성을 확인하였다.

3.1 주증기 온도제어 시뮬레이션

부하변동(주증기 유량 변화)시 출력(주증기 온도)제어를 시뮬레이션하기 위하여, 그림6과 같이 구성하였다.

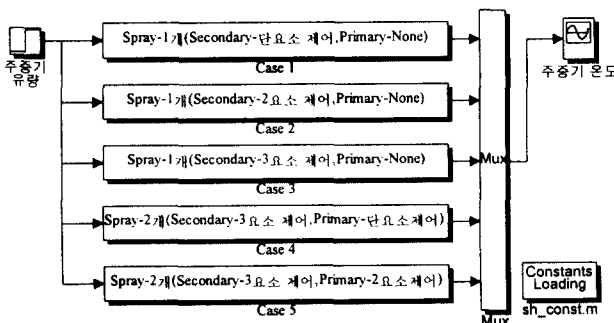


그림 6 제어방식에 따른 주증기 온도 제어

Fig. 6 The control of main steam temp.

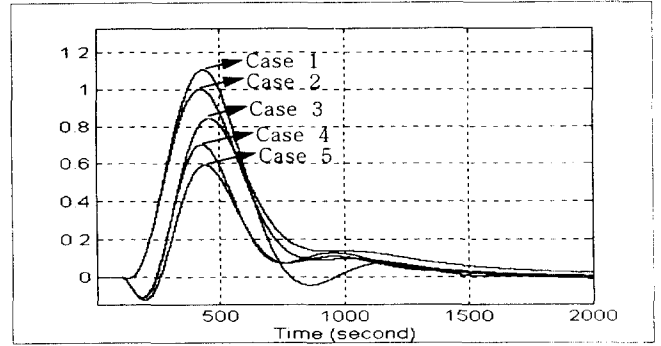


그림 7 제어 방식에 따른 주증기 온도 응답 곡선

Fig. 7 The response plot of main steam temp.

주증기 온도 제어 시뮬레이션 결과는 그림7과 같다. Case 1, 2, 3의 경우는 2차 과열기와 3차과열기 사이의 Spray Valve를 조작함으로써 주증기 온도를 제어하는 경우고 Case 4, 5의 경우는 1차 과열기와 2차 과열기 사이에 Spray Valve를 추가하여 제어한 경우이다.

그림 7과 같이 피드백 되는 측정값과 조작량이 많을 수록 응답 특성이 좋아짐을 확인할 수 있었다.

3.2 드럼 수위 제어 시뮬레이션

증기 유량의 변화에 따른 드럼의 수위 제어 실험은 그림8과 같이 구성하여 실험하였다.

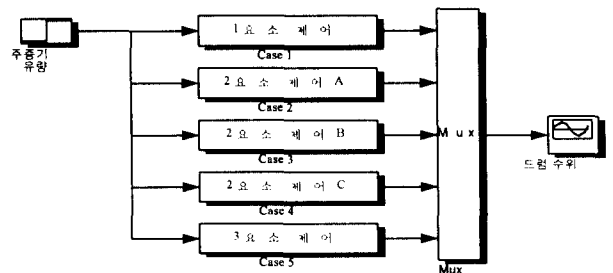


그림 8 제어 방식에 따른 드럼 수위 제어

Fig. 8 The control of drum level

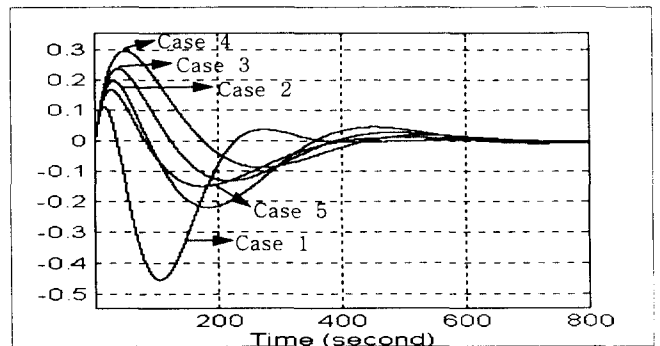


그림 9 제어 방식에 따른 드럼 수위 응답곡선

Fig. 9 The PI Control Simulation of the Drum Level

드럼 수위 제어 시뮬레이션 결과는 그림9와 같다. 드럼 수위를 측정해 Feed Water Valve를 제어한 Case 1의 경우 2요소, 3요소 제어보다 Overshoot이 큰 걸 알 수 있다. Case 2, 3, 4의 경우는 증발량과 드럼 수위를 측정한 2요소 제어로 제어 게인 값은 그대로 두고 드럼의 수위변화 비례정수의 값을 0.8, 1, 1.2로 변화 시켜 실험

하였다. 그결과 수위변화 비례정수값이 클수록 Overshoot) 큰 걸 알 수 있었다.

Case5의 경우는 3요소 제어로 2요소제어에 급수량을 측정하여 보상하였다. 그 결과 1, 2요소 제어보다 응답특성이 좋음을 알 수 있었다.

### 3.3 주증기 압력제어 시뮬레이션

압력제어계는 보일러의 시정수  $T_b$ 와 연소의 시정수  $T_f$ 의 비에 따라 제어성이 크게 달라진다. 증기유량과 연료량 변화 및 보일러 시정수에 따른 주증기 압력 제어 특성은 그림 10과 같이 구성하였다.

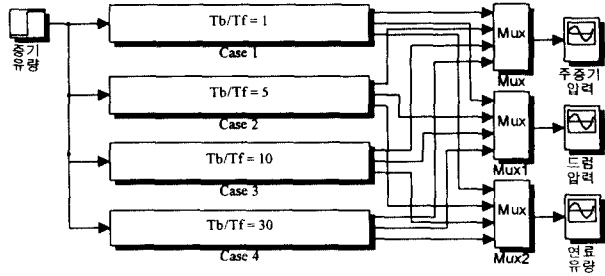


그림 10 증기량 변화에 따른 압력 제어

Fig. 10 The control of main steam pressure.

이 실험의 사용된 시정수는 Case 1의 경우 보일러 시정수 ( $T_b$ ) 와 연소 시정수 ( $T_f$ )의 비가 1이고, Case 2는 5, case 3는 10, Case 4는 30이다. 각 경우에 따른 증기량 변화에 의한 출력의 경향을 분석한 결과 그림 11, 12, 13에서처럼 보일러 시정수가 클수록 제어성이 좋게 나타남을 알 수 있다.

과열기를 가지고 있는 보일러의 경우  $T_b/T_f$ 가 10보다 큰경우에 최대압력 편차는 증기압력 강하계수에 의해 결정된다.

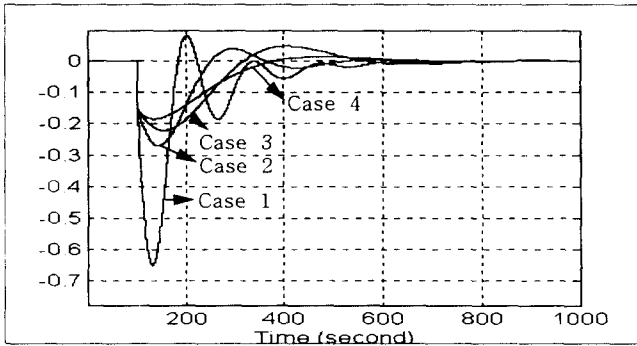


그림 11 주증기 압력 응답 곡선

Fig. 11 The simulation of main steam pressure

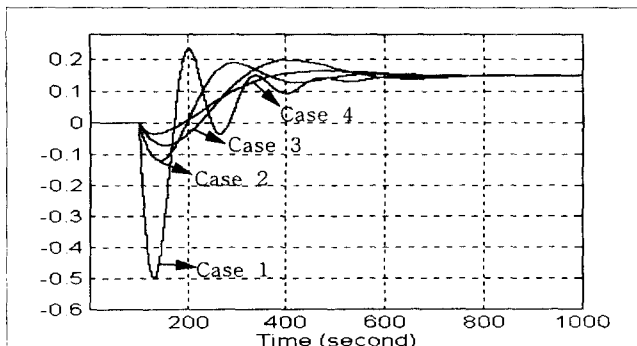


그림 12 드럼 압력 응답 곡선

Fig. 12 The simulation of the drum pressure

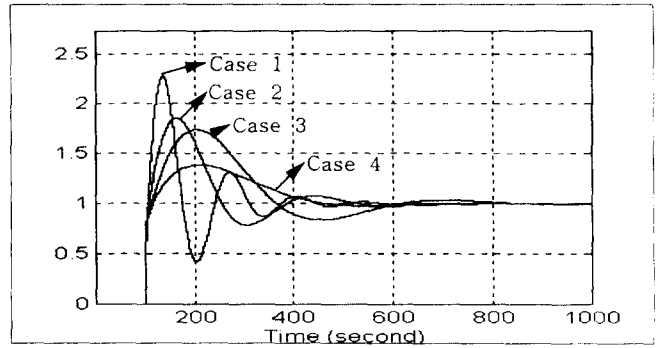


그림 13 연료 유량 응답 곡선

Fig. 13 The simulation of the fuel flow

## 4. 결론

각각의 입력값에 따른 출력의 경향을 분석한 결과 실제 드럼형 보일러의 추이와 같이 나타남을 알 수 있었다. 또한, 실제 운전 데이터를 측정하여 정확한 시정수와 계수를 사용하면 특정 보일러의 동특성을 시뮬레이션할 수 있을 뿐아니라 제어기의 구성에 따른 응답특성을 얻을 수 있다.

각 모듈별 구성 및 제어실험을 통하여 제어기를 구성함으로써, 시뮬레이션을 통한 제어 실험을 통하여 주증기 온도제어계, 압력제어계, 그리고 드럼내 수위 제어계에 대한 각 제어요소별 안정된 PID-제어기 형태를 구성할 수 있다.

향후 정밀한 시뮬레이션 결과를 얻기 위해서 보다 많은 변수에 대한 영향을 고려해야 한다.

## 참고문헌

- [1] SAM G DUKELOW, "The Control of Boilers", 2nd Edition, Instrument Society of America section 4, 10, 13
- [2] DAVID LINDSLEY, "BOILER CONTROL SYSTEMS", chapter 2
- [3] Babcock & Wilcox, "Steam / its generation and use", 12-1 to 12-20, 14-1 to 14-10, 33-1 to 33-28
- [4] 박정, 고부하에서의 보일러 플랜트 부하변동 묘사를 위한 프로세스 모델 개발 적용, 에너지공학회지 제6권 제1호 pp.41-51 (1997)