

드럼형 보일러 시스템의 분산 적응 제어

최영문, 조철형, 공재섭, 서진현
서울대학교 전기공학과

Decentralized Adaptive Control of Drum Type Boiler System

Youngmoon Choi, Cheolhyeong Jo, Jaesop Kong, Jinheon Seo
Dept. Electrical Eng. Seoul Nat'l University

ABSTRACT

In this paper, the decentralized adaptive control scheme^[1] is applied to the control of drum type boiler system. Because the scheme requires the stability of interconnections, static feedback is used to satisfy the requirement of the scheme. From a priori knowledge of the system, system parameter estimates are bounded to prevent parameter drifting. Computer simulation shows that the decentralized adaptive control is suitable for the control of drum type boiler system and robust in the presence of disturbance.

1. 서론

발전소 보일러 시스템의 제어는 크게 수위제어, 온도제어, 연소제어 3가지로 나누어 생각할 수 있다. 이 전체 시스템을 제어하는 방식에는 집중 제어 방식과 분산제어 방식이 있다. 위의 세가지 제어 시스템중 온도제어는 시스템의 동특성이 매우 빠르고 다른 시스템과의 상호연관성이 무시할 수 있을 정도로 작기 때문에 따로 분리해서 생각할 수 있다. 따라서, 온도제어 부분이 생략된 모형에 대해 수위제어기와 연소제어기를 구성하겠다.

발전소 보일러와 같은 대형 시스템(large scale system)의 일반적인 특성은 다수의 부시스템(subsystem)이 다른 부시스템과 유리된 자체의 입력과 출력을 이용하여 개별적으로 운용되는 동시에, 부시스템간의 상태 및 출력변수의 상호연관을 통하여 각각의 부시스템의 독립적인 운용에 상호간섭하고 있다는 점이다. 다수의 부시스템이 상호연관(interconnected)된 대형시스템의 제어에는 부시스템 상호연관의 모형화에서 야기되는 모형의 추가적인 불확실성과 상호간섭에서 발생하는 제반 문제를 고려하여야 한다. 이와 같은 부시스템 간의 상호연관의 불확실성에서 결과적으로 유발되는 여러 문제점을 해결하기 위해서는 통합 제어 방식보다는, 각각의 부시스템이 독자적인 성능 평가기준과 국부적으로 주어지는 정보에 의거하여 독립적으로 제어되는 분산 제어(decentralized control)기법을 적용하는 것이 효과적이다. 따라서, 본논문에서는 물리적으로 동인한 특성을 지닌 부시스템 별로 루우프제어를 실시하는 분산제어 방식을 채택한다.

또한, 보일러 시스템에는 사량의 부정확성, 설비의 노후화 및 주변환경의 변화 등에 기인한 모형계수의 변화에 의해 구조적 불확실성(structured uncertainty)이 산중하게 된다. 따라서, 시스템의 동작 중에 인가된 입력과 그에 대한 시스템의 응답 정보를 사용하여 제어기의 구조 및 변수를 스스로 조정함으로써 동작 환경에 적용할 수 있는 제어기의 도입이 필요하게 되고, 분산 적응 제어(decentralized adaptive control)시스템이 이와 같은 요구에 부응하게 된다.

수위제어에 있어서는 드럼의 수축(shrink)과 팽창(swelling)현상^[2]이 나타나는데, 이는 모형의 선형화시에 우반평면 영점으로 나타나며, 따라서 전체시스템의 특성은 비최소위상(nonminimum phase)이 된다. 비최소위상 시스템의 경우 모형기준 적응 제어(model reference adaptive control)기법을 사용하기 어렵고, 우반평면 영점이 원점에서 멀리 떨어져 있는 경우 이 문제를 해결한 모형기준 적응제어 기법^{[2],[3]}이 발표되기는 했지만, 드럼 모형에서 나타나는 영점은 원점에 매우 가깝기 때문에 위의 기법을 사용할 수 없다. 따라서, 본 논문에서는 위에서 언급한 상호연관성의 불확실성이 고려되고, 원점에서 가까운 영점이 문제가 되

지않는 참고문헌[1]에서 제안한 제어법칙과 적응법칙을 적용한다.

2. 수위제어를 위한 드럼-보일러 모형

드럼-보일러의 동특성을 나타내는 여러 비선형 모형 중에서 Bell과 Astrom이 제시한 간략화된 모형 등은 실제 드럼-보일러의 동특성을 좁은 운전범위에서만 묘사해 준다. 본 논문에서는 넓은 범위에서 보일러의 동특성을 잘 묘사하는 500MW 정격의 보령화력 1호기 모형^[4]을 사용하겠다.

드럼-보일러 모형은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & 0 \\ a_{31} & 0 & a_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{dr} \\ V_w \\ X_r \\ q_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned} b_1 &= h_c \rho_s q_{fw} + (\rho_w - \rho_s)(Q - (h_w - h_{fw})q_{fw}) - h_c \rho_w q_s \\ b_2 &= q_{fw} - X_r q_r \\ b_3 &= Q - (h_w - h_s)q_{fw} - h_c X_r q_r \\ b_4 &= K_1 P_{dr} \sqrt{P_{dr}} + K_2 \sqrt{P_{dr}} q_s \end{aligned}$$

$$a_{11} = V_w(\rho_w^2 - \rho_w \rho_s) \frac{\partial h_w}{\partial P_{dr}} + V_{st}(h_c \rho_w \frac{\partial \rho_s}{\partial P_{dr}})$$

$$\begin{aligned} a_{21} &= V_r a_m \frac{\partial \rho_s}{\partial P_{dr}} - V_r(\rho_w - \rho_s) \frac{\partial a_m}{\partial P_{dr}} \\ a_{22} &= \rho_w \end{aligned}$$

$$a_{23} = -V_r(\rho_w - \rho_s) \frac{\partial a_m}{\partial X_r}$$

$$a_{31} = V_r h_c (a_m \frac{\partial \rho_s}{\partial P_{dr}} + \rho_s \frac{\partial a_m}{\partial P_{dr}}) + V_w \rho_w \frac{\partial h_s}{\partial P_{dr}}$$

$$a_{33} = V_r h_c \rho_s \frac{\partial a_m}{\partial X_r}$$

$$a_{44} = \tau$$

$$a_m = \frac{\rho_w}{\rho_w - \rho_s} \times \left(1 - \frac{\rho_s}{(\rho_w - \rho_s) X_r} \ln \left(1 + \frac{(\rho_w - \rho_s) X_r}{\rho_s} \right) \right)$$

$$P_{s30} = P_{dr} - \frac{c_1 q_s c_1}{\rho_s}$$

위의 모형에서 P_{dr} , V_w , X_r , q_s 는 상태 변수로서 각각 드럼의 압력[MPa], 드럼내 물의 부피[m³], 상승관 내의 증기질, 그리고 드럼에서 빠져 나가는 증기의 질량 흐름률[Kg/sec]을 나타낸다. 제어 입력으로는 열량 Q [KJ/sec], 급수량 q_{fw} [Kg/sec], 주증기 제어 밸브의 위치 P_{cv} [%]가 있다. 드럼 수위 제어 루우프의 출력은 드럼내 물의 부피 V_w 이고, 연소제어 루우프의 출력은 주증기 압력 P_{s30} [MPa]이다.

위의 모형을 간단히 표시하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A(x)^{-1}b(x,u) = f(x,u) \\ y &= g(x,u) \\ x^T &= [P_{\alpha} \quad V_w \quad X_r \quad q_s] \\ u^T &= [Q \quad P_{\alpha} \quad q_{\omega}] \\ y^T &= [P_{sso} \quad V_w] \end{aligned} \quad (2.2)$$

본 연구에서는 드럼-보일러 정격 출력의 95%를 공칭 동작점으로 선정했으며, 정상 상태 운전 데이터로부터 $x_i^* = 17.75$ [MPa], $x_i^* = u_j^* = 393$ [Kg/sec]를 얻고, 이를 이용하여 $b(x^*, u^*) = 0$ 를 만족하는 정상상태 해의 나머지 부분을 구했다. 그 값은 $x^* = [17.75 \quad 18.5 \quad 0.243457 \quad 393]^T$, $u^* = [486491 \quad 58.3759 \quad 410.95]^T$ 이다.

이외에 정격 출력의 50%, 75%, 95%, 100%, 110%의 동작점도 구하고, 각 동작점에서 모델을 선형화 하여, 적응제어 구성을 위한 선형적 지식으로 활용하였다.

3. 분산 적응 제어기

다음과 같은 상호 연관된 N개의 부시스템으로 이루어진 시스템을 생각한다.

$$y_i = G_{p_i}(s) u_i + \sum_{j=1}^N \Delta_{ij} y_j, \quad i = 1, \dots, N \quad (3.1)$$

여기서 $u_i \in R^1, y_i \in R^1$ 는 각각 i번째 부시스템의 입력과 출력이고, $G_{p_i}(s)$ 는 알지 못하는 i번째 독립된 부시스템의 전달함수이며, $\Delta_{ij}(s)$ 는 j번째 부시스템이 i번째 부시스템에 미치는 영향을 묘사한 항이다.

가정1) $\Delta_{ij}(s), j=1, \dots, N$ 는 strictly proper하고, 알려진 값 $\delta_{\alpha_i} > 0$ 에 대해 $Re[s] \geq -\delta_{\alpha_i}/2$ 에서 해석가능하다.

가정2) $y_{mi}(t)$ 는, 허수축을 포함한 좌반평면에서 근을 갖고 허수축 상에서는 중복된 근을 갖지 않는 q_i 차수의 모닉 다항식 $Q_i(s)$ 에 대해 $Q_i(s)y_{mi}(t) = 0$ 을 만족한다.

다음은 i번째의 부시스템에 대하여 가정을 한다.

$$y_i = G_{p_i}(s) u_i, \quad (3.2)$$

$$G_{p_i}(s) = Z_i(s)/R_i(s)$$

가정3) $R_i(s) = s^{n_i} + \overline{R}_i(s, \theta_{ii}^*)$ 이고, $\overline{R}_i(s, \theta_{ii}^*)$ 는 $n_i - 1$ 차의 s에 대한 다항식이다.

가정4) $Z_i(s) = Z_i(s, \theta_{zi}^*)$ 는 $n_i - 1$ 차보다 작거나 같은 s에 대한 다항식이다.

가정5) $Q_i(s)[s^{n_i} + \overline{R}_i(s, \theta_{ii}^*)]$ 와 $Q_{ii}(s)Z_i(s, \theta_{zi}^*)$ 가 서로 소(coprime)가 되는 q_i 차수의 모닉 Hurwitz 다항식 $Q_{ii}(s)$ 가 존재한다.

다음과 같은 평가함수를 최소화 할 수 있는, 국부 LQ제어기를 설계한다.

$$J_i(\overline{u}_i) = \int_0^{\infty} [e^2_{ii}(t) + \rho_i \overline{u}_i^2(t)] dt \quad (3.3)$$

그러면, LQ제어기의 제어법칙은

$$u_i = -\frac{Q_{ii}(s)}{Q_i(s)} \overline{u}_i \quad (3.4)$$

$$\overline{u}_i = G_i \hat{e}_i$$

$$G_i = -\rho_i^{-1} b_i^T P_i$$

$$\dot{\hat{e}}_i = A_i \hat{e}_i + b_i u_i + k_i (C_i \hat{e}_i - e_{ii})$$

$$A_i^T P_i + P_i A_i - P_i b_i \rho_i^{-1} b_i^T P_i + C_i^T C_i = 0$$

여기서, k_i 는 임의의 안정한 행렬 A_i^* 에 대해 $A_i + k_i C_i = A_i^*$ 를 만족하는 행렬이고, \overline{u}_i 와 e_{ii} 는 다음과 같다.

$$\overline{u}_i = [Q_i(s)/Q_{ii}(s)] u_i, \quad (3.5)$$

$$e_{ii} = \frac{Z_i(s) Q_{ii}(s)}{R_i(s) Q_i(s)} u_i$$

$$e_{ii} \hat{=} y_i - y_{mi}$$

또, (A_i, b_i, C_i) 는 $Z_i(s) Q_{ii}(s)/R_i(s) Q_i(s)$ 의 최저차 상태공간 구현이고

$$\dot{\hat{e}}_i = A_i \hat{e}_i + b_i \overline{u}_i, \quad e_{ii} = C_i \hat{e}_i \quad (3.5)$$

$e_i \in R^{n_i \times q_i}$ 는 상태벡터

$$A_i = \begin{bmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & I_{n_i \times q_i - 1} \\ -\theta_{ii}^* & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix}, \quad b_i = [\theta_{zi}^*], \quad C_i = [1, 0, \dots, 0]$$

를 만족하며 θ_{ii}^* 와 θ_{zi}^* 는 $R_i(s) Q_i(s) - s^{n_i \times q_i}$, $Z_i(s) Q_{ii}(s)$ 의 계수 벡터이다.

위의 계수를 추정하기 위해 다음과 같은 적응법칙을 채택한다.

$$\dot{\theta}_i = \dot{\phi}_i = -\gamma_i \varepsilon_{ii} \xi_i - \gamma_i \rho_i \theta_i, \quad \gamma_i > 0 \quad (3.6)$$

여기서, $\sigma_i(t) \geq 0$ 는 가중치로서 설계해야 할 함수이고, 다음과 같은 스윙칭 σ -수정기법^[2]으로 σ_i 를 구성한다.

$$\sigma_i = \begin{cases} 0 & \text{if } |\theta_i| < M_{\alpha} \\ \sigma_{\alpha} (|\theta_i|/M_{\alpha} - 1) & \text{if } M_{\alpha} \leq |\theta_i| < 2M_{\alpha} \\ \sigma_{\alpha} & \text{if } |\theta_i| \geq 2M_{\alpha} \end{cases} \quad (3.7)$$

여기서 $\sigma_{\alpha} > 0$ 는 상수이고, $M_{\alpha} > |\theta_i^*|$ 는 i번째 국부 플랜트의 계수 벡터 θ_i^* 의 알려진 상한치이다. 또, ε_{ii} 은 정규화된 추정 오차로서,

$$\varepsilon_{ii} = \frac{\theta_i^T \xi_i + y_{fi}}{m_i^2} \quad (3.8)$$

이고, 정규화 신호 m_i 는

$$m_{i1} = -\delta_{\alpha} m_{i1} + u_i^* + \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_j^2, \quad m_{i1}(0) = 0 \quad (3.9)$$

$$m_i^2 = 1 + m_{i1}$$

과 같이 주어지며, 여기서, $\delta_{\alpha} > 0$ 는 $\Lambda_i(s)$ 와 $\Delta_{ij}(s) j=1, \dots, N$ 가 $Re[s] \geq -\delta_{\alpha}/2$ 에서 해석가능이 되도록 선택한다.

나머지 신호들은 모닉 Hurwitz 다항식 $\Lambda_i(s)$ 에 의해 다음과 같이 정의된다.

$$\xi_{i1} = [s^{n_i-1}, s^{n_i-2}, \dots, 1] \frac{1}{\Lambda_i(s)} y_i \quad (3.10)$$

$$\xi_{zi} = -[s^{n_i-1}, s^{n_i-2}, \dots, 1] \frac{1}{\Lambda_i(s)} u_i$$

$$y_{fi} = \frac{s^{n_i}}{\Lambda_i(s)} y_i, \quad \theta_i^* = [\theta_{ii}^{*T}, \theta_{zi}^{*T}]^T, \quad \xi_i = [\xi_{i1}^T, \xi_{zi}^T]^T,$$

$$\eta_i = \frac{R_i(s)}{\Lambda_i(s)} \sum_{j=1}^N \Delta_{ij}(s) y_j$$

4. 드럼-보일러모형에 대한 분산적응 제어기 설계

2절에서 주어진 3개의 모형을 분석하면 두개의 부 시스템으로 나눌 수 있음을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} x_1^T &= [P \quad q_s] & x_2^T &= [P \quad V_w \quad X_r \quad q_s] \\ u_1 &= Q & u_2 &= q_{\omega} \\ y_1 &= P_{sso} & y_2 &= V_w \end{aligned} \quad (4.1)$$

(4.1)에 따라 본 논문에서는 $G_{p_1}(s)$ 와 $G_{p_2}(s)$ 를 각각 Q에서 P_{sso} , q_{ω} 에서 V_w 까지의 전달함수로 설정한다. 이때 각 부시스템의 선형화된 모형의 차수는 $n_1 = 2, n_2 = 4$ 가 된다.

한편, P_{sso} 와 V_w 의 제어목적은 일정한 기준 값을 유지하는 것이므로 $Q_1(s) = Q_2(s) = s$ 로 한다. $Q_{ii}(s)$ 는 $s + q_{ii}$ 로 설정했다.

2.1절에서 비선형 드럼-보일러 모형을 선형화했는데, 선형 시스템 (2.3)은 우반평면에 존재하는 극점을 가지고 있고, 상호 연관항과 전체 모형은 극점을 서로 공유한다. 따라서, 가정(2)를 만족하지 못한다. 이 가정을 충족시키기 위해 다음과 같은 거친 출력 피드백 제어기를 이용, 모든 극점이 안정한 영역에 있는 새로운 시스템을 구성한다. 이 새로운 시스템을 선형화 하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \delta \dot{x} &= A \delta x + B (\delta u + K \delta y) \\ &= (A + B K C) \delta x + B \delta u \\ &= \overline{A} \delta x + B \delta u \end{aligned} \quad (4.2)$$

과 같이 표현된다.

이때, \overline{A} 가 안정한 행렬이 되도록 다음과 같은 K를 선택했다.

$$K = \begin{bmatrix} -100000 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -50 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

이 K 를 각 동작점에 적용해보면, 모든 동작점에서 선형화된 모델을 안정화 시킨다(표4.1). 또한 비선형 모형도 국부적으로 안정하게 된다. 따라서, 거친 출력 되먹임 제어가 붙은 새로운 시스템은 가정(2)를 만족 시킨다. 각 동작점에서의 계수의 값과 극점의 위치를 아래 표에 정리하였다.

동작점	50%	95%	110%
a1	0.03963627	0.03886757	0.03769040
	0.00039181	0.00384479	0.00037326
b1	0.02009295	0.02203505	0.0225320
	0.00032801	0.00034810	0.00035007
a2	0.19450609	0.30863860	0.32101607
	0.02637526	0.04742826	0.05093887
	0.00079411	0.00140889	0.00149381
b2	0.00000708	0.00001664	0.00001326
	-0.00378526	-0.00416236	-0.00433471
	0.01894956	0.03534746	0.03812809
	0.00070244	0.00125118	0.00133091
극점의 실수부분	0.00000680	0.00001213	0.00001272
	-0.07902115	-0.13675621	-0.14332940
	-0.07902115	-0.13675621	-0.14332940
	-0.01823189	-0.01756308	-0.01717862
	-0.01823189	-0.01756308	-0.01717862

[표 4.1]

여기서, a_i, b_i 는 각 부시스템의 \bar{A}_i 와 B_i 에 대해 다음을 만족한다.

$$\bar{A}_i = \begin{bmatrix} -a_i & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, B_i = \{b_i\} \quad (4.4)$$

3점의 적용법칙 (3.6)만으로는 충분여기 조건이 만족되지 않는 경우, 계수들의 유동이 일어 날 수 있다. 이를 방지하기 위하여, 시스템에 대한 선형적 지식으로부터 각 계수들의 상하한을 주었다.

표 4.1에 나타난 결과를 이용하여 계수들의 크기를 다음과 같이 제한하였다.

	최소값	최대값
a1	0.001	0.1
	0.00009	0.0006
b1	0.009	0.07
	0.00005	0.0009
a2	0.09	0.9
	0.009	0.09
	0.0001	0.004
	0.000001	0.00005
b2	-0.009	-0.001
	0.009	0.05
	0.0003	0.000002
	0.03	0.00005

[표 4.2]

표 4.1의 계수의 값과 극점의 실수부의 크기를 이용하여 M_{0i}, δ_{0i} 의 값을 설정하였다.

$$M_{01} = 0.05 \quad M_{02} = 0.4$$

$$\delta_{01} = 0.01 \quad \delta_{02} = 0.015$$

$\Lambda_i(s)$ 는 다음과 같이 설정 하였다.

$$\Lambda_1(s) = (s+0.9)^2, \quad \Lambda_2(s) = (s+0.9)^4$$

A_i^* 는 특성 다항식이 다음과 같이 되도록 설정하였다

$$\det(sI - A_1^*) = (s+0.09)^3,$$

$$\det(sI - A_2^*) = (s+0.2)^5$$

평가 함수에서 입력 가중치는

$$p_1 = 0.07, \quad p_2 = 5 \times 10^{-8}$$

로, $Q_{11}(s)$ 의 근은

$$q_{11} = -0.04, \quad q_{12} = -0.03$$

로 설정했다.

5.시뮬레이션 결과

시뮬레이션은, 초기 1분 동안은 PID제어기로 제어하여 계수 적응만을 하고, 1분후 부터 분산 적용제어기로 교체한후, 4분후 P_{ω} 벨브의 20%를 달는 계단과 외란을 주었다. 결과를 보면 1분

후 제어 입력이 교환 될때 약간의 진동이 보이고, 외란에 대해서 적절한 제어능력을 보여 준다.

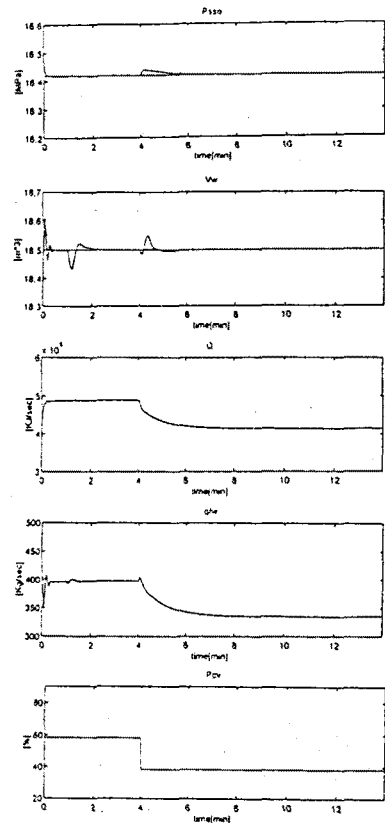


그림 1. P_{01} 가 외란으로 작용했을 때의 입력과 출력

6. 결론 및 추후과제

발전소 드림-보일러 모형에 대한 분석을 통하여 얻은 지식으로, 시스템을 안정화시킬 수 있는 거친 출력 되먹임 제어를 구성하여 미리 시스템을 안정시키고, 안정화된 시스템에 대하여 분산 적용 제어기를 적용하여 적응성과 강인성을 향상시켰다. 이 제어기가 왜란에 강인한 특성을 가짐을 시뮬레이션을 통하여 보였다.

추후로, 이 분산 적용 제어기가 전체 동작점에서 안정성을 보장해 줄 수 있는지에 대한 연구가 필요하다. 또한, 본 제어기의 특성상 많은 계산량이 필요하므로, 계산량을 줄일 수 있는 알고리즘의 연구가 필요하다.

7.참고문헌

- [1]A. Datta and P. Ioannou, "Decentralized Indirect Adaptive Control of Interconnected Systems," I.J. of Adaptive Control and Signal Processing, pp 259-281, April 1991.
- [2]P.A. Ioannou and K.S. Tsakalis, "A Robust Direct Adaptive Controller," IEEE Trans. Auto. Control, vol. AC-31, 1986.
- [3]P. Ioannou and J. Sun, "Theory and Design of Robust Direct and Indirect Adaptive Control Schemes," I.J.C., vol. 47, pp 775-813, 1988.
- [4]B.D.O. Anderson, "Second Order Convergent Algorithms for the Steady State Riccati Equation," I.J.C., vol. 23, pp 295-306, 1978.
- [5]K.J. Astrom and B. Wittenmark, Adaptive Control, Addison Wesley, 1989.
- [6]H. Butler, Model Reference Adaptive Control from Theory to Practice, Prentice Hall, 1992.
- [7]B.D.O. Anderson and J.B. Moore, Optimal Control Linear Quadratic Methods, Prentice Hall, 1990.
- [8]한국전력공사 기술연구원, 보일러 계수 추정에 의한 최적 보일러 제어기 개발(1), 1993.