

재가열로에서 소재 온도 변화의 실험적 분석

이춘식[†] · 이재용 · 유보현 · 염충섭 · 임동렬

고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터

(2017년 11월 7일 접수, 2017년 12월 1일 수정, 2017년 12월 5일 채택)

Experimental Study of Workpiece Temperature Variation in Reheating Furnace

Chunsik Lee[†], Jaeyong Lee, Bo-Hyun Ryu, Choongsub Yeom, Dong-Ryul Rhim

Plant Engineering Center, Institute for Advanced Engineering

(Received 7 November 2017, Revised 1 December 2017, Accepted 5 December 2017)

요 약

재가열로에서 분위기 온도에 따른 소재온도 변화를 예측하기 위해 SUS304, SS400 소재가 적용되었으며, 소재 내부에 깊이 방향으로 열전대를 5개씩 설치한 후 분위기 온도를 1200도까지 상승시켰다. 그 결과 소재온도는 평균적으로 1150도 이상 도달했으며, 국부적으로 소재 표면과 내부는 10도 이상의 온도차를 나타내었다. 실험결과와 타당성 검증을 위해 열모델을 적용하여 수치해석 되었으며, 실험결과 대비 해석결과는 출구 평균온도 기준 15도 이내의 범위에서 오차를 나타내었다. 또한 오차는 SUS304 소재에 비해 비열 변화가 큰 SS400 소재에서 상대적으로 높게 나타났다. 결론적으로 재가열로에서 소재 온도는 분위기 온도 제어를 통해 달성할 수 있으며, 분위기 온도에 따른 소재 온도 변화는 출구에서 3% 오차범위 내에서 열모델을 사용하여 유추할 수 있음이 실험적으로 증명되었다.

주요어 : 재가열로, 열모델, 소재 온도, 분위기 온도

Abstract - The materials of SUS304 and SS400 are adopted for prediction of workpiece temperature variation according to ambient temperature in a reheating furnace. Five thermocouples were installed in a depth direction inside the material, and the ambient temperature was raised to 1200 Celsius degrees. As a result, the material average temperature reached more than 1150 Celsius degrees, and the surface and inside of workpiece locally showed a temperature difference of more than 10K. In order to verify the experimental results, numerical analysis was conducted by applying a thermal model, and the error of numerical simulation compared with the experimental results was within the range of 15K at the average outlet temperature. Also, the error was relatively higher in the SS400 material, which has a larger specific heat change than the SUS304 material. In conclusion, the workpiece temperature in the reheating furnace can be achieved through the atmospheric temperature control, and it is experimentally proved that the material temperature change according to the atmospheric temperature can be estimated within about 3% error range at the outlet position using a thermal model.

Key words : Reheating Furnace, Thermal Model, Workpiece Temperature, Ambient Temperature

[†]To whom corresponding should be addressed.

Tel : 031-330-7472 E-mail : sufaltus@iae.re.kr

1. 서론

재가열로는 압연, 단조 공정을 위하여 소재를 가열하는 설비로 철강산업에서 가장 많은 화석에너지를 사용한다. 국내 상용급 재가열로의 경우 평균적으로 15~60m 길이와 6~12m의 폭을 지니며 1100~1300°C의 고온에서 1년 중 300일 이상 연속운전 하는 것으로 알려져 있다. 또한 재가열로는 시간당 15,000,000~150,000,000 kcal의 높은 연료를 소모하는 설비로 에너지 저효율에 따른 생산비용의 증가가 기술적 문제의 현안이다. 에너지 효율 향상과 양질의 소재를 얻기 위해 재가열로는 가열 조건에 따라 3~4개의 영역으로 구분되어 운영되는데, 대표적으로 예열대(pre-heating zone), 가열대(heating zone) 그리고 균열대(soaking zone)로 나누어 진 것을 들 수 있다. 각 구간별로 목표 온도를 별도 설정하고 가열능력에 따른 버너의 출력, 대수 및 배열 등을 조절한다. 다만, 상기 제어방식을 적용하더라도 버너를 통한 화염이 분위기 온도를 상승시키고 분위기 온도에 따른 소재 온도변화가 열전달 메커니즘에 의해서 일어나기 때문에 정확한 지배방정식의 수립이 근본 해결책을 알 수 있다. 이러한 목적으로 많은 연구자들이 재가열로 내에서의 전도, 대류, 복사 열전달 및 에너지평형에 의해 소재 온도 및 가스 온도를 예측하기 위한 지배방정식의 수립과 수치해석적 방법으로 결과를 도출하였다[1~4]. 그러나 기존의 학문적 연구가 타당하더라도 상용급 재가열로의 실시간 제어를 고려했을 때, 상당한 계산시간이 요구되는 복잡한 편미분방정식이나 CFD를 사용한 해석방법은 적용하기 어려우므로 단순화된 열모델의 도출이 필요

하다. 이를 위해 2008년도 Radhakrishnan Purushothaman의 박사학위 논문 “Evaluation and Improvement of Heat Treat Furnace Model”[5]에서 제시한 열모델을 사용하였으며, 실험 조건을 고려하여 해당 열모델의 주요 변수를 결정한 후 실험결과와 비교하게 되었다.

2. 열모델

소재의 온도는 재가열로 내 가스의 분위기 온도에 의해 복사 및 대류 열전달을 통해 상승되는 것으로 소재에 저장된 에너지는 복사와 대류 열전달에 의한 열량의 합으로 표시할 수 있으며 각각의 지배방정식은 식1~4과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{convection} = h \cdot A \cdot (T_f - T_s) \tag{1}$$

$$E_{radiation} = \epsilon \cdot \sigma \cdot F \cdot A \cdot (T_f^4 - T_s^4) \tag{2}$$

$$E_{storage} = \rho \cdot c_p \cdot V \cdot \frac{dT_s}{d\tau} \tag{3}$$

$$E_{storage} = E_{radiation} + E_{convection} \tag{4}$$

식1~2에서 T_f 는 재가열로 내 가스의 분위기 온도, T_s 는 소재의 온도를 의미하며 h, ϵ, σ, F 는 대류 열전달 계수, 방사율(Emissivity), Stefan-Boltzmann 상수, 형태지수(View Factor)를 각각 나타낸다. 식3의 c_p 는 정압비열이다. 식4의 에너지 평형 관계식을 정리하면 아래의 식5를 얻을 수 있다.

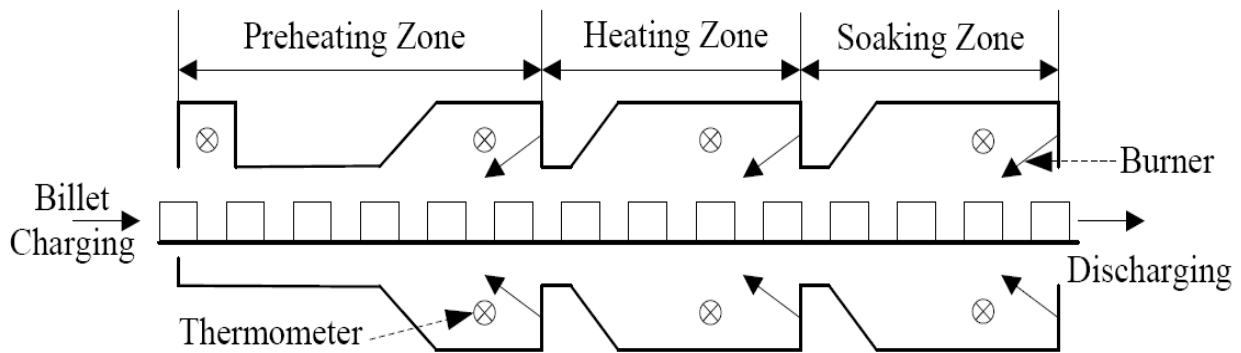


Fig. 1. Configuration of the Commercial Reheating Furnace

(from N. Wang, et al., 2013, Optimal heating and energy management for the reheating furnace using oxygen enhanced combustion, Proc. of the 2013 AIChE Annual Meeting.[4])

$$\rho \cdot c_p \cdot V \cdot \frac{dT_s}{d\tau} = h \cdot A \cdot (T_f - T_s) + \epsilon \cdot \sigma \cdot F \cdot A \cdot (T_f^4 - T_s^4) \quad (5)$$

식5에서 체적 V 는 소재의 면적 A 와 등가두께(t_{equ})의 곱으로 나타낼 수 있는데, 이때 등가두께는 소재의 실제형상을 체적이 동일한 사각기둥으로 치환하였을 때 사각형 면적 A 에 대한 높이를 의미한다. 수식의 좌변을 유한차분법을 적용하여 시간 간격에 따른 소재의 온도에 관한 식으로 나타내면 식6의 열모델 지배방정식이 수립된다.[5]

$$T_s^{k+1} = T_s^k + \frac{\delta\tau}{\rho \cdot c_p \cdot t_{equ}} [h \cdot (T_f^k - T_s^k) + \epsilon \cdot \sigma \cdot F \cdot ((T_f^k)^4 - (T_s^k)^4)] \quad (6)$$

식6의 열모델 지배방정식은 재가열로내 분위기 온도에 따른 소재 온도를 예측하기 위한 가장 단순화된 형태로 시간 k 에서의 분위기 온도와 소재 온도 정보를 이용해서 시간 간격에 의한 다음 시간 $k+1$ 에서의 소재 온도가 계산된다. 여기서 중요한 것은 초기 조건과 시간 간격 설정 외 대류 및 복사와 관계된 주요 변수

를 결정하는데 있으며, 이는 소재 정보 및 재가열로의 형상에 지배를 받게 된다.

3. 실험

3-1. 재가열로의 사양

실험에 적용된 재가열로는 컴버스텍(주) 소유의 당진공장에 위치하고 있으며 소재의 운송과정이 없는 정치식이며 또한 상용급과 달리 예열부, 가열부, 균열부로 구분되어 있지 않고 통합된 하나의 가열로이다. 그렇지만 본 연구의 목적이 분위기 온도에 따른 소재 온도 변화를 실험하고 해석 결과와 비교하는 것으로 정치식 재가열로의 적용은 문제될 것이 없다고 판단된다. 적용된 재가열로의 사양은 가로 6.1m, 세로 4m, 높이 2.7m의 직사각 형태이며, LNG를 연료로 사용하는 4기 버너가 오른쪽 측면 중앙 높이에서 균일하게 분배되어 있다. 재가열로 내부는 고온의 온도를 견디기 위한 내화제로 코팅되어 있고 분위기 온도를 측정하기 위한 열전대가 천장에서 10~30cm 떨어져서 12개가 분포되어 있다.



(A) Outside of the Experimental Furnace



(B) Inside of the Experimental Furnace



(C) Outside of the 4EA Burner



(D) Inside of the 4EA Burner

Fig. 2. Configuration of the Reheating Furnace for Experiment

3-2. 실험 방법

사각기둥 형태의 SUS304, SS400 소재의 정중앙에 깊이 방향으로 천공하여 각각 5개의 k-type 열전대를 설치하였으며, 열전대 와이어를 후렌지를 통하여 재가열로 외부로 뺀 후 소재 온도 정보를 디지털로 변환할 수 있는 데이터 팩에 연결하였다. 이후 버너 연료공급부에 연료를 공급 한 후 제어밸브를 통하여 1~4기 버

너를 순차적으로 점화하여 분위기 온도가 약 800도씨에 도달할 때까지는 급격히 온도를 상승시키고 이후 완만하게 조절하여 최종적으로 약 1200도씨에 이르게 하여 온도를 유지하였다. 화염의 온도와 가스의 분위기 온도 그리고 소재의 온도는 HMI(Human Machine Interface) 화면을 통하여 1분 주기로 실시간으로 계측 되도록 구성하였다.



(A) Workpieces of SUS304 and SS400 Material



(B) Mounting Position of Thermocouples



(C) Junction Thermocouple Wires to Data Pack



(D) Configuration of Data Pack

Fig. 3. Installation of Thermocouples for Experiment



(A) Flame Structure of the Bunner



(B) HMI Screen for Control of Ambient Temperature

Fig. 4. Control of Ambient Temperature in Experiment

3-3 실험 결과

약 4시간 동안 버너를 가열하여 분위기 온도를 1200도 근방까지 유지했으며, 분위기 온도는 재가열로 내부에 위치한 12개 열전대의 평균온도를 채택하였다. 이때 소재의 온도 변화는 그림5와 같이 운전 후 3시간 동안 빠른 열전달에 의해 급격히 상승하다가 이후 분위기 온도와 작은 온도 차이에 의해 완만하게 증가하게 되었다. 소재 간 특성은 운전 후 약 1시간 30분

동안은 SUS304소재가 SS400소재보다 온도가 많이 높았으나 이후 두 소재 간 온도 차이는 감소하여 최종 출구온도에서 SUS304 소재가 SS400 소재보다 약 10~20도 정도 높았다. 그러나 소재 내부의 온도 차이는 그림6에서 알 수 있듯이 초기에는 상대적으로 온도가 낮은 SS400 소재의 온도편차가 큰 편이나 SS400 소재의 경우 SUS304 소재에 비해 온도 변화에 따른 정압 비열의 변화가 크기 때문에 800도 이상의 고온에서

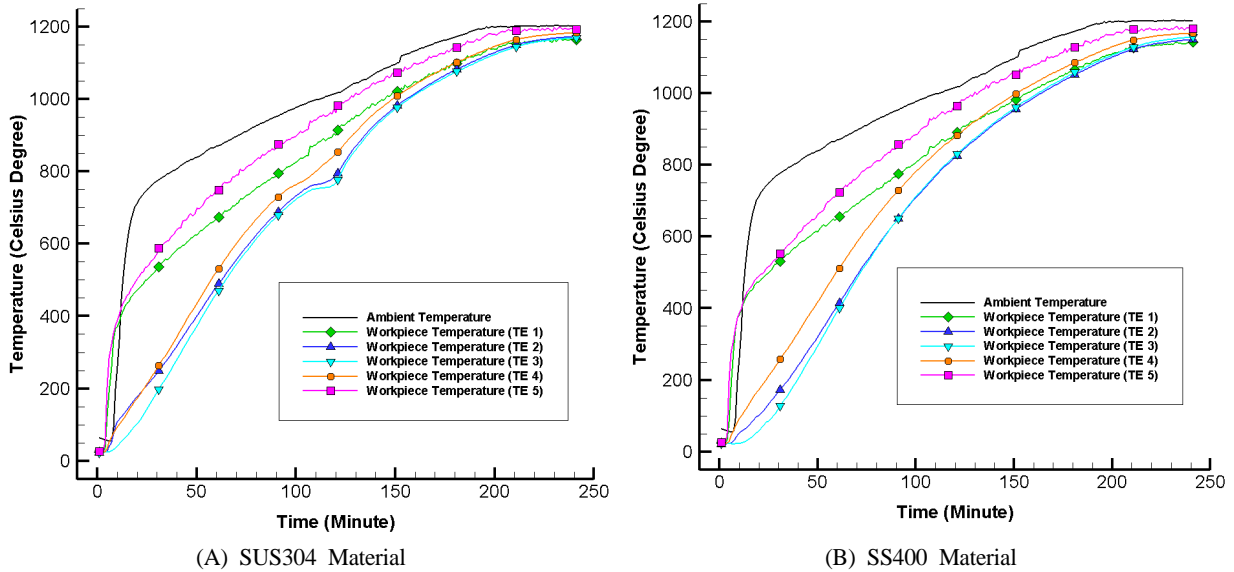


Fig. 5. Temperature Variation in SUS304 and SS400 Material

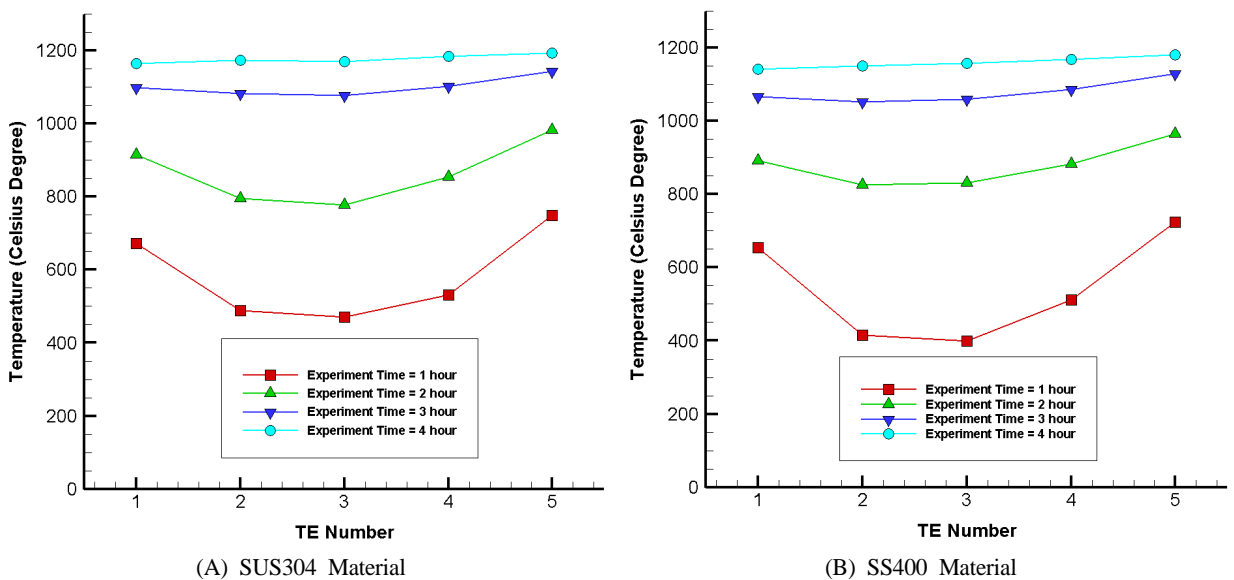


Fig. 6. Internal Temperature Distribution of SUS304 and SS400 Material

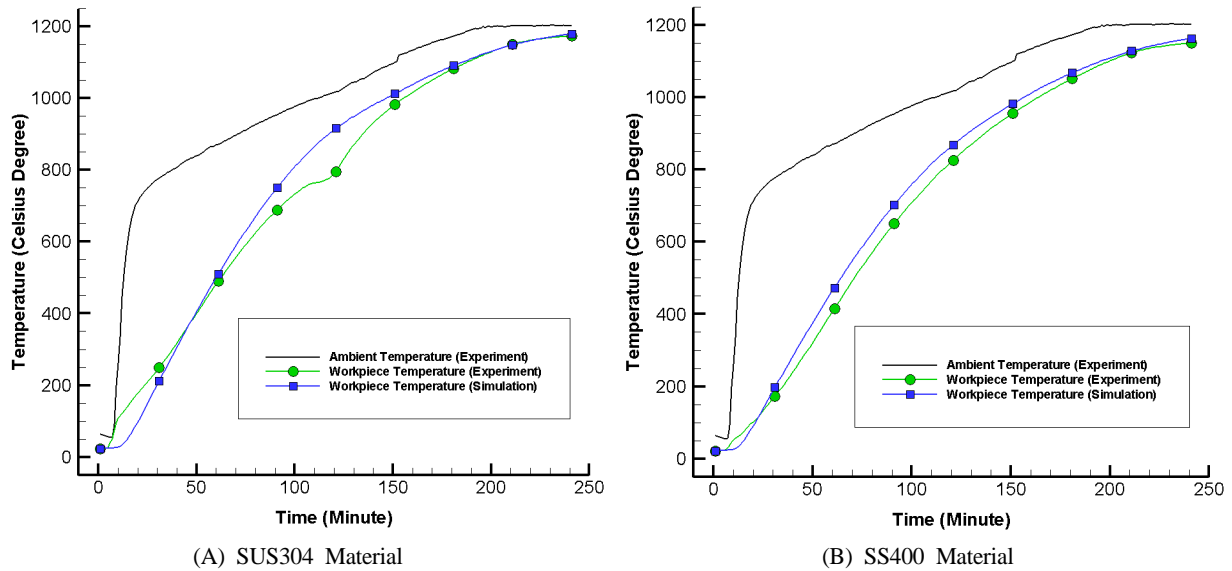


Fig. 7. Comparison of Experimental and Numerical Result about Average Temperature of SUS304 and SS400 Material

는 오히려 편차가 적고 균일해 짐을 알 수 있다.

4. 실험과 해석 결과의 비교

소재 내부에 깊이 방향으로 위치한 5개 열전대의 온도를 평균화하여 식6의 열모델에 의한 해석 결과와 비교하였다. 그림7의 실험결과 대비 해석결과의 비교에서 두 소재 모두 공통적으로 최종 출구온도의 경우 20도 이하의 온도 차이를 나타내었으며, 재료 종류에 상관없이 실험과 해석의 경향성이 유사하여 실험 결과의 타당성이 검증되었다. 다만 소재 간 차이에서 SUS304 소재의 경우 700~900도 범위에서 온도 변화가 완만하지 못하여 해석이 실험에서 나타나는 물리적 현상을 완전히 반영하지 못하는 단점이 나타났다. 전반적으로 해석은 SS400소재에서 더 정확한 것으로 보이나 궁극적으로 소재 출구 조건이 중요하기 때문에 고온에서 비열변화가 큰 SS400 소재보다 SUS304 소재에서 좀 더 우수한 것으로 볼 수 있다. 그러나 그 차이가 크지 않기 때문에 소재 물성 변화에 따른 열모델 적용 한계는 발견하지 못하였다.

5. 결론

재가열로에서 분위기 온도에 따른 소재 온도 변화를 알기 위해 정치식 형태의 재가열로 테스트베드에서 물

성이 다른 SUS304, SS400 두 소재를 이용해 실험을 수행하였으며 실험결과의 타당성을 검증하기 위해 열모델을 적용한 수치해석적 분석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 분위기 온도로부터 복사 및 대류 열전달에 의해 소재의 온도가 상승하는 과정에서 초기에는 급격하게 증가하나 이후 작은 온도 차이에 의해 둔화되어 분위기 온도와 소재 온도의 차이가 30도 이하의 근접 조건에서는 방사를 고려할 때 상당히 많은 가열 시간이 요구되므로 목표로 하는 소재 온도보다 적어도 50도 이상 분위기 온도를 설정하는 것이 에너지효율 관점에서 유리하다.

(2) 재가열로에서 소재 온도는 분위기 온도 제어를 통해 달성할 수 있으며, 분위기 온도에 따른 소재 온도 변화는 출구에서 3% 오차범위 내에서 열모델을 사용하여 유추할 수 있음이 실험적으로 증명되었다.

(3) 양질의 소재를 열기 위해서는 소재 내부의 온도 편차를 가능한 작게 유지시켜야 하며, 이는 온도에 따른 소재의 정압비열 변화에 가장 크게 영향을 받으므로 실시간으로 계측된 혹은 예측할 수 있는 소재 평균 온도에서의 정압비열을 지속적으로 반영하여야 한다.

Acknowledgement

본 연구는 산업통상부의 재원으로 한국에너지기술
평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행되었음.
(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. Jiraphon Srisertpol et al., 2011, Estimation of the Mathematical Model of the Reheating Furnace Walking Hearth Type in Heating Curve Up Process, International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences, Vol. 5, Issue 1, pp. 167-174
3. Pongam T. et al., 2012, Manufacturing Process Identification for the Reheating Furnace Walking Hearth Type Using Genetic Algorithm, International Journal of Modeling and Optimization, Vol. 2, No. 2, pp. 114-118
4. N. Wang et al., 2013, Optimal heating and energy management for the reheating furnace using oxygen enhanced combustion, Proc. of the 2013 AIChE Annual Meeting
5. Radhakrishnan Purushothaman, 2008, Evaluation and Improvement of Heat Treat Furnace Model, Dissertation, Worcester Polytechnic Institute