

연속식 가열로에서 버너배열에 따른 소재 및 가스온도의 영향

김강민 · 전충환* · 유인** · 김규보***†

부산대학교 기계공학부, *부산대학교 기계공학부, **컴버stek, ***부산대학교 화력발전에너지분석기술센터
(2017년 4월 26일 접수, 2017년 5월 2일 수정, 2017년 5월 4일 채택)

The Effects of Various Burner Array on Workpiece and Gas Temperature in a Continuous Reheating Furnace

Kang-Min Kim · Chung-Hwan Jeon* · In Yoo** · Gyu-Bo Kim***†

School of Mechanical Engineering, Pusan National University,

*School of Mechanical Engineering, Pusan National University,

Combustech, *Pusan Clean Coal Center, Pusan National University

(Received 26 April 2017, Revised 2 May 2017, Accepted 4 May 2017)

요 약

열전달 및 에너지평형모델을 적용하여 연속식 가열로에서의 버너 배열에 따른 소재 및 노내 가스 온도의 영향을 수치해석으로 분석하였다. 연속식 가열로에서의 최적화된 소재의 가열구간을 확보하기 위해 한정된 공간을 갖는 노 내에서 총 공급열량을 동일한 조건으로 하고 가열능력에 따른 버너의 출력, 대수 및 배열 등을 조절하여 소재의 온도와 노 내 가스온도에 미치는 영향을 수치 해석적 방법으로 살펴보았다. 수치 해석적 방법을 통해 110톤/일의 생산량을 가지도록 설계된 기존의 가스 연소식 버너를 포함하는 연속식 가열로의 성능을 유지하면서 가스온도가 가열대 및 균열대의 중간지점에서 최대 값의 차이가 약 40℃ 낮아 설비에 부하가 적고 소재목표 추출온도에 도달하는 1,175℃조건인 버너배열을 도출하였다.

주요어 : 연속식 가열로, 버너배열, 소재온도, 노 내 온도

Abstract - Numerical study was conducted for the effects of various burner array on the workpiece and the gas temperature in a continuous reheating furnace. Under the same conditions which were the total heat of combustion, the heat capacity of unit burner, the number of burner and burner array were changed to be applied the furnace. The behavior of workpiece temperature and gas temperature in a furnace were evaluated for the effects as function of the changed conditions. A continuous reheating furnace designed for 110 tons/day of production capacity was applied in this study. The furnace which has several gas burners is designed to heat a workpiece. By this study, the better condition was confirmed than the existing designed condition.

Key words : Continuous Reheating Furnace, Burner Array, Workpiece Temperature, Furnace temperature

1. 서 론

연속식 가열로는 철강분야인 압연, 단조 공정에서

반제품의 가열을 위해 일반적으로 사용되고 있다. 가열로는 반제품의 소재 온도를 약 1,200℃ 까지 가열하거나 재료의 질을 향상시키기 위한 방법으로 목표온도의 $\pm 5^\circ\text{C}$ 이내, 승온온도가 25℃/min 이하의 조건에서 승온율을 가지게 각 영역을 설계해야 하며, 버너를 통해 연소 시 에너지 소비율을 낮게 하고 배기 배출물의

†To whom corresponding should be addressed.

Tel : +82-10-4595-6101 E-mail : kgbhym@pusan.ac.kr

생성이 낮게 해야 한다[1-7]. 연속식 가열로의 경우, 설계 시 설치되어야 할 공간 및 소재의 크기, 초기투자비용 등의 복합적인 제약으로 인해 목표 생산량을 확보하기 위한 충분한 공간을 확보하지 못할 경우가 있다. 일반적으로 연속식 가열로의 경우는 가열조건에 따라 다음과 같은 몇 개의 영역을 나누어 운영되어진다. 예열대(pre-heating zone)와 가열대(heating zone), 균열대(soaking zone)로 영역을 나누어 양질의 소재를 얻기 위해 각 구간별로 목표온도를 설정하고 각 위치에 버너를 설치하여 운영하고 있다. 이러한 경우, 가열능력에 따른 버너의 출력, 대수 및 배열 등을 조절하여 최적화된 소재의 가열구간을 확보해야 한다.

이러한 목적으로 많은 연구자들은 목표로 하는 생산량을 기준으로 소재의 온도와 노 내의 가스온도 및 노 벽의 온도를 계산할 수 있는 수치해석적 방법을 도입하여 연속식 가열로의 설계 시 온도특성을 연구하였는데, 특히 연속식 가열로 내에서의 전도, 대류 및 복사 열전달 및 에너지평형에 의해 소재온도 및 가스온도, 노 벽 온도를 수치 해석적 방법으로 도출하였고, 또한 연속식 가열로의 기초설계를 위한 상용 프로그램들에도 이러한 수치적 방법이 적용되어 있다. 이러한 대부분의 연구가 이미 결정되어 있는 가열로의 설계 정보에 따라 소재평균온도 또는 소재온도분포나 노 내 가스온도에 대한 수치해석결과나 실험결과와의 비교를 통해 연구결과를 도출하고 있으나, 실제 가열로 설계 시 가열로 내 버너의 용량이나 배열에 따른 노 내 가스온도와 소재온도 특성에 대한 연구는 부족한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 기 설계되어 있는 연속식 가열로를 대상으로 열전달 모델(전도, 대류, 복사) 및 에너지평형모델이 적용된 수치 해석적 모델을 구축하고 모델을 통해 기존 설계된 연속식 가열로의 버너 배열에 대한 소재온도 및 노 내 가스온도특성을 살펴보고 동일한 공급열량에 대한 버너배열 및 버너 용량별 대수를 변경하여 동일한 입열 조건에서도 버너배열이나 버너의 수에 의해 소재온도 및 노 내 가스온도 특성이 바뀔 수 있음을 살펴봄으로써 연속식 가열로에서의 버너 배열 설계 시에 대한 이해를 돕고자 한다.

2. 이론적 모델

2-1. 가스온도모델

연속식 가열로에서의 소재온도와 노 내 가스온도를

예측하기 위해 아래와 같이 에너지평형모델 및 열전달 모델을 적용하였다. 에너지평형모델과 열전달 모델은 각각 연속식 가열로의 각 영역(예열대, 가열대 및 균열대)에서의 공급열량과 열손실을 정의하여 나타내었다.[1]

식 (1)과 (2)는 연속식 가열로 내에서의 에너지 평형모델을 나타낸 것으로 소재 가열에 사용된 열과 가열로 내 손실된 열의 합은 연소용 입열과 배기손실의 차로 표현하였으며, 가열로 내 손실된 열은 노 벽과 개구부 및 스킨드 파이프(skid pipe)에서의 손실로 정의하여 아래와 같이 나타내었다.

$$Q_{steel} + Q_{loss} = Q_{fuel} - Q_{flue} + Q_{re} \quad (1)$$

$$Q_{loss} = Q_{skid} + Q_{wall} + Q_{open} \quad (2)$$

여기서, Q_{steel} 은 소재에 전달되는 열, Q_{loss} 은 손실되는 열, Q_{fuel} 은 공급된 연료의 연소로 발생하는 열, Q_{flue} 은 배기 손실 및 Q_{re} 는 재사용 가능한 열량을 각각 나타내며, 각 열량의 단위는 [kcal/h]다.

배기손실 및 재사용 가능한 열량의 경우는 아래 식 (3), (4)와 같이 정의할 수 있으며,

$$Q_{flue} = \frac{Q_{fuel}}{HHV} * R_{\frac{flue}{fuel}} * H_{flue} \quad (3)$$

$$Q_{re} = \frac{Q_{fuel}}{HHV} * R_{\frac{re}{fuel}} * H_{re} \quad (4)$$

여기서, HHV 는 연료 고위 발열량 [kcal/Nm³], $R_{\frac{flue}{fuel}}$ 은 배기가스와 연료 주입 비, $R_{\frac{re}{fuel}}$ 은 재가열가스와 연료 주입 비, H_{flue} 은 배기가스 엔탈피 [kcal/Nm³] 및 H_{re} 는 재가열가스 엔탈피 [kcal/Nm³]를 각각 나타낸다.

배기손실을 제외한 가열로 내 열손실(Q_{loss})은 크게 3가지로 구분되어지며, 다음과 같이 스킨드 파이프(skid pipe)에서의 냉각수에 의한 열손실(Q_{skid})과 노 벽면으로의 열손실(Q_{wall}), 그리고 장입/추출 개구 열손실(Q_{open})로 나타낼 수 있으며, 본 연구에서 스킨드 파이프(skid pipe)에 의한 손실은 매우 작은 값을 가지기 때문에 시스템 전체에 영향을 미치지 않는 것으로 보고 무시하였다. 이러한 가열로 내 열손실과 소재에

전달된 열량의 경우는 아래 식 (5)~(7)과 같이 열전달 모델로 간략하게 나타낼 수 있다.

$$Q_{steel} = m_{steel}c_p \frac{T_f - T_i}{t} \quad (5)$$

$$Q_{wall} = k_{wall}A_{wall} \frac{T_{fw} - T_a}{l} \quad (6)$$

$$Q_{open} = \sigma \epsilon A_{open} (T_{fw}^4 - T_a^4) \frac{t_{open}}{t_{total}} \quad (7)$$

여기서, m 은 질량 [kg], c_p 은 비열 [kcal/kgK], k_{wall} 은 로벽 열전도율 [kcal/mhK], A 은 면적 [m^2], t 은 공정 시간 [h], T_i 은 초기 온도 [K], T_f 은 최종 온도 [K], T_{fw} 은 로벽 온도 [K], T_a 은 외부 온도 [K], σ 은 슈테판-볼츠만(Stefan-Boltzmann) 상수 [$kcal/m^2hK^4$] 및 ϵ 은 복사율을 각각 나타낸다.

전술한 바와 같이 에너지평형모델과 열전달 모델을 포함하는 식(1)과 (2)를 통해 아래 식 (8)와 같이 노 내 가스온도함수로 나타낼 수 있다.[8]

$$\rho c_p \frac{dT_f}{dt} = Q_{fuel} - Q_{loss} - Q_{steel} - Q_{flue} + Q_{res} \quad (8)$$

2-2. 소재온도모델

소재의 온도는 가열로 내의 가스온도에 의해 대류 및 복사열전달을 통해 가열되는 것으로 각각의 지배 방정식은 아래 (9)~(11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{convection} = h_f \cdot A_{steel} \cdot (T_f - T_s) \quad (9)$$

$$E_{radiation} = \epsilon_f \cdot \sigma \cdot F \cdot A_{steel} \cdot (T_f^4 - T_s^4) \quad (10)$$

$$E_{storage} = \rho_{steel} \cdot c_{psteel} \cdot V_{steel} \cdot \frac{dT_s}{d\tau} \quad (11)$$

여기서, h , ϵ , σ 는 가열로 내 연소가스의 대류열전달 계수, 복사계수 및 슈테판-볼츠만(Stefan-Boltzmann) 상수를 각각 나타낸 것이며, A , V 는 각각 소재의 단

면적과 체적을 의미하며 T_s 는 소재의 온도를 의미한다.

에너지 평형을 고려하여 식 (9)~(11)을 다시 나타내면 아래 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho_{steel} \cdot c_{psteel} \cdot V_{steel} \cdot \frac{dT_s}{d\tau} = h_f \cdot A_{steel} \cdot (T_f - T_s) + \epsilon_f \cdot \sigma \cdot F \cdot A_{steel} (T_f^4 - T_s^4) \quad (12)$$

여기서, V 는 소재의 면적(A)과 유효두께(t_{equ})로 나타낼 수 있으며, 수식의 좌변을 유한차분법을 적용하여 시간간격에 따른 소재의 온도 분포식으로 나타내면 아래 식 (13)과 같다.[9]

$$T_s^{k+1} = T_s^k + \frac{\delta\tau}{\rho_{steel} \cdot c_{psteel} \cdot t_{equ}} [h_f \cdot (T_{fce} - T_s) + \epsilon_f \cdot \sigma \cdot F \cdot (T_f^4 - T_s^4)] \quad (13)$$

3. 수치해석 조건

3-1. 연속식 가열로 사양

본 연구에 모델로 적용된 연속식 가열로는 폭 12m, 길이 20.5m의 크기를 갖는 것으로 예열대와 가열대, 균열대를 구성하고 있고 각각 5m, 9.5m, 6m로 길이를 가지며, 1,100℃, 1,200℃ 및 1,170℃의 노 내 가스 온도를 유지하도록 구성되어 있다. 최대 생산량은 시간 당 110톤으로 약 1,170℃±10℃ 로 소재가 가열되게 설계되었으며, 그림 1에 개략도를 나타내었다. 연료는 메탄(CH₄)을 사용하는 것으로, 총 공급열량을 31,020,000kcal/hr 로 모든 조건에서 동일하고 하였으며, 버너의 용량 및 수량, 설치위치에 따른 소재온도 및 가열로 내 온도분포를 살펴보았다. 이미 설계된 조건에서는 약 1백만kcal/hr 급 버너를 30개 설치하였으며, 버너배열 및 공급열량분포에 대한 특성을 표 1과 그림 2에 각각 나타내었다. 예열부에는 고온의 배가스를 이용하여 소재를 예열하고, 이후 가열부 및 균열부에 버너를 각각 16개와 14개를 설치하여 소재가열온도 1,170℃±10℃, 110톤/일의 생산량을 만족할 수 있도록 설계되었다.

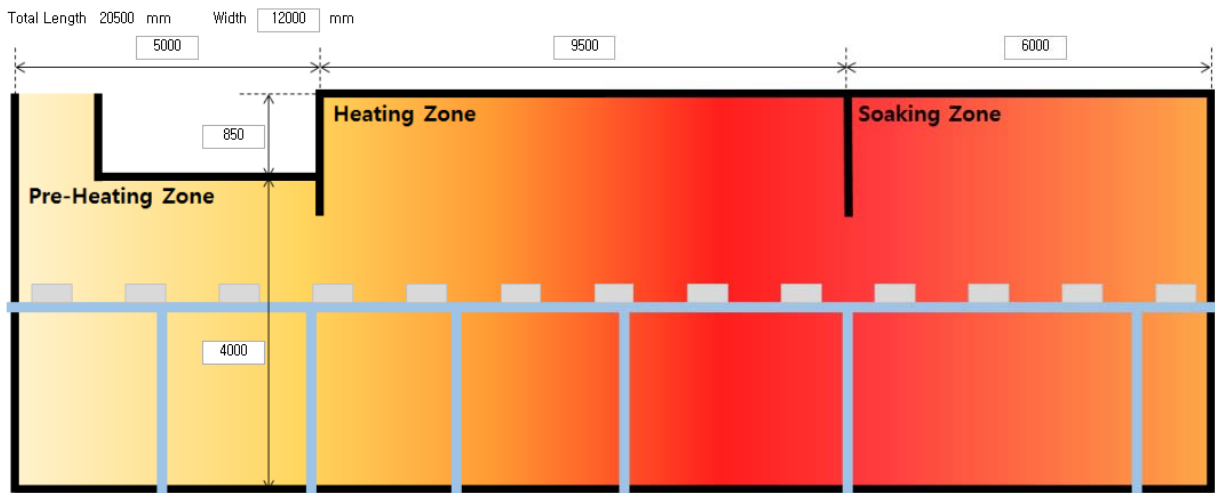


Fig. 1. Schematic diagram of a continuous reheating furnace

Table 1. Numerical condition for based burner array in the designed furnace

Contents	Preheat	Heat					Soak				Total
		6	8	10	12	15.5	17	18.5	20		
F'ce length [m]	5	6	8	10	12	15.5	17	18.5	20	20.5	
Burner Number	0	4	4	4	4	4	4	4	2		
Heat capacity/BR [kcal/hr, BR]	0	1,034,000					1,034,000				
Heat capacity/Zone [kcal/hr.Zone]	0	16,544,000					14,476,000				31,020,000

3-2. 수치해석 조건

연속식 가열로에서의 소재온도와 노 내 온도분포에 대한 버너배열의 특성을 살펴보기 위해 다음과 같은 조건을 선정하였다.

첫 번째는 버너의 용량을 1백만kcal/hr 급에서 약 2백만kcal/hr급으로 증가시키고 버너의 수량을 30대에서 18대로 감소시킨 경우와 1백만kcal/hr급 버너를 등간격으로 30대를 설치한 경우, 그리고 1백만kcal/hr급 버너를 예열대에 설치된 경우, 각 영역에 1.5백만 kcal/hr급 버너를 22대 정도 각 영역이 구분되는 지점에 설치한 경우, 마지막으로 1 백만kcal/hr 급 버너를 넓게 분포시킨 경우로 구분하여 각각의 조건에서 소재의 온도분포와 노 내 가스온도분포를 비교분석하였으며, 버너 배열 및 용량에 따른 특성을 살펴보았다. 이와 같은 버너 배열 및 용량조건을 표 2에 정리하여 나타내었다.

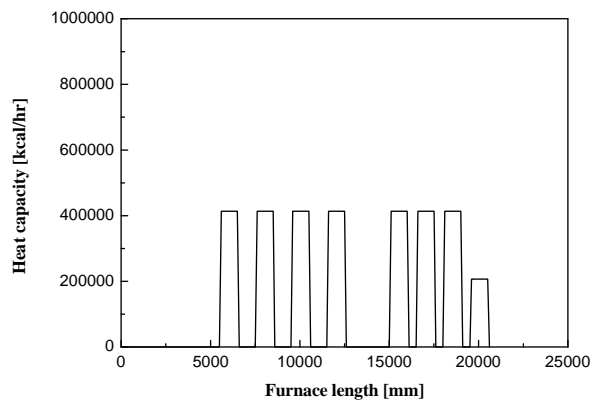


Fig. 2. Heat capacity distribution for furnace length as a function of the burner array

각 조건에서 생산량은 동일하게 110톤/일 생산량으로 선정하였으며, 소재는 강(steel)을 적용하였다. 수치해석에 적용한 소재의 크기는 가로 180mm, 세로

Table 2. Numerical conditions of various burner array and heat capacity

Case	Heat capacity of unit BR [kcal/hr]	Burner number	Burner array [m]	Remarks
1	1,723,330	Preheat 0 Heat 12 Soak 6	5.7, 7.2, 8.7, 11.2, 12.7, 14.2 15.7, 17.2, 18.7	2 BR @ each
2	1,034,000	Preheat 8 Heat 16 Soak 6	2, 3.5 5, 8, 11, 14 18.5, 20	4 BR @ each 2 BR @ 20
3	912,400	Preheat 4 Heat 18 Soak 12	4, 5 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 15, 16, 17, 18, 19, 20	2 BR @ each
4	1,034,000	Preheat 8 Heat 16 Soak 6	2.5, 4.5, 7, 9.5, 12, 14.5 17, 20	4 BR @ each 2 BR @ 20
5	1,410,000	Preheat 6 Heat 12 Soak 4	5 14, 15 20	6 BR @ each 4 BR @ 20

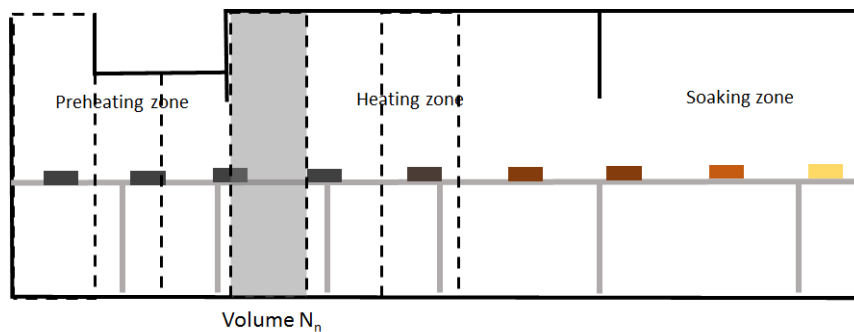


Fig. 3. Schematic illustration of control volumes for furnace section

11,200mm 및 두께 180mm이다.

위와 같은 조건들에 대해 수치해석을 수행하기 위해 기본 조건으로 노 내 예열대, 가열대 및 균열대의 온도를 각각 1,100℃, 1,200℃ 및 1,170℃로 가정하였으며, 연소는 CH₄ 연료를 공기비 1.2 조건에서 완전 연소하는 것을 가정하여 배기가스 성분을 CO₂, H₂O 그리고 과잉산소 또는 질소로 가정하였다. 또한 일반적인 연속식 가열로는 연소 후 배출되는 배기가스의 폐열을 이용하여 연소용 공기를 약 600℃ 이하로 예열하여 연소기에 공급하는 것으로 알려져 있으며, 본 연구에서는 예열공기온도를 550℃로 가정하였다.

그림 3에는 110톤/일급 연속식 가열로 내에서 소재의 온도분포와 노 내 가스온도분포를 계산하기 위해

가정한 것으로 가열로 내부를 미소체적으로 구분하여 각 체적간의 열전달 및 에너지평형을 고려하여 미소체적 내의 온도분포를 도출할 수 있도록 수치해석을 수행하였다.

4. 해석결과 및 고찰

4-1. 노 내 가스온도 및 소재온도분포 특성

그림 4에는 연속식 가열로의 노 내 가스온도 및 소재온도분포를 계산할 수 있도록 구축한 수치해석 모델을 통해 조건 별 결과를 나타낸 것이다. 본 연구에 모델로 적용된 연속식 가열로는 110톤/일급 강(steel)

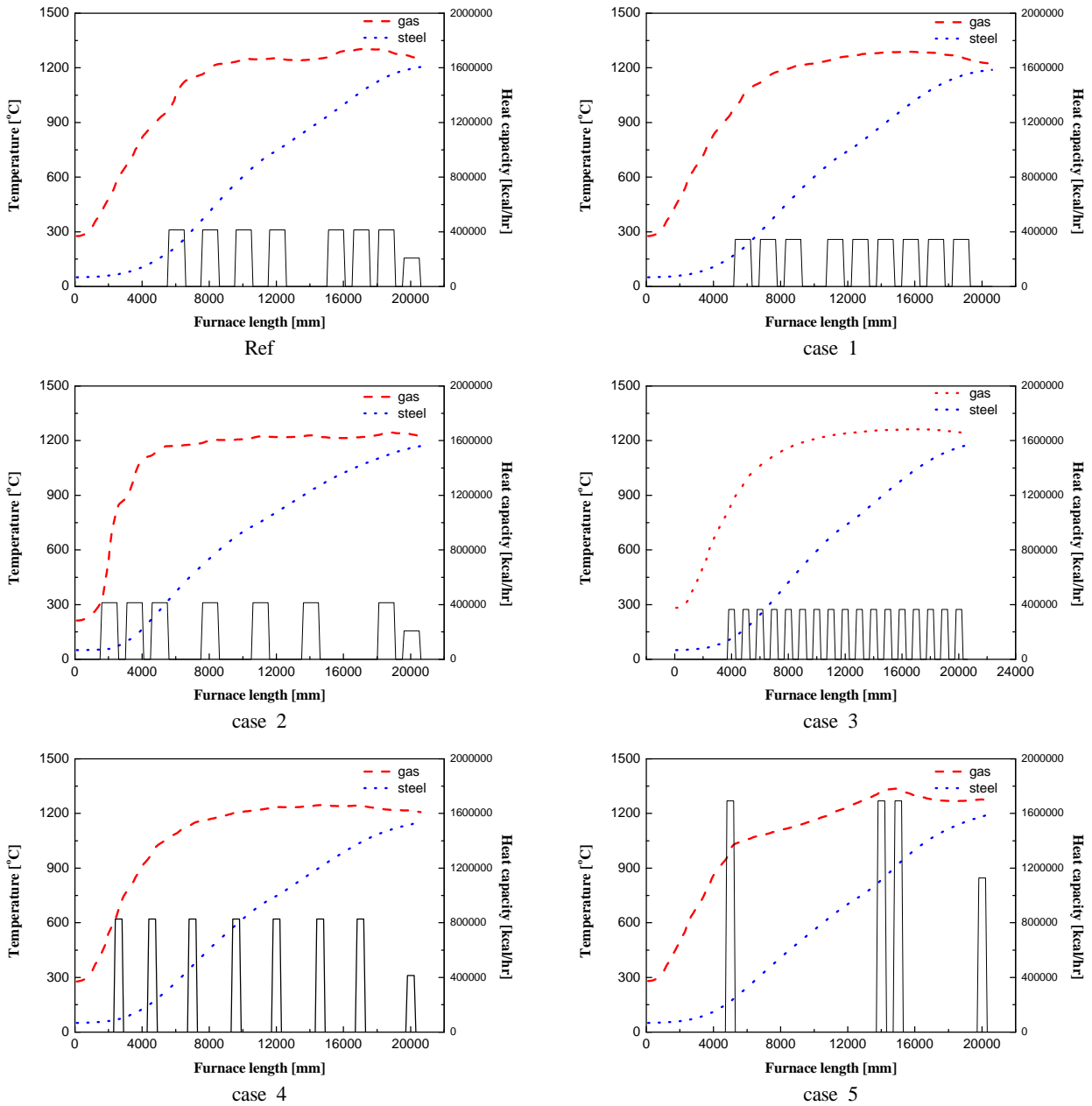


Fig. 4. Temperature distributions of gas and workpiece in furnace as function of various burner array and capacity

을 $1,170^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$ 로 재가열하기 위해 설계된 공업로이다. 기본 설계 값을 나타내는 Ref의 수치해석결과에서부터 case 5까지의 조건을 간략하게 정리하면 Ref조건은 1백만kcal/hr급 버너 30개를 가열부와 균열부에 적용한 경우이며, case 1의 경우는 버너 용량을 키운 2백만kcal/hr급 버너 20개를 가열부와 균열부에 적용하였고, case 2, 4의 경우는 Ref와 동일한 1백만kcal/hr급 버너 30개를 Ref와 구분되게 예열대, 가열대 및 균열대에 적용한 경우로 case 4의 경우는 기존

의 다른 버너 배열과 구분되게 동일 배열 내에서 버너 간 간격을 절반정도로 좁게 설계하여 국부가열정도를 살펴 볼 수 있도록 구분하였다. Case 3의 경우는 버너 용량은 1백만kcal/급을 적용할 수 있는 범위에서 예열대, 가열대 및 균열대에 균일한 간격으로 34개 버너를 설치한 경우이며, case 5의 경우는 극단적으로 각 영역, 즉 예열대, 가열대 및 균열대의 연결부위에 버너를 설치하여 노 내 가스온도 및 소재온도분포 특성을 조사한 것이다.

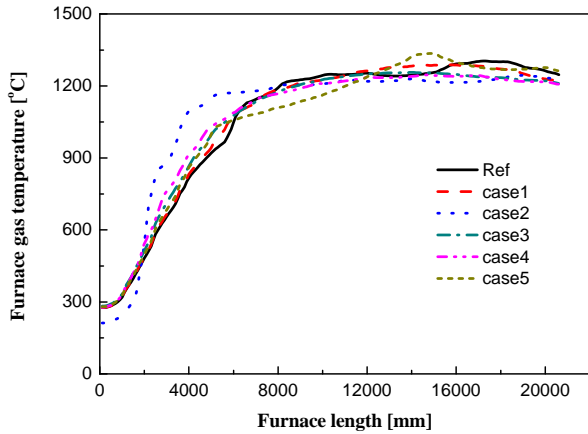


Fig. 5. Gas temperature distributions for various burner array and capacity

그림 4에 나타난 수치해석결과를 비교분석하기 위해 그림 5와 6에 각 조건에 대한 노 내 가스온도분포 및 소재온도분포 특성곡선을 비교하여 다시 정리하였다. 그림 5에 나타난 것과 같이 노 내 가스온도분포특성을 살펴보면 전체적으로 총 공급열량이 동일함에 따라 단위버너의 열용량에는 관계없이 버너의 배열에 따라 노 내 가스온도분포가 변하는 것을 확인할 수 있으며, 가열대 및 균열대에서 약 1,200°C의 온도를 유지하고 있는 것을 확인할 수 있고, case 5와 같이 국부적으로 버너를 배열한 경우에는 국부적인 노 내 가스온도가 1,300°C 이상 상승함에 따라 로 영역의 단열재 설계 시 세심한 검토가 필요할 것으로 사료된다. 위 결과들을 살펴 볼 때 노 내 가스온도의 경우, 최종적으로 버너의 출력보다는 버너의 설치된 배열에 의해 노 내 가스온도에 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었으며, 각 부에 버너배열을 적절히 하지 않을 경우, 노 내 가스온도의 편차를 통해 최종 소재의 가열온도를 만족하지 못하는 결과를 초래 할 수 있을 것으로 판단된다.

그림 6에는 노 내 가스온도를 형성한 상태에서 연속식 가열로의 최종목표가 될 수 있는 소재의 온도분포특성을 비교하여 정리한 것이다. 본 연구에 적용된 공업로의 경우 소재의 추출목표온도는 전술한 바와 같이 1,170°C±10°C로, 목표온도범위 보다 높거나 낮을 경우 재가열 이후 공정에 상당한 영향을 미치게 된다. 결과를 살펴보면, Ref와 case 1, 5의 경우 소재의 추출온도 약 1,200°C로 목표온도범위 최대 값보다 20°C 정도 높게 추출되는 것을 확인할 수 있으며, case 4는 목표온도범위 최소 값인 1,160°C 보다 10°C 정도

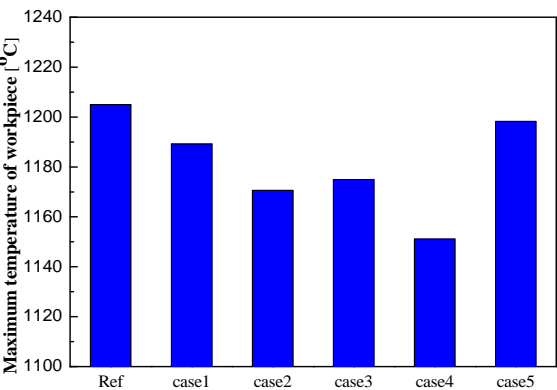
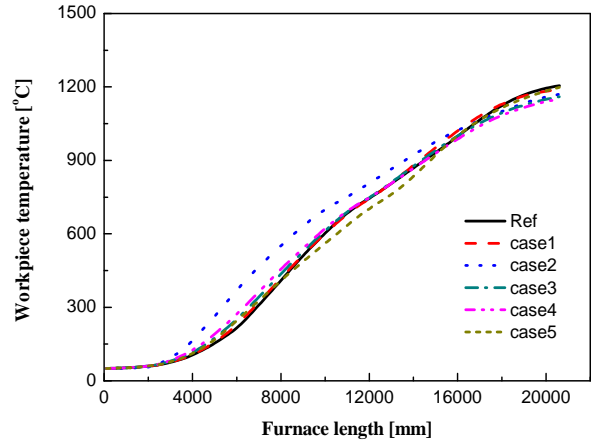


Fig. 6. Workpiece temperature distributions for various burner array and capacity

낮은 1,151°C로 추출되었다. 반면 case 2, 3의 경우에는 목표온도범위 내에서 추출되는 것으로 각각 1,171°C와 1,175°C로 나타내었다. 전체적으로 총 공급열량을 동일하게 하였음에도 불구하고 버너의 배열에 따라서 최종 추출온도에서 차이가 존재하는 것을 확인하였다. 최종의 소재 추출온도가 목표범위에 만족하더라도 소재의 가열율[°C/min]이 클 경우, 소재가 열용력에 의해 균열되는 사례가 현장에서 빈번하게 발생함에 따라 소재의 가열율에 대한 조사가 반드시 요구되며, 다음의 4-2절에서 분석결과를 나타내었다.

4-2. 소재온도편차 특성

그림 7에는 소재의 품질을 좌우할 수 있는 소재의 가열율을 조사하여 나타난 결과이다. 일반적으로 재가열시 가열율은 25°C/min 이하의 값을 가지는 것을 현장에서 권장하고 있는 실정이나, 가열로 설계 시 공간적 한계로 다소 가열율이 Ref조건에서도 높게 평가된

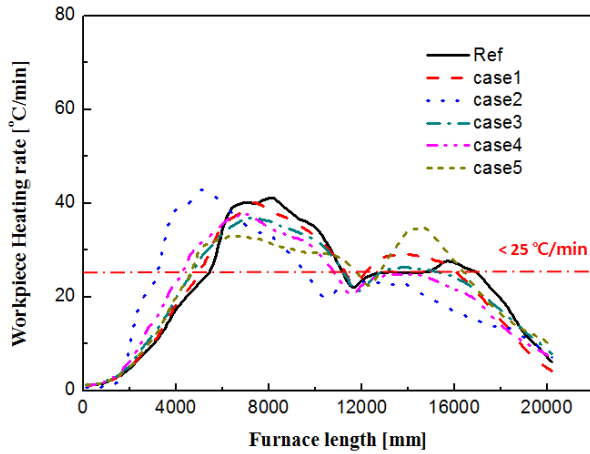


Fig. 7. Heating rate of workpiece as function of various burner array and capacity

것이 사실이다. 그러나 전체적으로 Ref조건에서보다 버너의 배열이나 열용량을 변경하여 공정 상에서 가열율을 최소화할 수 있다면 본 연구의 큰 의미가 있다고 할 수 있다. 결과를 살펴보면 최종추출온도가 설계 범위에 있던 case 2와 3 중에서 case 3의 경우가 가장 가열율이 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 버너의 열용량보다는 버너가 국부적으로 배열된 구간에서 구간별 가열율이 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

Ref와 case 1과 5의 경우에는 소재의 추출온도가 다소 높았는데, 가열율의 결과를 토대로 추측해 보면 생산량을 다소 높이거나 총 공급열량을 낮게 할 수 있는 설계상 여유를 갖는다고 추정할 수 있다.

전반적으로 버너의 배열이 균일하게 분포될 경우 가열율이 낮게 유지되는 것을 확인할 수 있는 것으로 연속식 가열로와 같은 공업로를 설계 시 예열대, 가열대 및 균열대와 같은 3부분으로의 설계범주를 벗어나, 영역을 더 세분화하여 공업로를 설계, 제어할 경우 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

5. 결론

110 톤/일급 강(steel) 재가열을 위한 연속식 가열로의 버너 배열 및 열용량에 따른 수치해석적 분석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

에너지평형방정식 및 전도, 대류 및 복사와 같은 열 전달방정식을 통해 연속식 가열로 내 버너의 배열 및 열용량을 고려하여 가스온도분포 및 소재의 온도분포 특성을 나타내었다.

노 내 가스온도와 소재의 온도분포는 총 공급열량이 동일함에도 불구하고 버너의 배열이나 열용량에 의해 영향을 받는 것을 확인하였다.

또한 노 내 가스온도와 소재의 온도분포는 버너의 용량보다는 공업로의 각 영역에 설치된 버너의 배열에 의해 지배적인 영향을 받는 것을 확인하였으며, 특히 버너의 배열을 각 영역에 대해 열량이 낮은 버너를 통한 균일한 배열조건이 최적의 조건을 나타냄을 확인하였다.

소재의 가열율의 결과를 통해 버너의 열용량이 낮고 버너의 배열이 전 영역에서 균일하게 배열될 경우 가열율을 낮출 수 있는 것을 확인하였으며, case 3의 경우가 최적의 버너배열 및 열용량조건임을 도출하였다.

버너의 배열이 국부적으로 배열될 경우, 노 내 가스 온도상승 및 소재의 높은 가열율을 초래함을 확인하였다.

Acknowledgement

본 연구는 2014년 산업통산부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다.(No.20142010102710)

References

1. Kim, K. M., et al., 2015, A numerical study on the efficiency of an industrial furnace for oxygen combustion conditions, *KOSEE*, Vol. 24, No. 3, pp. 82-88
2. Lee, G. W., et al., 2014 On the thermal behavior of the slab in a reheating furnace with radiation, *WASET*, Vol. 8, No. 5, pp. 922-927
3. Kim, M. Y., 2007, A heat transfer model for the analysis of transient heating of the slab in a direct-fired walking beam type reheating furnace, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 50, pp. 3740-3748
4. Wild, D., et al., 2009, Modelling and experimental model validation for a pusher-type reheating furnace, *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*, vol. 15, pp. 209-232

5. Hsieh, C. T., et al., 2010, A numerical study of skid marks on the slabs in a walking-beam type slab reheating furnace, *Numerical Heat Transfer, Part A*, vol. 57, pp. 1-17
6. Panjkovic. V., et al., 2012, Fast dynamic heat and mass balance model of walking beam reheat furnace with two-dimensional slab temperature profile, *Ironmaking & Steelmaking*, vol. 39, pp. 190-209
7. Emadi. A., et al., 2014, Heating characteristics of billet in a walking hearth type reheating furnace, *Applied Thermal Engineering*, vol. 63, pp. 396-405
8. Ünal Çamdali, Murat. Tunç, 2006, Steady State Heat Transfer of Ladle Furnace During Steel Production Process, *Journal of Iron and Steel Research, International*, Volume 13, Issue 3, pp. 18-25,
9. Radhakrishnan Purushothaman, 2008, Evaluation and Improvement of Heat Treat Furnace Model, *Dissertation*, WORCESTER POLYTECHNIC INSTITUTE