

# 가열로내 피열재의 온도분포 해석

## Analysis on the Temperature Distribution for the Billet in a Furnace

권오봉 · 김명관 · 장강영 · 권현출 · 배대석

O. B. Kwon, M. K. Kim, K. Y. Chang and H. C. Kwon, D. S. Bae

**Key Words** : Furnace(가열로), Heating Pattern(가열형태), Temperature Distribution(온도분포)

**Abstract** : In this paper, the optimal heating pattern of the furnace is sought to reduce the unnecessary energy loss. A finite difference method was used to estimate the transient temperature field of the billet in a furnace. Heat conduction equations were used in the interior nodes of the billet, while energy balances for conduction, convection, and radiation were considered in the boundary nodes.

Several heating patterns for the furnace were tested and subsequently compared each other. The results showed that the temperature in the preheating zone should be set to relatively low. The temperature distributions of the billet are quite different from each other when different heating pattern are used, even though the heating patterns have the same amount of energy consumption. It reveals that there exists an optimal heating pattern to save the energy loss.

### 기호설명

$a, b$	: 상수
$c$	: 피열재의 평균 비열
$h$	: 대류 열전달 계수
$k$	: 피열재의 열전도 계수
$T$	: 피열재의 온도
$\varepsilon$	: 피열재의 방사율
$\rho$	: 피열재의 비중
$\sigma$	: Stefan-Boltzman 상수

### Subscripts

E	: 모서리
B	: 표면 중심
I	: 중심부
W	: 표면
$\infty$	: 분위기

접수일 : 2004년 6월 1일  
권오봉(책임저자), 배대석 : 부경대학교 기계공학부  
김명관 : 부경대학교 대학원  
권현출 : LG전자  
장강영 : 동국제강

### 1. 서론

우리나라는 비산유국으로써 에너지 공급의 불안정을 생각하면 에너지 사용의 합리화 추진은 국가적인 중요한 과제의 하나라고 생각할 수 있다. 현재 각종 공업로는 공업의 제조 공정에 필요한 가열 프로세서 중의 핵심으로 대표적인 에너지 다소비 설비이다. 공업로는 중요한 에너지 절약 대상 설비로써 자원, 에너지, 산업 환경의 커다란 변혁에 따라서 공업로의 에너지 절약 기술은 공업로 문제에 있어서 가장 중요한 과제이다.

1973년과 1979년 2차례의 석유 파동에는 에너지 다소비형인 철강 업체는 커다란 타격을 입은 경험이 있다. 이에 에너지 문제를 극복하기 위하여 많은 업체가 적극적인 에너지 대책을 수립한 결과 커다란 성과를 거둘 수 있었다.

현재 우리나라의 가열로는 대부분이 선진국의 기술에 의한 설계 또는 국내 설계 후 선진국에서 승인하는 방식이 불가피하여 많은 시간과 외화를 낭비하고 있다. 그리고 현재 가동 중인 가열로도 가열로 사용

자의 전문적인 지식부족으로 인하여 적절하지 못한 가열형태(heating pattern)로 과잉 가열을 행하여 많은 양의 에너지를 낭비하고 있는 실정이다<sup>3)</sup>.

본 논문은 가열로 내 가열형태의 최적화를 위하여 가열로 내부의 피열재 각부의 온도분포를 수치적으로 구하는 프로그램을 개발하여, 설계시 외화 낭비를 줄이고 또한 현재 가동 중인 가열로 운전시 적절한 가열형태에 의한 가열로의 과잉 가열을 피하여 에너지 사용의 합리화에 기여하는 것이다.

## 2. 가열로의 개요

연속 가열로는 압연 공장에서 강괴(ingot), 강편(billet)으로 최종 제품을 연속적으로 생산하기 위하여 목표 온도까지 연속 가열을 하는 로(furnace)를 말한다.

연속 가열로의 형식에는 피열재의 이송방법에 따라 Pusher Type, Walking Hearth Type, Walking Beam Type, Rotary Hearth Type 등이 있다.

본 논문에서는 Walking beam type furnace를 대상으로 하였으며, 이 형태는 설비 규모의 대형화 및 설비의 면적당 가열 능력이 요구되는 대형 슬래브(slab), 강괴, 강편 등에 주로 사용되며, 특히 타 가열로에 비하여 높은 생산성과 양질의 제품을 얻을 수 있다. 현재 우리나라의 대형 가열로의 대부분이 이 형태의 가열로로 변화되고 있는 실정이다. Walking beam type furnace는 walking hearth type furnace에서 할 수 없는 피열재의 하부면을 균일하게 가열할 수 있으므로 양질의 가열을 요구하는 경우에 사용된다.

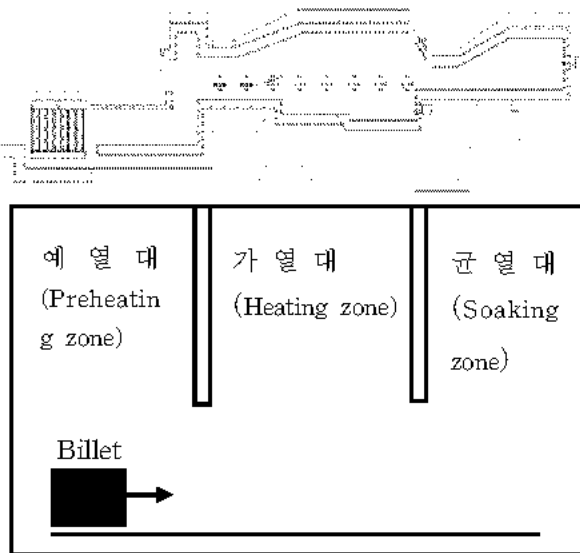


Fig. 1 Schematics of furnace

Walking beam type furnace의 구조는 Fig. 1과 같이 크게 예열대(preheating zone), 가열대(heating zone), 균열대(soaking zone)로 구분되고 저온부의 예열대(preheating zone)에서는 천장을 낮게 하여 연소가스와 피열재의 접촉을 많게 하고 연소가스의 유속을 빠르게 하여 대류 열전달이 많게 한다. 가열대는 비교적 천장을 높게 해서 로내 가스층을 두껍게 해서 복사 전열을 좋게 한다. 균열대는 로 온도를 가열 목표 온도로 일정하게 유지하고, 피열재 내부의 온도 분포를 균일하게 해서 가열로에서 추출한다. 그림에서 강편(billet)은 여러 가지 형상을 만들기 전의 압연 강재를 말한다.

우수한 가열로는 피열재 즉 강편 등을 작은 양의 에너지를 소비하면서 원하는 온도까지 균일하게 가열하여야 한다. 가열로 내의 분위기 온도 즉 예열대, 가열대, 균열대의 온도를 버너로서 일정하게 유지하여 강편을 가열하는 것이다. 이 때 적절한 예열대, 가열대, 균열대의 온도를 채택하여 강편을 가열하면 최소의 에너지를 투입하여 강편을 일정한 목표온도로 가열시킬 수 있다. 즉 Fig. 2의 가열형태(heating pattern) A와 같이 예열대, 가열대, 균열대를 동일한 온도로 가열하여 강편을 가열할 수도 있고, 가열형태 B와 같이 예열대, 가열대, 균열대의 온도를 점차 상승하면서 강편을 가열할 수도 있으며, 또한 가열형태 C와 같이 예열대 및 가열대에서 온도를 점차 상승하면서, 균열대에서 온도를 균일하게 유지하여 강편을 가열할 수도 있다. 이렇게 다양한 형태의 가열형태로 각각 원하는 강편의 최종온도를 얻을 수 있다. 각각의 가열형태를 유지하기 위하여 서로 다른 양의 에너지가 소요되게 마련이다. 따라서 가열로를 가열하기 위한 에너지의 절약을 위하여, 여러 가지 가열형태에 따른 강편의 온도 분포를 예측할 필요가 있다.

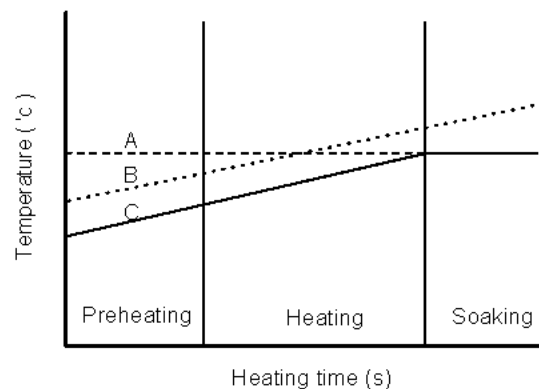


Fig. 2 Heating patterns at the furnace

본 논문에서는 가열형태에 따른 피열재의 온도 분포를 구하는 프로그램을 개발하여 보다 정확하게 온도를 예측하여 공업로의 설계시 외화 낭비를 줄이고 또한 현재 가동 중인 가열로 운전 시 적절한 가열형태에 의한 가열로의 파잉 가열을 피하여 에너지 사용의 합리화에 기여하는 데 있다. 실제 현장에서는 가열로 내 피열재의 온도분포를 계산하기 위해 가열로를 간단한 몇 개의 구간으로 설정하여 수작업으로 계산하는 방식을 사용하고 있다. 이러한 방식의 피열재의 온도계산은 많은 시간을 소비하기도 하지만 계산의 착오, 그리고 정확한 온도계산이 불가능하여 적절한 가열형태를 얻을 수가 없다. 따라서 컴퓨터를 이용하여 다양한 가열형태로 피열재의 온도분포를 해석함으로써 가열로의 에너지 절약에 기여할 수 있을 것이다. 이를 위한 프로그램을 개발하여 가열로 형태에 따른 온도변화 상태를 해석하였다.

프로그램을 실행하여본 결과는 실제 회사에서의 설계지침에 의한 수작업 결과와 일치하는 것으로 나타났다.

### 3. 가열로 내 피열재의 온도분포 계산

피열재가 가열로내에서 이송할 때 주위로부터 대류 및 복사 열전달을 통하여 가열된다. 피열재의 온도분포는 3차원이지만 피열재의 일부 끝 부분을 제외하고는 온도분포는 단면의 중앙부분과 거의 동일하다. 또한 피열재의 온도분포해석에서 중요한 부분은 중앙단면부분이다. 이 중앙 단면에서의 온도 분포가 피열재의 온도 판별 기준으로 사용된다. 중앙단면에서의 온도 분포를 비정상 2차원 해석을 통하여 구할 수 있다. Fig. 3의 중앙단면을 계산 영역으로 채택한다. 계산 영역에서의 지배방정식은 다음과 같다<sup>2-3)</sup>.

$$k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

피열재의 표면에서는 대류 및 복사를 통한 열전달이 일어나므로 다음과 같은 경계조건을 사용한다.

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{wall} = h(T_\infty - T) + \sigma \epsilon (T_\infty^4 - T_w^4) \quad (2)$$

또한, 가열로내에서의 온도가 많이 변하므로 위

식에 사용된 열전도 계수와 비열은 온도의 함수로서 데이터를 최적화한 다음의 식을 사용하였다<sup>4)</sup>.

$$k = a_0 + a_1 T + a_2 T^2 + a_3 T^3 + a_4 T^4 + a_5 T^5 \quad (3)$$

여기서

$$a_0 = 52.30621, a_1 = -0.02059, a_2 = 3.81e-5,$$

$$a_3 = -2e-7, a_4 = 2.32e-10, a_5 = -7.7e-14$$

$$c = b_0 + b_1 T + b_2 T^2 + b_3 T^3 + b_4 T^4 + b_5 T^5 + b_6 T^6 + b_7 T^7 \quad (4)$$

여기서

$$b_0 = 329.616, b_1 = 5.082, b_2 = -4.13e-2,$$

$$b_3 = 1.40e-4, b_4 = 2.19463e-7,$$

$$b_5 = 1.69074e-10, b_6 = -6.13242e-14,$$

$$b_7 = 8.06883e-18$$

위 식과 경계조건을 이용하여 유한 차분법<sup>5-6)</sup>으로 구한 차분식을 이용하여 피열재의 시간에 따른 온도를 구하였다. 피열재의 온도 분포에 대한 가열로 분위기 온도의 영향을 효과적으로 고찰할 수 있도록 가열로를 임의의 구간으로 나누어서 각 구간에 대한 가열로의 분위기 온도를 임의로 가정할 수 있도록 하였다.

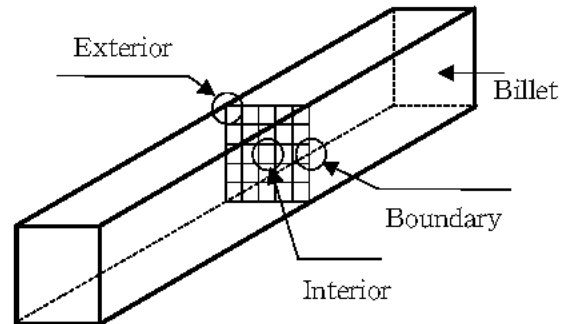


Fig. 3 Calculation domain

### 4. 결과 및 고찰

실제 현장에서는 가열로 내 피열재의 온도분포를 계산하기 위해 가열로를 간단한 몇 개의 구간으로 설정하여 수작업으로 계산하는 방식을 사용하고 있다. 이와 같은 불편함을 해소하기 위해, 컴퓨터를 이용한 다양한 가열형태에서 피열재의 온도분포 해석이 용이하도록 GUI 환경에서 좀 더 편리한 데이터 입력과 온도분포의 변화과정을 나타내는 프로그램을 개발하였다.

Fig. 4는 가장 먼저 프로그램을 수행한 모습을 나타내고 있다. Fig. 5는 실행을 위하여 데이터를 입력한 모

습이고 메뉴의 Run을 클릭하면 Delay Time과 Run이란 하위 메뉴가 나오는 데 실행을 위해 Run을 클릭하면 계산을 하게 된다.

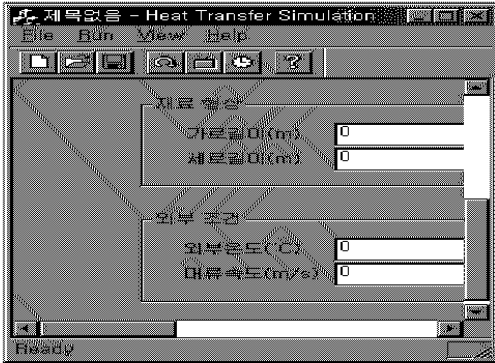


Fig. 4 First execute screen

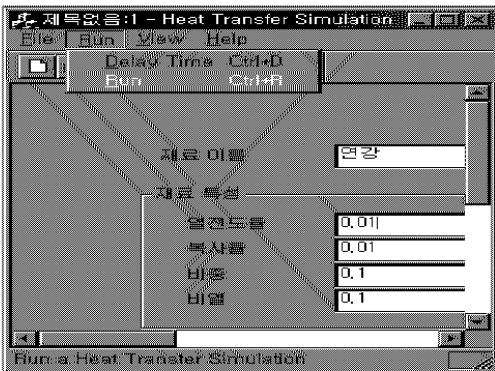


Fig. 5 Data input for run

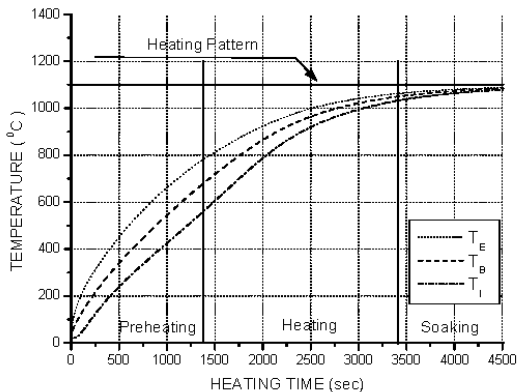


Fig. 6 Temperature change of billet for the heating pattern A

계산 과정은 위에서 언급한 지배방정식을 전진차분법으로 구한 차분방정식을 사용하여 다음 시간에서의 온도분포를 구한다. 계속하여 그 다음시간에서의 온도분포를 구하여 정하여진 가열시간동안 온도분포를 구하

게 된다.

프로그램을 실행하여본 결과는 실제 회사에서의 설계치에 의한 수작업 결과와 일치하는 것으로 나타났다.

Fig. 6은 가열로내 분위기 온도를 예열대, 가열대, 균열대 구분없이 1100℃로 일정한 가열형태로 하였을 때 (heating pattern A) 시간의 경과에 따른 피열재(billet)의 표면중심온도, 모서리온도와 중심부의 온도를 보여주고 있다.

그림에서 실선은 가열로내의 분위기 온도분포로서 가열형태를 나타내고 있으며 이 경우에는 전체 영역에 걸쳐 일정한 온도분포를 나타내고 있다.

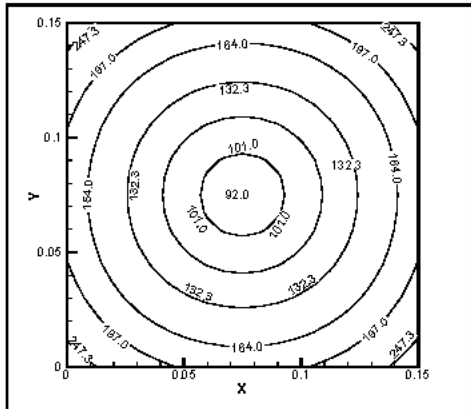
$T_E$ ,  $T_B$ ,  $T_I$ 는 각각 모서리 온도, 표면 중심온도와 중심부의 온도를 나타내고 있으며 시간의 경과에 따른 온도변화를 그림에서 도시하고 있다. 예열부에서는 가열로내 분위기 온도와 피열재의 온도차이가 커서 이들 온도는 급격히 상승하고 있으며, 이들의 온도차이도 크게 나타난다. 가열부에서는 점차 완만하게 상승하는 경향을 보여주고 있으며 또한 이들의 온도 차이도 점차 감소하고 있다. 그리고 추출시 피열재 중심부의 온도와 표면 중심온도는 각각 1085℃, 1079℃로 이 두 온도차이가 5℃로서 전체에서 거의 균일한 온도분포를 보여, 온도분포는 매우 양호하지만 가열로 전체에서 1100℃로 유지하였기 때문에 많은 양의 에너지를 소비하였으므로 좋은 가열형태라고 할 수 없다.

Fig. 7은 이러한 가열형태에서 피열재를 가열로 내에 넣은 후 200s 후부터 단계별로 피열재 단면의 온도 분포를 보여주고 있다. 그림에서 x, y는 Billet의 가로와 세로의 길이(m)를 나타낸다. 초기에는 피열재의 급격한 가열로 인하여 중심부의 온도와 모서리 부의 온도편차가 커서 심한 온도구배를 보여주고 있다. 그러나 시간이 경과할수록 초기보다 온도구배가 상당히 줄어드는 모습을 볼 수 있으며 4000s 이후에서는 피열재 각부의 온도구배가 미세하여 거의 균일하게 되었음을 알 수 있다.

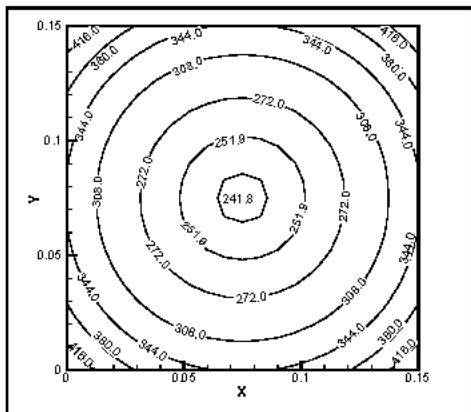
Fig. 8은 전체 가열로에서의 평균온도가 1100℃가 되도록 예열대의 분위기 온도를 1000℃로, 출구에서의 분위기 온도를 1200℃가 되게 선형적인 가열형태(B1)를 채택하였다.

이 경우 피열재의 온도는 시간이 지남에 따라 전체적으로 선형적으로 증가하므로 가열형태 A의 경우에 비해 예열대에서의 표면중심온도, 모서리온도와 중심부의 온도차이는 작게 나타났으며 전체 영역에 걸쳐 가열형태 A에 비해 이들 온도는 점진적으로 증가하는 것을 알 수 있어 바람직하다. 또한 가열형태 A와 비교하여 비슷한 가열량으로 추출시 피열재 중심부의 온도와 표면 중심온도가 각각 1154℃, 1135℃로 보다 높은 피열

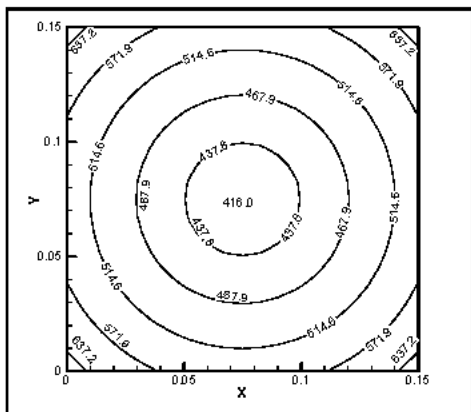
재의 온도를 얻을 수 있는 것으로 나타났다. 또한 이 경우 동일한 에너지를 투입하였을 때 A형으로 한 경우와 비교하여 피열재의 최종평균온도가 1145℃로 A의 경우보다 63℃ 높으므로 5~6%정도 에너지 흡수량이 증가하는 것으로 나타났다. 역으로 동일한 피열재인 경우 온도상승에는 약 5~6%정도의 투입 에너지가 절감되는 것으로 예측된다. 현 단계에서 실제 현장실험 결과를 구하기는 어렵고, 여건이 된다면 이에 대한 현장 실험도 수행하여야 할 것이다.



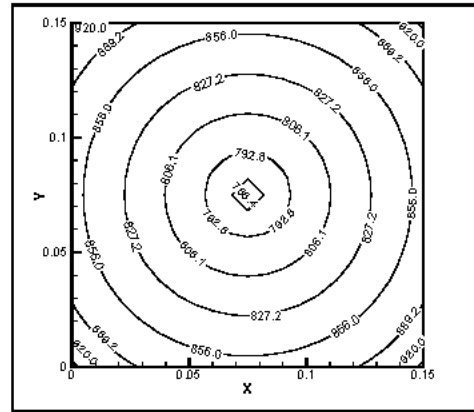
(a) after 200s



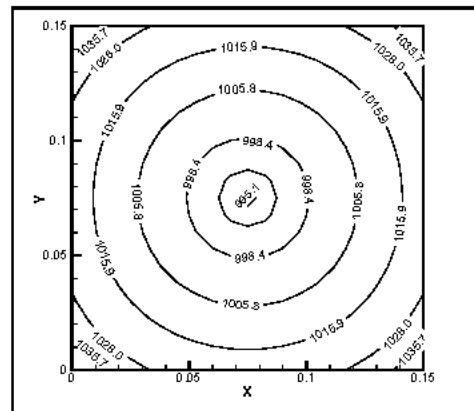
(b) after 500s



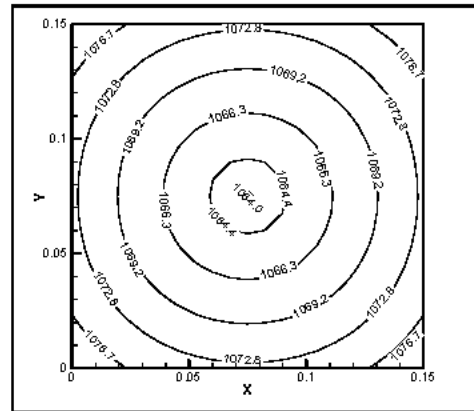
(c) after 1000s



(d) after 2000s



(e) after 3000s



(f) after 4000s

Fig. 7 Temperature distribution at the center section of billet

B1 형태의 경우 두 온도차가 19℃로서 비교적 크게 나타나 작은 온도 편차가 요구되는 경우는 바람직하지 않다고 하겠다.

이러한 온도편차는 가열로내의 온도 기울기를 작게 조절하여 Fig. 9와 같이 예열대의 분위기 온도를 1050℃로, 출구에서의 분위기 온도를 1150℃가 되게 가열 형태(B2)를 채택하면 추출시 피열재중심부의 온도와 표

면 중심온도가 각각 1117℃, 1105℃로 얻을 수 있으며 이 두 온도차는 12℃로 나타났다.

Fig. 10은 예열대 및 가열대에서 1000℃에서 1100℃로 선형적으로 증가시키고 균열대에서는 1100℃로 일정하게 유지시키는 가열형태(C)를 채택한 경우 온도변화를 보여주고 있다. 이 경우 역시 가열형태 A와 비교하여 표면중심온도, 모서리온도와 중심부의 온도는 점진적으로 상승하는 것으로 나타났으며, 추출시 피열재 중심부의 온도와 표면 중심온도가 각각 1072℃, 1062℃로 나타났으며 두 온도차가 10℃로서 비교적 작게 나타났다.

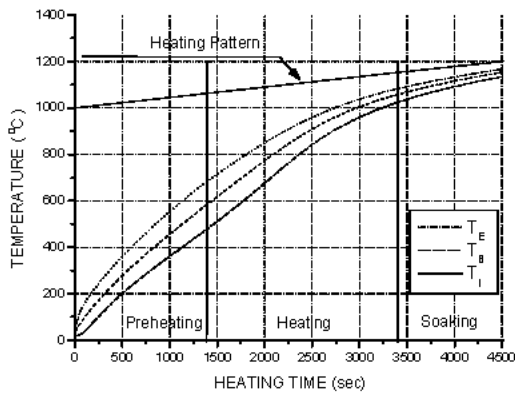


Fig. 8 Temperature of billet for the heating pattern B1

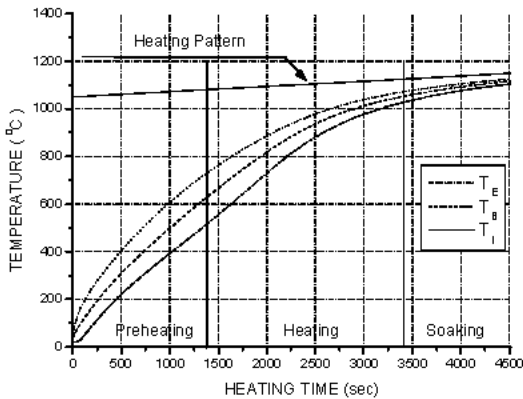


Fig. 9 Temperature change of billet for the heating pattern B2

Fig. 10은 예열대 및 가열대에서 1000℃에서 1100℃로 선형적으로 증가시키고 균열대에서는 1100℃로 일정하게 유지시키는 가열형태(C)를 채택한 경우 온도변화를 보여주고 있다. 이 경우 역시 가열형태 A와 비교하여 표면중심온도, 모서리온도와 중심부의 온도는 점진적으로 상승하는 것으로 나타났으며, 추출시 피열재 중심부의 온도와 표면 중심온도가 각각 1072℃, 1062℃로

나타났으며 두 온도차가 10℃로서 비교적 작게 나타났다. 그리고 예열대만 1000℃에서 1100℃로 선형적으로 증가시키고 가열대와 균열대는 1100℃로 일정하게 유지시키는 가열형태(D)를 채택한 경우 온도변화를 Fig. 11에 보여주고 있다. 이 경우도 가열형태 C와 유사한 양상을 보여주고 있으며, 추출시 피열재 중심부의 온도와 표면 중심온도가 각각 1081℃, 1075℃로 나타났으며 두 온도차가 6℃로서 비교적 작게 나타났다.

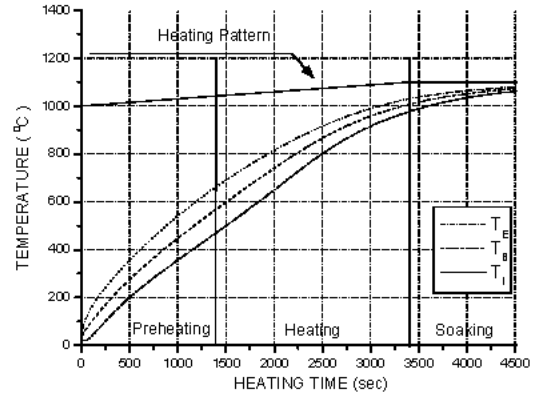


Fig. 10 Temperature change of billet for the heating pattern C

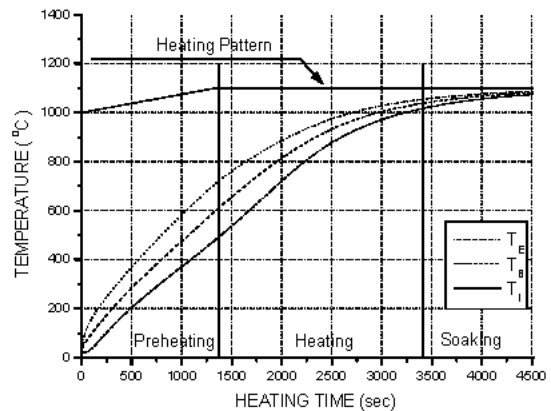


Fig. 11 Temperature change of billet for the heating pattern D

## 5. 결 론

가열로 내의 분위기 온도를 여러 가지 가열형태로 설정하여 피열재의 온도를 예측하는 수치 시뮬레이션 프로그램을 개발하여, 여러 가지 가열형태에 대하여 해석해 본 결과 아래와 같은 결론을 얻을 수가

있다.

(1) 같은 양의 에너지를 투입하여도 가열형태에 따라 피열체의 온도분포가 크게 상이하게 나타남을 알 수 있다.

(2) 가열로 전체에서 균일하게 가열하는 가열형태에서는 가열로 전체를 높은 온도로 유지해야 하기 때문에 에너지의 손실이 크다. 그러나 최종적으로 비교적 균일한 피열체의 온도 분포를 얻을 수 있다.

(3) 가열로 전체에서 선형적으로 증가시키는 가열형태인 경우 동일한 양의 에너지로서 보다 높은 피열체 온도를 얻을 수 있다. 그러나 피열체의 온도편차는 커진다.

(4) 보다 작은 온도편차가 요구되는 경우는 예열대만 선형적으로 증가시키는 가열형태 또는 예열대 및 가열대를 선형적으로 증가시키는 방식이 비교적 효율적인 것으로 판단된다.

## 후 기

이 논문은 부경대학교 기성회 학술연구조성비에 의하여 지원되었음.

## 참 고 문 헌

1. 동국제강 주식회사 연구 교재, 1993, "일본의 최신 가열로의 동향에 관하여".
2. F. P. Incropera and D. P. Dewitt, 1976, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", Wiley, pp. 278~288.
3. J.P.Holman, 1986, "Heat Transfer", McGraw-Hill, pp. 135~145.
4. 黒崎爐工業株式會社, 기초 자료집
5. S. C. Chapra and R. P. Canale "Numerical Methods for Engineers", McGraw-Hill, pp. 820~855.
6. S. V. Patankar, 1979, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, McGraw-Hill, pp. 59-74.