



상용급 재가열로에서 소재 온도 예측을 위한 해석과 실험 결과의 비교 분석

†이춘식 · 이재용 · 유보현 · 임동렬

고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터

(2018년 12월 26일 접수, 2019년 8월 25일 수정, 2019년 8월 26일 채택)

The Comparative Analysis of Numerical and Experimental Results for Prediction of Workpiece Temperature in the Commercial Reheating Furnace

†ChunsiK Lee · Jae Yong Lee · BoHyun Ryu · DongRyul Rhim

Plant Engineering Center, Institute for Advanced Engineering, Yongin, Korea

(Received December 26, 2019; Revised August 25, 2019; Accepted August 26, 2019)

요 약

상용급 재가열로 내부 소재 온도 측정을 위하여 특수 제작된 시험용 시편을 사용하고, 실시간 온도 예측을 위하여 선형화 된 열모델이 적용되었다. 적용된 로는 Walking Beam Type이고 소재의 형상은 폭 160mm, 높이 160mm, 길이 8100mm의 STS302 재질이며 온도 측정을 위해 폭, 높이와 길이 방향으로 총 6개의 열전대를 설치하였다. 로 내의 분위기 온도는 섭씨 1265도까지 상승시켰으며 소재의 장입부터 토출까지 약 2.5시간이 소요되었다. 시험결과, 토출 시 소재의 온도는 섭씨 1256~1259도 범위에서 평균적으로 1257도 였으며, 열모델을 통한 예측된 평균 온도는 1251도로 나타났다. 따라서 해석과 시험결과의 편차는 6도 정도로서, 이는 산업계에서 요구되는 10도 이내의 범위에 있다.

Abstract -Specially designed test material was used for workpiece temperature measurement in the commercial reheating furnace and a linearized thermal model was applied for real time temperature prediction. The applied furnace is a walking beam type and specification of the workpiece is a STS302 which is 160mm in width, 160mm in height and 8100mm in length. Also six thermocouples were installed in width, height and length direction for temperature measurement. Ambient temperature in the furnace was raised to 1265 Celsius degrees and it took about 2.5 hours from loading to discharging of the workpiece. As a result of the experiment, temperature of the workpiece at discharge was 1257 Celsius degrees on the average in the range of 1256 to 1259 Celsius degrees, and predicted average temperature through the thermal model was 1251 Celsius degrees. Therefore, the deviation of the analysis and test results is about 6 degrees, which is within the range of 10 degrees required by the industry.

Key words : Reheating Furnace, Workpiece Temperature, Walking Beam, Experiment

I. 서론

재가열로는 구조된 철강을 한번 더 열처리하는 설비로 압연, 단조 등을 통한 재료의 가공을

위해 필요하며, 상용급의 경우 시간당 15,000,000~150,000,000kcal의 에너지를 소모하므로 제철 산업에서 가장 많은 화석에너지를 사용한다고 볼 수 있다. 따라서 재가열로에 소모되는 가스 연료를 감소하기 위해서는 로 내의 소재온도에 대한 정확한 예측이 필요하며, 그 동안 많은 연구가 진행되어져 왔다[1][4][5]. 하지만 실시간

†Corresponding author:sufaltus@iae.re.kr

Copyright © 2019 by The Korean Institute of Gas

제어 관점에서 복잡한 편미분 방정식이나 전산 유체역학(CFD) 해석은 적용하기 어려우며 단순화된 선형의 지배방정식이 필요하다. 선형화된 지배방정식은 다수의 연구가 존재하나[2][3], 실험적으로 검증한 에너지 공학 제26권 4호에 게재된 “재가열로에서 소재 온도 변화의 실험적 분석”[2]에 따르면 Radhakrishnan Purushothaman의 박사학위 논문 “Evaluation and Improvement of Heat Treat Furnace Model”[1]에서 제시한 열모델이 타당한 것으로 제시하고 있다. 그러나 기존 논문[2]은 소재가 움직이지 않는 정지식 재가열로라는 점에서 상용급 재가열로와는 거리가 있으며, 상용급 재가열로의 경우 소재 이송 등에 따른 환경적 변수가 많아 별도의 검증이 필요하다. 이에 기존 개발된 열모델이 다수 상용급 재가열로에서 불확실성 때문에 현장 적용이 선택적으로 이루어져 왔음을 반영하여, 본 논문에서는 실제 조업 중인 상용급 재가열로를 대상으로 실험결과와 해석결과를 비교 분석하고자 한다.

II. 열모델

재가열로의 전형적 형상은 그림1과 같으며, 소재가 장입(Charging)되어 토출(Discharging) 되기까지의 온도 변화에 대해 예측할 수 있는 지배방정식은 Purushothaman의 논문[1]에서의 제안에 따라 다음과 같이 유도될 수 있다.

우선 소재 온도는 재가열로 내부 가스의 분위기 온도에 의해 복사 및 대류 열전달을 통해 상승되는 것으로 소재에 저장된 에너지는 복사와 대류 열전달에 의한 열량의 합으로 식(1)~(4)와 같이 표현된다.

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

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

$$E_{storage} = \rho \cdot c_p \cdot V \cdot \frac{dT_s}{dt} \quad (3)$$

$$E_{storage} = E_{radiation} + E_{convection} \quad (4)$$

식(1)~(4)에서 $T_f(K)$ 는 재가열로의 분위기 온도, $T_s(K)$ 는 소재의 온도를 의미하며 $h(W/m^2K)$ 는 대류 열전달 계수이고 ϵ, σ, F 는 무차원 수로 각각 방사율(Emissivity), Stefan-Boltzmann 상수, 형태지수(View Factor)를 나타내며 $c_p(J/kgK)$ 는 정압비열이다. 식(4)의 에너지 평형 관계식을 정리하면 아래의 식(5)를 얻을 수 있다.

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

식(5)에서 체적 $V(m^3)$ 는 소재의 면적 $A(m^2)$ 와 등가두께(t_{equ})의 곱으로 나타낼 수 있는데, 이때 등가두께는 소재의 실제형상을 체적이 동일한 사각기둥으로 치환하였을 때 사각형 면적A에 대한 높이를 의미한다. 수식의 좌변을 유한차분법을 적용하여 시간 간격에 따른 소재의 온도에 관한 식으로 나타내면 식(6)의 열모델 지배방정식이 수립된다.

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

식(6)에 의하면 소재 온도 변화는 복사 열전달 계수, 형태 지수, 대류 열전달 계수에 의존하는 것을 알 수 있으며 이는 시뮬을 통해 얻게 된다. 그 외의 변수는 소재의 온도에 따른 물성으로 해당 온도에서의 정확한 물성을 사용하고 필요시 보간법 등이 활용될 수 있다. 소재 온도 계산 시 초기 조건은 장입 시 온도이며, T_s^{k+1} 는 (k+1) Time Step에서의 온도, T_s^k 는 (k) Time Step에서의 온도이다.

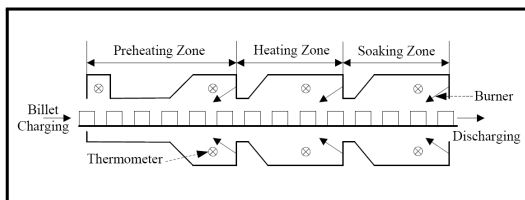


Fig. 1. Configuration of the Typical Reheating Furnace[3]

III. 시 험

3.1. 상용급 재가열로의 사양

시험에 적용된 상용급 재가열로는 조업 중에 있는 세아특수강(주)의 설비를 활용했으며 그림 2에 제시한 바와 같이 Pre-Heating Zone과 Heating Zone을 합한 길이는 13170mm, Soaking Zone의 길이는 8370mm로서 총 길이는 21540mm이며 폭은 10840mm의 제원을 지니는 Walking Beam Type이다.

3.2. 시험용 소재의 제원

시험용 소재는 STS302재질로서 그림3에 나타난 바와 같이 단면이 폭 160mm, 높이 160mm인 정사각형이며 길이는 8100mm이다. 그리고 그림 3에 표기한 1~10까지의 10개 점은 열전대의 위치를 나타내는데 3, 4, 6, 8은 분위기 온도를 그 외 1, 2, 5, 7, 9, 10은 소재의 온도를

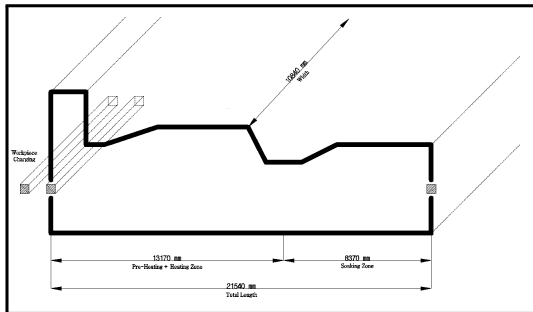


Fig. 2. Configuration of the Commercial Reheating Furnace

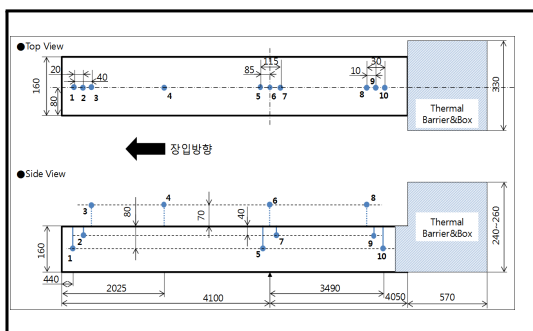


Fig. 3. Workpiece specification for experiment

를 계측하는데 활용된다. 또한 열전대를 섭씨 1250도 이상의 환경에서 보호하기 위하여 특수 제작된 Thermal Barrier Box가 있고 그 내부에 데이터 전송 팩을 설치하였다

3.3. 시험 방법

제품 생산을 위한 운전 특성은 스테인리스 계열의 일반 소재가 열처리를 위하여 로에 머무르는 시간이 약 2시간 20분이고 이 때 분위기 온도는 섭씨 1265도 근방이며 Walking Beam Type의 특성상 거의 균일한 시간 간격으로 이송된다. 따라서 특수 제작된 시험용 소재도 동일한 환경에서 테스트하기 위하여 일반 소재 사이에 끼워 넣는 방식을 채택하였다. 분위기 온도와 소재 온도의 측정을 위해 사용된 열전대는 K Type이며 1분 단위로 계측하였다.

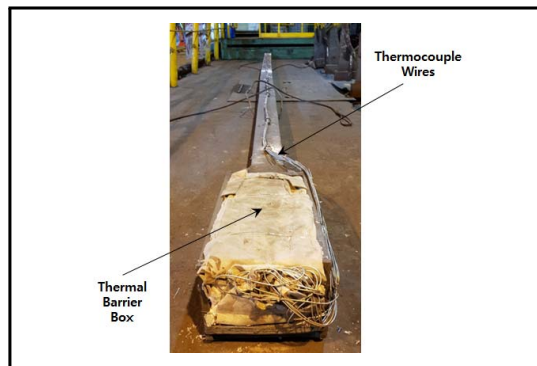


Fig. 4. Photograph of workpiece for experiment

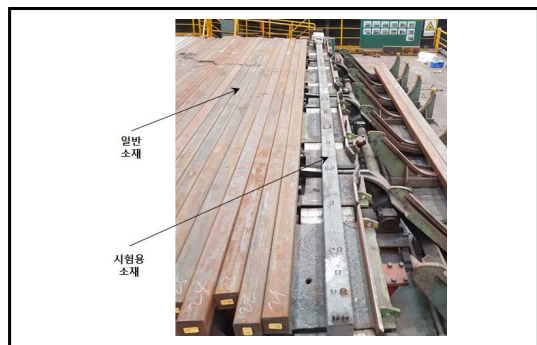


Fig. 5. Preparation for charging materials to the furnace



Fig. 6. Process of separating the thermal barrier box after the test workpiece is discharged



Fig. 7. Process of predicting the workpiece temperature during experiment

3.4. 시험 결과

그림3에 명기한 시험용 소재의 열전대 위치를 기준으로 소재 1개를 장입부터 토출 시까지 85분 동안 이동시키면서 분당 1회씩 데이터를 수집하였으며, 이를 10분 간격으로 정리해서 표1에 제시하였다.

Table 1. Experimental results for the workpiece temperature variation

시간(분)	열전대 온도 (°C)					
	1번	2번	5번	7번	9번	10번
10	502	566	450	492	557	505
20	641	695	593	631	695	649
30	728	804	688	755	805	741
40	826	883	813	865	886	838
50	1106	1127	1146	1146	1125	1115
60	1172	1194	1180	1196	1187	1167
70	1235	1236	1225	1241	1230	1218
80	1259	1259	1256	1257	1258	1256

IV. 시험과 해석 결과 비교

표1에서 알 수 있듯이 소재 온도 변화의 특성은 국부적 온도에 있어서 장입 후에는 편차가 크나 시간이 지날수록 그 편차는 감소하여 토출이 될 시점에는 3도 이내로 거의 균일해진다. 따라서 소재 온도를 해석으로 예측함에 있어 국부적 온도 변화는 2차원 이상의 해석이 요구되어 필요한 정보와 계산량이 많으며 시험결과를 볼 때 그 필요성이 높다고 할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 소재의 국부적 온도를 평균하여 시험한 소재 평균온도와 해석한 소재 평균온도를 비교하여 시험 결과의 타당성을 검증하고자 한다. 해석에 의한 소재 평균온도는 앞서 식(6)에 의한 유한차분법에 따라 현재 시간에서의 소재 온도 T_s^k 와 동일한 시간에서의 분위기 온도 T_a^k 로부터 대류와 복사열전달에 의해 소재 내부에 축적된 에너지를 계산하여 그 다음 시간에서의 소재온도 T_s^{k+1} 를 계산하는 방식을 채택하였으며 초기 소재온도와 분위기 온도는 대기 온도를 적용하였다. 표2와 그림8에 해석과 시험 결과의 차이를 그래프로서 비교하여 제시하였다.

Table 2. Comparison of analytical and Experimental results for the workpiece average temperature variation

시간(분)	소재 평균 온도 (°C)		편차 (°C)
	시험 결과	해석 결과	
10	512	587	75
20	651	668	17
30	753	722	-31
40	852	779	-73
50	1127	1090	-37
60	1182	1163	-19
70	1231	1221	-10
80	1257	1251	-6

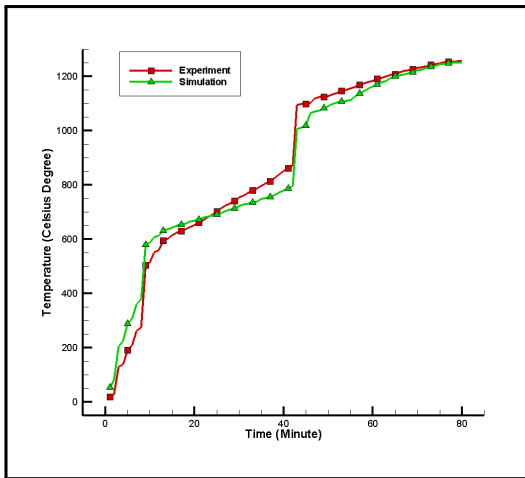


Fig. 8. Graph of analytical and Experimental results for the workpiece average temperature variation

V. 결론

본 연구에서는 현재 조업 중인 상용급 재가열로를 통해 소재 온도 변화에 대한 실증시험을 수행하였고 그 결과를 해석결과와 비교함으로써

시험 결과의 타당성 검증 및 소재 온도 예측을 위한 지배방정식의 산업계 현장 적용 가능성을 확인하였다. 시험과 해석 결과의 비교 분석을 통해 다음의 3가지 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 양산 소재의 품질을 결정하는 것은 소재의 평균온도와 소재 내부의 온도편차인데 장입 후 초기에는 소재의 국부적 온도 변화가 크지만 시간이 흐를수록 감소하여 토출 시점에서는 매우 미미함을 확인하였고 이에 따라 소재의 온도를 평균온도로 대표할 수 있다.

(2) 소재의 온도를 평균 온도로 대표할 때 시험과 해석 결과의 차이는 토출 시점에서 6도 정도로서 산업계에서 요구하는 오차범위 10도 내에서 만족하며, 본 논문에서 사용한 지배방정식과 해석방법을 현장에서도 활용할 수 있음을 확인하였다.

(3) 시험과 해석 결과의 오차는 2가지 요소에 가장 큰 영향을 받는데 우선, 장입 초기 오차가 큰 것은 해석에 있어서의 초기 경계 조건이 실제와 다르기 때문이며 둘째, 로의 상세 형상이 복잡하고 소재가 계속해서 이송함에 따른 복사열전달 형태지수(View Factor)를 정확히 예측하기 힘들기 때문이다. 다만, 이는 반복된 시험으로 계수를 튜닝하는 과정에 의해 정확도를 향상시킬 수 있다.

감사의 글

본 연구는 산업통상부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행되었음. (No. 20142010102710)

사용기호

- T_f : Furnace Temperature [K]
- T_s : Average Temperature of Workpiece [K]
- V : Volume of Workpiece [m^3]
- t_{equ} : Equivalent Thickness of Workpiece [m]
- c_p : Specific Heat at Constant Pressure [$\frac{J}{gK}$]
- h : Convective Heat Transfer Coefficient [$\frac{W}{m^2K}$]
- F : View Factor [Dimensionless]

그리스 문자

$d\tau$: Time Step [s]

ρ : Density of Workpiece [g/m^3]

σ : Stefan-Boltzmann Constant [$\frac{W}{m^2 K^4}$]

ϵ : Emissivity [Dimensionless]

REFERENCES

- [1] Radhakrishnan Purushothaman, "Evaluation and Improvement of Heat Treat Furnace Model", Ph.D Dissertation, Worcester Polytechnic Institute, (2008)
- [2] Lee Chunsik et al., "Experimental Study of Workpiece Temperature Variation in Reheating Furnace", *Journal of Energy Engineering*, 26(4), 100~106, (2017)
- [3] Kim K. M. et al., "A numerical study on the efficiency of an industrial furnace for oxygen combustion conditions", *Journal of Energy Engineering*, 24(3), 82-88, (2015)
- [4] Jiraphon Srisertpol et al., "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*, 5(1), 167-174, (2011)
- [5] Pongam T. et al., "Manufacturing Process Identification for the Reheating Furnace Walking Hearth Type Using Genetic Algorithm", *International Journal of Modeling and Optimization*, 2(2), 114-118, (2012)