

# 소재온도 감도계산을 통한 가열로내 분위기온도 설정방안 연구

## The Study on the Gas Temperature Set by Calculating the Sensitivity of Slab Temperature in Reheating Furnace

강덕홍<sup>†</sup> · 김기홍<sup>\*</sup> · 이용국<sup>\*</sup>

(2000년 11월 2일 접수, 2001년 5월 31일 심사완료)

Deok-Hong Kang, Ki-Hong Kim and Young-Kuk Lee

**Key Words:** Slab(강편), Reheating Furnace(가열로), Residence Time(재로시간), Gas Temperature(분위기 온도), The Total Heat Exchange Factor(총괄열흡수율), Moving Beam(이동빔), Fixed Beam(고정빔)

### Abstract

A new mathematical model to determine the optimal gas temperatures in reheating furnace was proposed for the good quality of products. This model employs sensitivity method to calculate the optimal gas temperatures in each zone for heating the slab up to its discharging target temperature and for heating it uniformly. This method was validated by showing that the calculated discharging temperature of the slab was in a good agreement with its prescribed discharging target one through an off-line simulation.

### 기호설명

$a_1, a_2, a_3$  : 무차원 보정계수  
 $C_p$  : 대표비열 [ $Kcal/Kg\ ^\circ C$ ]  
 $H$  : 소재 두께 [ $m$ ]  
 $N$  : sample 데이터 개수  
 $t$  : 재로시간 [ $hr$ ]

### 그리스문자

$a$  :  $h/(\rho C_p)$ , [ $m/hr$ ]  
 $h$  : 평균 대류열전달계수 [ $Kcal/m^2 hr\ ^\circ C$ ]  
 $\rho$  : 밀도 [ $Kg/m^3$ ]  
 $\sigma$  : Stefan-Boltzmann 상수  
 $\theta$  : 온도 [ $^\circ C$ ]  
 $\theta_{n\ out}^*$  : skid간 추출목표온도 [ $^\circ C$ ]

$\theta_{s\ out}^*$  : skid부 추출목표온도 [ $^\circ C$ ]

### 첨자

$g$  : 로내 분위기 [ $^\circ C$ ]  
 $in$  : 초기온도 [ $^\circ C$ ]  
 $H1$  : 1가열대, 1st heating zone  
 $H2$  : 2가열대, 2nd heating zone  
 $i$  : 계산부위, skid 또는 skid간  
 $j$  : 각 zone  
 $n$  : skid 간  
 $out$  : 추출  
 $P$  : 예열대, preheating zone  
 $S$  : 균열대, soaking zone  
 $s$  : skid

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 포항산업과학연구원, 에너지·화성연구팀

E-mail : kangdh@rist.re.kr

TEL : (054)279-6548 FAX : (054)279-6688

<sup>\*</sup> 포항산업과학연구원 에너지·화성연구팀

### 1. 서론

단히 큰 공정이며, 그 중에서도 압연소재를 굽는 가열로(reheating furnace)는 압연공정 소비 에너지의 반 이상을 차지하고 있어 에너지 수급 면에서 매우 중요하다. 또한 가열공정은 소재의 단순가열 차원을 넘어 제품의 품질을 결정하게 된다. 특히, 최근의 다품종 소량생산 및 품질의 고급화 추세에 따라 고도의 가열로 조업기술이 요구되고 있다.<sup>(1-3)</sup> 이러한 경향에 따라 가열로 조업을 효과적으로 하기 위한 일환으로 컴퓨터에 의한 가열로의 연소제어가 행해진다. 가열로의 연소제어에서는 소재의 추출목표온도와 균열도를 적절하게 확보하는 것을 목표로 한다. 가열로 연소제어 모델은 다음과 같이 크게 네 부분으로 구성된다.<sup>(4,5)</sup>

- 1) 압연 PITCH 계산
- 2) 소재송온계산
- 3) 송온패턴계산
- 4) 분위기온도 설정계산

이 중에서 분위기온도 설정계산은 가열로 연소제어 모델에 있어 최종적인 목표로 가열로의 조업 조건에 따라 적정 대별 분위기온도를 설정하는 것은 매우 중요하다. 분위기온도 설정계산 방법은 전적으로 조업자의 운전경험에 의한 테이블(table)방식, 수식모델방식, 그리고 최근에 신경회로망(neural network)법 등이 산업체에 적용되어 사용되고 있다. 이중에서도 연소제어모델의 근간이 되는 수식모델방식에는 회귀식법, 수식과 테이블 혼합방식 그리고 순수한 수식(편미분 방정식)에 의해서만 분위기온도를 계산하는 방식 등이 있다. 가열로 연소제어 모델 중 수식에 의한 분위기온도 설정계산모델은 주로 가열로를 다수개의 대(zone)로 나누어 각 대의 열수지(heat balance)식을 근간으로 한 최적화 방법을 적용하여 각 대 최적의 연료유량을 산정한다.<sup>(6,7)</sup> 이 방식은 가열로 각 대에 해당하는 외부 표면온도 및 각 대의 사용 연료, 공기유량 등의 데이터를 온라인으로 수집해야 하며, 이때 계측기기의 정확도가 요구된다. 따라서 본 연구에서는 직접적인 각 대의 연료유량 산정방식 대신 각 대의 분위기온도를 산정하는 방식을 제공하고자 한다. 분위기온도 산정방식은 기본 모델식을 가지고 추출온도를 예측하고, 이 예측값이 목표추출온도 및 균열도를 만족시키도록 각 대별 분위기온도에 대한 소재온도의 감도계산을 통한 대별 분위기온도의

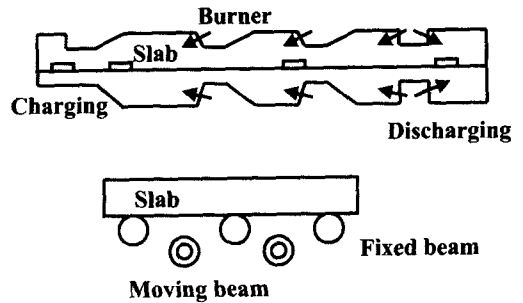


Fig. 1 Schematic diagram of reheating furnace

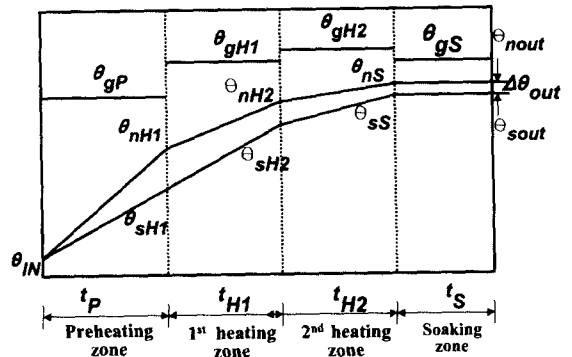


Fig. 2 Basic model concept diagram

증감량을 구하여 분위기 온도를 설정하는 방법으로, 오프라인 시뮬레이션을 통하여 이 방법의 타당성을 검토하였다.

## 2. 이 론

### 2.1 가열로의 개요

가열로는 제철소내 연주공정에 의해 만들어진 소재를 적절히 가열 및 연성을 부여하여 후속공정인 압연공정의 압연기에 대한 부하의 변동폭을 줄여 조업의 안정화를 이루는데 있다. 통상 가열로는 장입측으로부터 네 개의 제어대 즉, 예열대(preheating zone), 1가열대(1st heating zone), 2가열대(2nd heating zone), 균열대(soaking zone)로 구성된다. 가열로의 개략적인 구성은 Fig. 1과 같은데, 이동빔(walking beam)식 가열로의 경우 장입된 소재는 이동지지대(moving beam)에 의해 전진하여 일정시간동안 고정지지대(fixed beam)에 있다가 다시 이동지지대에 의하여 전진하는 것을 반복하면서 가열되어 추출된다.<sup>(8)</sup> 이때 각 빔의 구조물 내부에 위치한 스킨드 파이프(skid pipe)내로 냉각

수가 흐르기 때문에 빔에 접하는 부분(skid 부)의 소재온도는 소재내의 다른 지점과 비교할 때 온도가 낮다. 한편, 소재의 균열도란 스키드부와 스키드간 중간부 소재 단면의 평균온도차를 뜻하는데, 이는 소재가 전체적으로 균일하게 가열되었는지를 판정하는 기준이 된다. 따라서 가열로 실조업시 소재의 추출목표온도와 더불어 목표 균열도를 맞추기 위해 가열로내 각 대의 분위기 온도를 적절하게 설정해 주어야 한다.

## 2.2 분위기온도 설정의 개요

분위기온도 설정은 가열로내 장입되어 있는 소재들에 대하여 일정주기(통상 2분 또는 4분)로 소재온도 예측기능을 하는 소재 승온모델을 통하여 계산된 소재온도를 가지고, 해당 계산열의 모든 소재에 대하여 추출시 각각의 소재온도가 추출목표온도 및 균열도를 확보할 수 있도록 각 대별 적정 분위기온도( $\theta_p, \theta_{H1}, \theta_{H2}, \theta_s$ )를 계산, 설정하는 것을 목적으로 한다. Fig. 2에 분위기온도 설정모델의 기본 개념도를 나타내었다.  $\Delta\theta_{out}$ 은 가열로 추출시 소재의 스키드간부 평균온도( $\theta_{nout}$ )와 스키드부 평균온도( $\theta_{sou}$ )의 편차로 균열도를 의미한다.

## 2.3 기본모델

먼저 소재의 추출온도를 예측하기 위한 기본모델을 세우기 위하여, 소재가 두께방향 온도구배 없이 임의 시간에 대하여 균일한 집중열용계(lumped capacity system)가정을 통하여, 초기온도  $\theta_{in}$ , 두께  $H$ 인 소재가 분위기  $j$ 대의  $\theta_g$ 의 대표로 온에서 시간  $t$ 만큼 경과하였을 경우의  $i$ 부위 평균 소재온도  $\theta_{ij}$ 는 다음과 같은 형태의 기본 모델식으로 나타낼 수 있다.<sup>(9)</sup>

$$\theta_{ij} = \theta_{g,j} + (\theta_{in} - \theta_{g,j}) \exp(-a_{ij} \cdot t_j / H) \quad (1)$$

여기서,

$$a_{ij} = \frac{h_{ij}}{\rho C_{p,j}} \quad (2)$$

$$i = 1 \sim 2 \quad (1 = n, 2 = s)$$

$$j = 1 \sim 4 \quad (1 = P, 2 = H1, 3 = H2, 4 = S)$$

이다. 그리고 식 (1)에서  $h_{ij}$ 는  $j$ 대에 존재하는 소재  $i$ 부위 평균 대류 열전달계수,  $C_{p,j}$ 는 소재가 존재하는 대의 대표비열을 의미한다. 식 (1)에 나타난  $\alpha$ 를 구하기 위하여, 가열로내 고온의 분위기로 부터 소재표면으로의 복사열유속을 일반적인 대류에 의한 열유속으로 표현하면 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$h_{ij} \left( \frac{\theta_{g,j} + 273}{100} - \frac{\theta_{ij} + 273}{100} \right) = \sigma \left\{ \left( \frac{\theta_{g,j} + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{\theta_{ij} + 273}{100} \right)^4 \right\} (a_{1ij} + a_{2ij} \cdot \theta_{g,j} + a_{3ij} \cdot \theta_{ij}) \quad (3)$$

식 (3)의 우측 마지막 소괄호 안에 있는 항들은 집중열용계(lumped capacity system)라는 가정에 대한 보정을 하기 위한 것으로서, 소재와 가열로의 각 대 형상이 고정되어 있기 때문에 임의의 대의 대표로온에서 소재로의 복사열유속계수를 대표로온과 해당계산부위의 소재평균온도의 선형적인 관계로 가정을 하였다. 식 (3)에 사용한 무차원 보정계수  $a_{1ij}, a_{2ij}, a_{3ij}$ 는 실제 온라인용 일차원 두께방향 소재온도 예측모델 계산 결과치를 가지고 구하게 된다. 식 (2)를 식 (3)에 대입하여 소재 부위별과 가열로 대별로 나타내면  $\alpha$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$a_{ij} = \left\{ (a_{1ij} + a_{2ij} \cdot \theta_{g,j} + a_{3ij} \cdot \theta_{ij}) \frac{\sigma}{C_{p,j} \cdot \rho} \left[ \left\{ \left( \frac{\theta_{g,j} + 273}{100} \right)^2 + \left( \frac{\theta_{ij} + 273}{100} \right)^2 \right\} \cdot \left\{ \frac{\theta_{g,j} + 273}{100} + \frac{\theta_{ij} + 273}{100} \right\} / 100 \right] \right\} \quad (4)$$

따라서 식 (1)을 이용하여 가열로 임의의 대에 위치하는 소재에 대하여 계수  $\alpha$ 와 현 시점의 온도 및 예측 잔재로시간을 알면 현재 위치한 대의 통과온도 및 가열로 추출온도를 계산할 수 있다.

## 2.4 무차원 보정계수( $a_{1ij}, a_{2ij}, a_{3ij}$ ) 결정

가열로의 실 조업데이터(장입온도, 소재두께, 대별 재로시간, 대별 분위기온도)와 연소제어모델에 의하여 온라인으로 계산되는 각 대 통과온도 데이터를 수집하여 식 (1)에 대입하여 계산한  $\alpha^*$ 과 식 (4)에 대입하여 구한  $\alpha$ 와의 편차를 최소화하는 목적함수(objective function)를 다음과 같이 정의하였다.

$$E_{ij} = \sum_{k=1}^N (\alpha_{ij} - \alpha_{ij}^*)^2 \quad (5)$$

여기서  $N$ 은 샘플 데이터 셋의 총 개수를 나타낸다. 필요 데이터 셋은 초기 소재온도, 소재두께, 각대 재로시간 및 로온, 스키드부의 각대 추출온도, 스키드간의 각대 추출온도로 이루어지며, 데이터의 개수는 신뢰성을 확보하기 위하여 30 이상을 취하였다.

목적함수  $E_{ij}$ 를 최소화 하는 열전달률 계수를 구하는 조건은

$$\frac{\partial E_{ij}}{\partial a_{1ij}} = 0, \quad \frac{\partial E_{ij}}{\partial a_{2ij}} = 0, \quad \frac{\partial E_{ij}}{\partial a_{3ij}} = 0 \quad (6)$$

이다. 즉, 조건식 (5)에 식 (1)과 (4)를 대입하여 정리하여 매트릭스로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \sum_{k=1}^N C_{ij,k} & \sum_{k=1}^N C_{ij,k} \theta_{gi,k} & \sum_{k=1}^N C_{ij,k} \theta_{ij,k} \\ \sum_{k=1}^N C_{ij,k} \theta_{gj,k} & \sum_{k=1}^N C_{ij,k} \theta_{gj,k}^2 & \sum_{k=1}^N C_{ij,k} \theta_{gj,k} \theta_{ij,k} \\ \sum_{k=1}^N C_{ij,k} \theta_{ij,k} & \sum_{k=1}^N C_{ij,k} \theta_{gj,k} \theta_{ij,k} & \sum_{k=1}^N C_{ij,k} \theta_{ij,k}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{1ij} \\ a_{2ij} \\ a_{3ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^N \alpha_{ij,k}^* \\ \sum_{k=1}^N \theta_{gj,k} \alpha_{ij,k}^* \\ \sum_{k=1}^N \theta_{ij,k} \alpha_{ij,k}^* \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서, 하첨자  $k$  는 샘플링 (sampling) 데이터 셋의 순서를 의미하고,  $C_{ij}$ 는

$$C_{ij} = \frac{\sigma}{C_p \cdot \rho} \cdot \left[ \left\{ \left( \frac{\theta_{gi} + 273}{100} \right)^2 + \left( \frac{\theta_{ij} + 273}{100} \right)^2 \right\} \cdot \left\{ \frac{\theta_{gi} + 273}{100} + \frac{\theta_{ij} + 273}{100} \right\} \right] / 100$$

을 나타낸다.

위  $3 \times 3$  매트릭스 (7)을 풀면 가열로 각 대별, 소재 부위별 무차원 보정계수인  $a_{1ij}$ ,  $a_{2ij}$ ,  $a_{3ij}$ 를 구할 수 있다.

### 2.5 기본모델식의 선형화

기본 모델식 (1)에 의하여 소재의 추출온도예측식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta_{iout} = \theta_{gS} + (\theta_{iS} - \theta_{gS}) \exp(-\alpha_{iS} \cdot t_S/H) \quad (8)$$

스키드, 스키드간의 추출목표온도를  $\theta_{sout}^*$ ,  $\theta_{nout}^*$ 이라 하면,

스키드 부:

$$\begin{aligned} \theta_{gS} + (\theta_{sS} - \theta_{gS}) \exp(-\alpha_{sS} \cdot t_S/H) - \\ \theta_{sout}^* = \theta_{sout} - \theta_{sout}^* \end{aligned} \quad (9)$$

스키드간 부:

$$\begin{aligned} \theta_{gS} + (\theta_{nS} - \theta_{gS}) \exp(-\alpha_{nS} \cdot t_S/H) - \\ \theta_{nout}^* = \theta_{nout} - \theta_{nout}^* \end{aligned} \quad (10)$$

으로 나타낼 수 있다.

식 (1)과 식 (9), (10)의 관계식으로 부터 소재의 추출온도를 각 대 분위기온도( $\theta_p, \theta_{H1}, \theta_{H2}, \theta_S$ )의 함수로 놓고, Taylor's series를 이용하면 위 식 (9), (10)은 각각 다음과 같이 선형화된 식으로 나타낼 수 있다.

스키드 부:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta_{sout}}{\partial \theta_{gP}} \cdot \Delta \theta_{gP} + \frac{\partial \theta_{sout}}{\partial \theta_{gH1}} \cdot \Delta \theta_{gH1} + \\ \frac{\partial \theta_{sout}}{\partial \theta_{gH2}} \cdot \Delta \theta_{gH2} + \frac{\partial \theta_{sout}}{\partial \theta_{gS}} \cdot \Delta \theta_{gS} \\ = \theta_{sout}^* - \theta_{sout} \end{aligned} \quad (11)$$

스키드간 부:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta_{nout}}{\partial \theta_{gP}} \cdot \Delta \theta_{gP} + \frac{\partial \theta_{nout}}{\partial \theta_{gH1}} \cdot \Delta \theta_{gH1} + \\ \frac{\partial \theta_{nout}}{\partial \theta_{gH2}} \cdot \Delta \theta_{gH2} + \frac{\partial \theta_{nout}}{\partial \theta_{gS}} \cdot \Delta \theta_{gS} \\ = \theta_{sout}^* + \Delta \theta_{out}^* - \theta_{nout} \end{aligned} \quad (12)$$

여기서,

- $\Delta \theta_{gP}$  : 예열대 노온 증감량
- $\Delta \theta_{gH1}$  : 1가열대 노온 증감량
- $\Delta \theta_{gH2}$  : 2가열대 노온 증감량
- $\Delta \theta_{gS}$  : 균열대 노온 증감량
- $\Delta \theta_{out}^*$  : 목표균열도(=  $\theta_{nout}^* - \theta_{sout}^*$ )

이다.

### 2.6 감도계산

2.3절에 나타낸 식 (1), (4)을 각 대 로온  $\theta_p, \theta_{H1}, \theta_{H2}, \theta_S$ 에 대하여 편미분하면 각 대 노온 변화에 따른 소재 평균온도의 변화량을 나타내는 감도계산은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$il=i2$  인 경우

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta_{iil+1}}{\partial \theta_{g,il}} = 1 - \exp\left(-\frac{\alpha_{iil} \cdot t_{il}}{D}\right) - (\theta_{iil} - \theta_{g,il}) \\ \cdot \frac{t_{il}}{H} \cdot \frac{\partial \alpha_{iil}}{\partial \theta_{g,il}} \cdot \exp\left(-\frac{\alpha_{iil} \cdot t_{il}}{H}\right) \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \alpha_{iil}}{\partial \theta_{g,il}} = [(\alpha_{1iil} + \alpha_{2iil} \cdot \theta_{g,il} + \alpha_{3iil} \cdot \theta_{iil}) \cdot \\ \left\{ \left( \frac{\theta_{g,il} + 273}{100} + \frac{\theta_{iil} + 273}{100} \right)^2 + \right. \\ \left. 2 \cdot \left( \frac{\theta_{g,il} + 273}{100} \right)^2 \right\} / 10000 + \alpha_{2iil} \cdot \\ \left\{ \left( \frac{\theta_{g,il} + 273}{100} \right)^2 + \left( \frac{\theta_{iil} + 273}{100} \right)^2 \right\} \cdot \\ \left( \frac{\theta_{g,il} + 273}{100} + \frac{\theta_{iil} + 273}{100} \right) / 100 \\ \cdot \frac{\sigma}{C_{p,il} \cdot \rho} \end{aligned} \quad (14)$$

$il>i2$  인 경우

$$\frac{\partial \theta_{jil+1}}{\partial \theta_{g,i2}} = \left\{ \frac{\partial \theta_{jil}}{\partial \theta_{g,i2}} - (\theta_{jil} - \theta_{g,i1}) \cdot \frac{t_{il}}{H} \cdot \frac{\partial a_{jil}}{\partial \theta_{g,i2}} \right\} \cdot \exp\left(-\frac{a_{jil} \cdot t_{il}}{H}\right) \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial a_{jil}}{\partial \theta_{g,i2}} = & [(a_{1jil} + a_{2jil} \cdot \theta_{g,i1} + a_{3jil} \cdot \theta_{jil}) \cdot \\ & \left\{ \left( \frac{\theta_{g,i1} + 273}{100} + \frac{\theta_{jil} + 273}{100} \right)^2 + \right. \\ & \left. 2 \cdot \left( \frac{\theta_{jil} + 273}{100} \right)^2 \right\} / 10000 + a_{3jil} \cdot \\ & \left\{ \left( \frac{\theta_{g,i1} + 273}{100} \right)^2 + \left( \frac{\theta_{jil} + 273}{100} \right)^2 \right\} \cdot \\ & \left. \left( \frac{\theta_{g,i1} + 273}{100} + \frac{\theta_{jil} + 273}{100} \right) / 100 \right] \\ & \cdot \frac{\sigma}{C_{p,i1} \cdot \rho} \cdot \frac{\partial \theta_{jil}}{\partial \theta_{g,i2}} \end{aligned} \quad (16)$$

여기서,  $i1, i2$ 는 가열로의 각 대를 나타내는 심벌(symbol)로 예열대(P), 1가열대(H1), 2가열대(H2), 균열대(S)를 의미하는 변수이고,  $j$ 는 스키드(s)와 스키드간(n)을 의미하는 변수이다.

### 3. 노온설정모델

상기에 전술한 이론을 바탕으로 가열로의 각대 노온설정치를 계산하기 위한 프로그램의 흐름도(flowchart)를 Fig. 3에 간략히 나타내었다. 먼저 대별 노온의 초기치를 설정하고, 이 설정된 노온과 전술한 소재승온이력 계산모델(소재의 계산부위별 두께방향 1차원온도 예측모델)에 의해 구해진 현시점의 소재 가열이력 데이터(각 부위별 평균온도)를 가지고 기본모델식 (1)을 이용하여 스키드와 스키드간의 추출온도를 예측한다. 스키드부 추출온도 예측치와 소재추출목표치와의 편차 및 스키드부 추출온도 예측치와 스키드간부의 추출온도 예측치의 편차에 대한 절대치를 각각 추출온도 허용치 및 목표균열도와와의 비교를 통하여 각대 노온 설정치가 적절한지를 다음과 같은 조건들을 이용하여 판단하게 된다.

$$\begin{aligned} |\theta_{sout} - \theta_{sout}^*| &\leq \Delta \theta_D \\ \theta_{nout} - \theta_{sout} &\leq \Delta \theta_{out}^* \end{aligned} \quad (17)$$

여기서,  $\Delta \theta_D$ 는 수속허용치로서, 각 해당 소재의 추출목표온도 대비 추출 가능한 추출온도의 허용범위를 나타낸다. 즉, 스키드부 추출예측온도가 추출허용온도 범위 안에 들어오면 추출목표온

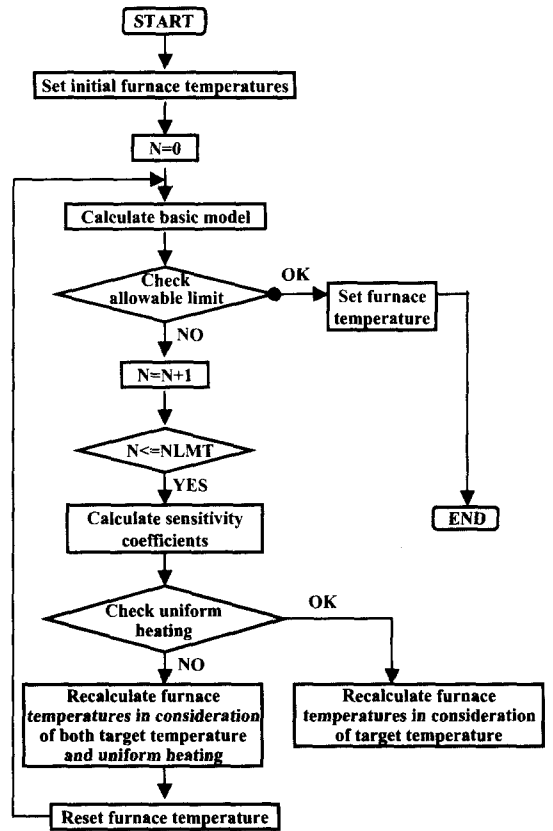


Fig. 3 Flowchart

Table 1 Thermophysical properties of SUS304

Temperature [°C]	Specific heat [kcal/kg°C]	Thermal conductivity [kcal/hrmK]	Temperature [°C]	Specific heat [kcal/kg°C]	Thermal conductivity [kcal/hrmK]
0	0.116	42.8	750	0.150	23.0
50	0.120	42.5	800	0.148	20.9
100	0.124	41.4	850	0.148	20.9
150	0.130	40.3	900	0.148	22.0
200	0.130	38.9	950	0.146	22.7
250	0.136	37.1	1000	0.150	23.0
300	0.138	35.6	1050	0.152	23.8
350	0.146	34.6	1100	0.156	24.5
400	0.150	32.8	1150	0.160	25.2
450	0.160	31.3	1200	0.162	25.9
500	0.168	30.2	1250	0.166	26.6
550	0.180	29.2	1300	0.170	27.3
600	0.186	28.1	1350	0.174	28.0
650	0.200	27.0	1400	0.178	28.7
700	0.522	25.9			

도에 대하여는 수속되었다고 한다. 그리고 스키드부와 스키드간부 사이의 평균온도 편차가 지정된 목표 균열도 이내에 들어오면 균열도가 확보되었다는 뜻이며, 이를 목표균열도가 수속되었다고 한다.

수속이 되지 않을 경우 상기에 전술한 선형화된 기본모델식 (11), (12)와 감도계산식 (13) ~

(16)을 이용하여 대별 노온 증감량, 즉 새로운 각대 로온 설정값을 계산한다. 이 계산된 노온 설정치를 가지고 기본모델식 (1)을 사용하여 추출온도 예측치를 구하고 다시 수속판정을 하게 된다. 이 과정은 지정된 반복계산 횟수 (NLMT=5)를 넘지 않는 범위 내에서 수속이 될 때까지 행해지며, 또한 목표균열도가 수속이 되고 추출목표온도가 미수속인 경우에는 선형화된 기본모델식 (9)와 감도계산식 (12) ~ (15)를 사용하여 추출온도만을 고려한 로온설정과정을 행하게 된다.

#### 4. 적용성 검토

소재온도 감도계산을 통한 본 가열로 로온 설정방법의 유용성을 검토하기 위하여 유효로 길이 41.5m이고, 예열대(11.5m), 1가열대(10.5m), 2가열대(10.5m), 균열대(9m)의 네 개의 대로 이루어진 워킹빔식 가열로(POSCO 2후판 가열로)를 대상으로 하였으며, 소재가 상온인 상태로 장입(cold charge)되어 이동빔에 의해 로내에서 등속도로 이동되면서 가열되어 추출하는 경우로 제한하여 오프라인 시뮬레이션을 수행하였다. 대상소재는 250mm(두께)×1900mm(폭)×3520mm(길이)의 SUS 304를 택하였으며 table 1에 해당강종의 온도에 따른 비열 및 열전도도를 나타내었다. 오프라인 시뮬레이션을 위한 계산조건은 다음의 table 2에 나타내었다. 여기서 목표균열도는 식 (17)에서 처럼 스킨드간부 평균온도와 스킨드부 평균온도와 의 차이로 정의하였다. 그리고 초기 노온설정치는 예열대, 1가열대, 2가열대 그리고 균열대에 대하여 각각 950℃, 1200℃, 1250℃ 그리고 1210℃을 적용하였다. 그리고 무차원 보정계수인  $a_{1ij}$ ,  $a_{2ij}$ ,  $a_{3ij}$ 를 구하기 위하여 2.4절에 전술한 것처럼 소재초기온도, 소재두께, 각대 재로시간에 대한 소재 두께방향의 1차원 온도예측모델<sup>(9)</sup>을 이용하여 계산된 스킨드부의 각대 평균추출온도, 스킨드간의 각대 평균추출온도의 데이터 셋을 가지고 식 (7)을 풀어 무차원 보정계수인 무차원 보정계수인  $a_{1ij}$ ,  $a_{2ij}$ ,  $a_{3ij}$ 를 구하여 table 3(a), (b)에 나타내었다. 이와 같은 테스트 조건들을 가지고 Fig. 3의 흐름도에 따라 오프라인 시뮬레이션을 실시하면, 가열로 장입에서 추출시까지 4분 주기로 테스트 소재의 온도계산 및 추출목표온도와 목표 균열도를 맞추기 위한 각대 분위기 온도값을 계산하게 된다.

Fig. 4는 테스트 소재의 초기조건에서 부터 추

Table 2 Test conditions

Total residence time	Target temperature $\theta_{sout}^*$	Charging temperature	Allowable limit $\Delta\theta_D$	Uniform heating $\Delta\theta_{out}^*$
240min	1180℃	20℃	5℃	1.0℃

Table 3(a) Coefficients for skid part ( $a_1, a_2, a_3$ )

	Preheating zone	1st heating zone	2nd heating zone	Soaking zone
$a_1$	0.1811E+01	0.1985E+01	0.3518E+01	0.8029E+00
$a_2$	-1.1087E-02	-1.1017E-02	-1.1927E-02	-1.1077E-02
$a_3$	-5.607E-03	-1.1050E-02	-3.889E-03	-1.1077E-02

Table 3(b) Coefficients for non-skid part ( $a_1, a_2, a_3$ )

	Preheating zone	1st heating zone	2nd heating zone	Soaking zone
$a_1$	0.2309E+01	0.2401E+01	0.4753E+01	0.6821E+00
$a_2$	-1.1383E-02	-1.1920E-03	-1.2841E-02	-1.1151E-02
$a_3$	-5.464E-03	-1.1661E-02	-1.3486E-03	0.1116E-02

출시까지의 재로시간에 따른 각대 노온설정 값 및 소재온도, 균열도의 변화 추이를 나타낸 것이다. Fig. 4에서 1은 균열도, 2는 스킨드부 평균온도, 3은 스킨드간부 평균온도, 4는 로내 가스온도 프로파일 그리고 5는 시간에 따른 각대 로온 설정치의 변화를 의미한다. Fig. 4에서 알 수 있듯이, 1가열대 까지는 스킨드부와 스킨드간부 사이의 온도편차인 균열도가 증가하지만 2가열대로 들어오면서 균열도는 감소하여 최종 추출시에는 스킨드부와 스킨드간부 사이의 온도편차는 거의 나타나지 않는다. 그리고 각 대의 초기설정 노온 950℃, 1200℃, 1250℃ 그리고 1210℃에 대하여, 최종적으로 예열대는 48℃ 증가, 1가열대는 16℃ 감소, 2가열대는 로온은 증감량이 없고, 균열대는 24℃ 감소함을 나타내었다. Table 3에 조업조건에서 명시된 테스트 소재의 목표온도와 목표균열도 대비 노온설정모델을 통하여 계산된 테스트 소재의 추출온도와 균열도를 비교하여 Table 4에 나타내었다.

Table 4에서 알 수 있듯이 본 연구의 노온설정방법에 의하여 대별 필요로온을 설정하였을 경우 추출 목표온도 대비 +3.4℃, 목표 균열도 대비

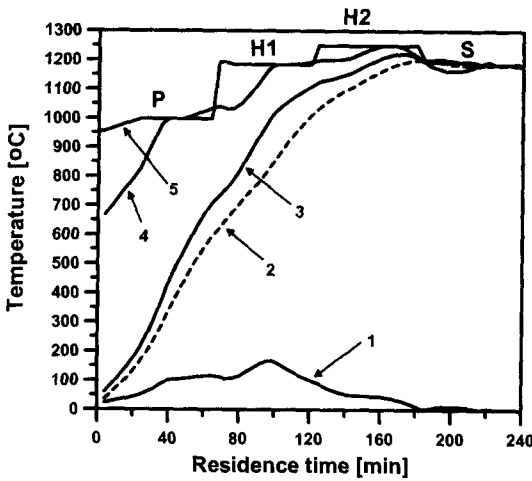


Fig. 4 Variations of slab temperatures with residence time according to the setting values of gas temperature in each zone

Table 4 Comparison of specified and calculated values

Specified Values			Calculated Values	
Discharging temp.	Uniform heating	Allowable limit	Discharging temp.	Uniform heating
1180°C	1.0°C	5°C	1183.4°C	0.5°C

+0.5°C의 편차로 조업조건에서 명시된 수속허용치 5.0°C와 목표균열 1.0°C 이내로 들도록 가열로 내 대별 로온설정제어가 잘 이루어짐을 알 수 있으며, 가열로 연소제어시 정확성을 만족시킬 수 있는 유용한 방법이 될 수 있다.

### 5. 결론

본 연구는 가열로 연소제어시 소재의 적정가열을 위한 대별 노온설정 관련하여, 소재온도감도 계산법을 이용하는 필요로운계산 방법을 제시하였다. 또한, 실 가열로에 대한 오프라인 시뮬레이션을 통하여 감도계산을 통한 필요로운 계산방법이 온라인적용이 가능함을 알 수 있었으며, 향후 실 가열로 연소제어 시스템에 본 필요로운 설정 모델을 이식하여 온라인 적용 예정이다.

### 후 기

본 연구는 POSCO의 연구비 지원에 의하여 이루어진 것으로 이에 감사합니다.

### 참고문헌

- (1) Ishida, R, Matsuura, Y., Sawae, M. and Ohtomo, A., 1983, R&D, 神戸製鋼技報, Vol. 33, No. 4, p. 81.
- (2) Veslocki, T. A., Smith, C. C. and Kelly, C. D., 1986, Automatic Slab Heating Control at INLAND'S 80-IN. HOT STRIP MILL, Iron & Steel Engineer, Vol. 63, No. 12, pp. 47~54.
- (3) Lee, G. S., Yoo, E. J. and Song, D. I., 1985, HWAHAK KONGAK 23, 137.
- (4) 若宮宣範, 住野知子, 1982, 三菱電機技報, Vol. 59, No. 4, p. 294.
- (5) Hollander, F. and Zuurbier, S. P. A., 1982, "Design, Development and Performance of On-Line Computer Control in a Three-Zone Reheating Furnace, Iron & Steel Engineer, Vol. 59, No. 1, pp. 44~52.
- (6) Masamoto Kamata, Tatsuo Kuraishi, etc., 1979, "Computer Control System for Continuous Reheating Furnace of Hot Strip Mill," 日本鋼管技報, No.82, pp. 38~46.
- (7) Naoharu Yoshitani, Youichi Naganuma, and Toshio Yanai, 1991, Optimal Slab Heating Control in Reheating Furnaces, Nippon Steel Technical Report, No. 49, pp. 45~50.
- (8) Hollander, F. and Zuurbier, S. P. A., 1985, "Accurate Temperature Control of the Reheating Process at Mixed Cold and Hot Charging," Proceedings of the International Conference on Process Control and Energy Savings in Reheating Furnaces, Vol. 36, No. 6, pp. 1~6.
- (9) 강덕홍, 김기홍, 1998, "후판가열로 연소제어 수식모델 성능향상 연구," RIST 연구보고서 (98A309)