

## 다변수 예측제어를 이용한 가열로 온도 제어 Temperature Control of a Reheating Furnace using Multivariable Predictive control

고 현 석\*, 임 목 근\*\*, 김 정 수\*, 전 익 수\*\*\*, 윤 태 웅\*, 양 대 룡\*\*  
\*고려대학교 전기공학과, \*\*고려대학교 화학공학과, \*\*\*㈜포스콘 기술연구소

### 1. 서론

철강산업은 전형적인 에너지 집약적 산업이다. 이러한 철강산업에서의 압연생산공정은 크게 열간 압연 방식과 냉간 압연 방식으로 분류할 수 있다. 열간 압연공정에서의 필수요소인 가열로에서 소모하는 에너지는 전체 에너지의 약 절반정도를 차지하는 것으로 알려져 있으며, 따라서 가열로에서의 연료 소모량의 절감은 철강 산업에서의 에너지 절감 노력의 일환으로 매우 중요한 문제로 부각되어 있다.

가열로 연소제어의 최종 목표는 크게 두 가지로 요약될 수 있다. 첫째, 해당 강편을 압연하기에 필요한 최적의 온도로 가열함과 동시에 강편내부의 가열온도의 균일성을 유지하여 생산제품의 고품질을 만족시켜야 한다. 둘째, 불필요하게 높은 온도로 가열하여 연료를 낭비하지 않도록 하여야 한다[1][2].

그림 1은 가열로의 구조를 나타낸다[3].

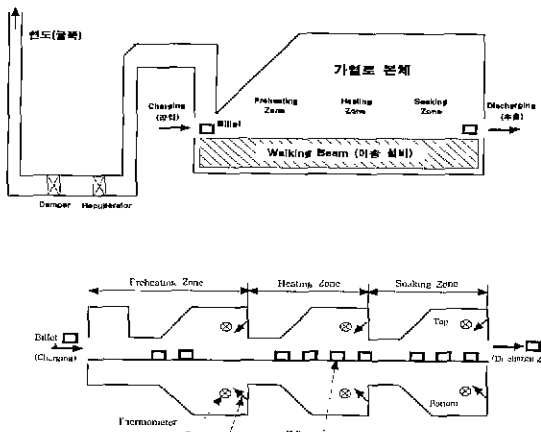


그림 1. 가열로의 구조

그림에서 보여지듯이 본 연구에서 고려하는 가열로 본체의 내부는 예열대(Preheating zone), 가열대(Heating zone), 균열대(Soaking zone)로 나누어져 있다. 현재 운전되고 있는 대부분의 가열로에서는, 산업계의 표준이라 할 수 있는 PID제어기를 사용하여 이들 세 영역에서의 온도제어를 상호 독립적으로 수행하고 있다. 그러나 PID제어가 시간지연이 큰 시스템에 적합하지 못하다는 점과, 각각의 제어기가 각 영역간의 상호 작용을 고려하지 못하고 있다는 점등으로 인하여, 효율적인 연소제어가 이루어지지 않고 있다.

본 연구에서는 다변수 예측제어 기법을 사용함으로써, 이와 같은 기존의 연소제어 시스템이 갖는 문제점을 극복하고자 한다. 실제적인 모의 실험을 위해 공정의 세세한 부분까지 표현할 수 있는 상세 모델이 요구되므로, 가열로와 관련된 물리적 법칙을 이용하여 수학적 모델을 구한다. 그리고 제어기 설계를 위한 저차의 이산치 모델을 플랜트 식별 기법을 통해 구하고 이를 이용하여 다변수 예측제어기를 설계한다. 아울러, 모의 실험을 통해 제시된 제어 시스템의 성능을 평가한다.

### 2. 가열로의 수학적 모델링

#### 2.1 Material Balance

물질의 반응 전후에는 질량 보존의 법칙이 성립한다. 가열로의 각 연소대에서 연소 반응 과정에 존재하는 연소 가스의 유입과 유출 사이에도 동일한 원리가 적용되며, 이를 다음과 같이 표현한다.

$$\begin{aligned} & \text{이전 Zone에서의 유입가스} + \text{연료후 생성가스} \\ & = \text{다음 Zone으로의 유출가스} \end{aligned}$$

연소 반응은 진행이 매우 빠르므로, 연소 후 생성 가스 발생량의 산출은 속도가 느린 화학 반응식의 여러 가지 조건을 고려하지 않고, 단순히 연료와 공기의 화학 반응식의 양론계수에 따른 양론비에

따라 연소되어 생성된 가스만큼이 발생한다고 간주한다.

기체를 포함한 유체의 흐름은 양쪽의 압력 차이에 기인한다. 가열로 내부에서의 각 연소대사이의 압력  $P_{z1}, P_{z2}$ 의 차에 따른 부피 유속은 다음과 같다.

$$Q[Nm^3/h] = \frac{C_z}{\sqrt{2}} \sqrt{P_{z1}^2 - P_{z2}^2}$$

단,  $C$ 는 유체가 흐르는 통로의 기하학적 구조에 관계되는 비례 상수이다.

연소가스에 의한 가스의 이동은 공급되는 연료와 공기의 합으로 이루어진다. 혼합 가스의 성분과 연소에 관련된 화학 반응식으로부터 연소 후 생성 가스의 각 성분의 양을 산출하여 연소 후 생성 가스의 총량을 구하면  $A+0.766F$ 가 된다. 여기서  $A, F$ 는 과잉 공기와 연료량을 의미한다.

각 연소대에 공급되는 연료  $F_p, F_h, F_s$ 와 공기  $A_p, A_h, A_s$ 에 대하여, 기체의 부피 유속  $Q[Nm^3/h]$ 와 기체의 밀도  $\rho = N/V[\text{mol}/Nm^3]$  및 연소 후 생성 가스와의 관계로부터 각 연소대에 대한 Material Balance 방정식을 세우면 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt}N_p = \frac{C_h}{\sqrt{2}} \sqrt{P_h^2 - P_p^2} \frac{N_h}{V_h} - \frac{C_p}{\sqrt{2}} \sqrt{P_p^2 - P_{atm}^2} \frac{N_p}{V_p} + A_p + 0.766F_p$$

$$\frac{d}{dt}N_h = \frac{C_s}{\sqrt{2}} \sqrt{P_s^2 - P_h^2} \frac{N_s}{V_s} - \frac{C_h}{\sqrt{2}} \sqrt{P_h^2 - P_p^2} \frac{N_h}{V_h} + A_h + 0.766F_h$$

$$\frac{d}{dt}N_s = -\frac{C_s}{\sqrt{2}} \sqrt{P_s^2 - P_{atm}^2} \frac{N_s}{V_s} - \frac{C_h}{\sqrt{2}} \sqrt{P_h^2 - P_p^2} \frac{N_h}{V_h} + A_s + 0.766F_s$$

## 2.2 Energy Balance

물질의 반응 전후에는 에너지 보존의 법칙이 성립한다. 가열로의 각 연소대에서 연소 반응 과정에 존재하는 연소 에너지의 유입과 유출 사이에 동일한 원리를 적용하면 다음과 같다.

이전 Zone에서 유입되는 가스의 열량  
 + 연소에 의한 열량 + 연료와 공기의 엔탈피(열량)  
 = 다음 Zone으로 유출되는 가스의 열량  
 + 노벽으로 손실되는 열량 + 강편으로 전달되는 열량

표 1은 연소과정에 관계되는 열량들을 보인다.

표 1. 열량의 수학적 표현

$C_p M_z (T_{g,z} - T_{ref})$	이전 연소대에서 유입되는 가스의 열량, 다음 연소대로 유출되는 가스의 열량
$\lambda F_z$	연소에 의한 열량
$C_p M_z (T_z - T_{ref})$	연료와 공기의 엔탈피(열량)
$U_z S_z (T_{g,z} - T_{w,z})$	노벽으로 손실되는 열량

노내 벽의 온도  $T_{w,z}$ 의 시간에 따른 변화는 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{d}{dt}T_{w,z} = \frac{U_z S_z (T_{g,z} - T_{w,z})}{C_{pw,z} m_{w,z}}$$

가열로의 각종 물리적 상태에 따른 열량의 전달 정도를 적절히 반영하기 위한 변수로 총 열방사 계수(Total Thermal Emissivity Coefficient,  $\phi_{cc}$ )를 사용한다 [4]

각각의 연소대에서 강편에 전달되는  $Q_p, Q_h, Q_s$ 는 다음 식과 같이 표현된다.

$$Q_p = \sum_i 4.88 \times 10^{-8} \phi_p (T_{gp}^4 - T_{hp,i}^4)$$

$$Q_h = \sum_i 4.88 \times 10^{-8} \phi_h (T_{gh}^4 - T_{bh,i}^4)$$

$$Q_s = \sum_i 4.88 \times 10^{-8} \phi_s (T_{gs}^4 - T_{hs,i}^4)$$

위에서 열거한 수식들에 의해서 각 연소대의 분위기 가스에 대한 Energy Balance는 다음과 같은 방정식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}T_{wp} = & \frac{\lambda F_p}{C_{pp} N_p} + \frac{C_h}{\sqrt{2} R N_p} \frac{\bar{C}_{ph}}{C_{pp}} P_h \sqrt{P_h^2 - P_p^2} (T_{gh} - T_{ref}) \\ & + \frac{\bar{C}_{ps}}{C_{pp} N_p} A_s (T_s - T_{ref}) \frac{1}{T_{gh}} - \frac{C_h}{\sqrt{2} R N_p} P_h \sqrt{P_h^2 - P_p^2} (T_{wp} - T_{ref}) \frac{1}{T_{gh}} \\ & - \frac{T_{wp} - T_{ref}}{N_p} (A_p + 0.766F_p) - \frac{W_p}{C_{pp} N_p} - \frac{Q_p}{C_{pp} N_p} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}T_{gp} = & \frac{\lambda F_p}{C_{gp} N_p} + \frac{C_s}{\sqrt{2} R N_p} \frac{\bar{C}_{ps}}{C_{gp}} P_s \sqrt{P_s^2 - P_p^2} (T_{gs} - T_{ref}) \\ & + \frac{\bar{C}_{ps}}{C_{gp} N_p} A_s (T_s - T_{ref}) \frac{1}{T_{gh}} - \frac{C_h}{\sqrt{2} R N_p} P_h \sqrt{P_h^2 - P_p^2} (T_{gp} - T_{ref}) \frac{1}{T_{gh}} \\ & - \frac{T_{gp} - T_{ref}}{N_p} (A_p + 0.766F_p) - \frac{W_p}{C_{gp} N_p} - \frac{Q_p}{C_{gp} N_p} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}T_{gs} = & \frac{\lambda F_s}{C_{ps} N_s} + \frac{\bar{C}_{ps}}{C_{ps} N_s} A_s (T_s - T_{ref}) \\ & - \frac{T_{gs} - T_{ref}}{N_s} (A_s + 0.766F_s) - \frac{W_s}{C_{ps} N_s} - \frac{Q_s}{C_{ps} N_s} \end{aligned}$$

각각의 강편에 전달되는 열량을 표현하는 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt}T_{gp,i} = 4.88 \times 10^{-8} \phi_p (T_{gp}^4 - T_{gp,i}^4) \frac{1}{m_b C_{p,gb}}$$

$$\frac{d}{dt}T_{bh,i} = 4.88 \times 10^{-8} \phi_h (T_{gh}^4 - T_{bh,i}^4) \frac{1}{m_b C_{p,bh}}$$

$$\frac{d}{dt}T_{hs,i} = 4.88 \times 10^{-8} \phi_s (T_{gs}^4 - T_{hs,i}^4) \frac{1}{m_b C_{p,bs}}$$

표 2는 여기서 사용된 파라미터들을 나타내 주는 데, 첨자 p, h, s는 각각 예열대, 가열대, 균열대를 의미한다.

표 2. 가열로 파라미터

$C_{pz}, \bar{C}_{pv,z}$	열용량, 노벽의 평균 열용량
$M_z$	Flow rate
$T_{gz}, T_{ref}, T_{0,z}$	연소대, Reference, 노벽의 온도
$U_p$	열전달 계수
$S_p$	노내의 표면적
$m_{w,z}, m_b$	노벽, 강편의 질량
$\bar{C}_{pv}, \bar{C}_{ph}, \bar{C}_{ps}$	각 연소대의 혼합가스의 평균 열용량
$\bar{C}_{pbp}, \bar{C}_{pbh}, \bar{C}_{pbs}$	각 연소대의 강편 평균 열용량
$\bar{C}_{pa}, \bar{C}_{pw}$	공기, 노벽의 평균 열용량
$V_p, V_h, V_s$	각 연소대의 부피
$P_p, P_h, P_s$	각 연소대의 압력
$N_p, N_h, N_s$	각 연소대의 총 몰수
$T_{gp}, T_{ph}, T_{gs}$	각 연소대의 분위기 가스온도
$F_p, F_h, F_s$	각 연소대의 연료의 유량
$A_p, A_h, A_s$	각 연소대의 공기의 유량
$C_p, C_b, C_s$	압력차에 의해 추출구를 통과하는 부피유속의 계수

### 2.3 모의실험 결과

여기서는 앞에서 제시된 모델을 사용한 모의실험 결과를 소개한다.

전체 강편개수는 84개로 하고 1분 40초마다 균열대에서 가열된 강편이 나오고 예열대로 상온의 강편이 들어간다고 가정하였다. 또 예열대에는 41개의 강편이, 가열대에는 22개의 강편이, 그리고 균열대에는 21개의 강편이 존재한다고 가정하였다.

그림 2는 각 연소대의 온도를 나타낸 그림이다. 진동하는 양상을 보이는 것은 100초 주기의 강편의 이동과 균열대 문의 개폐로 인한 것이다. 그림 3은 가열로 내부에 있는 모든 강편의 온도를 나타낸 그림이다. 일정시간에 84개의 강편 온도를 세로축에 모두 그린 그림으로 84개의 강편의 온도변화를 볼 수 있다. 100초마다 강편이 이동하고 입구에서 새로운 강편이 들어오고 출구로 가열된 강편이 나가게 되므로 이를 주기로 새로 상온의 온도에서 시작하는 그림이 그려지게 되고 이를 연결하면 하나의 강편의 온도가 된다. 그림 4는 한 개의 강편의 온도가 장입순간부터 추출순간까지 어떻게 변하는가를 보여주는 그림이다.

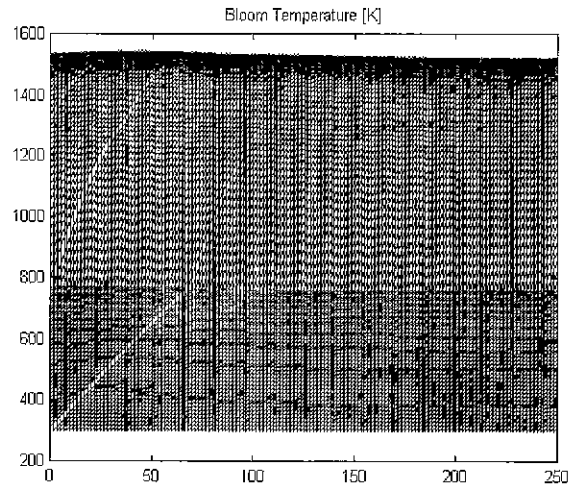


그림 2. 모든 강편의 온도

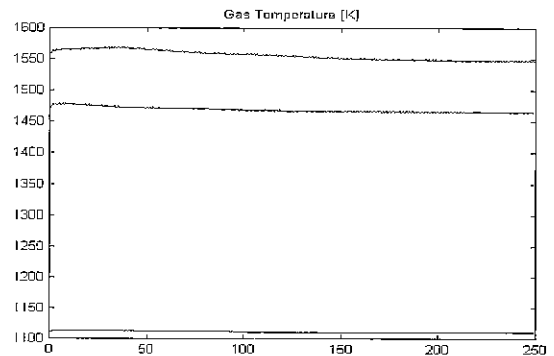


그림 3. 각 연소대의 온도

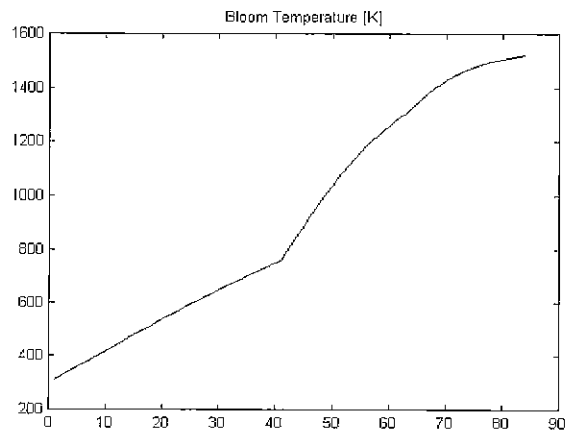


그림 4. 강편의 온도

### 3. 플랜트 식별

여기서는 예측제어기 설계에 사용되는 이산화 모델을 플랜트 식별 기법을 통해 구한다.

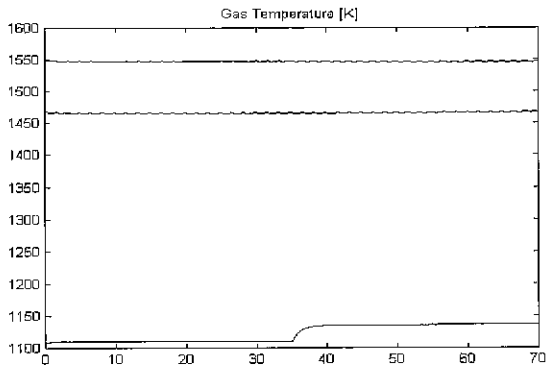


그림 5. 예열대의 연료량 증가에 따른 응답

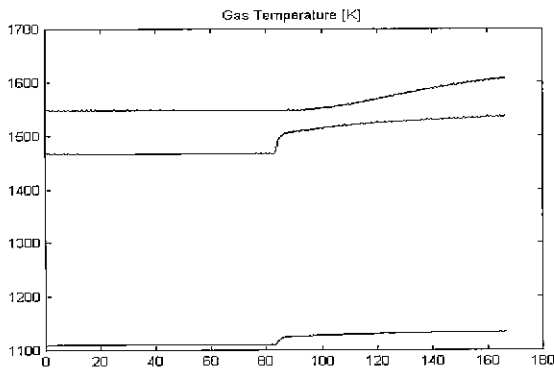


그림 6. 가열대의 연료량 증가에 따른 응답

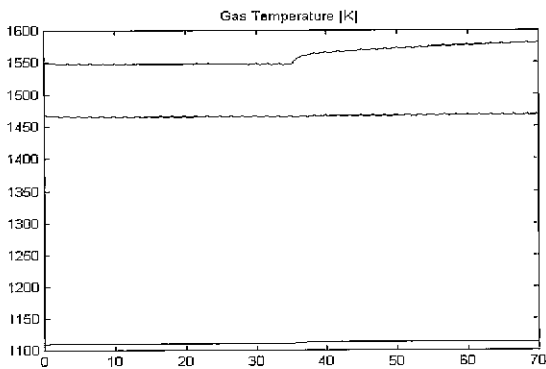


그림 7. 균열대의 연료량 증가에 따른 응답

### 3.1 이산 모델의 구조

먼저 이산화 모델의 구조를 결정하기 위해, 정상 상태에서 예열대, 가열대, 균열대에서의 연료량을 각각 20%씩 증가시킨다. 그림 5, 그림 6, 그림 7은 이 경우의 출력을 보인다. 그림에 보여지듯이, 서로 인접하지 않은 예열대와 균열대간의 상호작용은 인접한 연소대간의 상호작용에 비해 작다. 또한 유체의 흐름에 역행하는 방향의 상호 작용도 유체 흐름 방향의 상호 작용에 비해 작다. 이와 같은 특성

을 고려하여 (1)에 나타난 바와 같은 구조의 이산화 모델을 가정한다.

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{B^{11}}{A^1} & \frac{B^{12}}{A^1} & \frac{B^{13}}{A^1} \\ 0 & \frac{B^{22}}{A^2} & \frac{B^{23}}{A^2} \\ 0 & 0 & \frac{B^{33}}{A^3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

그리고 상승시간과 지연차수를 고려하여 모델의 차수는 분모 1차, 분자 2차로 가정한다.

$$\frac{B^y}{A^i} = q^{-1} \frac{b^1 + b^2 q^{-1}}{1 + a^1 q^{-1}} \quad (2)$$

### 3.2 시스템 식별 알고리즘

(1), (2)로 표현되는 모델에 대해 최소자승법을 적용하여 모델의 파라미터들을 구한다. 시스템 식별 과정에서 시스템의 주요 모드들을 여기시킬수 있도록 충분한 주파수 성분을 갖는 방형파를 인가하였다.

시스템 식별 결과를 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{B^{11}}{A^1} &= \frac{0.0013q^{-1} + 0.0035q^{-2}}{1 + 0.9793q^{-2}} \\ \frac{B^{12}}{A^1} &= \frac{0.0004648q^{-1} + 0.0009504q^{-2}}{1 + 0.9793q^{-2}} \\ \frac{B^{13}}{A^1} &= \frac{0.0016q^{-1} + 0.0016q^{-2}}{1 + 0.9793q^{-2}} \\ \frac{B^{22}}{A^2} &= \frac{0.0012q^{-1} + 0.0033q^{-2}}{1 + 0.9866q^{-2}} \\ \frac{B^{23}}{A^2} &= \frac{0.0004023q^{-1} + 0.0001441q^{-2}}{1 + 0.9866q^{-2}} \\ \frac{B^{33}}{A^3} &= \frac{0.0014q^{-1} + 0.00271q^{-2}}{1 + 0.9955q^{-2}} \end{aligned}$$

그림 8은 모델의 출력과 플랜트 출력을 보인다.

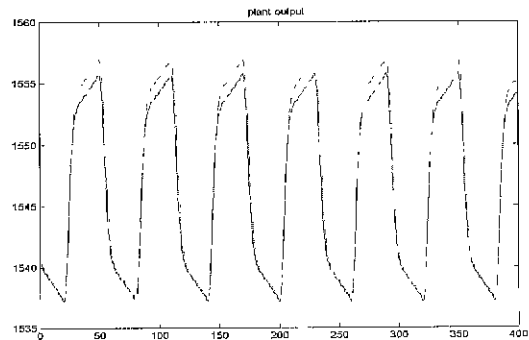


그림 8. 모델의 출력과 플랜트의 출력

#### 4. 다변수 예측 제어

##### 4.1 다변수 시스템의 최적 예측

다음과 같은 CARIMA 모델로 표현되는 다변수 시스템을 고려한다.

$$A^i(q^{-1})y_j(t) = \sum_{i=1}^n B^{ij}(q^{-1})u_j(t-1) + T^i(q^{-1})\frac{\xi_i(t)}{\Delta}$$

여기서,  $y_j$ ,  $u_j$ 는 각각 시스템의  $i$ 번째 입력과  $j$ 번째 출력을 의미하고,  $\xi_i$ 는 백색 잡음이고,  $\Delta$ 는 차분 연산자, 즉,  $1 - q^{-1}$ 이다.

$i$ 번째 출력의  $k$ 스텝후의 값  $y_j(t+k)$ 에 대한 최적 예측  $\hat{y}_j(t+k)$ 는 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \hat{y}_j(t+k) &= \sum_{i=1}^n G_k^y \Delta u_j(t+k-1) + f^i(t+k) \\ f^i(t+k) &= \frac{F_k^i}{T^i} y_j(t) + \sum_{i=1}^n H_k^y \Delta u_j(t-1) \end{aligned}$$

여기서  $F_k^i$ ,  $G_k^y$  및  $H_k^y$ 는 다음의 Diophantine 등식을 만족시킨다.

$$T^i = A^i \Delta E_k^i + q^{-k} F_k^i, \quad E_k^i B^y = G_k^y T^i + q^{-k} H_k^y$$

$G_k^y$ 는  $k-1$ 차 다항식으로, 그 계수는 시스템  $\frac{B^y}{A^i}$ 의 처음  $k$ 개의 계단 응답 계수와 일치한다.

##### 4.2 예측제어 법칙

예측 제어는 예측된 미래의 출력과 지령신호사이의 차이를 최소화하도록 하는 제어 입력을 구하는 방법이다[7]. 본 논문에서는 다변수 예측제어를 위해 다음과 같은 2차의 비용함수를 고려한다[5].

$$\begin{aligned} J &= \sum_{i=1}^n \left( \sum_{k=N_1}^{N_1-1} \mu_i(k) [w_i(t+k) - \hat{y}_i(t+k)]^2 \right. \\ &+ \sum_{k=N_2}^{N_2+m-1} \frac{M_i(N_2)}{\gamma} [w_i(t+N_2) - \hat{y}_i(t+k)]^2 \\ &+ \sum_{j=1}^n \sum_{k=0}^{N_3-1} \rho_j(k) \Delta u_j(t+k)^2 \end{aligned}$$

여기서  $\mu_i(k)$ 와  $\rho_j(k)$ 는  $i$ 번째 출력의 추종오차와  $j$ 번째 제어 입력 증가분에 대한 가중치들이다.  $N_1$ 과  $N_2$ 는 예측범위의 상한 및 하한,  $N_3$ 는 제어범위이고  $\gamma$  ( $0 \leq \gamma \leq 1$ )는  $N_2$  이후의 추종오차에 대해 더 큰 가중치를 두기 위해 마련된 값이다. 만약  $\gamma=0$ 이면 다음과 같은  $m_1$ 개의 등식조건이 사용될

을 의미한다.

$$w_i(t+N_2) = \hat{y}_i(t+k) \text{ for } k \in [N_2, N_2+m_1-1]$$

예측제어법칙은 이러한 비용함수를 최소화하는 입력을 구함으로써 얻어진다. 이렇게 얻어진 제어입력 중에서  $\Delta u_j(t)$ 만이 시간  $t$ 에 인가되고 위의 최적화과정은 매번 반복되는 소위 Receding-horizon제어를 행한다.

다음의 정리는 다변수 예측제어 시스템의 안정도 보장을 위한 충분조건을 제시한다[5][6].

##### 정리

다변수 프로세스(3.1)과 예측제어법칙(4.4)에 대해서 다음의 조건이 만족되면 페루프는 안정하다.

$$\begin{aligned} \gamma &= 0 \\ m_i &= \deg(A^i) + 1 \\ N_u &\geq \deg(\text{lcm}(A^1, A^2, \dots, A^n)) + 1 \\ N_1 &= N_u + \max_{1 \leq i \leq n} (\deg(B^y) - \deg(A^i)) \\ 0 &\leq \mu_i(k) \leq \mu_i(k+1), 0 \leq \rho_j(k) \leq \rho_j(k+1) \end{aligned}$$

정리를 만족시키면서  $N_1$ 의 크기를 최대한 크게 하고( $N_1 = N_u$ ) 지수적 가중치를 사용하면, 다음과 같이 단지 2개의 파라미터( $N$ 과  $\alpha$ )로 제어기를 조율할 수 있게된다[8].

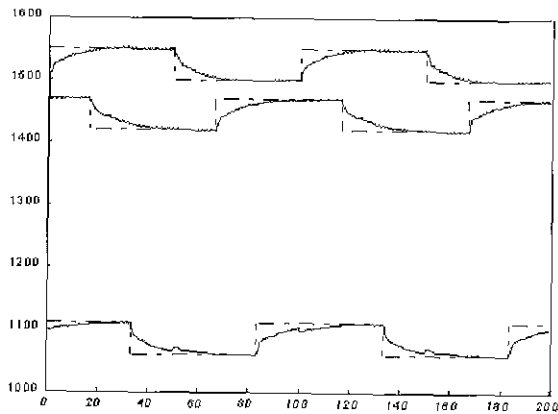
$$N_1 = N_u = N_v = N, \quad \mu_i(k) = \rho_j(k) = \alpha^{-2k}$$

이상과 같이 단 2개의 파라미터를 사용하게 되면 제어기 설계과정이 대단히 간략화된다. 더욱이  $N$ 은 프로세스의 상승시간과 관련되고,  $\alpha$ 의 사용은 페루프 시스템의 극점들을 반경  $\alpha$ 인 원 내부에 위치시키는 역할을 한다[8]. 또한 플렌트 모델의 noise-coloring 다항식  $T^i$ 는 일반적으로 설계자가 제어기의 강인함을 증가시키기 위해 설계하는 설계 파라미터로 사용된다[9].

#### 5. 모의실험

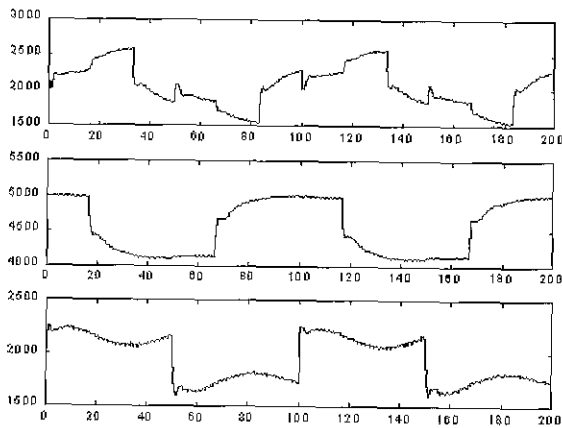
여기서는 앞에서 구한 이산화 모델을 이용한 다변수 예측제어 알고리즘을 가열로 상세 모델에 적용한다. 제어기 파라미터에 관해서는 위에서 논한 바 있듯이  $N$ 과  $\alpha$ 만을  $N=15$ ,  $\alpha=1$ 로 선정한다. 또한, 다항식  $T^i$ 는  $T^i = 1 - 0.9q^{-1}$ 로 설정한다.

그림 9에서 일점쇄선은 지령치를 나타내며 실선은 각 연소대의 온도를 나타낸다. 그림 10은 각 연소대의 제어입력 즉 연료량을 보인다.



(위에서부터 균열대, 가열대 예열대의 온도)

그림 9. 예측제어의 결과



(위에서부터 균열대, 가열대 예열대의 연료량)

그림 10. 제어 입력

그림 9는 본 연구를 통해 제시된 제어 기법이 매우 고무적임을 보여준다. 제어기에서 사용한 모델의 특징은 가열로 각 연소대간의 상호 작용을 효과적으로 표현하면서도 비교적 단순하게 구성된 전달함수 모델이라는 점이다. 이와 같이 간략한 모델을 사용한 예측제어 시스템에서 각 연소대의 온도는 그 설정치를 충실히 추종하고 있으며, 더불어 연소대간의 상호작용도 효과적으로 억제됨을 알 수 있다. 한편, 세 연소대중 예열대의 제어 특성이 다른 두 연소대에서의 특성에 비해 조금 떨어지는 것을 볼 수 있는데, 이는 예열대가 가장 많은 상호 작용을 받고 있음에 기인한다.

## 6. 결론

본 연구에서는 가열로에 대한 상세 모델을 제시하였다. 제시된 모델은 Energy balance, Material balance

그리고 연소 반응과 에너지 보존의 법칙 등에 근거한 새로운 모델로서, 실제적인 모의실험을 가능케 한다. 따라서 가열로를 위한 여러 제어기법들의 성능 평가를 위해 사용됨은 물론, 가열로의 여러 상태들을 Monitoring하고자 하는 경우에도 사용될 수 있을 것이다.

본 연구에서는 또한 각 연소대간의 상호 작용을 고려한 고성능 다변수 제어 시스템의 구현을 위해 예측제어기법을 적용하였다. 이를 위해, 우선 시스템 식별기법을 통해 제어기 설계용 선형 이산 모델을 얻으며, 이에 근거하여 예측제어기를 설계한다. 제어기 설계에 사용된 이산 모델은 가열로 각 연소대의 상호 작용을 적절히 고려하면서도 비교적 단순하게 구성되었다. 이는 시스템 식별 과정 및 제어기 설계 과정이 지나치게 복잡하게 되는 것을 방지하기 위해서이다. 이상의 과정은 가열로에 관한 적절한 다변수 모델에 근거하는 것으로서, 각 연소대간의 관련성을 무시하고 고전적인 PID 제어기를 사용하는 기존의 방식과는 크게 구별된다.

제시된 예측 제어 시스템을 가열로의 상세모델을 사용하여 모의실험한 결과, 각 연소대의 온도가 그 지령치를 잘 추종함을 볼 수 있으며, 더불어 각 연소대간의 상호작용도 크게 약화된 것을 알 수 있다. 현재로서는 매우 제한된 범위에서의 모의실험 결과이지만, 가열로 제어 시스템의 성능 제고를 위한 다변수 예측 제어의 가능성을 제시해 주고 있는 것으로 생각된다.

## 참고문헌

- [1] S. Hori, S. Nishitomo, S. Tanifuji, 1983, "Reheating Furnace Combustion Control System for Hot Charge Rolling," Omika Works, Hitachi, Ltd. Japan Hitachi Review vol. 32, no. 2.
- [2] Y. Wakamiya, M. Tsuruda, and T. Yamamoto, 1986, "Computer Control System for Reheating Furnace," Power and Industrial Systems Center, Mitsubishi Electric Corporation, Wadasaki-cho, Hyogo-ku, Kobe, Japan, Automation in Mining, Mineral and Metal Processing 1986, 5th IFAC Symposium.
- [3] 최종호, 1987, "Slab 가열로의 수학적 모델링에 관한 연구," 서울대학교 공과대학 부설 생산기술 연구소.
- [4] 일본 철강 협회, 1983, "가열로내 전열해석법의 기초 및 응용," 일본 철강 협회.
- [5] T.-W. Yoon, D. R. Yang, K. S. Lee and Y.-M. Kwon, 1999, "Adaptive Predictive Control of a Distillation Column", International Journal of Applied Mathematical and Computer Science, vol. 9, no. 1, pp. 193-206.
- [6] 권영민, 1998, "다변수 예측제어." 석사학위논문, 고려대학교 전기공학과.

- [7] D. W. Clarke and C. Mothadi, 1987, "Generalized Predictive Control-Part 1. The Basic Algorithm," Automatica, vol. 23, no. 2, pp. 137-148.
- [8] T.-W. Yoon and D. W. Clarke, 1993, "Receding-horizon predictive control with exponential weighting," International Journal of Systems Science, vol. 24, no. 9, pp. 1745-1757.
- [9] T.-W. Yoon and D. W. Clarke, 1995, "Observer design in receding-horizon predictive control," International Journal of Control, vol. 61, no. 1, pp. 171-191.

**고 현 석**

1998년 고려대학교 전기공학과 학사. 1998년-현재 고려대학교 전기공학과 석사과정. 주관심 분야는 예측제어.

Tel: (02) 3290-3687

E\_mail: khsleo@classic.korea.ac.kr

**임 목 근**

1998년 고려대학교 화학공학과 학사. 1998년-현재 고려대학교 화학공학과 석사과정. 주관심 분야는 공정모사.

Tel: (02) 929-6250

E\_mail: mklim@prosys.korea.ac.kr

**김 정 수**

1998년 고려대학교 전기공학과 학사. 1998년-현재 고려대학교 전기공학과 석사과정. 주관심 분야는 예측제어, 적응제어.

Tel: (02) 3290-3687

E\_mail: bldl@classic.korea.ac.kr

**전 익 수**

1985년 서울대학교 전기공학과 학사. 1999년 고려대학교 전기공학과 석사. 1990년-현재: (주)포스콘 기술연구소, 책임연구원. 주관심분야는 제어 응용.

Tel: (02) 3290-4430

E\_mail: tsjun@poscon.korea.ac.kr

**윤 태 웅**

1984 서울대학교 제어계측공학과 학사. 1986 서울대학교 제어계측공학과 석사. 1994 Oxford대학교 Dept. of Eng. Sci 박사. 1992년-1993년 Oxford대학교 Tutor. 1986년-1995년 한국 과학기술원(KIST), 연구원/선임연구원. 1995년-현재 고려대학교 전기전자전파공학부 조교수/부교수. 주관심 분야는 적응 선형/비선형 제어, 예측제어 및 제어 응용.

(136-701)서울시 성북구 안암동 5가 1번지

고려대학교 공과대학 전기전자전파 공학부

Tel: (02) 3290-3240, Fax: (02) 928-8909

E\_mail: twy@cello.korea.ac.kr

**양 대 륙**

1981년 서울대학교 화공과 학사. 1983년 한국과학기술원 화공과 석사. 1990년 university of California, Santa Barbara, 화공과 박사. 1983년-1986년 KIST, 연구원. 1990년-1991년 ABB Simcon Inc., Application Engineer 1992년-1993년 포항공과대학 화학공학과, 조교수. 1994년-현재 고려대학교 화학공학과, 부교수. 주관심 분야는 공정제어, 공정모사, 공정최적화.

(136-701)서울시 성북구 안암동 5가 1번지

고려대학교 공과대학 화학공학과

Tel: (02) 3290-3298, Fax: (02) 926-6102

E\_mail: dryang@infosys.korea.ac.kr