

# 보일러 드럼의 안전조업을 위한 동특성 모델링 및 제어기 설계

## Dynamic Simulation and Controller Design for the Safe Operation of Boiler Drum

이 익 형\*  
Ik-Hyung Lee

### ABSTRACT

The stable and safe operation of a boiler system is essential for ensuring stability of the chemical processes. A dynamic simulation of a boiler drum was performed to identify the dynamics of the boiler drum. The obtained results represented that the variation of process variables disturb boiler system. So, disturbance rejection with tracking and constraints handing was necessary for stable operation of boiler drum. Among many controller, GPC has been known to show good performance in set point tracking than disturbance. In order to improve disturbance rejection performance measurable disturbance term was introduced in basic GPC model. The controller which had tracking and disturbance rejection was designed for improving the stable operation of a boiler system.

### 1. 서 론

화학공정에서 고압증기는 가열, 분리 등 단위조작이나 화학반응의 온도조절등에 이용된다. 그러므로 고압증기를 생산하는 보일러 시스템은 화학공정에 큰 영향을 끼치므로 항상 안정되게 운전되어야 한다.

보일러 시스템의 주요 구성요소는 보일러, 헤더, 파이프이며 보일러는 드럼, 상승관, 하강관, 버너

그리고 과열기로 구성되어 있다. 보일러에 대한 동적모델연구는 Franks<sup>1)</sup>, Ramirez<sup>2)</sup>, Astrom<sup>3)</sup>, Eklund<sup>4)</sup>, 그리고 Astrom & Bell<sup>5)</sup>가 드럼과 상승관 하강관에 대해, Fellow<sup>6)</sup>가 과열기를 포함하여 연구를 하였고 Alatiqi<sup>7)</sup>, Astrom<sup>3)</sup>, Bell<sup>5)</sup>이 역응답 현상에 대한 연구를 하였다.

본 연구는 보일러 시스템의 동특성을 나타내는 모델을 구성하여 중요 공정변수에 대한 동특성을 얻은 다음 고압증기를 안정적으로 생산하는 제어기의 설계에 그 목적이 있다. 이를 위하여 Ramirez<sup>2)</sup>

\* 서울보건전문대학 산업안전과

의 모델에 기본을 두고 보일러의 가장 중요부분인 드럼에 대한 시뮬레이션을 통해 고압증기의 생산 및 시스템의 안정성에 가장 큰 변동을 주는 중요 공정변수 및 외란에 대해 동특성을 해석하였고, 이 공정변수 및 외란을 고려한 제어기 설계방법을 연구하였다.

## 2. 보일러 드럼의 동특성 해석

보일러 동특성 해석을 위한 모델 및 가정은 Ramirez<sup>2)</sup>를 참조하였다.

여기서 모델링한 보일러는 정상상태를 유지하면서 보일러 출구의 압력이 170(psia), 보일러의 온도 351.5(F)에서 고압증기 270.0(ft<sup>3</sup>/hr)를 생산하는 시스템으로 정상상태를 유지하고 있었다. 여기에 공정의 중요변수에 대한 동특성 해석을 위하여 공정 변수들을 ±10%씩 변화 시켰다. 주요공정 변수로는 보일러에 공급되는 공급수 유량 및 온도, 보일러에 공급되는 열량 그리고 보일러 출구의 압력으로 하였다. 동특성은 시스템의 정상상태 도달 시간 및 발생하는 고압증기의 온도 및 발생량 등을 기준으로 해석하였으며 그 결과는 다음과 같다.

### 2.1 정상상태 도달시간

각각의 공정 변수를 ±10% 변화 시켰을때 시스템의 온도 및 압력 그리고 고압증기 생산량등에 변동을 보이면서 새로운 정상상태에 도달하였다. 새로운 정상상태에 도달하는데 걸리는 시간이 가장

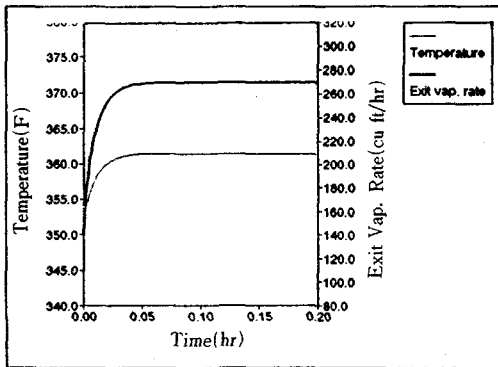


Fig. 1 Dynamic response of boiler drum for the variation of outlet pressure(+10%)

오래 걸리는 것은 보일러 출구의 압력을 높였을 때로 약 9분정도 걸리며 도달시간이 가장 빠른 경우는 보일러에 공급하는 열량을 증가하여 변동시켰을 때이며 약 6분 30초 정도 소요되었으며 응답이 느린 순서대로 쓰면 보일러 출구의 압력, 보일러에 공급되는 공급수 온도, 공급수 유량, 보일러에 공급되는 열량의 순이며 응답이 가장 느린 것을 나타내면 Fig. 1과 같다.

### 2.2 고압증기의 온도변동

기존 시스템의 온도가 변하면서 새로운 정상상태의 온도가 가장 많이 높아지는 변화를 보인것은 보일러 출구의 압력을 높였을때로 Fig. 2처럼 10°F정도 변동이 일어났고 온도가 가장 많이 낮아지는 변화를 보인것은 보일러 출구의 압력을 낮게 하였을 때로 역시 10°F정도 변동이 일어났으며 이 경우의 응답 곡선은 다음 Fig. 2와 같다.

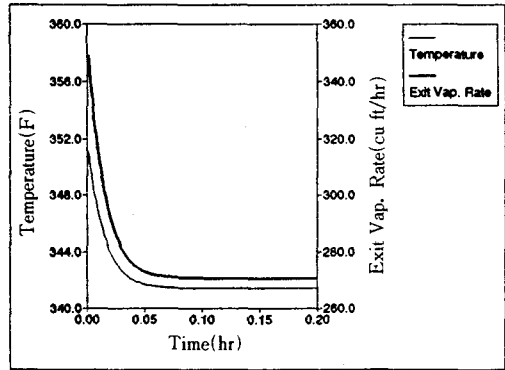


Fig. 2 Dynamic response of boiler drum for the variation of outlet pressure(-10%)

### 2.3 고압증기 생산량의 변동

새로운 정상상태에서 생산되는 고압증기의 양의 변동은 공급수의 유량 및 온도에 변동이 일어날때가 현저하여 약 20(ft<sup>3</sup>/hr)의 변화가 일어났으며 보일러 출구의 압력변동은 큰 영향을 끼치지 않았다. Fig. 3은 보일러 공급수 유량의 변동에 대한 고압증기 생산량의 변동이다.

이상에서 각변수들의 변동은 시스템을 기존의 정상상태에서 벗어나게 하여 내부온도 및 압력 그리

고 고압증기 생산량에 영향을 미치는 것을 알았다. 특히 공정내에서의 압력변동은 보일러 시스템의 온도 및 압력에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다. 생산되는 고압증기의 양은 공급수의 유량 및 온도에 많은 영향을 받으며 이는 공급수의 공급조건이 일정하지 않을때 보일러 시스템이 원하는 양의 고압증기를 실제 공정에 공급하는 것을 어렵게 한다는 것을 나타냈다. 이때 보일러 시스템에 영향을 미치는 변수는 임의로 조절이 용이한 공급수의 유량과 임의로 조절하기 어려운 공급수의 온도변동 및 시스템의 압력변동 모두인 것으로 확인되었으나 제어설계시 주로 외란으로 처리하고 있는 공급수의 온도변동과 시스템의 압력변동에 더 많은 영향을 받음을 알 수 있었다.

보일러 시스템의 운전특성은 안전면에서 특정한 온도 및 압력이하에서 운전되어야만 하며 또한 생산하는 고압증기의 품질이 공정에서 요구하는 규격을 갖추어야 할 뿐만 아니라 공정에서 요구량의 변동이 일어났을때 이의 요구를 신속히 응답하는 것이 필요하였다. 이상의 결론으로 보일러 드럼시스템은 다중 입출력(MIMO) 및 제약조건하에서 응답성이 뛰어나고 외란제거 성능을 갖춘 제어기를 요구하였다.

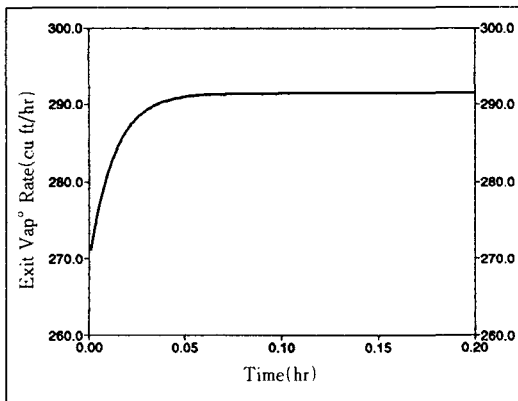


Fig. 3 Dynamic response of boiler drum for the variation of water flow rate(+10%)

### 3. 보일러 제어기의 설계

현재 알려져 있는 제어기중 이상의 조건을 고려

한 것은 설정치 추적제어를 만족하고 제한조건을 처리할 수 있는 모델 예측 제어기이다<sup>8)</sup>. 모델 예측 제어기는 설정치 추적이 뛰어나지만 아니라 예기치 못한 상황이 공정상에 발생할때 특정한 공정변수가 제한조건을 위반하는지를 미리 예측할 수 있고, 만약 특정한 공정 변수가 이러한 제한조건을 위반하게 된다면 이를 유연하게 체계적으로 처리할 수 있기 때문에 보일러의 안전을 위해서도 적합하다. 즉, 예측제어기가 제어에 이용되는 경우 추후 발생될 설정치 변화에 대하여 제어기가 설정치 변화 이전에 미리 작동하여 계산된 제어 입력을 공정에 가해 줌으로써 공정의 조업성능의 향상 및 안전조업을 이룰 수 있다. 특히 이러한 특성은 보일러와 같이 제어 입력 조작부(제어밸브등)가 기계적인 특성상 변화시킬 수 있는 제어입력의 절대적인 양과 변화속도의 한계를 지니고 있는 경우에 매우 유용하다. 즉 급격한 제어입력의 변화를 억제시키고 점진적인 제어입력의 변화를 공정에 가해줌으로써 과도한 제어입력의 변화로 발생할 수 있는 제어성능의 저하 및 공정의 불안정현상을 방지해 줄 수 있다. 또한 모델이 불확실한 경우에도 견실한 제어성능을 보일뿐만 아니라 비최소위상 공정을 대상으로 하는 경우에 있어서도 우수한 제어성능을 나타낸다. 여기서의 제어전략으로는 현재 개발되어 있는 모델 예측 제어기중 다구간 예측제어 방법인 일반형 예측제어기(GPC)에 외란 제거 성능을 가미시킨 제어기 설계전략을 세웠다. GPC는 기존의 예측제어의 장점은 물론이고 설정치 추적성능이 지연시간의 변화와 공정차수의 변화에도 큰 영향을 받지 않는다. GPC 알고리즘은 매우 빠른 속도로 개선되고 있는데 알고리즘의 유도에 자체적인 적분기능을 가진 CARIMA 모델을 이용하여 편차를 제거한 이후 Tsang 등<sup>9)</sup>이 2차 계획법(QP)을 이용하여 제어입력에 대한 제약조건을 처리하는 방법을 발표하였고 현재에는 다중입출력(MIMO) 시스템에 대한 알고리즘이 정립된 상태이다<sup>13)</sup>. 여기서 고려한 제어기는 Clarke 등<sup>10)~12)</sup>이 발표한 GPC 알고리즘에서 변수들의 상호관련성을 고려한 다중 입·출력(MIMO) 및 외란처리 기능을 도입한 알고리즘이며<sup>14)</sup> 제한조건이 유·무에 관계없이 적용할 수 있게 처리하였다.

#### 3.1 GPC제어기의 설계

GPC에서 사용하는 공정모델은 오프셋을 제거할 수 있는 CARIMA(Controlled Auto Regressive Integrated Moving Average) 모델로서 m개의 입력, n개의 출력을 고려한 식을 기준으로 하여 외란을 고려하면 다음과 같이 표현되었다.

$$\Delta(q^{-1}) A(q^{-1}) y(t) = B(q^{-1}) \Delta(q^{-1}) u(t-1) + C(q^{-1}) \xi(t) + D(q^{-1}) \Delta(q^{-1}) v(t-1) \dots \dots \dots (1)$$

여기서

$$y(t) = [y_1(t), y_2(t), \dots, y_n(t)]^T$$

$$u(t-1) = [u_1(t-1), u_2(t-1), \dots, u_m(t-1)]^T$$

$$\xi(t) = [\xi_1(t), \xi_2(t), \dots, \xi_r(t)]^T$$

$$v(t-1) = [v_1(t-1), v_2(t-1), \dots, v_s(t-1)]^T$$

y(t)는 n×1의 출력벡터, u(t-1)은 m×1의 입력벡터, ξ(t)는 r×1의 백색잡음 또는 오차벡터 그리고 v(t-1)은 s×1의 측정가능한 외란벡터이다. 또한 A(q<sup>-1</sup>)은 n×n, B(q<sup>-1</sup>)은 m×n, C(q<sup>-1</sup>)은 n×r, D(q<sup>-1</sup>)은 n×s의 공정모델의 계수로 주어지든지 또는 on-line으로 계수를 추정하여 구해지는 다항식 행렬이다. 그리고 q<sup>-1</sup>는 backward shift operator 이고 Δ(q-1)은 차분연산자이다. 미래의 예측값을 구하기 위해 식 (1)에 Diophantine 등식을 도입하면

$$P_N(q^{-1}) = E_j(q^{-1}) \Delta(q^{-1}) A(q^{-1}) P_D(q^{-1}) + q^j F_j(q^{-1}) \dots \dots \dots (2)$$

여기서 E<sub>j</sub>(q<sup>-1</sup>), F<sub>j</sub>(q<sup>-1</sup>)는 j-step에서의 Diophantine 등식의 해이다. 식 (1)의 양변에 q<sup>j</sup> E<sub>j</sub>를 곱하고 식 (2)를 대입하면, 다음의 식 (3)을 얻는다.

$$P_N(q^{-1}) P_D(q^{-1}) y(t+j) = E_j(q^{-1}) B(q^{-1}) \Delta(q^{-1}) u(t+j-1) + F_j(q^{-1}) P_D(q^{-1}) y(t) + q^j E_j(q^{-1}) C(q^{-1}) \xi(t) + q^j E_j(q^{-1}) D(q^{-1}) \Delta(q^{-1}) v(t-1) \dots \dots \dots (3)$$

여기서 q<sup>j</sup> E<sub>j</sub>(q<sup>-1</sup>) C(q<sup>-1</sup>) ξ(t)와 q<sup>j</sup> E<sub>j</sub>(q<sup>-1</sup>) D(q<sup>-1</sup>) Δ(q<sup>-1</sup>) v(t-1)를 다음과 같이 미래의 값을 갖는 부분과 과거의 값을 갖는 두 부분으로 나눈다.

$$q^j E_j(q^{-1}) C(q^{-1}) \xi(t) = T_j^p(q^{-1}) \xi(t) + T_j^g(q^{-1}) \xi(t)$$

$$q^j E_j(q^{-1}) D(q^{-1}) \Delta(q^{-1}) v(t-1) = V_j^p(q^{-1}) \Delta(q^{-1}) v(t-1) + V_j^g(q^{-1}) \Delta(q^{-1}) v(t-1)$$

여기에 '미래의 측정가능한 외란은 현재의 외란

과 같다'는 가정과 '미래의 오차는 없다'라는 가정을 도입하면

$$T_j^p(q^{-1}) \xi(t) = 0$$

$$V_j^g(q^{-1}) \Delta(q^{-1}) v(t-1) = 0$$

따라서 최적예측은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Psi(t+j) = P(q^{-1}) y(t+j) = P_N(q^{-1}) P_D(q^{-1}) y(t+j) = G_j(q^{-1}) \Delta(q^{-1}) u(t+j-1) + F_j(q^{-1}) P_D(q^{-1}) y(t) + T_j^p(q^{-1}) \xi(t) + V_j^p(q^{-1}) \Delta(q^{-1}) v(t-1) \dots \dots \dots (4)$$

여기서 G<sub>j</sub>(q<sup>-1</sup>) = E<sub>j</sub>(q<sup>-1</sup>)B(q<sup>-1</sup>)

Ψ(t+j) = P(q<sup>-1</sup>)y(t+j) : 출력이 설정치에 1차 지연등과 같이 어떤형태를 갖고 추적하도록 하기 위해 유사출력 Ψ(t)를 사용

Diophantine 등식의 해를 순환적으로 구하는 방법은 Clarke 등<sup>10)</sup>과 같은 과정으로 구했으며 GPC에서의 비용함수는 다음과 같이 놓았다.

$$J = \sum_{j=N1}^{N2} |y(t+j) - w(t+j)|^2 + \sum_{j=N1}^{Nu} |\Delta u(t+j)|^2 \dots \dots \dots (5)$$

- N1 : 최소예측구간
- N2 : 최대예측구간
- Nu : 제어입력구간
- ρ : n×n의 대각행렬
- λ : m×m의 대각행렬

|X|<sub>Q</sub> : Q를 가중치로 하는 Euclidean norm 비용함수를 벡터형태로 나타내면 다음과 같다.

$$J = (\Psi - w)^T R (\Psi - w) + \Delta u^T \Lambda \Delta u \dots \dots \dots (6)$$

$$\Psi = [\Psi(t+N1), \Psi(t+N1+1), \dots, \Psi(t+N2)]^T$$

$$w = [w(t+N1), w(t+N1+1), \dots, w(t+N2)]^T$$

$$\Delta u = [\Delta u(t), \Delta u(t+1), \dots, \Delta u(t+Nu-1)]^T$$

$$\Lambda = \text{diag} \{ \lambda \}, i = 1, 2, \dots, Nu$$

$$R = \text{diag} \{ \rho \}, i = N1, N1+1, \dots, N2$$

여기서 f(t+j)를 다음과 같이 정의하면

$$f(t+j) = q^{j-1} [G_j - \sum_{i=0}^{j-1} g^1 g_{ji}] \Delta u(t) + F_j P_D^{-1} y(t) + T_j^p(q^{-1}) \xi(t) + V_j^p(q^{-1}) \Delta(q^{-1}) v(t-1)$$

식 (6)은 다음과 같다.

$$\Psi = G \Delta u + f$$

$$f = [f(t+N_1), f(t+N_1+1), \dots, f(t+N_2)]^T \quad (7)$$

$$G = \begin{bmatrix} g_{N_1-1} & g_{N_1-2} \dots & g_0 \dots 0 \\ g_{N_1} & g_{N_1-1} \dots & g_0 \dots 0 \\ g_{N_1+1} & & \vdots \\ \vdots & & g_0 \\ g_{N_2-1} & \dots & g_{N_2-N_u} \end{bmatrix}$$

비용함수를 최소화하는 제어벡터는 J를  $\Delta u$ 로 미분하여 0일때의 값이므로 이를  $\Delta u$ 로 나타내면

$$J = (\Psi - w)^T R (\Psi - w) + \Delta u^T \Lambda \Delta u$$

$$= (G \Delta u + f - w)^T R (G \Delta u + f - w) + \Delta u^T \Lambda \Delta u$$

$$= \Delta u^T (G^T R G + \Lambda) \Delta u + 2(f - w)^T R G \Delta u + (f - w)^T R (f - w) \dots \dots \dots (8)$$

와 같다. 이 비용함수로부터 제어입력을 계산하는데 제한조건이 있을때와 없을 경우 각각의 제어치는 다음과 같다.

- 제약조건이 없을 경우

최적의 제어 벡터는  $\partial J / \partial \Delta u = 0$ 라는 조건으로부터 계산하면 다음과 같다.

$$\Delta u = (G^T R G + \Lambda)^{-1} G^T R (w - f) \dots \dots \dots (9)$$

예측제어의 일반적인 방법과 마찬가지로  $\Delta u$ 의 첫번째 요소인  $\Delta u$ 만 제어에 사용한다. 즉

$$u(t) = u(t-1) + \Delta u(t) \dots \dots \dots (10)$$

- 제약조건이 있는 경우

보일러의 유량 및 압력 제어에서는 주로 actuator로 밸브를 이용한다. 즉, 제어신호를 보내 밸브를 열고 닫음으로서 제어의 목적을 달성한다. 이때 밸브는 예를 들면 actuator rate의 제약문제로 1초에 10% 정도밖에 움직이지 않을 수도 있고, actuator saturation의 제약문제로 완전히 개폐된 이후에도 더이상 작동하지 않는다. 이런경우 발생하는 제한조건은 다음과 같이 처리하여 제어를 수행했다.

식 (8)에서 비용함수는 다음과 같다.

$$J = \Delta u^T (G^T R G + \Lambda) \Delta u + 2(f - w)^T R G \Delta u + (f - w)^T R (f - w)$$

따라서 J를 제약조건하에서 최소화 하는 문제는 다음과 같다.

$$\min J = \min \{ \Delta u^T (G^T R G + \Lambda) \Delta u + 2 (f - w)^T R G \Delta u + (f - w)^T R (f - w) \}$$

Actuator rate와 actuator saturation의 제약문제는 다음과 같다.

$$L_r < \Delta u(t+j-1) < U_r, \quad j = 1, 2, \dots, N_u$$

$$L_s < u(t+j-1) < U_s, \quad j = 1, 2, \dots, N_u \quad (11)$$

여기서 비용함수의 독립변수가  $\Delta u$ 로 되어 있기 때문에 actuator saturation의 제약조건은 다음과 같이 변형되어야 한다.

$$L_s < u(t) < U_s$$

$$L_s - u(t-1) \leq \Delta u(t) \leq U_s - u(t-1)$$

$$L_s \leq u(t+1) \leq U_s$$

$$L_s - u(t-1) < \Delta u(t) + \Delta u(t+1) < U_s - u(t-1)$$

.....

$$L_s < u(t + N_u - 1) < U_s$$

$$L_s - u(t-1) < \Delta u(t) + \Delta u(t+1) + \dots + \Delta u(t + N_u - 1) < U_s - u(t-1)$$

또한 보일러 시스템의 안전을 위하여 보일러 내부의 온도 및 압력의 최고 또는 보일러 수위의 최저치등을 제한조건으로 고려할 경우가 있으며 이경우 제한 조건은 온도 및 압력 그리고 수위등에 대해 등식이나 부등식으로 표현된다. 이런경우 비용함수와 제약조건은 최적화의 문제가 되며 2차 계획법등으로 풀수 있는 문제이다<sup>14)</sup>. 예측제어의 일반적인 방법과 마찬가지로  $\Delta u$ 의 첫번째 요소인  $\Delta u$ 만 제어에 사용한다. 즉

$$u(t) = u(t-1) + \Delta u(t) \dots \dots \dots (12)$$

계산속도를 빠르게 하기 위해, 먼저 제약조건이 없다고 가정하고 해를 구한 다음 이 해가 모든 제약조건을 만족하면 타당한 해로 인정하고, 그렇지 못한 경우 만족되지 못한 제약조건만을 가지고 해를 구한다. 이 경우 보다 상세한 과정은 최적화 프로그래밍 기법을 참조하였다<sup>15)</sup>.

### 3.2 보일러의 시스템 제어전략

보일러 시스템의 제어 목표를 일정한 규격(온도 및 압력)의 고압증기를 요구량에 신속히 공급하는 것과 외란 제거에 들 경우 다음의 제어 전략에 따라 보일러 드림을 제어할 수 있는 제어기를 설계하였다.

- 1) 보일러 시스템의 실제 공정에 대해 공정변수 및 외란과의 상호관계를 다중 입·출력 공정 모델로 표현하였다.
- 2) 정상상태에서의 공급수의 온도변화 및 보일러 출구의 압력변동은 외란으로 처리 하였다.
- 3) 공정에서 요구량의 변동이 일어났을때 이의 요

구를 신속히 응답하도록 설정치 추적 제어기법인 일반형 예측 제어를 사용하였다.

- (1) 미래의 제어입력에 대해 미래의  $t+N1$ 부터  $t+N2$ 까지의 구간내에서의 공정의 출력을 공정모델에 의해 예측하였다.
- (2) 공정모델에 의한 예측기가 설정치에 최적으로 접근할 수 있는 제어 입력의 변화를 이동구간비용함수를 최소화하는 값으로 결정하였으며 제한조건이 없는 경우 식 (10)의 값, 제한조건이 있는 경우 식 (11)을 사용하였다.
- (3) (2)에서 결정된 제어 입력의 변화중 현시점에 해당하는 제어입력만을 실제공정에 입력시키고 시점  $t+1$ 에서도 이상과 같은 과정을 반복하였다.

#### 4. 결 론

보일러 시스템의 제어를 위하여 보일러 드럼에 대한 동적모사 프로그램을 작성하였으며 이 모델을 기본으로 보일러의 동특성을 해석하였다. 그 결과 보일러 시스템은 다중 입출력 및 외란 그리고 제한조건을 고려한 제어기 설계를 필요로 하였다. 이와 같은 요구로 일반형 예측제어기(GPC)에 외란을 처리하는 제어기를 설계하였다. 향후 실제 공정에 적용하여 on-line으로 공정 모델을 추정하면서 제어를 수행하여 설계된 제어기의 건실함을 입증하는 것이 필요하였다.

#### 참 고 문 헌

- 1) Franks, Rogers G.E., Modelling & simulation in chemical engineering, John Wiley & Sons, New York, 1972.
- 2) Ramirez, W.F., Process simulation, Lexington Books, Lexington, 1976.
- 3) Astrom, K. J., K. Eklund, A simplified non-linear model of a drum-boiler turbine unit, Int. J. Control, 16, pp.145~169, 1972.
- 4) Astrom, K. J., K. Eklund, A simplified non-linear drum-boiler model, Int. J. Control, 22, pp. 739~740, 1975.
- 5) Astrom, K. J., R.D, Bell, simple drum-boiler models, Proc. of IFAC Power Systems Modelling & Control Applications, 123, 1988.
- 6) Fellow, F.P.de Mello, Boiler models for system dynamic performance studies, IEEE Transactions on Power Systems, 6(1), 66, 1991.
- 7) Alatiqi, I.M., A.M.Meziou, Simulation and parameter shedding operation of waste heat steam-boilers, Computers Chem. Eng., 16(1), 51, 1992.
- 8) Garcia, C.E., D.M.Prett, & M.Morari, Model Predictive Control-Theory & Practice(a survey), Automatica, 25, 335, 1989.
- 9) Tsang, T.T.C. & D.W. Clarke, Generalized Predictive Control with Constraints, Proc. IEE, 135D, 451, 1988.
- 10) D.W. Clarke, C.Mohtadi, & P.S.Tuffs, Generalized Predictive Control-Part1. Basic Algorithm, Automatica, Vol.23, No.2, pp.137~148, 1987.
- 11) D.W. Clarke, C.Mohtadi, & P.S.Tuffs, Generalized Predictive Control-Part2. Extension & Interpretation, Automatica, Vol.23, No.2, pp.149~160, 1987.
- 12) D.W. Clarke, C.Mohtadi, Properties of Generalized Predictive Control, Automatica, Vol.25, No.6, pp.875~895, 1989
- 13) M.Kinnart, Adaptive Generalized Predictive Controller for MIMO systems, Int. J. Control, Vol.50, No.1, pp.161~172, 1989.
- 14) 차문환, 노균, 윤인섭, 여영구, 송형근, 증류탑에서의 일반형 예측제어 응용연구, 한국자동제어학술대회 학술집, 1990.
- 15) Tabak, D., Kuo, B.C., Optimal control by mathematical programming, Prentice-Hall, 1971.