

과열기 증기온도 추정을 위한 쌍선형 관측기의 구성

이종명 서진현
 서울대학교 공과대학 전기공학과

Design of bilinear observer for Superheater
 Steam Temperature Estimation

Jong Myeong Lee Jin Heon Seo
 Dept. of Electrical Eng. Seoul National University

Abstract

The problem of constructing an bilinear observer for use in the control of superheater temperature with desuperheater is considered. The distributed heat input into the superheater is usually not available for use in the observer, and hence is treated as an unknown inputs. The bilinear observer theory for system with unknown inputs is exploited and applied to the problem.

1. 서론

발전소에서 과열기(superheater)는 드럼으로부터 유입되는 포화증기의 수분율을 증발시켜 과열증기로 만든다. 이 과정에서 증기온도의 변동에 의한 터빈의 균열을 방지하기 위하여 온도를 일정 범위 이내로 유지시켜야 한다. 이러한 증기온도 유지를 위해 발전소에서는 과열 저감기(desuperheater)를 설치하여 원하는 온도를 얻고 있다.

과열 저감기를 이용해 증기온도를 제어하는 경우 증기온도는 과열 저감기로부터 분사되는 냉각수의 유입량으로 제어되는데 지금까지는 과열기 출구에서 온도를 측정하여 목표치와 비교, PID 제어를 통해 냉각수의 유입량을 결정하는 방식을 취해왔다. 그러나 보다 나은 제어 성능을 얻기 위해 상태궤환(state feedback) 제어방식이 제시되었고, 실제 플랜트 적용이 시도되고 있다.

증기온도를 상태궤환으로 제어할 때 관련된 시스템의 상태는 과열기의 금속관을 따라 분포하는 온도가 되는데 이는 연소가스에 의한 열입력의 분포에 영향을 받는다. 이런 열입력의 분포를 알아내기는 쉽지 않고, 금속관을 따라 분포하는 온도분포는 측정이 용이하지 않기 때문에 상태궤환을 써서 증기온도를 제어하려면 관측기를 구성하여야 한다.

본 논문에서는 과열저감기를 사용하여 과열기 출구의 온도를 제어하는 과열기에 대해 열입력의 분포를 미지입력으로 간주하여 미지입력을 갖는 관측기를 구성하였다. 지금까지 제시된[8,15] 관측기에서 다루지 않았던 과열기로의 증기 유입량이 변할 때를 고려하여 쌍선형 관측기(bilinear observer with unknown inputs)를 구성하였고, 미지입력을 갖는 관측기 구성 조건을 만족시키기 위하여 열입력의 분포를 근사화 시켰다. 관측기의 수렴을 보장하기 위한 조건을 제시하여 그 조건을 만족할 때, 구성된 관측기가 증기 유입량이 변할 때와 미지의 입력이 변할 때에 실제값에 수렴함을 보였다.

2. 미지입력을 갖는 쌍선형 관측기

2.1 관측기의 구성

다음과 같은 미지입력을 갖는 쌍선형 시스템을 생각하자.

$$S_p: \dot{x}(t) = [A_0 + \sum p_i(t)A_i]x(t) + [B_0 + \sum p_j(t)B_j]u(t) + Dv(t)$$

$$y(t) = Cx(t) \tag{2.1}$$

여기서, $x(t) \in R^n$ 는 상태벡터, $u(t) \in R^p$ 는 입력벡터, $v(t) \in R^q$ 는 미지입력 또는 외란을 나타내는 벡터, $y(t) \in R^m$ 는 측정치 벡터이다. 그리고 $A_0, A_i \in R^{n \times n}$, $B_0, B_j \in R^{n \times p}$, $D \in R^{n \times q}$, $C \in R^{m \times n}$ 이고, $p_i(t), p_j(t)$ 는 섭동(perturbation)항으로 다음과 만족한다.

$$p_{i \min} \leq p_i(t) \leq p_{i \max}$$

$$p_{j \min} \leq p_j(t) \leq p_{j \max} \tag{2.2}$$

시스템 S_p 에 대하여 미지의 입력 $v(t)$ 의 영향을 받지 않는 관측기를 구성하기 위해서는

$$\rho(CD) = q, m \geq q \tag{2.3}$$

를 만족해야 한다. [2,3,15] (2.3)이 만족한다는 가정하에 최소차 관측기(minimal order observer) 구성을 위해 먼저, $\rho[CT^TJT]^T = n$ 을 만족하는 $(n-m) \times n$ 행렬 J 를 잡아 상사변환 행렬 $T = [CT^TJT]^T$ 로 시스템 S_p 를 좌표변환하면

$$S_p: \dot{\bar{x}} = \left\{ \begin{array}{c|c} A_{011} & A_{012} \\ \hline A_{021} & A_{022} \end{array} \right\} + \sum p_i \left\{ \begin{array}{c|c} A_{i11} & A_{i12} \\ \hline A_{i21} & A_{i22} \end{array} \right\} \bar{x}$$

$$+ \left\{ \begin{array}{c} B_{01} \\ B_{02} \end{array} \right\} + \sum p_j \left\{ \begin{array}{c} B_{j1} \\ B_{j2} \end{array} \right\} u + \left\{ \begin{array}{c} D_1 \\ D_2 \end{array} \right\} v$$

$$y = [I_m \ 0] \bar{x} \tag{2.4}$$

가 된다.

$\bar{x} = [\bar{x}_1^T \ \bar{x}_2^T]^T$ 라 하면 $y = \bar{x}_1$ 이 되어 m 개의 상태는 출력으로 직접 나타남으로 $(n-m)$ 차의 관측기를 구성하여 상태 \bar{x}_2 를 추정하면 된다. 미지입력을 갖는 $(n-m)$ 차의 관측기는 다음과 같이 구성할 수 있다. [1,2,3,5,6]

$$S_o: \dot{z}(t) = [F_0 + \sum p_i F_i]z(t) + [L_0 + \sum p_i L_i]y(t) + [G_0 + \sum p_j G_j]u(t)$$

$$x_e(t) = z(t) - Fy(t) \tag{2.5}$$

여기서, $z(t) \in R^{n-m}$, $w(t) \in R^{n-m}$, $F_0, F_i \in R^{(n-m) \times (n-m)}$, $L_0, L_i \in R^{(n-m) \times m}$, $G_0, G_j \in R^{(n-m) \times p}$, $E \in R^{(n-m) \times m}$

추정오차 $e(t)$ 를 $e(t) = x_e(t) - \bar{x}_2(t)$ 라 할 때

$$F_0 = EA_{012} + A_{022} \tag{2.6a}$$

$$F_i = EA_{i12} + A_{i22} \tag{2.6b}$$

$$L_0 = (EA_{011} + A_{021}) - F_0 E \tag{2.7a}$$

$$L_i = (EA_{i11} + A_{i21}) - F_i E \tag{2.7b}$$

$$G_0 = EB_{01} + B_{02} \tag{2.8a}$$

$$G_j = EB_{j1} + B_{j2} \tag{2.8b}$$

$$ED_1 + D_2 = 0 \tag{2.9}$$

가 성립되면 오차의 동특성은

$$\dot{e}(t) = (F_0 + \sum p_i F_i)e(t) \tag{2.10}$$

가 된다. 따라서 $\|e(t)\|$ 가 (2.2)식을 만족하는 p_i, p_j 에 대하여 0으로 수렴하면 $x_e(t) \rightarrow \bar{x}_2(t)$ 가 된다.

2.2 관측기의 존재

미지입력을 갖는 쌍선형 관측기 S_o 의 구성은 식(2.6)

~(2.9)을 만족하면서 $x_0(t)$ 가 $x_2(t)$ 로 수렴하도록 행렬 F_0 , F_i , L_0 , L_i , G_0 , G_i , E 를 선정하는 문제가 된다. 행렬 F_0 , F_i 에 대하여 $\|e(t)\|$ 가 0으로 수렴하도록 보장하는 p_i , p_j 의 범위를 구하는 데는 다음의 정리가 유용하다.

[정리 1][4,7]: F_0 가 안정한 행렬일때, 양의 정부호(positive definite)인 대칭행렬 H_0 에 대하여 양의 정부호인 대칭행렬 H_i 를 방정식 $F_0^T H_i + H_i F_0 + Q_i = 0$ 의 해로 정의한다. 만약,

$$\sum |p_i(t)|^2 < \frac{(\sigma_{\min}(Q) - \epsilon)^2}{\sum \sigma_{\max}^2(Q_i)}, \quad \forall t \quad (2.11)$$

가 성립하는 양의 수 ϵ , $\epsilon < \sigma_{\min}(Q)$, 이 존재하면 $\|e(t)\|$ 는 0으로 수렴한다.

<증명> F_0 는 안정한 행렬이므로 양의 정부호인 대칭행렬 Q_0 에 대하여 $F_0^T H_0 + H_0 F_0 + Q_0 = 0$ 을 만족하는 양의 정부호인 대칭행렬 H_0 가 존재한다. $e(t)$ 에 대해 Lyapunov 방정식을 $V(e) = e^T H_0 e$ 라 놓으면 dV/dt 는

$$\begin{aligned} \dot{V}(e) &= e^T [(F_0^T H_0 + H_0 F_0) + \sum p_i (F_i^T H_i + H_i F_i)] e \\ &= -e^T Q_0 e + e^T [\sum p_i (F_i^T H_i + H_i F_i)] e \end{aligned} \quad (2.12)$$

가 되고,

$$\dot{V}(e) \leq -\epsilon \|e\|_2^2 \quad (2.13)$$

를 만족하면 $\|e(t)\|$ 는 0으로 수렴한다. 여기서, $F_i^T H_i + H_i F_i = Q_i$ 라 하면 (2.12), (2.13)으로부터

$$e^T (\sum p_i Q_i) e \leq \epsilon e^T Q_0 e \|e\|_2^2 \quad (2.14)$$

를 만족해야 한다. 또,

$$\begin{aligned} \sigma_{\min}(Q) \|e\|_2^2 &\leq e^T Q_0 e \leq \sigma_{\max} \|e\|_2^2 \\ |e^T (\sum p_i Q_i) e| &\leq \sigma_{\max} (\sum p_i Q_i) \|e\|_2^2 \end{aligned}$$

이므로 다음이 만족되면 (2.14)가 성립된다.

$$\sigma_{\max} (\sum p_i Q_i) \leq \sigma_{\min}(Q) - \epsilon \quad (2.15)$$

그리고

$$\begin{aligned} \sigma_{\max} (\sum p_i Q_i) &\leq \sum (|p_i| \sigma_{\max}(Q_i)) \\ &\leq (\sum |p_i|^2)^{1/2} (\sum \sigma_{\max}^2(Q_i))^{1/2} \end{aligned}$$

이므로 $(\sum |p_i|^2)^{1/2} (\sum \sigma_{\max}^2(Q_i))^{1/2} \leq \sigma_{\min}(Q) - \epsilon$ 이 만족되면 족.

$$\sum |p_i(t)|^2 \leq \frac{(\sigma_{\min}(Q) - \epsilon)^2}{\sum \sigma_{\max}^2(Q_i)}, \quad \forall t$$

이 만족되면 (2.15)가 성립되어 (2.13)를 만족한다. ■

행렬 F_0 가 안정하기 위해서는 식 (2.9)를 만족하는 행렬 E 에 대하여 $E A_{012} + A_{022}$ 의 고유치가 음의 실수부를 가져야 한다. 먼저, $CD = D_1$ 이므로 행렬 E 가 존재하기 위해서는 식 (2.3)을 만족해야 한다. CD 가 (2.3)을 만족한다면 임의의 행렬 K 에 대하여 다음의 일반해가 존재한다.

$$E = -D_2 D_1^{-1} + k(I_m - D_1 D_1^{-1}) \quad (2.16)$$

다음은 만족하는 직교행렬 $U \in R^{m \times m}$ 를 택하면

$$UD_1 = [D_1^T \quad 0]^T \quad (2.17)$$

행렬 D_1 은 $D_1 \in R^{n \times n}$ 가 되고 역행렬이 존재한다. 그리고

$$U A_{012} = \begin{bmatrix} A_{012}^1 \\ A_{012}^2 \end{bmatrix}, \quad K U^T = [K_1 \quad K_2] \quad (2.18)$$

라 놓으면

$$E = [D_2 D_1^{-1} \quad k_2] U \quad (2.19)$$

$$F_0 = (A_{022} - D_2 D_1^{-1} A_{012}^1) + k_2 A_{012}^2 \quad (2.20)$$

이 성립된다. 따라서 $(A_{012}^2, (A_{022} - D_2 D_1^{-1} A_{012}^1))$ 가 가짐 출하면 적당한 k_2 를 택하여 안정한 F_0 를 만들 수 있다.

[정리 2][2]: 시스템 (D, A_0, C) 의 모든 invariant zero[10]가 음의 실수부를 가지면 안정한 행렬 F_0 를 구성할 수 있다.

<증명> 다음을 만족하는 $\lambda \in C$ 가 존재한다면

$$\rho \begin{bmatrix} \lambda I_{n-m} - (A_{022} + D_2 D_1^{-1} A_{012}^1) \\ A_{012}^2 \end{bmatrix} < n-m \quad (2.21)$$

0이 아닌 벡터 x_2 에 대하여 다음이 성립된다.

$$\begin{bmatrix} \lambda I_{n-m} - (A_{022} + D_2 D_1^{-1} A_{012}^1) \\ A_{012}^2 \end{bmatrix} x_2 = 0 \quad (2.22)$$

그러면

$$\begin{bmatrix} \lambda I_{n-m} - A_{022} & D_2 \\ A_{012}^2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2 \\ D_1^{-1} A_{012}^1 x_2 \end{bmatrix} = 0$$

이 되고, 식 (2.17), (2.18)와 $A_{012}^2 x_2 = 0$ 으로부터 $A_{012}^2 x_2 = 0, D_1^{-1} A_{012}^1 x_2 = 0$ 이므로

$$\begin{bmatrix} \lambda I_{n-m} - A_{022} & D_2 \\ -A_{012} & D_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2 \\ D_1^{-1} A_{012}^1 x_2 \end{bmatrix} = 0$$

가 성립된다. $v = D_1^{-1} A_{012}^1 x_2$ 라 하고 $x_1 \in R^m$ 을 0벡터라 하면

$$\begin{bmatrix} \lambda I_m - A_{011} & -A_{012} & D_1 \\ -A_{021} & \lambda I_{n-m} - A_{022} & D_2 \\ I_m & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ v \end{bmatrix} = 0 \quad (2.23)$$

이 되어 다음이 만족된다.

$$\rho \begin{bmatrix} \lambda I_m - A_{011} & -A_{012} & D_1 \\ -A_{021} & \lambda I_{n-m} - A_{022} & D_2 \\ I_m & 0 & 0 \end{bmatrix} < n+m \quad (2.24)$$

따라서

$$\rho \begin{bmatrix} \lambda I - A & D \\ C & 0 \end{bmatrix} < n+m \quad (2.25)$$

이 되므로 λ 는 시스템 (D, A_0, C) 의 invariant zero가 된다. 따라서 모든 invariant zero가 음의 실수부를 가지면 $(A_{012}^2, (A_{022} - D_2 D_1^{-1} A_{012}^1))$ 는 가짐출하여 안정한 행렬 F_0 를 구성할 수 있다. ■

3. 열교환기의 모델링 및 관측기의 구성

3.1 과열기의 모델링[11,14]

일반적으로 열교환기에서는 관외부의 고온의 연소가스(유체 2) 열입력이 급속관을 경유하여 상대적으로 온도가 낮은 증기(유체 1)로 전달되어 증기의 온도를 높임으로써 열교환이 일어난다. 따라서 열교환 시스템의 모델링은 전체적인 에너지 변화에 대한 에너지 보존법칙을 써서 할 수 있다. 시스템을 집중 정수 시스템으로 가정하여 모델링을 할때 먼저 에너지 보존법칙을 쓰면

$$\frac{d}{dt} (V \rho H_0) = W_i H_i - W_o H_o + Q_m \quad (3.1)$$

$$\frac{d}{dt} (M_m C_m T_m) = Q_{2m} - Q_{m1} \quad (3.2)$$

가 된다. 여기서

- V 유체 1의 체적 (m^3)
- ρ 유체 1의 밀도 (kg/m^3)
- T_m 급속관의 온도 ($^{\circ}C$)
- C_m 급속관의 비열 ($kcal/kg^{\circ}C$)
- H_i 관내로 유입되는 유체 1의 엔탈피 ($kcal/kg$)
- H_o 관외로 유출되는 유체 1의 엔탈피 ($kcal/kg$)
- W_i 관내로 유입되는 유체 1의 질량 흐름률 (kg/sec)
- W_o 관외로 유출되는 유체 1의 질량 흐름률 (kg/sec)
- Q_{m1} 급속관에서 유체 1로 전달되는 열량 ($kcal/sec$)
- Q_{2m} 유체 2에서 급속관으로 전달되는 열량 ($kcal/sec$)

이다. 정상 상태에서 유체의 흐름은 정상 흐름(steady flow)이 되어 $W_i = W_o$ 가 성립하고, 과도상태에서는 유체의 속도가 유체내에서의 유속도보다 충분히 작다면 압축성 유체를 비압축성 유체로 근사화 시키는 것이 가능하므로[9,13] $W_i = W_o (dp/dt > 0)$ 라 놓을 수 있다. 발전소에서 과열기내의 증기의 속도는 유속에 비해 매우 낮으므로 위 근사가 가능하다. 관내가

정압이라 가정하면 유체의 엔탈피는 $H=C_p T$ 가 되고, Q_{2m} 과 Q_{m1} 은 전열 면적 A 와 열 전달률 α 에 대하여 다음과 같이 쓸 수 있으므로

$$Q_{2m} = A_2 \alpha_2 m (T_2 - T_m) \quad (3.4)$$

$$Q_{m1} = A_1 \alpha_1 m (T_m - T_1) \quad (3.5)$$

식 (3.1), (3.2)를 다시 정리하면

$$V \rho C_p \frac{dT_1}{dt} = C_p W_i T_i - C_p W_o T_1 + A_1 \alpha_1 m (T_m - T_1) \quad (3.6)$$

$$M_m C_m \frac{dT_m}{dt} = A_2 \alpha_2 m (T_2 - T_m) - A_1 \alpha_1 m (T_m - T_1) \quad (3.7)$$

이상의 방법으로 출구의 증기 온도를 입구에 위치하는 과열저감기(desuperheater)에서 분사되는 저온의 냉각수 유입량으로 조절하는 과열기에 대하여 그림(3.1)과 같이 n 등분하여 각 부분의 증기온도(x_{2i+1} , $i=0,1,\dots,n-1$)와 금속관의 온도(x_{2i} , $i=1,2,\dots,n$)에 대해 방정식을 세우면 냉각수 유입량을 W_d 라 할때 첫번째 부분의 경우

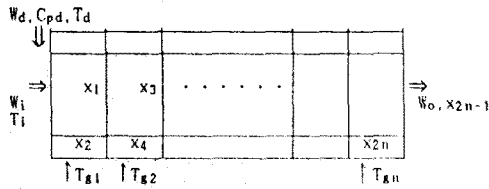


그림 3.1 과열기의 구성

$$\begin{cases} V_s \rho C_p \frac{dx_1}{dt} = C_p T_i W_i - C_p (W_i + W_d) x_1 + A_1 \alpha_{ms} (x_2 - x_1) + C_p d T_d W_d \\ M_m C_m \frac{dx_2}{dt} = A_2 \alpha_{gm} (T_{g1} - x_2) - A_1 \alpha_{ms} (x_2 - x_1) \end{cases} \quad (3.9)$$

가 되고 나머지 부분은 다음과 같다.

$$\begin{cases} V_s \rho C_p \frac{dx_{2n-1}}{dt} = C_p (x_{2n-2} - x_{2n-1}) (W_i + W_d) + A_1 \alpha_{ms} (x_{2n} - x_{2n-1}) \\ M_m C_m \frac{dx_{2n}}{dt} = A_2 \alpha_{gm} (T_{gn} - x_{2n}) - A_1 \alpha_{ms} (x_{2n} - x_{2n-1}) \end{cases} \quad (3.10)$$

$$\begin{cases} V_s \rho C_p \frac{dx_{2n-1}}{dt} = C_p (x_{2n-2} - x_{2n-1}) (W_i + W_d) \\ M_m C_m \frac{dx_{2n}}{dt} = A_2 \alpha_{gm} (T_{gn} - x_{2n}) - A_1 \alpha_{ms} (x_{2n} - x_{2n-1}) \end{cases} \quad (3.11)$$

위식에서,

- T_i 과열기 입구의 증기온도 ($^{\circ}C$)
- T_d 분사되는 냉각수의 온도 ($^{\circ}C$)
- T_g 연소가스의 온도 ($^{\circ}C$)
- C_p 관내 증기의 정압비열 (kcal/kg $^{\circ}C$)
- C_{pd} 분사되는 냉각수의 정압비열 (kcal/kg $^{\circ}C$)
- W_i 과열기로 유입되는 증기의 유량 (kg/sec)
- W_d 분사되는 냉각수의 유량 (kg/sec)
- A_1 과열기 내부의 전열면적 (m^2)
- A_2 과열기 외부의 전열면적 (m^2)
- α_{ms} 금속관에서 증기로의 열전달률 (kcal/ $m^2 sec^{\circ}C$)
- α_{gm} 연소가스에서 금속관으로의 열전달률
- V_s 과열기 각 부분의 체적 (m^3)
- M_m 금속관 각 부분의 질량 (kg)

식 (3.8) ~ (3.11)에 따라 쌍선형 상태방정식을 세우면

$$\dot{x}(t) = [A_0 + \sum p_i A_i] x(t) + [B_0 + \sum p_j B_j] u(t) + Dv(t)$$

$$p_i = (W_i, W_d), p_j = (W_i), u(t) = [T_i, W_d]^T$$

$$v(t) = [T_{g1}, T_{g2}, \dots, T_{gn-1}, T_{gn}]^T$$

이고, W_i 의 공칭점(nominal point)을 W_{in} 이라 하면

$$A_0 = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ a_3 & a_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ a_6 & 0 & a_1 & a_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & a_3 & a_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & a_6 & 0 & a_1 & a_2 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 & 0 & a_6 & 0 & a_1 & a_2 \\ 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_3 & a_4 \end{bmatrix}$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} -a_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ a_5 & 0 & -a_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & a_5 & 0 & -a_5 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 & 0 & a_5 & 0 & -a_5 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = A_1$$

$$B_0 = \begin{bmatrix} b_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ b_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ b_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ d & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & d & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & d \end{bmatrix}$$

여기서,

$$a_1 = \frac{A_2 \alpha_{gm} + C_p W_{in}}{V_s \rho C_p}, a_2 = \frac{A_1 \alpha_{ms}}{V_s \rho C_p}, a_3 = \frac{A_1 \alpha_{ms}}{M_m C_m}$$

$$a_4 = \frac{A_1 \alpha_{ms} + A_2 \alpha_{gm}}{M_m C_m}, a_5 = \frac{1}{V_s \rho}, a_6 = \frac{W_{in}}{V_s \rho}$$

$$b_1 = \frac{C_{pd} T_d}{V_s \rho C_p}, d = \frac{A_2 \alpha_{gm}}{M_m C_m}$$

$$b_2 = a_6, b_3 = a_5$$

3.2 과열기에 대한 관측기의 구성

본 논문에서는 과열기 입구와 출구에서 증기 및 금속관의 온도를 측정치로 하여 관측기를 구성한다. 측정치 벡터 y 는

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} x$$

가 된다. 그러나 식 (2.3)에 의하여 미지입력의 수는 측정점의 수보다 작거나 같아야 하므로, 위에서 구한 D 와 v 를 사용하여 관측기를 구성하는 것은 불가능하다. 따라서 외부 연소가스의 열입력의 분포를 근사시켜 식 (2.3)을 만족하는 D 와 v 를 만들어야 한다.

열교환기의 전열은 주로 대류에 의하여 일어나며 전열률은 유체의 상대적 유동방향에 따라 큰 차이가 난다. 유동방향은 크게 병행류, 역류, 직교류 3가지로 분류되는데, 아래 그림은 병행류와 역류일때에 대해서 증기와 연소가스의 온도 분포를 나타낸 것이다. [14]

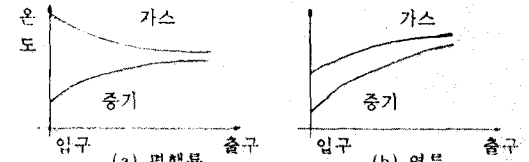


그림 3.2 연소가스 및 증기의 온도분포

그림 3.2로부터 가스의 온도분포는 선형 분포로 근사시킬 수 있으므로 과열기 입구측에서의 연소가스 온도를 T_{g0} 라 하면

$$T_{g1} = \beta_1 + T_{g0} \quad (3.11)$$

와 같이 나타낼 수 있다. 전체 길이가 $L(m)$ 인 과열기를 n 등분하여 각 부분의 길이를 Δl 이라 하면 i 번째 부분에서의 온도는

$$T_{gi} = \beta(i-1)\Delta l + T_{g0} \quad (3.12)$$

가 되고, $v = [\beta, T_{g0}]^T$ 라 할때 행렬 D 는

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & d\Delta l & 0 & 2d\Delta l & 0 & \dots & 0 & (n-1)d\Delta l \\ 0 & d & 0 & d & 0 & d & 0 & \dots & 0 & d \end{bmatrix}^T$$

가 되어 식(2.16)를 만족, 관측기의 구성이 가능하다. 전체길이 50.10(m)의 과열기를 5등분하고 $w_{in}=0.3$ 일때에 대하여 관측기를 구성하면 $\Delta l=10.02$ (m)이고 각 행열의 요소 값은 $a_1=-0.98044, a_2=0.29104, a_3=0.01259, a_4=-0.01747, a_5=2.2980, a_6=0.6894, b_1=437.06, d=0.0049104$ 가 된다. 행열 T와 U를 다음과 같이 잡아

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, U = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

과열기의 상태방정식을 상사변환 하고, (2.18), (2.19)와 같이 변환하였을때 행열 $CD=D_1$ 은 식(2.3)을 만족하고 E는 $K_2=0$ 이라면 다음과 같다.

$$D_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0.0049 \\ 0 & 0.1968 & 0.0049 \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.7500 & 0 & -0.2500 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.5000 & 0 & -0.5000 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.1128 & 0 & -0.8872 \end{bmatrix}$$

그리고 $(A_{012}^2, (A_{022}-D_2D_1^{-1}A_{012}^1))$ 는 가관측하므로 안정한 행열 F_0 를 구성할수 있으며 행열 E에 대하여 구성하면 다음과 같다.

$$F_0 = \begin{bmatrix} -0.9804 & 0.2910 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.0126 & -0.0175 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.6894 & 0 & -0.9804 & 0.2910 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0126 & -0.0175 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.6894 & 0 & -0.9804 & 0.2910 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0126 & -0.0175 \end{bmatrix}$$

구성된 행열 F_0, F_1 에 대하여 질량 1을 0.1일때에 대하여 적용하면 $\sum |p_i|^2 \leq 0.0457$ 이 된다. 발전소 데이터에서 $-0.3 \leq W_i \leq 0.1, 0 \leq W_d \leq 0.02$ 이므로 부하중동 운전시 부하 25%~100% 범위에서 관측기가 수렴됨을 알 수 있다.

4. 시뮬레이션

과열기를 5등분 하였을때에 대하여 관측기를 구성하여 과열기로 유입되는 증기량이 5분후 $w_i=0.1$ 에서 $w_i=-0.1$ 로 되었을 경우에 대해 시뮬레이션하고, 또 증기의 유입량이 일정할 때 미지입력이 변동되었을 경우 즉, $w_i=0$ 일때 연소가스의 온도가 5분후에 740°C에서 700°C로 변동되었을 경우에 대하여 시뮬레이션 하였다. 그림 1은 증기유입량이 변동되었을때이고 그림 2는 열입력의 분포가 변했을 때를 나타낸 것이다.

5. 결론

연소가스에 의한 열입력의 분포를 미지입력으로 간주하고 과열기내로 유입되는 증기유량의 변동을 고려하여 미지입력을 갖는 쌍선형 관측기를 구성하였다. 관측기를 구성하기 위하여 열입력의 분포를 근사화 시켰고 관측기의 수렴성을 보장하는 방법이 다양하다. 과열기를 5등분하였을 때에 대하여 관측기를 구성하여 증기유량이 변동할 때와 열입력의 분포가 변할 때에 추정치가 실제값으로 수렴함을 보였다.

6. 참고 문헌

[1] S.P. Bhattacharyya, " Observer Design for Linear Systems with Unknown Inputs," IEEE Trans. Auto. Contr., Vol. AC-23, pp. 483-484, 1978.
 [2] P. Kudva, N. Viswanadnam and A. Ramakrishna, "Observers for Linear Systems with Unknown Inputs," IEEE Trans. Auto. Contr., Vol. AC-25, pp. 113-115, 1980.
 [3] F. Yang and R.W. Wilde, " Observers for Linear Systems with Unknown Inputs," IEEE Trans. Auto. Contr., Vol.

AC-33, pp. 677-681, 1988.
 [4] L.H. Keel, S.P. Bhattacharyya, and J.W. Howze, " Robust Control with Structured Perturbations," IEEE Trans. Auto. Contr., Vol. AC-33, pp. 68-78, 1988.
 [5] S. Hara and K. Furuta, " Minimal Order State Observers for Bilinear Systems," IJC, Vol. 24 No. 5, pp. 705-718, 1976.
 [6] Y. Funahashi, " Stable State Estimator for Bilinear Systems," IJC, Vol. 29 No. 2, pp. 181-188, 1979.
 [7] K. Zhou and P.P. Khargonekar, " Stability Robustness Bounds for Linear State Space Models with Structured Uncertainty," IEEE Trans. Auto. Contr., Vol. AC-32, pp. 621-623, 1987.
 [8] R. Herzog and U. Kögi, " Operational Experience with a State Variable Controller with Observer on a Superheater Temperature Control System," SULZER, AV6 Contr. System, pp. 1-8.
 [9] R.L. Daugherty, J.B. Franzini and E.J. Finemore, Fluid Mechanics with Engineering Applications, McGraw-Hill 1985.
 [10] C.T. Chen, Linear System Theory and Design, Holt, Rinehart and Winston, 1984.
 [11] R. Dolezal and L. Varcop, Process Dynamics, Elsevier Publishing Co. Ltd., 1970.
 [12] J.E. Kurek, " The State Vector reconstruction for Linear Systems with Unknown Inputs," IEEE Trans. Auto. Contr., Vol. AC-28, pp. 1120-1122, 1983.
 [13] D.D. McCormack and L. Crane, Physical Fluid Dynamics, Academic Press, 1973.
 [14] 김 동 환, 증기 보일러 및 원동기, 동명사, 1988.
 [15] 이 상 혁, " 상태궤환을 이용한 과열증기의 온도제어," 석사학위 논문, 서울대, 1991.

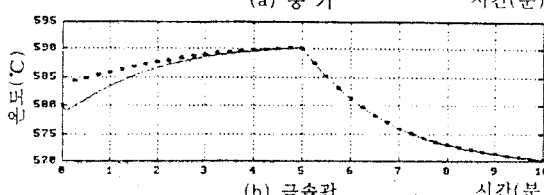
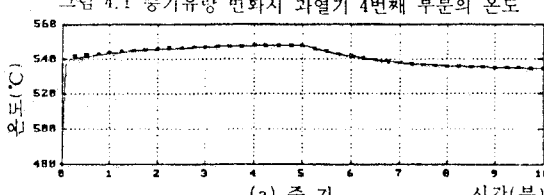
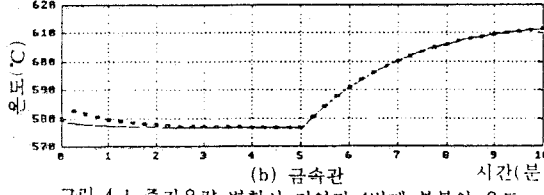
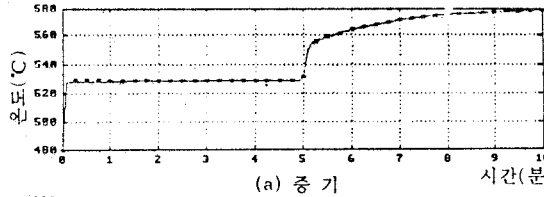


그림 4.2 열입력 변화시 과열기 4번째 부분의 온도