

냉연 연속 소둔로 가열대 판온제어

정 호 성 유 석 환 백 기 남
산업과학기술연구소 제어연구부 제어연구실

Strip Temperature Control for the Heating Furnace in the Continuous-Annealing Line

Ho-Seong Jeong Seog-Hwan Yoo Ki-Nam Paek
Control & Instrumentation Department
RIST

ABSTRACT

Recently batch type cold rolling processes have been replaced by continuous annealing type processes for cold rolled sheets of mild steel and high strength steel in order to obtain higher productivity, labor saving. In the continuous annealing line, it is very important to maintain the target steel strip temperature at the exit side of each furnace. The automation system of continuous annealing line is based on a hierachical composition. This paper shows how to preset the set value of furnace temperature control for the heating section in a continuous annealing line. Saying in other words, this paper presents the development of an adaptive control approach to control the exit strip temperature in the continuous annealing line. There are three parts in this approach; one is a process modelling and another is recursive parameter estimation and the other is a design of temperature controller.

로, 생산성이 향상되는 등 잇점이 많아서 신설되는 소둔로는 거의 연속식을 채택하고 있는 실정이다. 하지만 크기가 다른 냉연강판이 연속적으로 공정에 투입되므로, 이에 대응한 판온제어방법이 필요하다. 포항제철의 냉연 연속소둔로 공정의 경우, SCC(Supervisory Computer Control)에서의 數式모델을 통하여 각종 설정치를 DDC(Direct Digital Control)에 주면, DDC에서 각종 제어기를 동작시키도록 제어시스템이 구성되어 있다. 본 논문에서 다루고자 하는 부분은 연속소둔로 가열대에서의 SCC level에서의 최적판온제어에 관한 부분으로서, 목표 판온과 실측 판온과의 차이의 제곱과 순회의 노는 설정치와 前회의 노는 설정치의 차이의 제곱을 최소로 하는 판온 제어기를 설계하였다. 이 판온 제어기에 사용되는 매개변수는 출측 판온, 노내 각 부분의 온도 등의 조업 데이터로부터 식별해내어 이것을 판온제어기에 적용하였다. 그 결과, 기존의 정적인 수식모델에 의한 것보다 제어성능이 개선될 수 있음을 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있었다.

1. 서론

냉연공정은 철강공정중에서 최종 단계에 속하는 부분이며, 여기서 생산된 제품은 바로 수요자에게 인도되므로 우수한 냉연 강판을 값싸게 생산하기 위한 제조 공정으로서 연속 소둔설비가 채택되고 있다. 강판의 특성을 결정짓는 작업은 크게 2 가지로 나눌 수 있는데, 첫째는 제강공정에서의 성분 조정이고, 둘째는 강판의 열처리라 할 수 있겠다. 본 논문에서 다루고자 하는 부분은 냉연 공정에서의 열처리 작업을 위한 연속소둔로 설비중에서 가장 중요하다고 할 수 있는 가열대 부분에서의 최적 판온도 제어에 관한 것이다. 연속소둔로는 냉간압연중 발생한 강판의 내부 응력 등을 풀어주기 위한 열처리인데, 기존의 batch식 로에 비해 연속작업을 하

2. 냉연 연속소둔로 및 그 제어시스템의 구성

냉연 연속소둔로는 냉간압연되어 나오는 여러가지의 강판을 용접을 통하여 연결된 강판을 연속적으로 열처리하는 爐로서, 그 구성은 그림 1과 같다. 그림에서 WPD(Welding Point Detector)는 용접점 검출센서를 나타내고 있다. 포항제철의 광양 냉연 연속소둔로의 길이는 2 km 정도이며, 그 중 가열대가 차지하는 부분은 520 m이다. 그리고 통판속도는 200 mpm 내외인 경우가 가장 많으며, 노 중앙의 최대 속도는 430 mpm 정도이다. 신일본제철의 경우 최대 중앙 속도가 310 mpm 정도이다. 그리고 연속소둔로에 들어오는 냉연강판은 대개 2,000 m 내외의 길이이며, 在爐 시간은 10분 내지 15분 정도인 경우가 대부분이다.

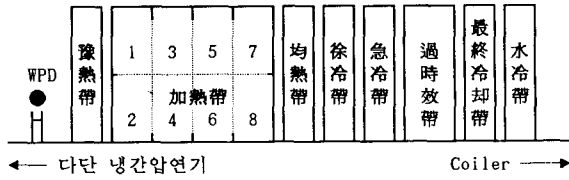


그림 1 냉연 연속소둔로의 구성
 Fig. 1 Configuration of Continuous Annealing Line in the Cold Rolling Mill

그런데, 최근의 CAL조업은 多品種 少量 생산의 경향이 강하여 set교체(판 폭, 판두께, 온도기준의 변경)가 자주 발생하므로, set교체시에 通板速度를 변경하는 경우도 많으며, 통판속도는 가열로의 爐內溫度를 가능한 한 一定하도록 변경시킨다. 포항제철에서의 냉간 압연 연속소둔로에서의 SCC의 판온제어 기능의 흐름은 그림 2와 같고, 각각의 기능은 대강 다음과 같다. 우선 각 강판에 대응하여 운전가능한 노의 통판속도의 범위를 계산하여 운전자에게 지침을 제공하는 능력 계산 기능이 있고, 통판 속도 및 강판 데이터에 의거하여 노

내 각 부분의 설정치를 계산하는 설정계산 기능이 있으며, 통판속도가 변경된다든지, 롤(Roll) 위치 변경, 용접점 통과 등이 발생하면 기동되어 용접점 위치에 대응하여 노내의 각 부분의 설정치를 적시에 변경시키는 Dynamic 제어 기능이 있다. 그리고 현재의 실적치가 안정한 것으로 판별되면, 실적치를 수집하여, 갱신된 parameter를 계산하여 능력계산 및 설정 계산 기능으로 보내는 학습제어 기능이 있는데, Dynamic 제어중에는 학습제어 기능은 동작되지 않는다. 또한 안정 판별 처리는 학습제어 및 Dynamic 제어에 대해 노의 각 부분별로 점검 항목이 전부 허용 편차내에 있을 경우에만, 안정으로 판정한다. 이상의 기존 SCC 조업에서는 노의 특성에 따라 모델 수식의 매개변수를 조정하기가 힘들고, 동일한 사양의 노라도 개별 로의 특성이 약간만 다를 경우 동일 매개변수를 사용할 수가 없다. 게다가 노온 설정치 변경에 따른 판온의 정정시간이 40 내지 60 분 정도로 이것 또한 SCC조업 정착에 많은 문제점을 야기시키고 있다.

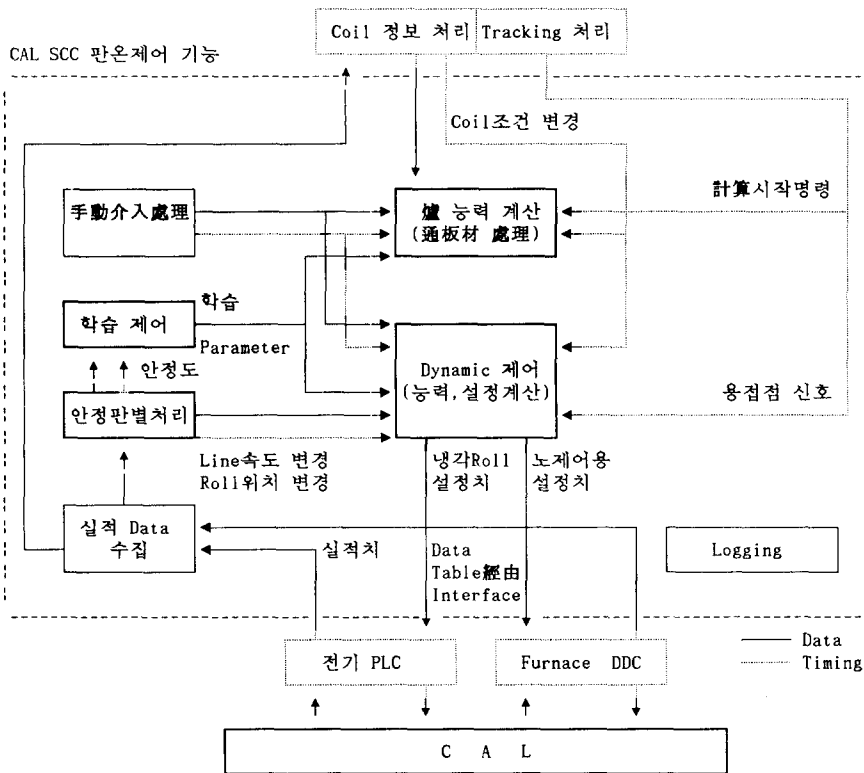


그림 2. 연속소둔로의 판온제어 기능 흐름도
 Fig.2 Flow of the function of strip temperature control

3. 새로운 연속소둔로에서의 판온 제어

연속소둔로의 가열대 판온제어의 가장 큰 목적은 출측 판온의 적중에 있다. 따라서 본 논문에서는 연속소둔로 가열대의 출력을 출측 판온으로 보고, 이 판온의 실현을 위한 입력을 가열대 각 구간에서의 노내 온도로 보았다. 이 값들은 출측 판온의 경우, 열방사 온도계를 통하여 알 수 있으며, 노내 온도는 열전대를 통하여 각각 알 수 있다. 단지 측정할 수 없는 것은 노내에서의 판온이 어떠한 분포를 보이는 가이다. 가열대에 대한 적당한 모델식을 세우고, 이 모델에서의 매개변수를 식별하여, 판온제어기에 적용하였다. 이상의 개념에 대해 도식화한 것이 그림 3이다.

3-1. 모델링과 매개변수 식별

연속소둔로의 가열대에서의 버너(Burner)는 그림 1에서와 같이 8 부분으로 나누어져 있지만, 실제의 경우 1,2구역, 3,4구역, 5,6구역, 7,8구역의 4 구간으로 제어되고 있으므로, 상태변수 표현에 의한 모델의 차수는 4차로 볼 수 있다. 따라서 본 고에서는 1,2구역에서의 중간 예상 판온을 상태변수 X_1 로, 2,3구역에서의 중간 예상 판온을 상태변수 X_2 로, 5,6구역에서의 중간 예상 판온을 상태변수 X_3 으로, 상태변수 4는 7,8구역출구에서의 판온, 즉, 출측 판온을 상태변수 X_4 로 정의하기로 한다. 그리고 상태변수의 출력은, $Y = X_4$ 로 정의하기로 한다. 예열대에서 약 120° C 내지 140° C 정도로 예열된 강판은 가열대를 통과하면, 약 750° C 내지 850° C 정도가 되어 나온다. 본 논문에서는 각 구역별 판온이 1차 함수적으로 상승하는 것으로 가정하였다. 실제로는 앞부분의 판온 상승율이 후단에 판온 상승율에 비해 큰 것으로 나타났지만, 제어기 적용시에는 별다른 차이가 없었기 때문에 차수가 낮고, 수식이 간단하기 때문에 1차 함수 형태의 판온 형태에 대해 매개변수를 식별하고, 그 결과를 제어기에 적용하였다. 예열대 출측 판온을 PHS로 표시하면, i 번째 구간 중간 지점에서의 예상 판온을 TS_i 라 하면, 다음과 같이 표현된다. 이상의 가정을 도식화한 것이 그림 4이다.

$$TS_i = (2i-1)*Y/8 + (9-2i)*PHS/8$$

식(1)은 $(k+1)$ 번째의 상태 $X_i(k+1)$ 를 각 구간에서의 노온 Z_i 와 k 번째의 상태 $X_i(k)$ 와 변화폭이 작아서 직류 성분으로 볼 수 있는 PHS(k)로 표현한 것이다.

$$X_i(k+1) = X_i(k) + g \cdot Z_i(k) + g_1 \cdot PHS(k) \quad (1)$$

여기서 g, g_1 은 적당한 상수이다. 또한 각 구간에서의 노온 설정치를 SF_i 라 했을 때, 노의 동특성을 1차식으로 근사화하면, 식(2)와 같이 표현된다.

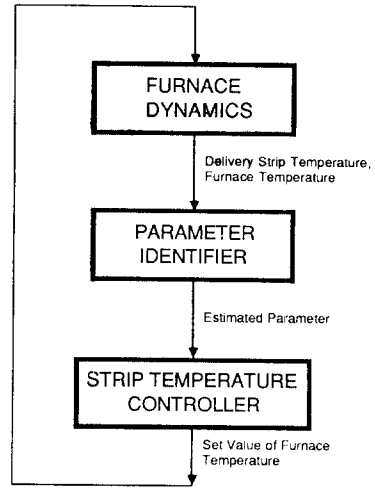


그림 3. 가열대 판온 제어계 개념도

Fig.3 Conceptual Diagram for the Strip Temperature Control System in the Heating Section

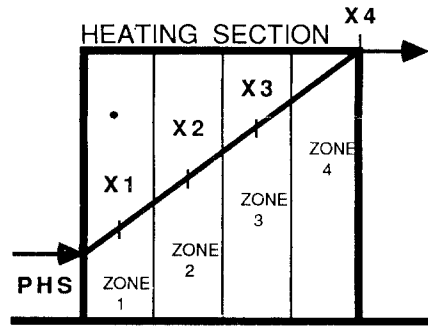


그림 4 가열대 각 구간에서의 예상판온

Fig. 4 Anticipated Strip Temperature in each zone of Heating Section

$$\dot{Z}_i = -M (Z_i - SF_i) \quad (2)$$

여기서 미지량 M 은 실조업 데이터로부터 결정된다. SCC의 계산 시간간격을 T_i 라 하면, 식(2)의 해는 (3)식과 같이 된다.

$$Z_i(t+T_i) = e^{-MT_i} \cdot Z_i(t) + M \cdot SF_i \int_t^{t+T_i} e^{-M(t+T_i-n)} dn \quad (3)$$

여기서 각 구간의 노 특성은 동일한 것으로 가정하였으며, 노온 상승중일 때는 정정 시간이 600 초 정도로서 $\beta = 0.819$ 이고, 노온을 내릴 때는 정정 시간이 900 초 정도로서 $\beta = 0.8763$ 이며, β_1 은 공히 $(1-\beta)$ 이다. 따라서 (3)식은 (4)식과 같이 표현된다.

$$Z_i(k+1) = \beta \cdot Z_i(k) + \beta_1 \cdot SF_i \quad (4)$$

이상의 식들을 상태변수식으로 나타낸 것이 식(5)이다.

$$\begin{bmatrix} X(k+1) \\ Z(k+1) \end{bmatrix} = F \begin{bmatrix} X(k) \\ Z(k) \end{bmatrix} + G \cdot SF(k) + G_0 \cdot PHS(k) \quad (5)$$

$$Y = H \cdot X(k)$$

여기서 F, G, G₀, H 는 각각 다음 식과 같다.

$$F = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -1/8*B_1 & B_1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -3/8*B_2 & 0 & B_2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -5/8*B_3 & 0 & 0 & B_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -7/8*B_4 & 0 & 0 & 0 & B_4 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & \beta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta \end{bmatrix}$$

$$G = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline \beta_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \beta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \beta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \beta_1 \end{bmatrix} \quad G_0 = \begin{bmatrix} 1-7/8*B_1 \\ -5/8*B_2 \\ -3/8*B_3 \\ -1/8*B_4 \\ \hline 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

식(5)에서 매개변수를 추정하기 위해서 출력식을 다시 쓰면, 식(6)과 같이 된다.

$$Y(k) = \varphi^T(k)\theta(k) + PHS(k) \quad (6)$$

여기서 $\theta^T(k) = [B_1 \ B_2 \ B_3 \ B_4]$ 이고,

$$\varphi(k) = \begin{bmatrix} -1/8*Y(k-4)+Z_1(k-4)-7/8*PHS(k-4) \\ -3/8*Y(k-3)+Z_2(k-3)-5/8*PHS(k-3) \\ -5/8*Y(k-2)+Z_3(k-2)-3/8*PHS(k-2) \\ -1/8*Y(k-1)+Z_4(k-1)-1/8*PHS(k-1) \end{bmatrix}$$

이다. 따라서 출력오차를 e(k)라 했을 때, 구하고자 하는 매개변수는 (7)식과 같이 구한다.

$$\begin{aligned} \hat{\theta}(k) &= Y(k) - \varphi^T(k)\hat{\theta}(k) \\ \hat{\theta}(k) &= \hat{\theta}(k-1) + K(k) [Y(k) - \varphi^T(k)\hat{\theta}(k-1)] \\ K(k) &= \frac{P(k-1)\varphi(k)}{R + \varphi^T(k)P(k-1)\varphi(k)} \\ P(k) &= [I - K(k)\varphi^T(k)] P(k-1) + Q \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 $\hat{\theta}(k)$ 는 k 번째에서의 추정된 매개변수를, R은 측정 잡음 공분산, Q는 프로세스 잡음 공분산 행렬을 의미한다.

3-2. 판온 제어기의 설계

3-2. 판온 제어기의 설계

식(6)식을 풀어쓰면 식(8)과 같이 된다.

$$\begin{aligned} Y(k+1) &= \sum_{i=0}^3 A_i Y_{k-i} + \sum_{i=1}^3 B_i Z_{k-i} + f(PHS) + B_4 \cdot Z_4(k) \\ &= C_1 + B_4 \cdot [\beta Z_4(k) + (1-\beta)SF_4(k)] \\ &= C_2 + B_0 \cdot SF_4(k) \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 $C_1 = \sum_{i=0}^3 A_i Y_{k-i} + \sum_{i=1}^3 B_i Z_{k-i} + f(PHS)$ 이고,

$$C_2 = C_1 + B_4 \cdot \beta \cdot Z_4(k) \text{ 이며,}$$

$$f(PHS) = -[7*B_1*PHS(k-4) + 5*B_2*PHS(k-3) + 3*B_3*PHS(k-2) + B_4*PHS(k-1)]/8 \text{ 이다.}$$

k번째 노온 설정치를 주면, 그 효과는 (k+1)번째에 나타날 것이므로, 목적판온 Y_{ref}와 Y(k+1)이 같아지도록 하고, 노온 설정치의 변동이 전회에 비해 너무 크지 않도록 하는 k번째의 노온 설정치를 구하면 된다. 이상의 항목을 목적함수로 표현한 것이 식(9)이다. 따라서 이것을 최소화하는 노온설정치는 식(10)과 같이 된다.

$$J = 1/2*[Y(k+1)-Y_{ref}]^2 + 1/2*W*[SF_4(k)-SF_4(k-1)]^2 \quad (9)$$

$$SF_4(k) = \frac{W*SF_4(k-1)}{B_0^2 + W} - \frac{B_0}{B_0^2 + W} * [C_2 - Y_{ref}] \quad (10)$$

식(9)의 W는 하중인자(weighting factor)를 의미한다. 그리고 식(10)에서 SF₄(k)만을 구한 이유는 실조업에서 사용되고 있는 SF₃(k), SF₂(k), SF₁(k)은 SF₄(k)를 기준으로 각각 20° C 씩 계단식으로 차이가 나게 제어하고 있기 때문이다.

4. 시뮬레이션

이상과 같이 설계된 판온 제어기에 대한 시뮬레이션 결과를 살펴보기로 한다. 그림 5의 (a)는 set교체가 일어난 시점부터 본 논문에서 설계한 제어기가 동작했을 경우의 응답을 보이고 있다. 이 경우 set 교체는 70 번째와 190 번째 샘플에서 일어나고 있다. SCC 조업에서는 한 샘플은 40 초마다 이루어지고 있다. 그림 5의 (a)의 경우에는 판온 오차가 10 ° C 이내로 들어가는 샘플수는 set 교체 후 20 정도이며, 20° C 이내로 들어가는 것은 12 샘플 정도이다. 이것은 시간으로는 8분 정도로서 상당히 긴 시간이지만, 이 결과는 set 교체가 일어난 시점부터 제어를 시작했고, 열방사 온도계의 측온 오차 등을 감안하면, 개선의 여지가 많다고 볼 수 있다. 그림 5의 (b)와 (d)는 각각 그림 5의 (a)와 (c)에 대한 매개변수의 추이를 나타내고 있다. 실제 조업에서는 set교체 시점을 미리 알 수 있으므로, 노온 설정치를 set교체 7 샘플 전에 변경시킴으로써, 연속소둔로를 통과한 냉연 강판의 판온 적응율을 향상시킬 수 있음을 보인 것이 그림 5의 (c)이다. 이 경우에도 set 교체 시점은 그림 5의 (a)와 같다.