

보일러를 위한 적응 제어기 설계

Design of Adaptive Controllers for the Boiler System

*박 태 건, 류 지 수, 최 경 영, 이 기 상

한국대학교 전기공학과(Tel:+82-2-709-2581; Fax:+82-2-795-8771; E-mail:taegeon@nuri.net)

Abstracts In this paper we propose direct and indirect adaptive controllers for a nonlinear multivariable steam generating unit(200MW). In the direct adaptive scheme the estimation of the controller parameter are achieved from tracking error, while in the indirect approach the unknown parameter of the boiler system is estimated by the Hopfield network-based identifier. The performance of two proposed adaptive controllers is shown through simulations.

Keywords Boiler System, Input Output Linearization, Direct Adaptive Control, InDirect Adaptive Control, Hopfield Network

1. 서론

급속한 산업 발전과 더불어 에너지의 소비가 점증하고 있어 화력이나 원자력 발전소 등에서 사용되는 산업용 보일러는 그 중요성을 더하고 있다. 국내외의 화력 발전소에서 일반적으로 많이 사용되는 드럼형 보일러에서 드럼은 절탄기(economizer)로 부터 공급받은 물을 수증기로 바꾸고 물과 수증기를 분리하여 다음단의 과열기(superheater)로 보내주는 역할을 한다. 드럼수벽(waterwall)은 공급 받은 열량에 의한 밀도차에 의해 하강관(downcommer)의 물을 상승관(riser)으로 끌어 올리면서 수증기로 바꾸어 주며, 이러한 과정을 통해 드럼내의 물은 하강관과 상승관을 순환하게 된다. 상승관을 통해 드럼의 상층부로 모인 수증기는 과열기를 거쳐 제어밸브에 의해 터빈을 돌리고 터빈의 움직임에 의해 발전소의 출력이 결정된다. 발전소의 안정된 전력 공급을 위해 드럼의 증기압, 드럼 수위, 터빈으로 공급되는 증기량이 효과적으로 제어되어야 하며, 이들을 제어할 수 있는 제어 입력으로는 일반적으로 보일러에 공급되는 연료량, 터빈 밸브의 위치, 급수량이 사용된다. 이와 같이 여러 입출력 변수를 갖는 드럼형 보일러의 동적 특성은 계통 입출력 변수들이 상호 결합되어 있어 비선형적이다. 최근까지 연구된 대부분의 보일러 제어기들은 보일러시스템의 여러 출력들을 동시에 제어하기 위하여 다변수 제어 이론에 근거하여 설계되었다. 그러나 대부분의 제어기들은 동작점 부근에서 선형화된 모델에 기초하여 설계되므로 동작점이 변화되거나, 큰 모델링 오차 또는 외란으로 인하여 만족할 만한 제어 성능을 얻을 수 없다. Ray는 감결합 이론(decoupling control theory)을 이용한 보일러 제어기를 제안하여 200MW급 화력 발전기용 보일러에 적용하여 그 유용성을 보인 바 있다. 그러나 Ray가 사용한 제어기는 입출력 변환 선형화 기법에 의해 감결합화하는 내부제어기와 감결합화된 계통을 제어하기 위한 외곽 루프의 퍼지 제어기로 구성되어 있다. 따라서 파라미터 변동, 동작점의 변화 등 운전 환경이 변동될 수 있는 실제 상황에서, 입출력 선형화 기법의 적용만으로는 계통의 비선형성의 완전한 제거가 불가능하여 감결합성이 깨어짐으로 인해 제어 성능이 저하될 수 있다[5]. 본 논문에서는 파라미터의 변동 등과 같은 운전 환경의 변화하에서도 강인성이 보장될 수 있는 보일러 계통을 위한 직접 및 간접 적응 제어 기법을 제안하고 시뮬레이션을 통해서 그 유용성을 보인다. 직접 적응 제어 기법에서는 기준 모델과 실제 계통과의 편차 방정식으로부터 제어기 파라미터 추정식이 유도되며, 간접 적응 제어 기법에서는 Hopfield 신경망에 근거한 파라미터 추정기를 이용하여 보일러 계통의 미지 파라미터를 추정하고 확정적 등가 제어기(certainty equivalence controller)에 의해 보일러에 투입될 제어 입력을 얻는다.

다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 제어 대상 보일러 계통의 모델인 Ray와 Majumder에 의해 알려진 200MW급 화력 발전기용 보일러의 수학적 모델을 기술한다. 3장에서는 2장에 기술된 보일러 계통을 제어하기 위한 적응 입출력 선형화 기법을 기술하고 4장에서는 직접 적응 입출력 선형화 제어를 위한 보일러 제어기의 파라미터 추정 기법을 개발하고 5장에서는 간접 적응 입출력 선형화 제어를 위한 Hopfield 신경망에 의한 보일러 계통의 미지 파라미터 추정 기법을 제안한다. 마지막으로 6장에서는 본 논문의 결론에 대해 기술한다.

2. 보일러 모델

본 논문에서는 보일러 계통의 동특성을 나타내는 비선형 모델들 [1-3] 중에서 Ray 등에 의하여 신뢰도가 입증된 200MW급 화력 발전기용 보일러 시스템의 동특성 모델을 채택하였다. 보일러를 포함한 증기 발생 장치의 개략적인 구조는 그림 1과 같고, 동특성 방정식은 (1)과 같이 비선형 미분 방정식의 형태로 주어진다.

$$\begin{aligned} \frac{dP}{dt} &= -a_1 \cdot S \cdot P^{1/8} + a_2 \cdot P_F - a_3 \cdot F_w + a_4 \cdot L + a_5 \cdot T_E \\ \frac{dS}{dt} &= 10 \cdot C_r \cdot P^{1/2} - a_6 \cdot S \\ \frac{dL}{dt} &= a_7 \cdot F_w + a_8 \cdot P_F + a_9 \cdot C_r - a_{10} \cdot P^2 - a_{11} \cdot L \\ &\quad - a_{12} \cdot L^2 - a_{13} \cdot S \end{aligned} \quad (1)$$

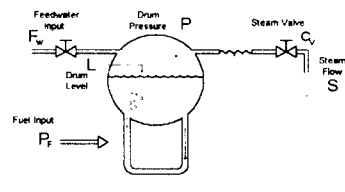


그림 1 200MW 증기 발생 장치 구조

Fig. 1 Schematic representation of 200MW steam generator

여기서 P , S , L 은 제어될 계통의 출력들로서, 각각 드럼증기압(kg/cm²), 터빈으로 공급되는 증기량(kg/s), 드럼의 수위(cm)를 나타내며, P_F , C_r , F_w 는 제어 입력들로서 각각 공급되는 연료량(kg/s), 터빈으로 유입되는 증기량을 조절하는 터빈 밸브의 위치, 급수량(kg/s)

을 의미한다. 또한 T_E 는 급수의 온도(°C)를 나타내며 일반적으로 급수 온도 T_E 는 예측할 수 없는 외란이다. 따라서 (2)를 정의하면 (1)을 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$e_a = T_E - T_{EN} \quad (2)$$

$$\dot{x} = f(x) + g_a u_a + g_b(x) u_b + g_c u_c + e_a f_1 \quad (3)$$

(3)에서, 계통의 상태 변수 $x = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T = [P \ S \ L]^T$ 으로 정의되며, 계통의 입력 변수 $u = [u_a \ u_b \ u_c]^T = [P_F \ C_v \ F_w]^T$ 이고, 계통의 출력 변수 $y = [y_1 \ y_2 \ y_3]^T = [P \ S \ L]^T$ 이며, $f(x)$, g_a , $g_b(x)$, g_c , f_1 은 (4)와 같다.

$$f(x) = \begin{bmatrix} -a_1 x_2 x_1^{0.125} + a_4 x_3 + a_5 T_{EN} \\ -a_6 x_2 \\ -a_{10} x_1^2 - a_{13} x_2 - a_{11} x_3 - a_{12} x_3^2 \end{bmatrix}, \quad g_a = \begin{bmatrix} a_2 \\ 0 \\ a_8 \end{bmatrix}$$

$$g_b(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ 10x_1^{0.5} \\ a_9 \end{bmatrix}, \quad g_c = \begin{bmatrix} -a_3 \\ 0 \\ a_7 \end{bmatrix}, \quad f_1 = \begin{bmatrix} a_5 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

본 논문에서는 시스템이 60% MCR(maximum continuous rating)하에서 동작된다고 가정하였으며, 동작 조건 및 이 조건에서 구해진 계통 공칭 파라미터들은 각각 표 1, 표 2와 같다.

표 1 60% MCR 동작 조건
Table 1 Operating condition at 60% MCR

| | 기호 | 동작점 |
|-----------------|-------|--------------------------|
| 드럼 증기압 | F | 175.8 kg/cm ² |
| 터빈으로 공급되는 증기의 양 | S | 135.0 kg/s |
| 드럼의 수위 | L | 64.0 cm |
| 공급되는 연료의 양 | P_F | 38.58 kg/s |
| 유출 증기량 조절밸브의 위치 | C_v | 0.8 |
| 급수량 | F_w | 190.96 kg/s |

표 2 공칭 파라미터 값
Table 2 Values of nominal parameters

| 파라미터 | 공칭값 | 파라미터 | 공칭값 |
|-------|----------|----------|----------|
| a_1 | 1.930E-3 | a_8 | 2.000E-3 |
| a_2 | 1.452E-2 | a_9 | 4.630E-1 |
| a_3 | 7.360E-4 | a_{10} | 6.000E-6 |
| a_4 | 1.210E-3 | a_{11} | 9.140E-3 |
| a_5 | 1.760E-4 | a_{12} | 8.200E-5 |
| a_6 | 7.857E-1 | a_{13} | 7.328E-3 |
| a_7 | 8.630E-3 | T_{EN} | 288 |

보일러의 제어 입력들은 (5)와 같이 제한되는 것으로 가정한다.
 $P_{Fmin} \leq P_F \leq P_{Fmax}$, $C_{vmin} \leq C_v \leq C_{vmax}$, $F_{wmin} \leq F_w \leq F_{wmax}$ (5)

3. 입출력 선형화에 의한 확정적 등가 제어기

(4)로 표현된 비선형 계통에 입출력 선형화 기법을 적용하기 위하여 다음과 같은 좌표 변환을 정의한다.

$$z_1 = \phi_1(x) = y_1, \quad z_2 = \phi_2(x) = y_2, \quad z_3 = \phi_3(x) = y_3 \quad (6)$$

$L_{g_a} \phi_1 = 0$, $L_{g_b} \phi_2 = 0$, $L_{g_c} \phi_2 = 0$, $L_{f_1} \phi_2 = 0$, $L_{f_1} \phi_3 = 0$ 이므로 (6)의 z 좌표계에서 보일러 계통의 동특성은 (7)처럼 표현된다.

$$\dot{z}_1 = L_f \phi_1 + L_{g_a} \phi_1 u_a + L_{g_c} \phi_1 u_c + e_a L_f \phi_1$$

$$\dot{z}_2 = L_f \phi_2 + L_{g_b} \phi_2 u_b, \quad \dot{z}_3 = L_f \phi_3 + L_{g_c} \phi_3 u_a + L_{g_b} \phi_3 u_b + L_{g_c} \phi_3 u_c \quad (7)$$

(7)에서

$$L_{g_a} \phi_1 = a_2, \quad L_{g_c} \phi_1 = -a_3, \quad L_{f_1} \phi_1 = a_5,$$

$$L_f \phi_1 = -a_1 x_2 x_1^{0.125} + a_4 x_3 + a_5 T_{EN}, \quad L_{g_b} \phi_2 = -a_6 x_2, \quad L_{g_c} \phi_2 = 10 x_1^{0.5},$$

$$L_f \phi_3 = -a_{10} x_1^2 - a_{13} x_2 - a_{11} x_3 - a_{12} x_3^2$$

$$L_{g_c} \phi_3 = a_8, \quad L_{g_b} \phi_3 = a_9, \quad L_{g_c} \phi_3 = a_7.$$

따라서 (7)로 부터 (8)로 표현되는 제어 입력을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = D^{-1} \begin{bmatrix} -L_f \phi_1 - \hat{e}_a L_{f_1} \phi_1 + V_a \\ -L_f \phi_2 + V_b \\ -L_f \phi_3 + V_c \end{bmatrix} \quad (8)$$

(8)에서

$$D = \begin{bmatrix} L_{g_a} \phi_1 & 0 & L_{g_c} \phi_1 \\ 0 & L_{g_b} \phi_2 & 0 \\ L_{g_c} \phi_3 & L_{g_b} \phi_3 & L_{g_c} \phi_3 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$V_a = -K_a z_1 + V_{aref}, \quad V_b = -K_b z_2 + V_{bref}, \quad V_c = -K_c z_3 + V_{cref} \quad (10)$$

$$V_{aref} = K_a x_{1ref} + \dot{x}_{1ref}, \quad V_{bref} = K_b x_{2ref} + \dot{x}_{2ref}, \quad V_{cref} = K_c x_{3ref} + \dot{x}_{3ref} \quad (11)$$

(8)에서 $\hat{e}_a = \hat{T}_E - T_{EN}$, 즉, $\hat{T}_E = \hat{e}_a + T_{EN}$ 이며, (9)에서 $\det(D) = 10x_1^{0.5}(a_2 a_7 + a_3 a_8)$ 이므로 $x_1 = 0$ 일 때 제어 입력에서 특이점(singularity)이 발생한다. 보일러 가동중에는 드럼의 증기압 $x_1 \neq 0$ 이므로 항상 D 의 역행렬이 존재한다.

(10),(11)의 K_a, K_b, K_c 는 (12)가 점근적으로 안정하도록 선정한다.

$$K_a(x_{1ref} - x_1) + (x_{1ref} - \dot{x}_1) = 0, \quad K_a > 0$$

$$K_b(x_{2ref} - x_2) + (x_{2ref} - \dot{x}_2) = 0, \quad K_b > 0 \quad (12)$$

$$K_c(x_{3ref} - x_3) + (x_{3ref} - \dot{x}_3) = 0, \quad K_c > 0$$

4. 직접 적응 제어를 위한 제어기 파라미터 추정

직접 적응 제어를 위하여 추정되어야 할 제어기의 파라미터 \hat{e}_a 는 (7)의 z 와 기준모델간의 추적 편차로 부터 얻어진다. $\dot{z}_1 = V_a$, $\dot{z}_2 = V_b$, $\dot{z}_3 = V_c$ 에 근거하여 (7)의 z 가 추적해야 할 기준모델을 (13)처럼 정의하자.

$$\dot{z}_{1M} = -K_a z_{1M} + V_{aref}, \quad z_{1M}(0) = z_1(0)$$

$$\dot{z}_{2M} = -K_b z_{2M} + V_{bref}, \quad z_{2M}(0) = z_2(0) \quad (13)$$

$$\dot{z}_{3M} = -K_c z_{3M} + V_{cref}, \quad z_{3M}(0) = z_3(0)$$

(7)의 z 와 (13)의 z_M 의 편차를 (14)의 추적 편차로 정의할 수 있다.

$$e = [e_1 \ e_2 \ e_3]^T, \quad e_1 = z_1 - z_{1M}, \quad e_2 = z_2 - z_{2M}, \quad e_3 = z_3 - z_{3M}. \quad (14)$$

따라서 (14)의 편차 동특성은 (15)와 같다.

$$\dot{e} = Ke + W\tilde{e}_a \quad (15)$$

(15)에서

$$K = \begin{bmatrix} -K_a & 0 & 0 \\ 0 & -K_b & 0 \\ 0 & 0 & -K_c \end{bmatrix}, \quad W = \begin{bmatrix} L_{f_1} \phi_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \tilde{e}_a = e_a - \hat{e}_a. \quad (16)$$

또한 대칭 행렬 $Q(>0)$ 을 선정하여 다음 식이 만족되는 대칭 행렬 $R(>0)$ 을 구할 수 있다.

$$K^T R + RK = -Q \quad (17)$$

이제 제어기 파라미터 추정 알고리즘을 얻기 위해 Lyapunov 방정식을 (18)처럼 선정한다.

$$\dot{v} = e^T R e + \tilde{e}_a^T \gamma_a \tilde{e}_a \quad (18)$$

(18)에서 γ_a 는 양수이다. 따라서 (18)의 시간 미분으로 부터 다음의 제어기 파라미터 추정식이 얻어진다.

$$\dot{\hat{e}}_a = -\gamma_a^{-1} W^T R e \quad (19)$$

(19)는 다음 식으로 귀결된다.

$$\dot{\hat{e}}_a = \frac{a_5}{\gamma_a} [R_{11} \ R_{12} \ R_{13}] e \quad (20)$$

$$(20) \text{에서 } R = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix}$$

5. 간접 적응 제어를 위한 계통의 파라미터 추정

간접 적응 제어를 위하여 추정되어야 할 보일러 계통의 파라미터 \hat{e}_a 는 아래 기술되는 Hopfield 신경망에 근거한 파라미터 추정기로 부터 얻어진다.

먼저 비선형 계통의 파라미터 추정을 위하여 (4)의 계통을 (21)의 선형 파라미터화 형태(linear parametrization form)로 전개하여야 한다.

$$x = M \theta \quad (21)$$

여기서 $M(x, u_a, u_b, u_c) = [f(x) \ g_a u_a \ g_b u_b \ g_c u_c \ f_1] \in \mathbb{R}^{3 \times 5}$,

$$\theta = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ e_a]^T \in \mathbb{R}^5$$

추정될 파라미터를 포함한 계통 표현은 (21)로 부터 (22)로 표현될 수 있으며 상태 추정 편차는 (23), 목적함수 E 는 (24)처럼 정의될 수 있다.

$$\hat{x} = M \hat{\theta} \quad (22)$$

$$e = x - \hat{x} \quad (23)$$

$$E = \frac{1}{2(\Delta T)} \int_{t_1}^{t_2} e^T e \, d\tau \quad (24)$$

위에서 ΔT 는 관심있는 시간구간이다.

(22)와 (23)을 (24)에 대입하면 아래와 같다.

$$E = \frac{1}{2(\Delta T)} \int_{t_1}^{t_2} [\hat{x} - M \hat{\theta}]^T [\hat{x} - M \hat{\theta}] \, d\tau$$

$$= \frac{1}{2(\Delta T)} \int_{t_1}^{t_2} [\hat{\theta}^T M^T M \hat{\theta} + 2 \hat{x}^T M \hat{\theta} + \hat{x}^T \hat{x}] \, d\tau$$

위 식에서 우변의 세번째 적분항은 항상 양수로 E 의 변화에 영향을 주지 않으므로 목적함수로 부터 제외시킨다. 따라서 목적함수는 (25)로 표현될 수 있다.

$$E \cong \frac{1}{2(\Delta T)} \int_{t_1}^{t_2} [\hat{\theta}^T M^T M \hat{\theta} + 2 \hat{x}^T M \hat{\theta}] \, d\tau \quad (25)$$

이제 (25)의 목적함수와 Hopfield 신경망의 에너지 함수를 비교함으로써 Hopfield 신경망의 가중치 (T) 및 바이어스 입력 (I)에 대한 식을 유도하는 것으로 된다.

Hopfield 신경망의 i 번째 뉴런에 대한 상태 및 출력 방정식은 (26)과 같다.

$$I_i + \sum_{j=1}^n T_{ij} V_j - U_i R_i = C_i \left(\frac{dU_i}{dt} \right) \quad (26a)$$

$$V_i = H(\lambda_i, U_i), \quad 1 \leq i \leq q \quad (26b)$$

(26)에서, U_i , V_i , I_i 는 각각 i 번째 뉴런의 상태, 출력, 바이어스 입력(bias input)이고 T_{ij} 는 j 번째 뉴런으로부터 i 번째 뉴런으로의 연결 가중치(connection weight), R_i , C_i , λ_i 는 모두 양수이다.

또한 q 는 뉴런의 개수로 추정될 파라미터 $\hat{\theta}$ 의 차원(=5)과 같고 양방향 활성화 함수, $H(\lambda_i, U_i) = G \cdot \tanh(\lambda_i U_i)$, $G_i > 0$,

$$G_i \geq |\theta_{i \max}|$$

Hopfield 신경망의 에너지 함수는 큰 학습률을 가정하면 (27)로 되고

$$E_H = -[(1/2) V^T T V + I V] \quad (27)$$

$H(\lambda_i, U_i)$ 가 단조 증가함수이면 $\frac{dU_i}{dt}$ 와 $\frac{dV_i}{dt}$ 는 같은 부호를 갖는다.

따라서 (28)이 항상 만족된다[4].

$$\frac{dE_H(V)}{dt} < 0 \quad (28)$$

이제 $\hat{\theta}_i = V_i$ 로 놓고 (25)와 (27)을 비교하여 다음의 가중치 행렬 (T)과 바이어스 입력 벡터(I)를 얻을 수 있다.

$$T = -\frac{1}{\Delta T} \int_{t_1}^{t_2} M^T M \, d\tau \quad (29)$$

$$I = -\frac{1}{\Delta T} \int_{t_1}^{t_2} \hat{x}^T M \, d\tau \quad (30)$$

여기서 $T \in \mathbb{R}^{5 \times 5}$, $I \in \mathbb{R}^5$, $\hat{\theta} = V \in \mathbb{R}^5$.

(30)의 바이어스 입력 산출에 요구되는 상태변수의 미분값의 추정을 피하기 위하여 계통 상태를 필터의 입력으로한 2차 필터를 이용할 수 있으며, (26)에서 5개의 파라미터중 $\hat{e}_a = \hat{\theta}_5 = V_5$ 를 얻기위해 오직 1개의 뉴런만 활성화시키면 된다.

6. 시뮬레이션 및 결과 검토

본 논문에서 제안된 보일러용 직접 및 간접 적응 제어기의 성능을 검토하기 위하여 급수온도(T_k)는 실제 계통에서는 예측할 수 없는 값이지만 288°C를 정상값으로 가정하고 268°C($10 \leq t < 50$)와 308°C($50 \leq t \leq 80$) 사이를 변화하는 경우에 대하여 여러 초기 상태에서 시뮬레이션을 하였다. 지면관계상 초기 상태가 정상 상태보다 큰 경우($P=180$, $S=160$, $L=70$)에 대한 제어 응답을 나타내었다. 설정치는 드럼 증기압 175.8 kg/cm², 터빈으로 공급되는 증기의 양 135.0 kg/s, 드럼의 수위 64.0 cm이다. 또한 제어 입력의 제한값은 공급되는 연료의 양(P_f)의 경우 정상상태의 30%-200%, 유출 증기량 조절밸브의 위치(C_v)의 경우 0%-100%, 급수량(F_w)의 경우 50%-150%를 가정하였으며 다음과 같다.

$$P_{f \min} = 11.57 \text{ kg/s}, \quad P_{f \max} = 77.16 \text{ kg/s}, \quad C_{v \min} = 0.0, \quad C_{v \max} = 1.0$$

$$F_{w \min} = 95.48 \text{ kg/s}, \quad F_{w \max} = 286.44 \text{ kg/s}$$

적용 제어기의 이득 K_a, K_b, K_c 는 $K_a=8000$, $K_b=8000$, $K_c=7500$ 으로 선정하였다. 직접 적응 제어기에서 제어기 파라미터 추정을 위하여 아래의 선정된 Q 및 K_a, K_b, K_c 에 의해 구해진 R 그리고 γ_a 는 다음과 같다.

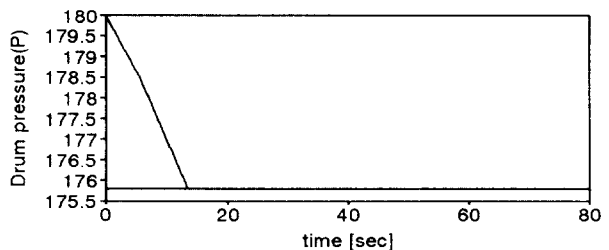
$$Q = \text{diag}\{1, 1, 1\}, \quad R = \text{diag}\{0.0000625, 0.0000625, 0.00006667\}, \quad \frac{1}{\gamma_a} = 8000$$

또한 간접 적응 제어기의 경우 보일러 계통의 파라미터 추정을 위한 Hopfield 신경망의 파라미터는 다음과 같다.

$$G_5 = 288 \times 0.2, \quad \frac{1}{R_5} = 10000, \quad \lambda_5 = 1000000, \quad C_5 = 1$$

위에서 G_5 는 급수온도 T_E 가 정상값으로부터 20%의 변화를 가정하여 선정된 값이다.

간접 적응 제어기의 보일러 계통의 응답 특성을 그림 2에 나타내었다. 지면관계상 직접 적응 제어기의 응답특성을 본 논문에서 나타내지는 않았지만, 직접 적응 제어기의 경우 급수온도 T_E 가 잘 추정되지 않았음에도 불구하고 추적 편차는 영으로 수렴하였다. 반면 간접 적응 제어의 경우 추적 특성 및 파라미터 추정 모두 우수함을 볼 수 있다.



7. 결론

계통의 동특성이 상호 유기적으로 연결되어 비선형적인 특성을 갖는 보일러 계통에 대해 직접 및 간접 적응 제어 기법을 제안하고 시뮬레이션을 통해서 그 유용성을 보였다. 직접 적응 제어 기법에서는 기준 모델과 실제 계통과의 편차 방정식으로 부터 제어기 파라미터 추정식이 유도되며, 간접 적응 제어 기법에서는 Hopfield 신경망에 근거한 파라미터 추정기를 이용하여 보일러 계통의 미지 파라미터를 추정하고 확정적 등가 제어기에 의해 보일러에 투입될 제어 입력을 얻는다. 급수온도가 변화하는 상황에서 보일러 계통의 시뮬레이션을 통하여 제안된 두 제어기의 유용성이 입증되었다.

참고문헌

- [1] D. D. Majumder and K. S. Ray, "Fuzzy Logic Control of a Nonlinear Multivariable Steam Generating Unit using Decoupling Theory," *IEEE Trans. SMC*, vol. 15, no. 4, pp. 539-558, 1985.
- [2] K. J. Aström and K. Eklud, "A Simplified Nonlinear Drum Boiler Model," *Int. J. Contr.*, vol. 22, pp. 739-740, 1975.
- [3] H. K. Nam, *Modeling and Control System Design of a Coal Fired Power Plant*, Ph. D dissertation, The Univ. of Texas at Austin, 1986.
- [4] J. M. Zurada, *Introduction to Artificial Neural Systems*, West Publishing Company, 1992.
- [5] 박귀태, 박태홍, 배상욱, 이기상, "보일러 제어를 위한 퍼지 자기 구성 제어기의 설계," '93 한국 자동제어 학술회의 논문집, pp. 737-741, 1993.

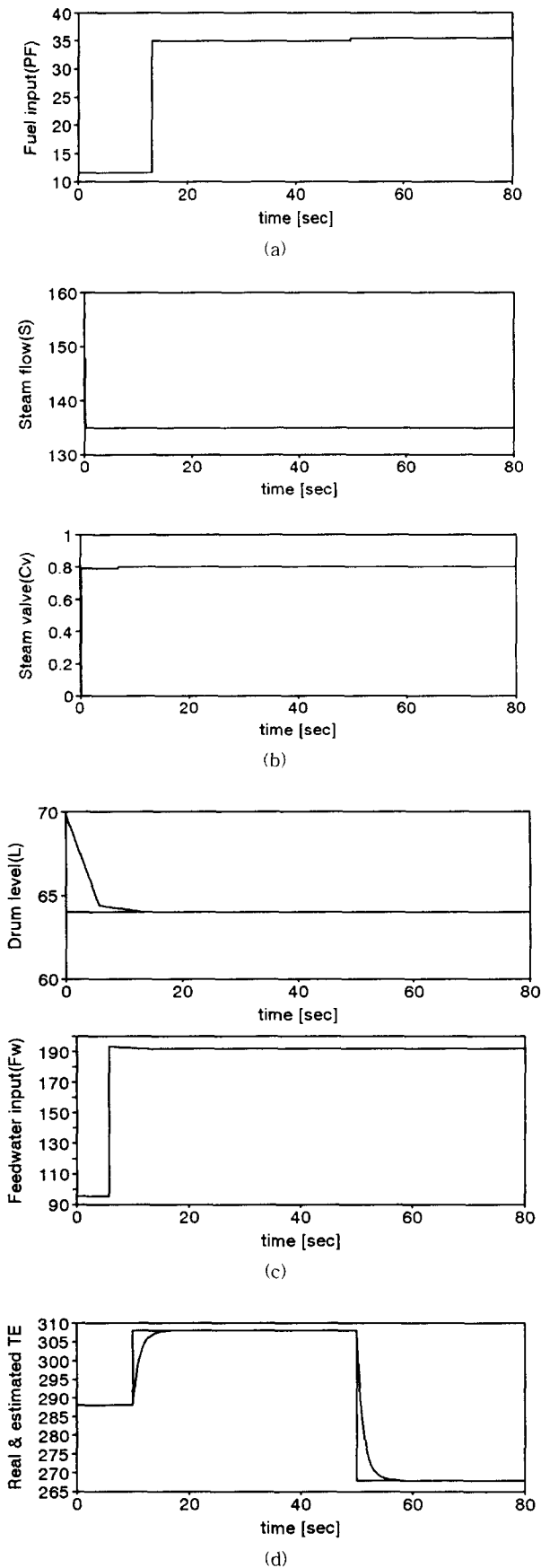


그림 2 간접 적응 제어의 경우

Fig. 2 For the case of indirect adaptive control