

< 논문 >

간접 가열방식의 연속식 열처리로내 판(Plate) 온도해석에 관한 연구

김영득* · 강덕홍** · 김우승†

(2005년 12월 5일 접수, 2006년 4월 27일 심사완료)

A Study on the Prediction of Plate Temperature in Indirectly-Fired Continuous Heat Treatment Furnace

Young-Deuk Kim, Deok-Hong Kang and Woo-Seung Kim

Key Words: Heat Treatment Furnace(열처리로), Thermal Analysis(열해석), View Factor(형태 계수) Plate(판)

Abstract

This study has been performed to predict the transient thermal behavior of the plate in indirectly-fired continuous heat treatment furnace. The temperature profiles in the plate are determined solving the transient one-dimensional heat conduction equations. To verify the validity of the present numerical results, the present results obtained from the transient analysis are compared with those of experiments. Extensive parametric investigations are performed to examine the effects of the emissivities of the plate and refractory, plate thickness and velocity, as well as the gas temperature, on the thermal behavior of the plate.

기호설명

A : 면적, mm²
 A_{gp} : 가스의 흡수율
 c : 비열, J/gK
 D/S : 노의 Drive Side
 F : 형태계수
 H : 노의 높이, mm
 h : 대류열전달계수, W/mm²K
 H_p : 판의 두께, mm
 k : 열전도계수, W/mmK
 L : 노의 길이, mm
 L_p : 판의 길이, mm
 N : 전체 영역(zone) 수

q : 열유속, W/mm²
 S : 두 영역간의 거리, mm
 T : 온도, °C
 t : 시간, sec
 W : 노의 폭, mm
 W_p : 판의 폭, mm
 W/S : 노의 Work Side
 x : 노의 폭 방향
 y : 노의 길이 방향
 z : 노의 높이 방향

그리스 문자

$\Delta\epsilon_{pw}$: 불꽃복사에 대한 교정인자
 ϵ : 방사율
 ϵ_{pw} : 직접교환인자
 θ : 극 각도, rad
 ρ : 밀도, g/mm³
 σ : Stefan-Boltzmann 상수

† 책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학과
 E-mail : wskim@hanyang.ac.kr
 TEL : (031)400-5248 FAX : (031)418-0153

* 회원, 한양대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 포항산업과학연구원 에너지 연구실

T_{gm} : 평균가스투과율

하첨자

- g : 가스
- i : 구분번호
- p : 판
- t : 전체 열유속(복사+대류)
- w : 벽

1. 서론

간접 가열방식을 적용한 열처리로는 노내 분위기 온도의 제어가 요구되는 야금(metallurgy), 도료 에나멜링(paint enameling), 제약 산업(pharmaceutical industry) 등에서 널리 사용되고 있다. 대부분의 경우 산화(oxidation)와 탈탄(decarburization)과 같은 노내 가스의 판에 대한 좋지 않은 영향을 최소화 또는 제거 할 필요성이 있다. 이로 인해 간접 가열방식의 복사관(radiant tube)과 고온의 노가 사용되며, 판(plate)과 같은 금속의 열처리에서 노내 분위기 온도는 중요한 역할을 한다.

간접 가열방식의 열처리로내 열해석은 복사관(radiant tube)내 난류유동, 열전달, 화학반응 그리고 노와 복사관내 복사 및 대류열전달, 판에서의 전도 등과 같은 노내 현상에 대한 정량적인 해석을 복잡한 노의 구조와 형상에 대해 모두 고려해야 하기 때문에 피가열물에 대한 열전달 과정을 정확하게 예측하는 것은 매우 어렵다. 현재 이러한 상세한 해석은 아직 이루어지지 않고 있으며,

간략화한 열처리로 모델에 대하여 기존의 여러 연구가들에 의해 수행 된 바 있다.⁽¹⁻⁴⁾

Ramamurthy et al.⁽¹⁾은 복사관의 일정 표면열유속 조건하에서 열처리로의 일부 형상에 대하여 노벽과 판의 1차원 비정상 상태를 해석하였다. 그들은 하부 열처리로에 대해서는 고려하지 않았으며, 판에서의 대류 영향력은 복사에 비해 무시할 수 있을 만큼 작다는 것을 보여주었다. 또한 판과 노벽의 방사율 그리고 판의 물성치와 두께 등과 같은 여러 가지 변수에 따른 판과 노벽의 온도분포를 해석하였다.

본 연구에서 고려한 열처리로는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이, 판의 추출목표온도에 도달시키기 위하여 노의 장입측으로부터 18개의 제어대(region) 즉, 1개의 입구대, 3개의 장입대, 10개의 가열대, 3개의 추출대 그리고 1개의 출구대로 구성되어 있으며, 판의 종류와 재로시간에 따라 각 대의 가열온도가 결정되어진다. 또한 상부 열처리로에는 172개의 복사관(blind-ended type radiant tube), 하부 열처리로에는 135개의 롤러(roller)와 102개의 복사관이 설치되어 있는 매우 복잡한 형상이다.

본 연구에서는 실험을 통해 얻은 노내 분위기 온도를 입력 조건으로 사용하여 열처리로의 전체 형상에 대하여 판의 1차원 비정상 상태에 대해 해석하였으며, 이를 실험 결과와 비교분석하였다. 또한 판과 노벽 표면의 방사율, 판의 두께와 장입속도 그리고 노내 분위기 온도의 변화에 따른 판의 온도변화 분석을 통해 열처리로의 최적 운전조건을 도출하고자 한다.

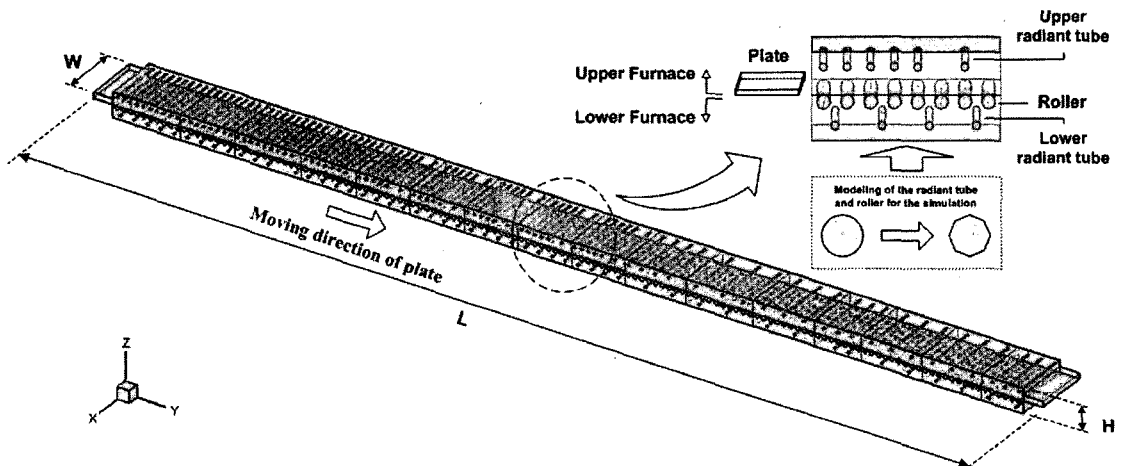


Fig. 1 Physical model of indirectly-fired continuous heat treatment furnace

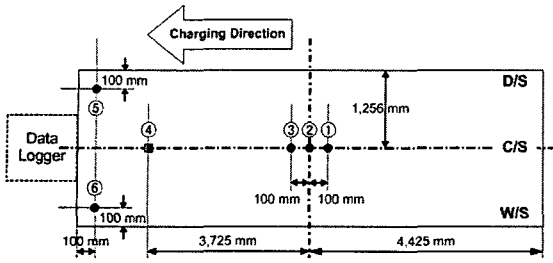


Fig. 2 Specification of test plate used for the temperature measurement

Table 1 Base configuration parameters for the furnace and test plate

Furnace dimensions	Length, mm	84,700
	Height, mm	2,204
	Width, mm	4,998
Material of plate		iron
Plate size ($H_p \times W_p \times L_p$), mm		25×2,512×8,850
Plate velocity, mm/s		27.5
Normalization temperature of plate		910°C
Time interval of data acquisition		10 sec

Table 2 The position and usage of thermocouple

Position of thermocouple	Distance from the bottom surface of the test plate, mm
①	5
②, ⑤, ⑥	12.5
③	20
④	25
Symbol	Usage
Square	Measurement of gas temperature
Circle	Measurement of plate temperature

2. 실험 방법 및 결과

2.1 실험 방법

열처리로 측온실험은 열처리로의 열해석에 필요한 데이터의 제공 및 수치해석의 타당성을 검증하기 위해 수행하였으며, 본 연구에서 고려한 열처리로의 형상 및 좌표계는 Fig. 1에 나타내었다.

Table 1을 통해 알 수 있듯이 본 연구에서 고려된 판의 두께는 25mm이며, 추출목표온도는 910°C이다. 그리고 본 실험을 통해서 노내 분위기 온도와 판의 두께와 위치에 따른 온도분포를 얻기 위해 열전대(Mineral insulated, Type K, 3mm diameter)를 Fig. 2와 Table 2에 나타낸 바와 같이 판에 설치하였다.

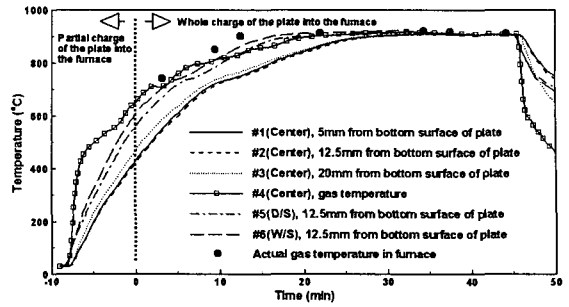


Fig. 3 Temporal variations of the plate and gas temperature

Table 3 Time required to the normalization temperature of each position on the test plate

Number of thermocouple	Height (mm)	Position	900°C (min)	910°C (min)
①	5	Center	28	35
②	12.5	Center	28	33
③	20	Center	27	32
④	25	Center	21	26
⑤	12.5	D/S	20	27
⑥	12.5	W/S	16	19

장입 전 상온 상태의 판은 노내로 장입되어 롤러에 의해 등속($V_p=27.5\text{mm/sec}$)으로 이동되며, 데이터 계측시스템(data logger system)을 사용하여 10초 간격으로 노내 분위기와 판의 온도를 측정하였다. 그리고 노내 열전달에 데이터 계측시스템의 영향을 최소화하기 위해 이를 용접을 통해 판의 선단에 고정시켰다.⁽⁵⁾

2.2 실험결과

실험을 통해 얻은 판과 노내 분위기 온도분포를 재료시간에 따라 Fig. 3에 나타내었다. 실험에서 노내 복사관(blind-ended type radiant tube, 총 274개)은 약 31개가 소화(fire extinguishing)되어 약 88.7% 이상이 정상 가동되었다.

판 전체가 노내로 장입한 후($t \geq 0 \text{ sec}$), 판은 전 지점에 걸쳐 28분 내에 목표온도의 $\pm 10^\circ\text{C}$ 이내 도달하였으며, ③번 열전대가 위치한 판의 온도는 재료시간 내 최대 912°C까지 상승하였다. 또한 가열시간 33분까지는 W/S부의 가열능력이 우수하나, 그 이후의 시간에서는 다른 지점과 유사해짐을 알 수 있으며, 두 모서리부(W/S부와 D/S부)의 온도차는 5°C 이내로 온도분포가 균일해짐을 알 수 있다.

그리고 판의 재료시간이 약 10분과 20분 사이

Table 4 Number of the zones for the furnace

	Location	Number	Total number
Lower furnace	Side wall	32	1,540
	Bottom wall	20	
	Roller	1,080	
	Radiant tube	408	
Upper furnace	Side wall	36	746
	Top wall	22	
	Radiant tube	688	

에서 노내 분위기 온도(④번 열전대)가 판의 온도(⑤, ⑥번 열전대)보다 낮게 나타나는 이유는 복사판의 소화로 인한 것이다.

또한 열전대가 위치해 있는 각각의 지점에 대하여 900℃와 판의 목표온도인 910℃까지의 도달 시간을 Table 3에 나타내었다. 두 모서리부는 판의 상부, 하부 그리고 옆면으로부터 모두 열이 유입되므로 목표온도로의 도달시간이 판의 다른 지점에 비해 상당히 빠르다. 그리고 복사판의 수가 상대적으로 작고 롤러(roller)와 같은 장애물이 존재하는 하부 열처리로보다 상부 열처리로에서 모든 표면으로부터 판으로의 조사(irradiation)가 상대적으로 크기 때문에 상부 표면이 하부 표면보다 목표온도에 도달하는 시간이 빠름을 알 수 있다.

3. 수치적 모델

3.1 형태계수

Table 1과 5에 나타낸 열처리로의 기하학적 형상에 대하여 판의 복사열전달을 고려하기 위해 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 열처리로를 모델링하였다. Fig. 1에서 열처리로는 총 18개의 대(region)로 이루어져 있으며, 판의 동선(traffic line)을 기준으로 크게 상·하부로 구분하여 열처리로내 열해석을 수행하였다.

노내 상·하부의 복사판과 롤러는 각각 172, 102 그리고 135개가 설치되어 있다. 이는 수치해석을 위하여 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 W/S부와 D/S부에 각각 설치된 2개의 복사판을 1개의 복사판으로 가정하고, 각각의 복사판과 롤러는 8개의 영역(zone)으로 나누었다. 따라서 Table 4에 나타낸 바와 같이 상·하부 열처리로는 각각 1540, 746개의 영역으로 분할하였으며, 총 2286개의 영역에 대한 형태계수를 수치적으로 계산하였다.

표면 A_i 와 A_j 사이의 복사형태계수는 표면 A_i

Table 5 Physical properties used in the present model⁽¹⁾

iron:		
ρc (J/mm ³ K)	k (W/mmK)	ϵ_p
$3.667 \times 10^{-6}(T_p-300)$	$0.112(1-0.001T_p)+5 \times 10^{-10}T_p^2$	0.3
• Velocity	: 27.5mm/s	
• Thickness	: 25mm	
Miscellaneous:		
• Number of radiant tubes:		
- upper furnace	: 172 (W/S: 86, D/S: 86)	
- lower furnace	: 102 (W/S: 51, D/S: 51)	
• Number of rollers:	: 135	
• Wall emissivity	: 0.8	
• Heat transfer coefficient	: 10^{-6} W/mm ² K	
• Time step		
- inlet and outlet regions	: 6.51 sec	
- other regions	: 4.36 sec	
• Surface temperature of radiant tubes	: Gas temperature+50℃	
• Radius of radiant tube	: 101mm	
• Length of radiant tube	: 2,249mm	
• Radius of roller	: 180mm	

를 떠나는 전체 확산 에너지 중 직접적으로 표면 A_j 를 향하여 도달하는 확산 에너지의 분율을 나타내며, 다음과 같이 표현된다.

$$F_{i-j} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos\theta_i \cos\theta_j}{\pi S^2} dA_i dA_j \quad (1)$$

여기서 θ 는 두 표면을 잇는 선분이 각 표면의 법선 벡터와 이루는 각을 나타내고, S 는 선분의 길이(두 표면이 떨어진 거리)를 나타낸다.

앞서 기술한 바와 같이 열처리로의 내부에는 수백개의 롤러 또는 복사판이 설치되어 있으며, 이는 형태계수를 계산할 때 장애물로 작용을 한다. 따라서 본 연구에서는 표면을 유한한 개수의 미소 표면으로 나누고, 두 표면사이에 장애물에 대한 판단을 수행한 후, 식 (1)을 적용하여 미소 표면간의 형태계수를 구한 뒤 전체 표면에 대해 수치적분(numerical integration)을 수행하여 형태계수를 계산하였다.

해석 대상에 대하여 본 연구에서 적용한 수치적 방법을 통해 얻은 형태계수들의 정확도는 다음과 같은 합규칙(summation rule)을 이용하여 판단하였으며, 노내 대부분의 위치에서 최대 1% 미만의 오차를 보임을 확인하였다.

$$\sum_{j=1}^N F_{di-j} = \sum_{j=1}^N F_{i-j} = 1 \quad \forall i \quad (2)$$

3.2 지배방정식과 경계조건

열처리로내 열해석을 위해서 본 연구에서는 복사관의 표면을 일정 표면온도로 가정하여 복사관 내 연소모델을 고려하지 않은 간략화한 수학적 모델을 사용하였다. 본 연구의 해석을 위해 도입한 가정은 아래와 같다.

① 복사관의 표면온도는 길이방향으로 균일하다. 이는 주어진 열처리로 내 분위기 온도 하에서 복사관의 표면온도변화는 50°C를 넘지 않는다는 것이 Harder et al.⁽²⁾과 Chapman et al.⁽³⁾에 의해 보고된 바 있다.

② 열처리로는 34개(상부: 18, 하부: 16)의 가스 영역(zone)으로 나뉘어지고, 상·하부 열처리로의 분위기 온도는 동일하며, 각 영역에서의 분위기 온도는 균일하다.

③ 열처리로내 모든 표면은 방사체이며, 확산 반사체이다. 또한 복사 물성치는 균일하고 방향에 대해 독립적이다.

④ 틀러와 노벽의 표면온도는 균일하며, 각 영역에서의 분위기 온도와 동일하다.

⑤ 열처리로의 외벽은 단열이며, 판과 틀러와의 전도열전달은 짧은 접촉시간으로 인해 무시한다.

⑥ 열처리로내 가스는 비참여 매체이다. 판의 산화와 탈탄 등을 방지하기 위해 아르곤과 질소와 같은 가스가 채워져 있다.

판의 두께방향의 온도분포를 계산하기 위해서 본 연구에서 고려한 1차원 비정상 열전도 방정식은 다음과 같다.

$$\rho c \frac{\partial T_p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T_p}{\partial z} \right) \quad (3)$$

판의 상·하면에서의 경계조건은 아래와 같다.

$$-k \frac{\partial T_p}{\partial z} = -q_t \quad \text{또는} \quad q_t \quad (4)$$

여기서 열유속(q_t)은 복사 및 대류에 의한 열전달의 합으로 식 (5)와 같이 주어진다.

$$q_t = q_{rad} + q_{conv} \quad (5)$$

식 (5)에서 나타나는 복사에 대한 열유속(heat flux)은 Leden⁽⁶⁾이 사용한 수학적 모델을 적용하였으며, 다음과 같이 표현된다.

$$q_{rad} = \frac{\sigma \epsilon_p}{1 - (1 - \epsilon_p)(1 - A_{gp})} (\epsilon_g T_g^4 - A_{gp} T_p^4) + \quad (6)$$

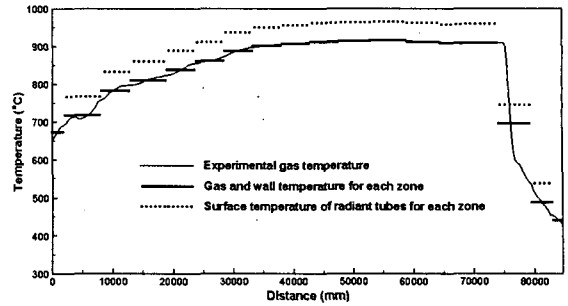


Fig. 4 Variation of the gas and wall temperature along axial direction

$$\sigma \sum_{i=1}^N \epsilon_{pw,i} (T_{w,i}^4 - T_p^4)$$

식 (6)에서 우변의 첫째 항은 가스와 판과의 열유속을 나타내며, 여기서 A_{gp} 는 가스의 흡수율(gas absorptivity)을 나타낸다. 앞에서 열처리로내 가스를 비참여 매체로 가정하였기 때문에 본 연구에서는 이 항을 고려하지 않는다. 그리고 우변의 둘째 항은 벽과 판과의 직접 복사열전달을 고려하는 항으로써, ϵ_{pw} 는 직접교환인자(direct exchange factor, 0과 1사이의 값)이며 다음과 같이 표현된다.

$$\epsilon_{pw} = \epsilon_p \epsilon_w \tau_{gm} F_{pw} + \Delta \epsilon_{pw} \quad (7)$$

식 (7)에서 τ_{gm} 은 평균가스투과율(mean gas transmissivity), F_{pw} 는 판과 벽면과의 형태계수(view factor) 그리고 $\Delta \epsilon_{pw}$ 는 불꽃복사(flame radiation)에 대한 교정인자를 나타낸다. 여기서 τ_{gm} 은 1이 된다. 따라서 식 (6)을 다시 정리하면 다음과 같다.

$$q_{rad} = \sigma \epsilon_p \sum_{i=1}^N \epsilon_{w,i} F_{pw,i} (T_{w,i}^4 - T_p^4) \quad (8)$$

그리고 판의 상·하면에서의 대류에 대한 열유속은 다음과 같다.

$$q_{conv} = h(T_g - T_p) \quad (9)$$

여기서 h 는 대류열전달계수, 하첨자 g 와 p 는 각각 가스와 판을 나타낸다.

3.3 해석방법 및 타당성 검증

지배방정식 (3)과 경계조건식 (4)는 유한체적법⁽⁷⁾을 적용하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석을 위해 사용된 강(iron)의 물성치들과 여러 가지 변수들을 Table 5에 나타내었다.

Fig. 4는 각 대별 가스 및 벽면, 그리고 복사관의 표면 온도분포를 나타낸다. 수치해석에 적용

Table 6 Design and operating conditions of a blind-ended type radiant tube⁽³⁾

Test number		M1	M2
Tube geometry	Diameter, mm	82.55	82.55
	Length, mm	1,333	1,333
Operating parameters	Fuel input, m ³ /hr	1.98	1.98
	Furnace temperature, °C	982	871

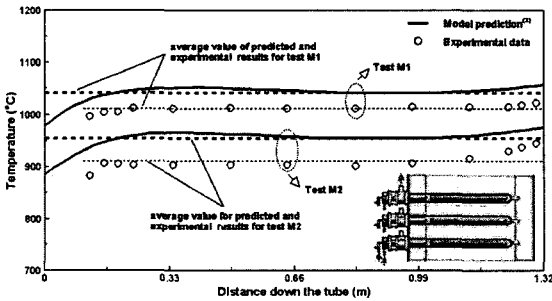


Fig. 5 Experimental and predicted outer tube wall temperature profiles for a blind-ended type radiant tube⁽³⁾

Table 7 Difference between furnace temperature and average surface temperature of radiant tube

Test number	M1	M2	Present results
Furnace temperature, °C	982	871	827.2 ^a
Average surface temperature of radiant tube(experimental data), °C	1015	915	875.6 ^b
Difference between furnace temperature and average surface temperature of radiant tube, °C	33	44	48.3 ^b

a: an average value for the whole space of the furnace

b: a linear interpolation by using M1 and M2 results

할 각 영역별 분위기 온도는 실험을 통해 얻은 각 영역별 분위기 온도의 평균값을 사용하였고, 각 영역별 복사관(blind-ended type radiant tube)의 표면온도는 각 영역별 분위기 온도의 평균값에 50°C를 더한 값을 사용하였다. 이는 Table 6과 같은 조건하에서 복사관의 표면온도 균일도에 관한 실험과 수치해석을 통해 얻은 결과로부터 가정된 값이다. Fig. 5에 나타낸 바와 같이 서로 다른 노내 분위기 온도에 대하여 복사관내 최대 온도편차는 50°C를 넘지 않으며, M1과 M2에 대한 복사관 표면의 평균온도는 각각 1015°C, 915°C이다. 따라서 본 연구에서는 Table 7에 나타낸 바

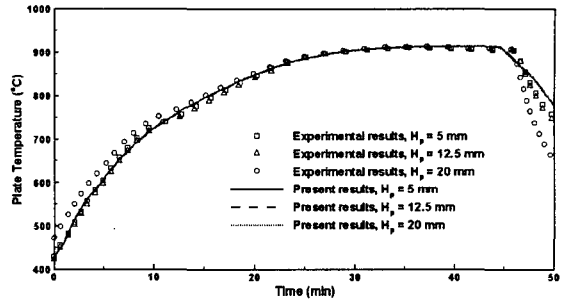


Fig. 6 Comparison of the present results(line) with those of experiment(symbol)

와 같이, M1과 M2의 실험 결과와 선형 보간을 통해 얻은 복사관 표면과 노내 분위기와의 온도차를 약 50°C로 가정하여 수치해석을 수행하였다.

비정상 상태의 수렴기준은 해의 상대오차로 표현된 다음의 식을 사용하였다.

$$\left| \frac{T_p^{n+1} - T_p^n}{T_p^{n+1}} \right| \leq 10^{-6} \quad (10)$$

여기서 상첨자 n+1과 n은 반복수, T_p는 판의 온도를 나타낸다.

본 연구에서 적용한 수치해석의 타당성을 검증하기 위해 실험 결과와의 비교를 Fig. 6에 나타내었다. 장입대와 추출대 부근을 제외한 모든 지점에서 계산된 판의 온도분포는 실험의 결과들과 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다. 장입대와 추출대에서 다소 큰 오차가 발생하는 이유는 분위기 온도의 구배가 다른 대에 비해 심하고, 장입대와 추출대의 실제 분위기 온도를 공간에 대하여 평균을 취해 얻은 수치적 분위기 온도가 실제 분위기 온도보다 하향 또는 상향 평가됨으로 인해 발생하는 것으로 예상된다.

4. 결과 및 고찰

본 연구에서는 표면의 물질과 거칠기에 강하게 의존하는 방사율(판과 벽), 판의 두께, 판의 이송 속도 그리고 노내 분위기 온도의 변화에 따른 판의 온도분포를 Table 5에 주어진 조건하에서 수치해석을 수행하였다.

4.1 방사율에 따른 영향

Fig. 7은 벽의 방사율이 0.1, 0.5, 0.8 그리고 0.95인 경우에 대하여 판의 온도분포를 나타낸다. 장입초기(10분)에는 방사율이 0.1일 때 220°C,

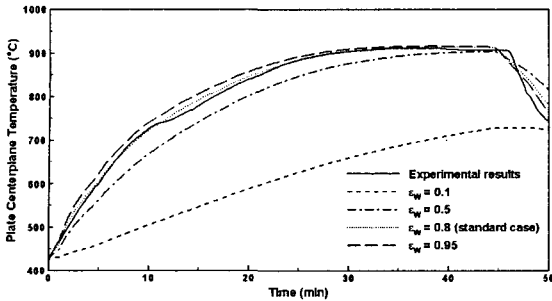


Fig. 7 Center plane temperature of the plate for varying wall emissivity

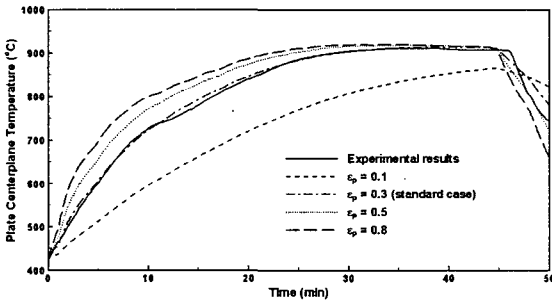


Fig. 8 Center plane temperature of the plate for varying plate emissivity

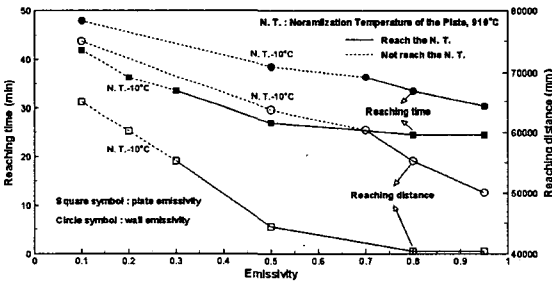


Fig. 9 Time and distance required to obtain the normalization temperature of the plate for varying wall and plate emissivities

0.5일 때 57°C의 온도차로 실험치($\epsilon_w \approx 0.8$)보다 하향 평가하며, 0.95일 때 15°C로 상향 평가를 보이고 있다. 벽의 방사율이 0.5와 0.95인 경우, 판의 중심부 온도는 출구쪽으로 갈수록 실험치와 약 7°C의 온도차 이내로 가까워지고, 목표온도의 $\pm 10^\circ\text{C}$ 이내 도달시간은 벽의 방사율이 0.95인 경우 26분으로 실험치보다 약 2분 단축되지만, 벽의 방사율이 0.5인 경우 40분 이내로 상당히 늦어짐을 알 수 있다. 또한 방사율이 0.1인 경우, 판은 추출대에서 목표온도와 183°C 이상의 온도차를 보인다.

그리고 판의 방사율이 0.1, 0.3, 0.5 그리고 0.8인 경우에 대하여 판의 온도분포를 계산하였으

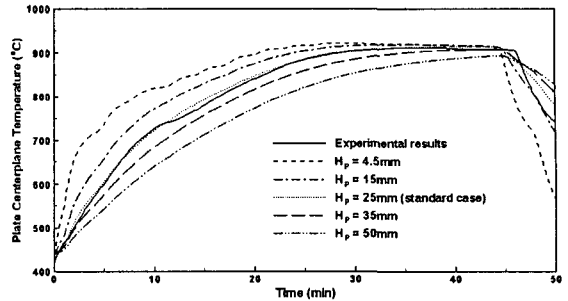


Fig. 10 Center plane temperature of the plate for varying plate thickness

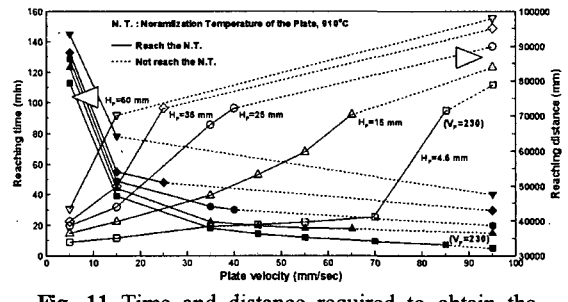


Fig. 11 Time and distance required to obtain the normalization temperature of the plate for varying plate thickness and velocity

며, 재로시간에 따른 결과를 Fig. 8에 나타내었다.

장입초기(10분)에는 방사율이 0.1인 경우 130°C의 온도차로 실험치($\epsilon_p \approx 0.3$)보다 크게 하향 평가하며, 0.5일 때 45°C, 0.8일 때 73°C로 상향 평가를 보이고 있다. 판의 방사율이 0.5와 0.8인 경우, 판의 중심부 온도는 출구쪽으로 갈수록 실험치와 약 8°C 정도의 온도차 이내로 가까워짐을 알 수 있으며, 각각 24분, 22분 내에 목표온도의 $\pm 10^\circ\text{C}$ 이내 도달한다. 그러나 방사율이 0.1인 경우 판은 목표온도와 45°C 이상의 온도차를 가진 상태로 추출된다.

또한 벽과 판의 방사율에 따른 판의 목표온도에 도달하는데 요구되는 시간과 거리를 Fig. 9에 나타내었다. 주어진 벽과 판의 방사율에 대하여 추출목표온도에 도달한 판을 생산하기 위해서는, 벽과 판은 각각 0.7, 0.3 이상의 방사율을 가진 재료의 벽과 판이 사용되어야 함을 알 수 있다.

4.2 판의 두께에 따른 영향

판의 두께가 4.5mm, 15mm, 25mm, 35mm 그리고 50mm인 경우에 대해 수치해석을 수행하였다.

Fig. 10은 재로시간에 따른 판의 온도변화를 판의 두께에 대하여 나타낸 것이다. 판의 두께가

얇아질수록 판의 가열능력이 뛰어나므로 알 수 있으며, 판의 두께가 실험의 기본 값인 25mm에서 각각 4.5mm, 15mm로 얇아지면 재로시간(추출목표 온도 기준)은 33분에서 각각 23분, 26분으로 단축되는 것을 알 수 있다.

재로시간의 단축은 곧 열처리로의 생산량 증대를 의미한다. 두께가 4.5mm, 15mm로 얇아질 경우 생산량은 실험의 기본 값인 25mm에 비하여 각각 1.44배, 1.27배 증대된다. 두께가 35mm인 경우에는 재로시간 35분이 지나서 목표온도의 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 이내 도달하지만, 50mm인 경우에는 추출대에서 목표온도와 20°C 정도의 온도차를 가진 상태로 추출된다.

또한 판의 두께와 이송속도에 따른 판의 목표온도에 도달되는데 요구되는 시간과 거리를 Fig. 11에 나타내었다. 주어진 판의 두께에 대하여 추출목표온도에 도달한 판의 생산과 동시에 생산량을 최대화하기 위해서는, 판의 두께가 4.5mm, 15mm, 25mm, 35mm 그리고 50mm으로 증가함에 따라 판의 이송속도는 각각 최대 230mm/sec, 65mm/sec, 40mm/sec, 25mm/sec 그리고 15mm/sec를 유지해야 함을 알 수 있다.

4.3 판의 이동속도에 따른 영향

Fig. 12는 판의 이송속도에 따른 판의 중심부 온도변화를 나타낸 것이다. 판의 이송속도가 감소함에 따라 판의 중심부 온도는 크게 증가한다.

열처리로의 가열대에서 판의 이송속도가 25mm/s씩 감소함에 따라 판의 중심부 온도는 약 45°C 씩 증가함을 알 수 있다. 이송속도가 15mm/s인 경우, 판의 추출목표온도에 도달하는데 걸리는 거리는 실험치($V_p=27.5\text{mm/sec}$)보다 11.5m 정도 단축되지만, 재로시간은 약 16분 증가하게 되며, 판의 생산량은 약 1.5배 감소하게 된다. 그리고 50mm/s의 이송속도를 가진 판의 경우, 판의 목표온도의 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 이내 도달시간은 23분으로 이송속도가 27.5mm/s인 판의 경우보다 약 5분 단축되지만, 판의 추출목표온도에 도달하지 못한 채 판이 그대로 추출된다. 또한 판의 이송속도가 75mm/s, 100mm/s로 비교적 빠른 경우, 판은 추출대에서 판의 추출목표온도와 약 30°C , 60°C 의 온도차를 가진 상태로 노에서 추출된다.

그리고 판의 이송속도에 따른 판의 목표온도에 도달되는데 요구되는 시간과 거리를 Fig. 13에 나타내었다. 이송속도가 35mm/s 이하인 경우의 판

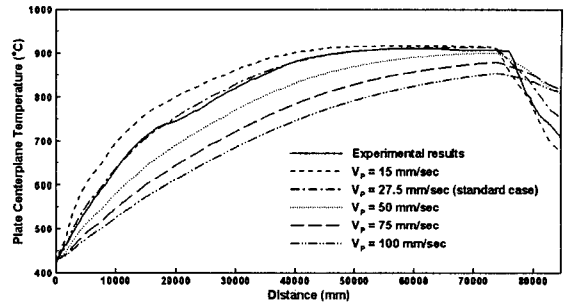


Fig. 12 Center plane temperature of the plate for varying plate velocity

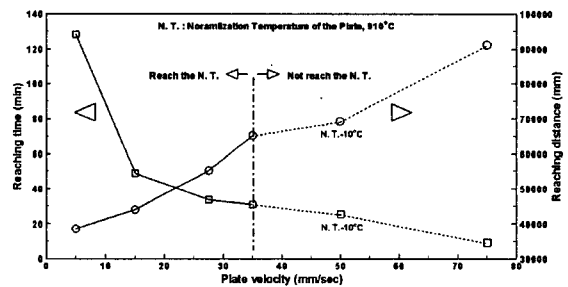


Fig. 13 Time and distance required to obtain the normalization temperature of the plate for varying plate velocity

은 주어진 조건하에서 판의 추출목표온도에 도달하며, 35mm/s 이상의 이송속도를 가진 판은 목표온도에 도달하지 못한 채 열처리로부터 추출된다. 판의 이송속도가 증가함에 따라 판의 추출목표온도에 도달하는데 걸리는 시간과 거리는 감소 및 증가하며, Fig. 13와 같이 서로 반비례 관계임을 알 수 있다.

따라서 추출목표온도에 도달한 판을 생산하기 위해서는 판의 이송속도를 약 35mm/s 이하로 판의 열처리 공정이 수행되어야 함을 알 수 있다.

4.4 분위기 온도에 따른 영향

노내 분위기 온도와 복사판 표면온도의 차가 50°C 로 일정한 조건하에서 분위기 온도를 각 대별 실제 분위기 온도보다 각각 25°C , 50°C 만큼 감소 또는 증가시켜 시간에 따른 판의 온도변화를 해석하였고, 이 결과를 Fig. 14에 나타내었다.

노내 분위기 온도가 상승됨에 따라 판의 가열능력 또한 비례적으로 상승하게 된다. 분위기가 온도가 실제 분위기 온도보다 25°C , 50°C 만큼 증가되면 판의 목표온도 도달시간은 33분에서 25분 및 21분으로 단축되지만, 주어진 노의 형상에서

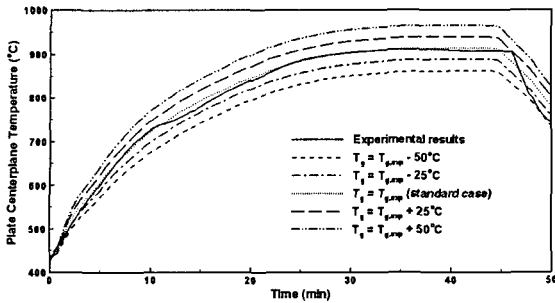


Fig. 14 Center plane temperature of the plate for varying gas temperature

는 판의 중심부 온도가 계속 상승하여 추출대에서는 목표온도보다 각각 29°C, 54°C만큼 온도가 상승하게 된다.

이에 반해, 분위기 온도가 실제 분위기 온도보다 25°C, 50°C만큼 감소되면, 판의 온도는 재로시간내 목표온도에 미치지 못하고 목표온도보다 각각 23°C, 49°C만큼 낮은 온도상태로 판이 추출된다.

5. 결론

본 연구에서 제시된 계산모델을 이용하여 판과 벽의 방사율, 판의 두께와 이송속도 그리고 분위기 가스 온도에 따른 판의 노내 온도이력에 미치는 영향을 검토하였다.

벽과 판의 방사율이 증가함에 따라 목표온도의 $\pm 10^\circ\text{C}$ 이내 도달시간은 단축됨을 알 수 있었으며, 벽의 방사율(ϵ_w)이 0.5, 0.95인 경우 도달시간은 40분, 26분 이내로 실험치($\epsilon_w \approx 0.8$)보다 각각 약 12분 연장, 2분 단축되고, 판의 방사율(ϵ_p)이 0.5, 0.8인 경우 도달시간은 24분, 22분으로 실험치($\epsilon_p \approx 0.3$)보다 각각 약 4분, 6분 단축된다.

실험과 동일한 조업조건하에서 판의 두께가 4.5mm, 15mm로 얇아질 경우, 실험의 기본 값인 25mm에 비하여 재로시간은 33분에서 각각 23분, 26분으로 단축되며, 판의 생산량은 각각 1.44배, 1.27배 증대된다. 또한 주어진 판의 두께에 대하여 추출목표온도에 도달한 판의 생산과 동시에 생산량을 최대화하기 위해서는, 판의 두께가 4.5mm, 15mm, 25mm, 35mm 그리고 50mm으로 증가함에 따라 판의 이송속도는 각각 최대 230mm/sec, 65mm/sec, 40mm/sec, 25mm/sec 그리고 15mm/sec를 유지해야 한다.

그리고 추출목표온도에 도달한 판을 생산하기 위해서는 판의 이송속도의 감소가 효과적인 것으

로 나타나고 있으나, 이송속도의 감소는 판의 생산량을 감소시키는 단점이 있다. 따라서 주어진 열처리로내에서 추출목표온도에 도달한 판의 생산량을 최대화하기 위해서는 판의 이송속도를 약 35mm/s로 열처리 공정이 수행되어야 한다.

또한 노내 분위기 온도가 상승됨에 따라 판의 가열능력 또한 비례적으로 상승하게 되며, 분위기 온도가 실험에서 설정된 분위기 온도보다 25°C씩 증가 또는 감소함에 따라 판의 중심부 온도는 노 전반에 걸쳐 25°C 내지 30°C로 균일하게 상승 또는 감소되고, 같은 온도차로 열처리로의 추출대에서 판이 추출된다.

후기

이 논문은 2005-2006년도 한양대학교 철강공정 및 응용연구소의 지원에 의하여 연구되었습니다.

참고문헌

- (1) Ramamurthy, H., Ramadhyani, S. and Viskanta, R., 1991, "Modeling of Heat Transfer in Indirectly-Fired Batch Reheating Furnace," *ASME/JSME Thermal Engineering Proceedings*, Vol. 5, pp. 205~215.
- (2) Harder, R.F., Viskanta, R. and Ramadhyani, S., 1988, "Evaluation and Modeling of Gas-Fired Radiant Tubes," *ASME Proceedings of the 1988 National Heat Transfer Conference*, Vol. 1, pp. 67~77.
- (3) Chapman, K., Harder, R.F., Ramadhyani, S. and Viskanta, R., 1988, "Radiative Heat Transfer," Annual Report January 1987 - March 1988, Purdue Uni., 1988.
- (4) Lisienko, V.G., Skylar, F.R., Dryuchenkov, Y.V., Toritsyn, L.N., Vokov, V.V. and Tikhostiskii, A.I., 1986, "Combined Solution of the Problem of External Heat Transfer and Heat Transfer Inside a Gas Radiation Tube for Thermal Furnaces with a Protective Atmosphere," *Journal of Engineering Physics*, Vol. 50, No. 1, pp. 70~76.
- (5) Kang, D.H., Kwag, D.S., Kim, W.S. and Lee, Y.K., 2003, "A Study on the Estimation of One-dimensional Heat Fluxes on the Slab in Reheating Furnace by Using Inverse Analysis," *Trans. of the KSME, Part B*, Vol. 27, No. 1, pp. 61~68.
- (6) Lindholm, D. and Leden, B., 1999, "A Finite Element Method for Solution of the Three-Dimensional Time-Dependent Heat-Conduction Equation with Application for Heating of Steels in Reheating Furnaces," *Numerical Heat Transfer, Part A*, Vol. 35, pp. 155~172.
- (7) Patankar, S.V., 1980, "Numerical Heat Transfer and Heat Flow," *Hemisphere Publishing Corp.*, Washington D. C.