

Batch-type 재가열로의 가열 효율 예측을 위한 CFD 해석 모델이민재^a, 강태원^a, 윤장혁^a, 양현익^{a*}**CFD Analysis Model to Predict the Heating Efficiency for a Batch-type Reheating Furnace**Min-jae Lee^a, Tae-won Kang^a, Jang-hyeok Yun^a, Hyun-Ik Yang^{a*}^a Department of Mechanical Design Engineering, Hanyang University**ARTICLE INFO***Article history:*

Received	7	May	2021
Revised	9	June	2021
Accepted	15	June	2021

Keywords:

CFD
Reheating furnace
Heating characteristics
Transient heat conduction

ABSTRACT

Austenitizing and quenching are performed to obtain the desired microstructure and mechanical quality by heat treatment. In this process, when the temperature difference between the surface and the center of the product increases, problems such as creep and residual austenite occur. In this study, a CFD analysis model was developed to determine the adaptive operating environment that minimizes temperature deviation. The model was verified for validity according to the experimental results, with an error of <3%. Moreover, the internal flow field based on the product location, the difference in temperature between the upper and lower parts of the product, and the uniform temperature distribution were confirmed. In addition, this study compared the area fraction at which the fitting product reached the target temperature through CFD analysis. In conclusion, it was confirmed that the CFD analysis model can be applied for optimizing the shapes, product, and operation environment of the furnace.

1. 서론

재가열로는 압연, 단조, 퀴칭 등의 공정 과정을 위해 적합한 목표 온도로 재가열해주는 설비이다. 1970년대 이후부터 철강 산업이 발전하면서 고부가가치 제품의 다품종 소량 생산 및 고품질화가 이루어져왔다. 이러한 추세에 맞춰서 대용량 슬라브(slab), 보 (beam), 피팅 제품과 같은 대용량 제품을 열처리하는데 있어서 walking beam-type 재가열로뿐만 아니라 특정 형상의 소량 제품을 열처리하는 batch-type의 재가열로 등이 많이 사용되고 있다^[1,2]. 우수한 기계적 성질의 강을 얻기 위해서는 제품의 재가열을 통한 오스테나이트화와 퀴칭을 통한 마르텐사이트 조직 변화가 필

요하다. 오스테나이트화를 통해 조직을 오스테나이트 상태로 만든 후, 급랭 과정인 퀴칭을 수행하면 강의 조직이 마르텐사이트 조직으로 변태되며 고강도 강 제품을 생산할 수 있다. 마르텐사이트 조직 변태는 가열 과정에서 생성된 오스테나이트의 구성에 따라 기계적 성질이 결정된다. 가열 과정 중 발생하는 제품 내 온도 편차는 크리프, 잔류 오스테나이트 등의 문제뿐만 아니라 오스테나이트를 결정하는 조성비에도 영향을 미칠 수 있다. 따라서 가열 과정 동안 제품의 온도 편차를 최소화하고, 오스테나이트화 목표 온도에 도달 할 수 있도록 열처리 방식을 제어 하는 것이 필수적이다. 대형 피팅 제품의 열처리 과정은 가열 시간이 매우 길고 제품 표면의 스케일층으로 인해 온도 변화를 파악하기 어렵다. 그리고 실험

* Corresponding author. Tel.: +82-31-436-8150

E-mail address: skynet@hanyang.ac.kr (Hyun-Ik Yang).

을 통해 최적의 연소 제어 방법을 찾는 과정은 반복적인 실험이 수행되어야하기 때문에 전문학적인 비용이 소모된다. 또한 연소로 내 전도, 대류 및 열 복사 현상이 동시에 일어나 제품의 온도를 파악하기 쉽지 않다^[3,4]. 하지만 수치해석 방법이 발달되면서 제품의 품질과 재가열로 운전 효율을 향상시키기 위해 전산 유체 역학(computational fluid dynamics: CFD) 이용하여 가열로의 온도 특성을 예측하는 연구가 활발해졌다.

Prieler, R. et al.은 산소 농도에 따른 가스 연소의 최대 효율을 검출하였고, CFD 해석을 통해 용해로 내 균질한 온도 분포에 대한 연구를 수행하였다^[5]. Liu, et al.은 FLUENT를 사용하여 비정상 상태 및 과도 상태에서 재가열로 내 온도 분포가 제품의 균일 온도와 가열 효율의 미치는 영향을 CFD로 분석하였다^[6]. Yang, et al.은 batch-type 재가열로 밑판의 다공 특성에 따른 열전달 효율을 CFD로 분석하였다^[7]. 그리고 Choi, et al.은 fluent를 이용하여 연소로 노즐의 위치에 따른 유동 특성을 비교하였고, 랜스의 위치를 제어함으로써 연소 효율을 향상 시켰다^[8]. 대형 피팅 제품을 열처리하는 방식은 pusher-type^[9-12], walking beam-type^[5,13-16] 그리고 batch-type^[6,17-20]의 3가지 등이 있는데, 이들을 활용한 연구들 또한 활발하게 진행되어 왔다. Han, et al.은 walking beam-type 재가열로에서 가열 시간에 따라 슬라브의 배출 온도와 온도 균일성을 고려한 최적 가열 시간을 연구하였다^[14]. Gu, et al.은 walking beam-type 재가열로에서 슬라브의 이동을 고려한 열전달 해석 결과를 실험과 비교하였다^[11]. 초기 온도를 높게 유지할수록 단면의 내외부 온도 차이가 줄어들 뿐만 아니라 가열 공정 시간도 감소되면서 성능을 향상 시킬 수 있다고 결론지었다. 하지만 상기한 연구들에서 활용된 수치해석 모델들은 제품 내부를 포함하는 성능을 분석하는데 한계가 있다. Jaklič, et al.은 용해로에서 빌릿의 크기와 공간이 용해로의 생산성과 재가열 시간과의 관계를 CFD와 열전대 결과를 통해 비교 분석하였다^[12]. 하지만 제품 성능의 정량적 지표에 대해서는 명시적으로 설명하지 못하였다. 따라서 재가열로를 수치해석 모델로 구성하고 제품 표면 및 내부 온도가 모두 목표 온도에 도달할 수 있는 최적화된 온도 제어가 필요하다.

본 연구에서는 CFD를 활용하여 제품을 목표 온도에 도달시키기 위해 batch-type 재가열로를 수치 모델링 하였다. 가열로 가이드 온도를 실험과 동일하게 구성하고 분위기 온도에 따라 버너를 제어하여 간접 가열 방식을 모사하였다. 그리고 수치해석 모델의 타당성을 검증하기 위해 가열되는 제품의 온도를 측정하여 실험 측정 데이터와 비교하였다. 마지막으로 검증된 수치해석 모델을 이용하여 제품 위치별 온도 특성을 분석하였다.

2. 이론

2.1 지배 방정식

재가열로 내부의 난류 유동은 reynolds averaged navier-stokes (RANS) 방정식을 기반으로 문제에 접근 할 수 있다. 연구에서 사용된 연속 방정식과 운동량 보존 방정식은 pressure-based solver를 사용하여 계산되었다. 질량 보존 방정식과 모멘텀 보존 방정식은 식 (1) ~ 식 (2)과 같다.

공식에서 ρ , \bar{u} , p , 그리고 \bar{g} 는 시스템의 평균 밀도, 속도, 시스템 압력, 단위 벡터, 중력을 의미하고, $\bar{\tau}$ 는 수직 응력과 전단 응력에 대한 응력 텐서이다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho \bar{u})}{\partial t} + \nabla \cdot ((\rho \bar{u}) \bar{u}^T) = -\nabla \cdot p \bar{I} + \nabla \cdot \bar{\tau} + \bar{\rho} \bar{g} \quad (2)$$

2.2 k-ε 난류 모델

난류 모델은 reynolds-averaged navier-stokes (RANS) 방정식을 이용한 detached eddy simulation (DES), k-ε 모델, k-ω 모델, large eddy simulation (LES), 레이놀즈 응력 모델(reynolds stress model, RSM), 전단응력 수송(shear stress transport, SST) 모델 등으로 구성된다^[21,22].

본 연구에서는 난류 운동 에너지와(k) 소산율(ε) 구현되는 2차 방정식인 k-ε 모델을 사용하였다. k-ε 모델은 유동의 확산 속도와 흐름 예측이 유리하고 일반적인 유동 문제를 연구하는 데 사용된다^[15].

2.3 복사열전달

재가열로와 피팅 제품, 피팅 제품 간의 복사열전달은 슈테판-볼츠만 법칙으로 정의된다. 식(3)과 식(4)에서 σ 는 슈테판-볼츠만 상수, ϵ 는 방사율, F_{fi} 와 F_{pi} 는 피팅 제품, 판(plate) 그리고 피팅 제품 형상의 복사형태계수(view factor)를 의미한다. A는 피팅 제품의 표면적이며, 복사열 방정식에서 복사형태계수를 계산해야 한다(식 (5)).

$$Q_{rad_pi} = \sigma \epsilon F_{pi} A (T_p^4 - T_i^4) \quad (3)$$

$$Q_{rad_fi} = \sigma \epsilon F_{fi} A (T_f^4 - T_i^4) \quad (4)$$

$$F_{pi} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_p} \frac{\cos \beta_i \cos \beta_p}{\pi r^2} dA_p dA_i \quad (5)$$

3. 실험 방법

본 연구에서 사용된 batch-type 재가열로는 정지식 재가열로이기 때문에 예열부, 가열부, 균열부 등의 구역이 나누어 지지 않고 하나의 통합된 형태를 갖는다(Fig. 1).

Batch-type에서는 제품이 가열로 내부에 장입하고 간접가열방식으로 가열된다. 가열로는 10개의 버너가 양쪽으로 5개씩 엇갈려 배치되어 있으며, 1개의 기체 배출구가 있다(Fig. 2). 또한 열처리로 내부 분위기 온도를 측정하기 위해 6개의 열전대가 천장에서 일정 간격으로 설치되어 있다. 열전대는 니켈(nickel)-크롬(chrome) 재질로 만들어져 있어 1753 K까지 온도 계측이 가능하다.

재가열로에 장입된 제품은 지름 490 mm, 두께 47 mm의 파이프들이며, 제품 내부에 열전대를 설치하여 온도 변화를 계측하였다. 그리고 장입 위치에 따른 온도 변화를 계측하기 위해, 위치가 다른 3개의 파이프들 내부에 각각 열전대가 설치되었다. 출구는 에어실린더 클램프를 활용하여 3.5 atm까지 견딜 수 있게 설계되었고, 열의 유출을 최소화하여 가열로 효율을 증가시킨다. 천장 열전대에 의해 측정된 분위기 온도, 제품의 가이드 온도 그리고 허용 오차 값에 따라 버너의 On/Off가 제어된다. Fig. 3은 버너의 제어 순서도이다. 측정된 분위기 온도가 가이드 온도와 실험을 통해 얻은 보정 값의 합보다 낮을 때 버너가 가동되면서 열처리가 진행되는

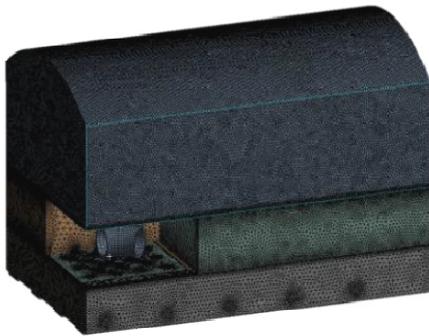


Fig. 1 Batch-type furnace model for finite element analysis

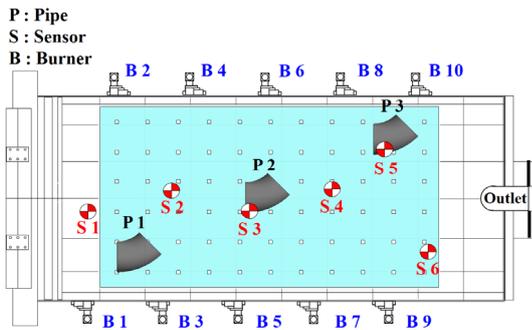


Fig. 2 Schematic diagram of reheating furnace used in the experiment

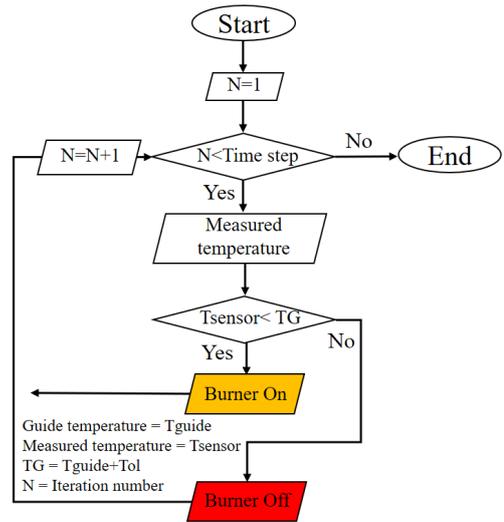


Fig. 3 Flow chart of the burner control

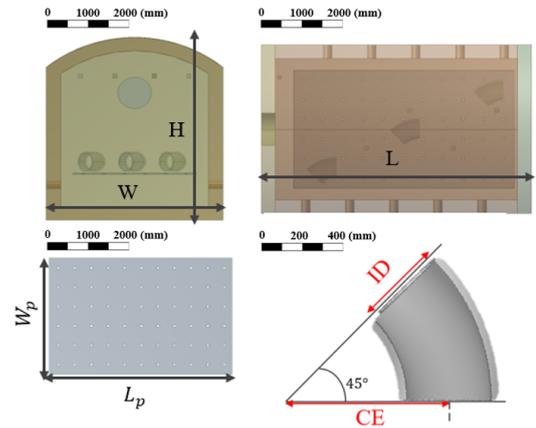


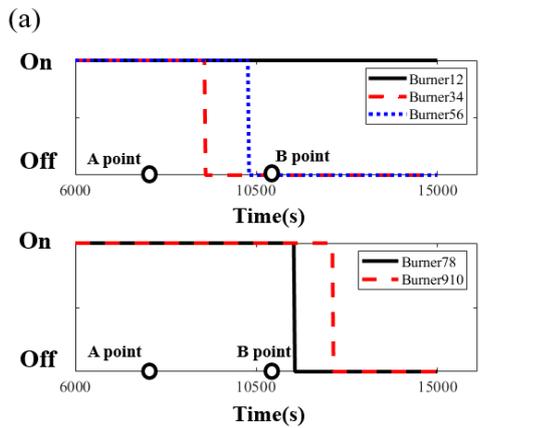
Fig. 4 Parameters of the model used in the experiment

Table 1 Dimensions of the model used in the experiment

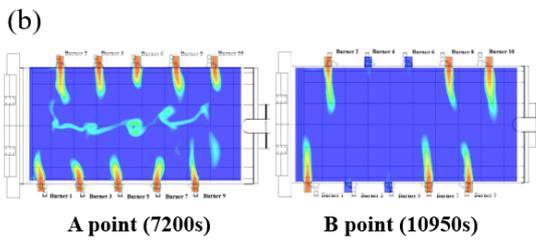
Model	Dimension (mm)	Value
Furnace	Length × Width × Height	7250 × 4300 × 4140
Fitting pipe	CE × ID × Thickness	490 × 570 × 47
Plate	Length × Width × Height	2200 × 3600 × 25

*CE : Center to end, ID : Inner diameter

다. 분위기 온도가 과도하게 높아지면 연료 투입을 중지시켜 가열이 중단되고 분위기 온도가 낮아진다. 본 실험은 가열로가 충분히 식은 상온 상태에서 진행되었다. 가열로와 제품의 크기는 Fig. 4와 Table 1에 나타내었다. 피팅 제품의 장입 온도는 상온과 동일한 290 K이다. 이후 버너를 제어하여 제품을 목표 온도에 도달시킨 후 이를 유지하게 하여 제품 전체의 온도가 균일 해지도록 만든다. 가열 시간은 200 분이며, 30 초마다 열전대에 계측된 온도가 저장된다.



(a) Burner on/off condition in reheating furnace operation



(b) Velocity distribution of burners at point A and point B

Fig. 5 Burner condition and velocity distribution of burners

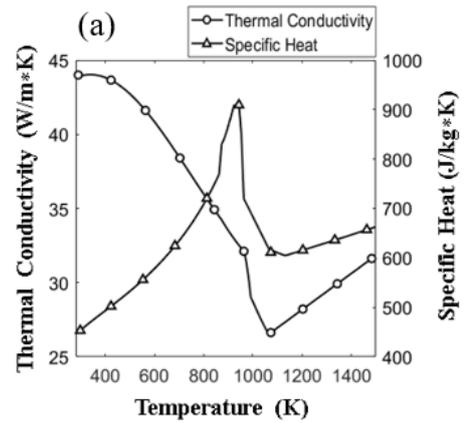
Table 2 Nodes and elements of model mesh

Model	Static mesh	
	Elements	Nodes
Air	505,124	97,036
Fitting Pipe	528	1,134
Plate	3,012	6,314
Total	508,664	104,484

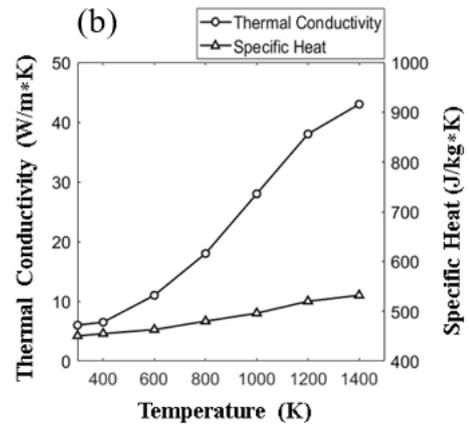
4. 모델 및 해석

본 연구에서 3차원 열/유동 전산 해석을 위해 ANSYS CFX를 사용하였다. 해석에 사용된 모델의 형태와 사용된 격자의 정보를 Fig. 1과 Table 2에 나타내었다. 그리고 버너의 On / Off 제어 시스템을 수치 해석에 반영하였다. Fig. 5(a), (b)는 가열 시간이 6000 초에서 15000 초 사이에 버너가 On / Off 되는 과정을 보여 준다. 7200 초(A지점)에서 전체 구간의 분위기 온도가 가이드 온도 이하일 때 모든 버너는 On상태로 유지된다. 10950 초(B지점)에서 센서2와 센서3 구간의 분위기 온도가 가이드 온도 이상으로 상승하면서 버너3, 4와 버너5, 6은 Off 상태를 유지한다. 수치 해석에 사용된 재가열로, 피팅 제품 및 판은 실험에 사용된 규격과 동일하다.

요소는 가열로의 버너와 제품 주위의 유동 변화를 잘 예측할 수 있도록 요소를 분할하였다. 난류 모델은 k-ε 모델이 고려되었고,



(a) Thermal conductivity and specific heat of the pipe



(b) Thermal conductivity and specific heat of the plate

Fig. 6 Thermal conductivity and specific heat as a function of temperature

피팅 제품의 초기 온도는 상온과 동일한 290 K로 설정하였다. 그리고 가열로 내부가 3.5 atm 이하를 유지하도록 배출구의 상대 압력을 설정하였다. 여기서, 가열로 외벽 형상은 열의 출입이 없는 단열 경계 조건으로 정의되어 해석 소요 시간을 크게 단축 시켰다.

열 전도율은 단위 시간당 단위 면적을 통하여 흐르는 열량을 나타내고 비열은 단위 질량의 물질 온도를 1 K 높이는데 필요한 열 에너지를 의미한다. 해석에 사용된 제품과 판의 재료의 열 전도율과 비열은 온도에 따라 다른 값을 나타낸다. 강의 조성비에 따라서 다른 물성치를 갖기 때문에, 제품과 판은 서로 다른 조성비를 지닌다. 따라서 가열 동안 변화하는 물성치 정보가 적용되었다 (Fig. 6(a), (b)). 이를 통해 실제와 유사한 열 특성 조건이 반영될 수 있다.

5. 전산 유체 역학 모델 검증

본 연구에서 활용된 CFD 모델의 타당성을 검증하기 위해 실험 결과와 해석 결과를 비교하였다. Fig. 7은 실험에서 측정된 피팅

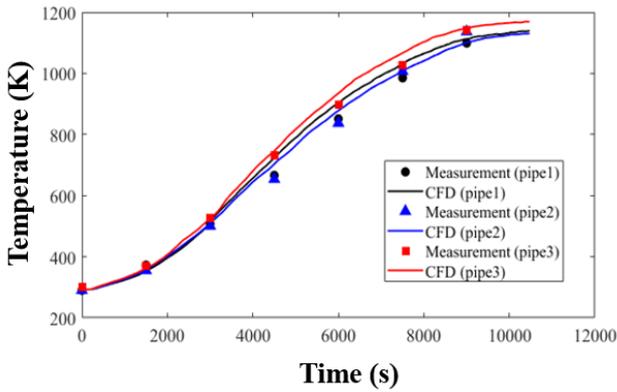


Fig. 7 Comparison of temperature between measured results and numerical results of pipes

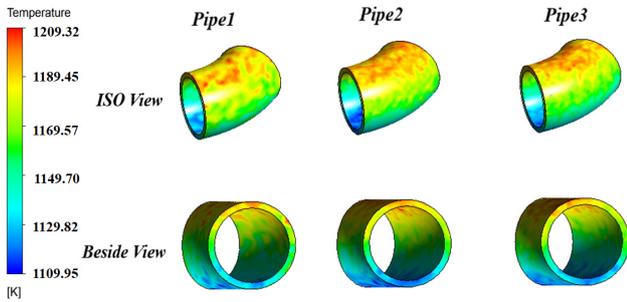


Fig. 8 Temperature contours of pipes

제품의 온도와 CFD 해석을 통해 얻은 3개 온도를 비교한 결과이다. 초기 가열 구간에서는 제품의 비열이 낮기 때문에 온도가 빠르게 상승하지만 이후에는 비열이 높아짐에 따라 온도 상승이 점차 둔화되면서 기울기가 완만해진다. Pipe 1, Pipe 2 그리고 Pipe 3은 6000 초에서 실험 결과와 해석 결과가 최대 37 K의 온도차가 발생하였다. 이는 재료의 비열이 실제 값과 다르고 가열로 벽면이 단열 경계로 가정되어 외부로 손실되는 열전달이 무시되면서 온도 변화에 차이가 발생 되었기 때문이다. Pipe 1과 Pipe 3의 최종 온도는 14.2 K (오차 1.2%)로서 목표 온도에 도달하였다. 그리고 Pipe 2는 총 해석 시간 동안 실험 결과와 9030 초에서 32.1

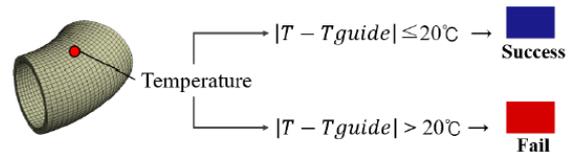


Fig. 9 Conditions of nodes reaching target temperature

K (오차 2.9%)의 온도차이가 발생 되었다. 따라서 pipe 별 온도 데이터가 실험 계측 결과와 5% 이내의 오차 범위를 갖기 때문에 정의된 수치 모델링 기법은 실제 환경과 유사하게 모사 되었다고 판단되었다.

6. 피팅 제품의 특성 분석

Fig. 8은 재가열 시간이 200분 동안 운용된 지점에서 피팅 제품의 온도 분포를 보여준다. 파이프 상부 최대 온도는 1209 K로 목표 온도보다 27 K 높으며, 최저 온도는 목표 온도보다 62 K 낮은 약 1110 K로 제품의 하부에서 발생하였다. 제품의 목표 온도 도달 여부를 확인하기 위해 수치해석 결과로부터 파이프의 표면 온도 데이터를 추출하였다. Fig. 9는 표면 온도 중 목표 온도에 도달했다고 판단되는 조건을 나타내었다. 제품의 성능 판단 여부는 $1183 \text{ K} \pm 20 \text{ K}$ 범위 내에 목표 온도가 도달하면 success로 표기 되며, 범위 밖에서는 목표 온도에 도달하지 못했다고 가정되면서 Fail로 표기된다. 출구로부터 가장 멀리 위치한 Pipe 1과 가장 가까운 Pipe 3은 각각 99%과 81%의 면적 비율이 목표 온도에 도달 하였다. 하지만 중앙에 위치한 Pipe 2는 67%의 면적 비율만 목표 온도에 도달했으며, 33%는 목표 온도 보다 낮은 1163 K 이하의 온도 분포를 보였다(Fig. 10(a)). Fig. 10(b), (c), (d)는 시간에 따른 제품의 상단부, 중간부, 하단부 지점의 온도 변화 그래프를 나타낸다. 세 제품 모두 Point 1과 Point 2는 목표 온도에 도달 하였지만 하단부인 Point 3은 Pipe 1을 제외한 Pipe 2와 Pipe 3에서 목표 온도보다 약 30 K 낮은 온도를 보였다.

분석된 결과를 통해 제품과 판이 맞는 하단부 온도가 목표 온

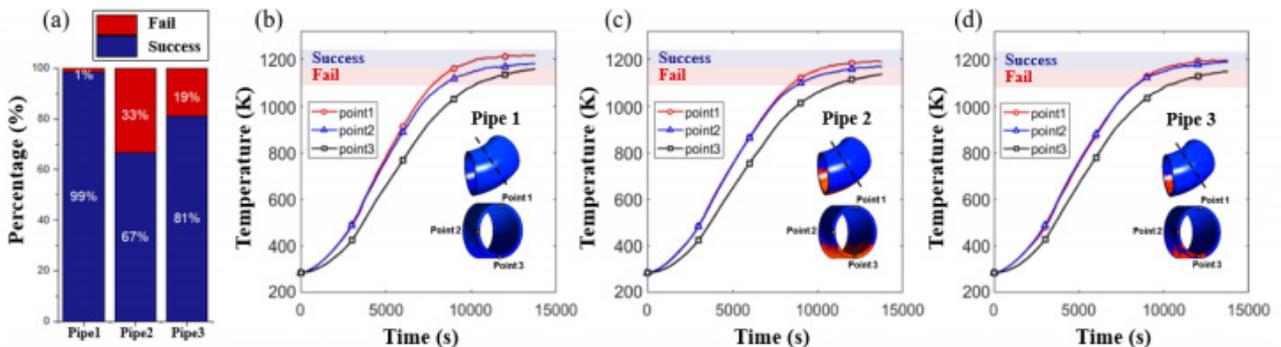


Fig. 10 (a) Percentage of nodes reached target temperature, (b), (c), (d) Comparison of the temperatures at the points of pipes

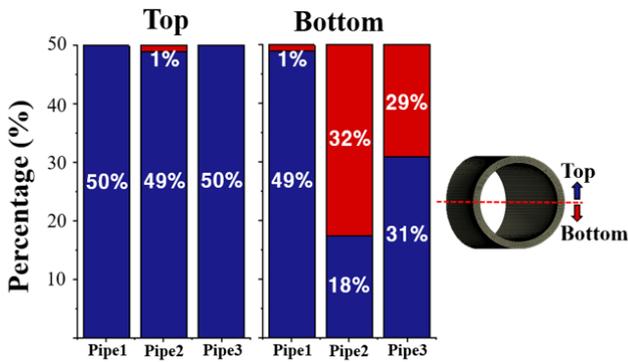


Fig. 11 Percentage of nodes at the top and bottom reached target temperature

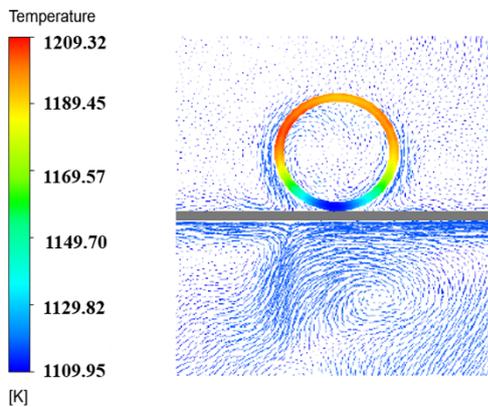


Fig. 12 Temperature contours of pipe and flow field around pipe

도에 미달되는 것을 확인하였으며, 가열 온도 유지 구간에서 Pipe 1, Pipe 3 그리고 Pipe 2 순서로 목표 온도가 도달할 것으로 예측된다. Fig. 11는 파이프가 목표 온도에 도달한 노드의 비율을 상단부와 하단부로 나누어 나타내었다. 모든 제품의 상단부는 목표 온도에 도달하였지만, Pipe 2와 Pipe 3의 하단부는 각각 전체의 18%, 31%의 노드만이 목표 온도에 도달하였다. 이는 판 아래에서 고온의 유동이 활발하게 흐르지만, 판에 의해서 제품 하단부에 유동 흐름이 제한되었기 때문으로 사료된다(Fig. 12). 해석 결과에서 제품 상하부의 온도 편차가 최대 90 K까지 발생하는데, 이는 오스테나이트 조성, 크리프, 잔류 오스테나이트 등의 문제를 발생시킬 수 있다.

Fig. 13에서는 제품 위치에 따른 유동 분포를 나타내었다. Pipe 1과 Pipe 3은 버너와 가까운 곳에 위치하였기 때문에 Pipe 2보다 상대적으로 제품 근처의 유동이 원활하게 흐르는 것을 확인할 수 있다. 이에 따라 Pipe 1과 Pipe 3의 상단부와 하단부는 Pipe 2보다 고온의 유동에 더 많이 노출되어 상대적으로 더 빨리 가열되었다. Pipe 3은 출구와 가까이 위치하여 외부로 나가는 유동 흐름으로 Pipe 1에 비해 낮은 온도 도달율을 보인 것으로 판단된다. 따라서 위치에 따라 제품의 목표 온도 도달 시간과 제품 전체 온도 균일성

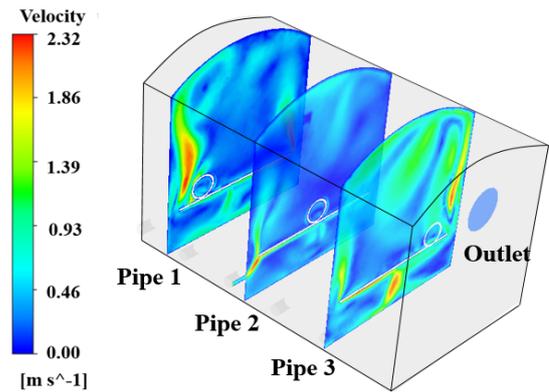


Fig. 13 Velocity contours of an environment of each pipe

이 달라질 수 있다고 판단된다. 그리고 제품의 가열 속도와 온도 균일성은 제품 성능으로 직결된다. 그러므로 제품 배치에 따라 가열로의 가동 시간, 가동 조건 등을 유기적으로 조절한다면 온도 균일성을 유지하면서, 소요되는 연료량을 감소시키고 생산성을 향상시킬 수 있을 것으로 기대할 수 있다.

7. 결론

본 연구에서는 batch-type 재가열로의 운전 환경을 CFD 해석으로 분석하였다. 가열로 내의 난류 흐름과 확산 속도를 예측하기 위해 유동의 확산 속도와 흐름 예측에 유리한 k-ε 모델을 적용하고, 피팅 제품의 실험 결과와 해석 모델 결과를 비교하여 수치해석 모델의 타당성을 입증하였다. 실제 가열로를 수치 모델링하여 제품 위치에 따른 내부 유동장, 가열로내 제품 온도 변화 차이와 균일 온도 분포를 분석하여 열 특성을 분석하였다. 이를 통해 제품의 목표 온도 도달 여부 차이를 비교하여 최적 운전 조건을 분석하였다. 결과적으로, 간접가열방식을 제어하는 방식으로 제품의 목표 온도 도달 비율을 비교한 결과를 이용하여 제품 전체가 오스테나이트화 되는 시간을 예측할 수 있다. 재가열로 내에 장입된 위치에 따라 출구로부터 가장 멀리 위치한 Pipe 1은 99%로 대부분의 면적이 목표 온도에 도달하고 출구로부터 가장 가까운 Pipe 3은 81%의 면적 비율이 목표 온도에 도달하였다. 그리고 중앙에 위치한 Pipe 2는 67%의 면적 비율만 목표 온도에 도달하였다. 이를 통해 Pipe 1, Pipe 3, Pipe 2 순서로 목표 온도에 도달하는 것을 확인하였다. 그리고 제품 배치 별 상하부에서 온도 편차가 발생하는데, 모든 제품에서 상단부는 49% 이상 목표 온도에 도달 하지만 하단부에서 Pipe 1, Pipe 2, Pipe 3은 각각 1%, 32%, 29%의 면적이 목표 온도에 미달되었다. 그리고 제품 상하부의 온도 편차가 최대 90 K까지 발생하여 제품 성능의 문제가 발생할 수 있음을 확인하였다. 본 논문은 CFD해석 분석 결과를 통해 제품 사이 유동

이 원활하도록 열 응력 및 변형을 고려한 판 형상 설계를 통해 제품 온도 편차를 최소화한다면 열처리현장에서 에너지효율을 높이기 위한 방법으로 유용하게 사용될 것으로 사료된다.

References

- [1] Lee, J. Y., Ryu, B. H., Lee, C. S., Rhim, D. R., 2017, Embodiment of Level 2 Control System for Continuous Reheating Furnaces, *J. Energy&Climate Change*, 12:1 63-71, <https://doi.org/10.22728/jecc.2017.12.1.063>.
- [2] Jung, W. S., 2009, A Study of Optimal Distribution of Gas Temperature in Directly-fired Reheating Furnace, Master Thesis, Hanyang University, Republic of Korea.
- [3] Han, S. H., Baek, S. W., Kang, S. H., Kim, C. Y., 2007, Numerical Analysis of Heating Characteristics of a Slab in a Bench Scale Reheating Furnace, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 50:9-10 2019-2023, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.10.048>.
- [4] Minaev, A. N., Reshetnyak, S. I., Butenko, I. G., 1983, Heat Transfer in Walking Beam Furnaces, *Steel USSR*, 13:9 417-418.
- [5] Prieler, R., Mayr, B., Demuth, M., Holleis, B., Hochenauer, C., 2016, Prediction of the Heating Characteristic of Billets in a Walking Hearth Type Reheating Furnace using CFD, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 92 675-688, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.08.056>.
- [6] Liu, Y. J., Li, J. D., Misra, R. D. K., Wang, Z. D., Wang, G. D., 2016, A Numerical Analysis of Slab Heating Characteristics in a Rolling Type Reheating Furnace with Pulse Combustion, *Appl. Therm. Eng.*, 107 1304-1312, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.07.074>.
- [7] Yang, D. H., Kang, T. W., Noh, K. S. Park, K. S., Yang, H. I., 2017, CFD Analysis of the Bottom Plate Having Multi-holes in an Indirectly Fired Batch Type Reheating Furnace, *Proc. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng. Autumn Conf.*, 55.
- [8] Choi, S. H., Kwak, N. S., Kim, J. Y., 2009, Pulverized Coal Injection System Development to Raise Combustion Efficiency of a Blast Furnace, *J. Korean Soc. Mach. Tool Eng.*, 18:6 690-696.
- [9] Mayr, B., Prieler, R., Demuth, M., Moderer, L., Hochenauer, C., 2017, CFD Analysis of a Pusher Type Reheating Furnace and the Billet Heating Characteristic, *Appl. Therm. Eng.*, 115 986-994, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.01.028>.
- [10] Mayr, B., Prieler, R., Demuth, M., Moderer, L., Hochenauer, C., 2017, CFD Modelling and Performance Increase of a Pusher Type Reheating Furnace using Oxy-fuel Burners, *Energy Procedia*, 120 462-468, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.222>.
- [11] Chakraborty, S., Rajora, A., Singh, S. P., Talukdar, P., 2017, Heat Transfer and Discrete Phase Modelling of Coal Combustion in a Pusher Type Reheating Furnace, *Appl. Therm. Eng.*, 116 66-78, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.01.056>.
- [12] Liu, X., Tang, G., Silaen, A., Cox, J., Johnson, K., Zhou, C., 2017, Investigation of Operational Effects on Slab Heating Characteristics in a Pusher-Type Reheat Furnace With Continuous Slab Motion, *Proc. ASME 2017 Heat Transf. Summer Conf.*, HT2017-4871, <https://doi.org/10.1115/HT2017-4871>.
- [13] Singh, V. K., Talukdar, P., 2013, Comparisons of Different Heat Transfer Models of a Walking Beam Type Reheat Furnace, *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, 47 20-26, <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2013.06.004>.
- [14] Gu, M., Chen, G., Liu, X., Wu, C., Chu, H., 2014, Numerical Simulation of Slab Heating Process in a Regenerative Walking Beam Reheating Furnace, *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, 76 405-410, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.04.061>.
- [15] Jaklič, A., Kolenko, T., Zupančič, B., 2005, The Influence of the Space between the Billets on the Productivity of a Continuous Walking-beam Furnace, *Appl. Therm. Eng.*, 25:5-6 783-795, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2004.07.012>.
- [16] Landfahner, M., Prieler, R., Mayr, B., Gerhardter, H., Zmek, T., Klarner, J., Hochenauer, C., 2018, Characterization of the Temperature Distribution on Steel Tubes for Different Operating Conditions in a Reheating Furnace using CFD and Three Different Measuring Methods, *Appl. Therm. Eng.*, 133 39-48, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.12.098>.
- [17] Arkhazloo, N. B., Bouissa, Y., Bazdidi-Tehrani, F., Jadidi, M., Morin, J. -B., Jahazi, M., 2019, Experimental and Unsteady CFD Analyses of the Heating Process of Large Size Forgings in a Gas-fired Furnace, *Case Stud. Therm. Eng.*, 14 100428, <https://doi.org/10.1016/j.csite.2019.100428>.
- [18] Rezazadeh, N., Hosseinzadeh, H., Wu, B., 2019, Effect of Burners Configuration on Performance of Heat Treatment Furnaces, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 136 799-807, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.01.113>.
- [19] Prieler, R., Demuth, M., Spoljaric, D., Hochenauer, C., 2015,

Numerical Investigation of the Steady Flamelet Approach under Different Combustion Environments, *Fuel*, 140 731-743, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.10.006>.

- [20] Mayr, B., Prieler, R., Demuth, M., Potesser, M., Hochenauer, C., 2016, Computational Analysis of a Semi-industrial Furnace Fired by a Flat Flame Burner under Different O₂/N₂ Ratios using the Steady Laminar Flamelet Approach, *J. Energy Inst.*, 90:4 602-612, <https://doi.org/10.1016/j.joei.2016.05.002>.
- [21] ANSYS CFX, 2016, ANSYS CFX User's Guide Releases 17.0, Canonsburg, Canonsburg, PA, ANSYS, Inc.
- [22] Jin, B. J., Park, M. H., Yun, T. J., Kim, I. S., Park, K. Y., Kim, Y., Yang, H. J., 2018, A Study on Performance Prediction of Purging Device using CFD in Laser Welding of Titanium Sheet, *J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.*, 27:1 70-75, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2018.27.1.70>.



Min-jae Lee

M. Sc. in the Department of Mechanical Engineering at Hanyang University. His research interest is Heat Process Optimization.
E-mail: minjaeho10@hanyang.ac.kr



Tae-won Kang

Ph. D. in the Department of Mechanical Engineering at Hanyang University. His research interest is Dynamic response evaluation of an floating offshore wind turbine.
E-mail: xodnjs0713@naver.com



Jang-hyeok Yun

Ph. D. in the Department of Mechanical Engineering at Hanyang University. His research interest is Computation Fluid Dynamics.
E-mail: yunjange@hanyang.ac.kr



Hyun-ik Yang

Professor in the Department of Mechanical Engineering at Hanyang University. His research interests are Mechanical Design and Optimization, Offshore Structure Design, Welding Process Optimization and Hydrothermal Polymerization.
E-mail: skynet@hanyang.ac.kr