

법랑코팅 열교환기에서 고온 소성공정에 따른 열전달 및 열응력에 관한 연구

최훈기^{1*}, 임윤승², 이종욱³

¹창원대학교 기계공학부 교수, ²창원대학교 기계공학부 대학원생, ³비에이치아이(주) 기술연구소 연구원

Numerical Study of Heat Transfer Characteristics and Thermal Stress for Enamel coating Heat Exchanger in High Temperature Firing Process

Hoon-Ki Choi^{1*}, Yun-Seung Lim², Jong-Wook Lee³

¹Professor, Division of Mechanical Engineering, Changwon National University

²Student, Division of Mechanical Engineering, Changwon National University

³Researcher, R&D Center, BHI

요약 본 연구는 화공용 열교환기에서 법랑코팅 적용을 위한 고온의 소성 공정조건 최적화에 대한 기초자료를 얻고자 하는데 그 목적이 있다. Shell & Tube 형태인 열교환기에 법랑코팅 적용을 위해 소성온도를 순차적으로 높이는 방안에 대해 검토하였다. 소성로 내부에서 열교환기의 온도분포에 대해 CFD 상용 프로그램으로 수치계산하여 구한 온도를 하중조건으로 열응력 해석을 수행하는 연성 해석(FSI) 방식을 이용하여 열교환기의 구조 안전성에 미치는 영향을 확인하였다. 수치해석 및 실험결과 상온의 열교환기를 바로 860℃도의 소성로에 넣으면 열교환기의 국부적 온도차로 인한 구조 안전성에 문제가 발생하므로 온도차를 줄이기 위한 예열 과정이 필요하다. 소성공정 단계가 적은 Case2와 같이 1단계 예열온도 445℃, 2단계 소성온도 860℃가 가장 적합한 것으로 판단된다.

주제어 : 법랑코팅, 열교환기, 소성로, 열전달, 열응력

Abstract The purpose of this study is to obtain basic data on the optimization of firing process conditions for enamel coating in chemical heat exchanger. The method of increasing the firing temperature in order to apply enamel coating to shell & tube type heat exchanger was examined. The temperature distribution of the heat exchanger in the firing kiln was numerically calculated using a commercial CFD program. The structural safety of the heat exchanger was confirmed by thermal stress analysis using the FSI method. Numerical analysis and experimental results show that there is a problem of safety due to temperature difference when the heat exchanger at room temperature is directly put into a firing kiln at 860℃. Therefore, a preheating process is need to reduce the temperature difference. As in Case2 with fewer firing steps, the first stage preheating temperature of 445℃ and the second stage firing temperature of 860℃ are considered to be most suitable.

Key Words : Enamel coating, Heat exchanger, Firing process, Heat transfer, Thermal stress

*This work was supported by the Korea Industrial Complex Corporation.(RKN18007).

*Corresponding Author : Hoon-Ki Choi(hkchoi@changwon.ac.kr)

Received December 24, 2019

Revised February 1, 2020

Accepted February 20, 2020

Published February 28, 2020

1. 서론

1.1 서론

화공 플랜트에는 제품생산에 필요한 열원을 공급하기 위한 열교환기를 사용하고 있다. 화학용 열교환기는 부식성 유체사용으로 인해 내부부식, 내화확성이 우수한 STS 316L, Duplex steel등을 사용하고 있으나 완벽한 부식방지는 되지 않으며 계속되는 산화막이나 스케일 발생으로 인하여 효과적인 열교환이 곤란하며 재료의 내구성에 치명적인 손상을 일으켜 운전 및 유지에 막대한 손실이 발생하고 있다.

이에 따라 산업계는 용사코팅, 테프론, 범랑 등의 코팅기술과의 융합으로 이러한 문제를 해결하기 위한 방법으로 제시하고 있다[1,2]. 그중 범랑 코팅은 금속소지와와의 접착력이 크며 내화확성, 내산성, 내열성 및 내열충격성이 우수하고 가격경쟁력이 높아 최근 HRSG, 석탄화력발전소 폐열회수 열교환기에 적용되고 있으며 부식환경에서 사용이 확대되고 있다[3-5].

범랑코팅은 소성로에서 800~860℃ 정도 고온에서의 소성과정을 통해 금속표면에 범랑이 용착되어 코팅된다. 이때 범랑 원료에 따른 요구되는 온도와 시간이 맞지 않을 경우 균열, 탄화 등이 발생하기 때문에 소성공정은 범랑코팅의 품질 특성을 결정하는 중요한 요소이다.

열교환기와 같이 복잡한 형상의 경우 소성시 위치별 온도의 편차가 크게 발생할 수 있어 코팅 품질에 큰 영향을 줄 수 있을 뿐만 아니라 열변형 및 열응력이 발생하기 때문에 적절한 소성조건을 수립하는 것은 범랑코팅에서 필수적이다.

본 논문에서는 Shell & Tube 형태인 열교환기에 범랑코팅 적용을 위해 소성온도를 순차적으로 높이는 방안에 대해 검토하였다. 소성로 내부에서 열교환기의 온도분포에 대해 CFD 사용 프로그램으로 수치계산 하여 구한 온도를 하중조건으로 열응력 해석을 수행하는 연성 해석(FSI : Thermal Fluid Structure Interaction) 방식을 이용하여 열교환기의 안전성에 미치는 영향을 파악하였다. 이를 토대로 화학용 열교환기에서 범랑코팅 적용을 위한 소성 공정조건 최적화에 대한 기초자료를 얻고자 하는데 그 목적이 있다.

2. 본론

2.1 전산해석 모델

본 논문에서는 소성로의 유동해석을 통해 시간에 따른 열교환기의 온도 분포를 계산하고 이를 토대로 열응력 해석을 수행하였다. 소성로의 규모는 길이, 높이, 넓이의 순으로 2.4m, 3.31m, 2.4m이다. Fig. 1에 소성로의 개략도를 나타내었다. 소성로는 길이 방향으로 양측면이 서로 대칭조건을 가지므로 가운데를 대칭면으로 하여 한쪽 부분에 대해서만 로내 유동장 및 온도장을 계산하였다. 소성로 중앙에 열교환기가 위치하고 있다. 열교환기의 세부 치수는 Fig. 2와 같으며 뷰트 길이 방향으로 대칭인 형태이다. Table 1에 열교환의 재원이 정리되어 있다.

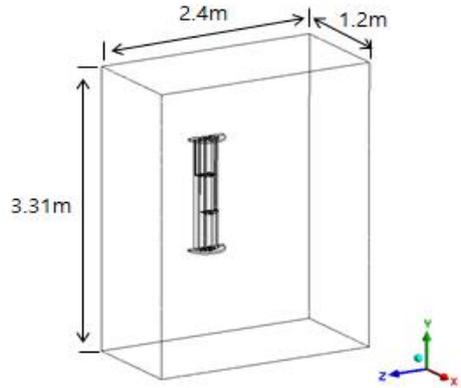


Fig. 1. Schematic drawing of firing kiln

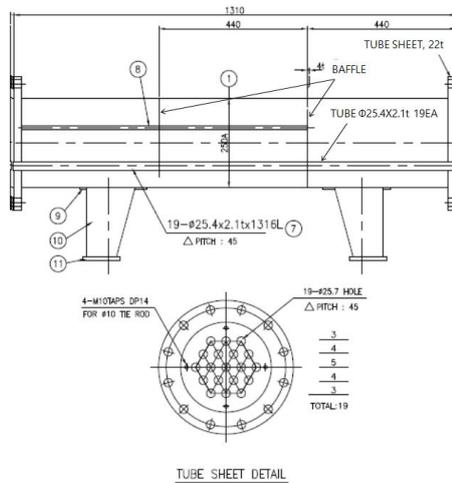


Fig. 2. Schematic drawing of heat exchanger

Table 1. Description of heat exchanger

	Material	Standard	Quantity
Shell	STS304	250A×sch.10	1
Tube sheet	STS304	22t	2
Tube	STS304	Φ25.4×2.1t×1316L	19
Baffle	STS304	4t	2

Fig. 3에 본 수치해석에 사용한 소성로의 계산에 대한 격자구조를 나타내었다. 유동장에 해당하는 영역에는 Polyhedral, 열교환기는 Hexa로 격자를 구성하였으며 격자수는 약 86만개를 기준으로 2배, 3배로 격자를 증가시켜 구성하여 최종 172만개로 격자를 구성하여 동일한 격자 독립성을 확보하였으며 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

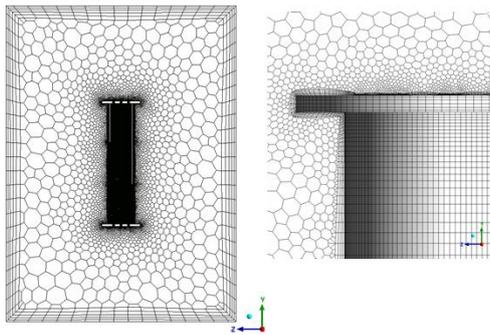


Fig. 3. The grid structure of the computational domain

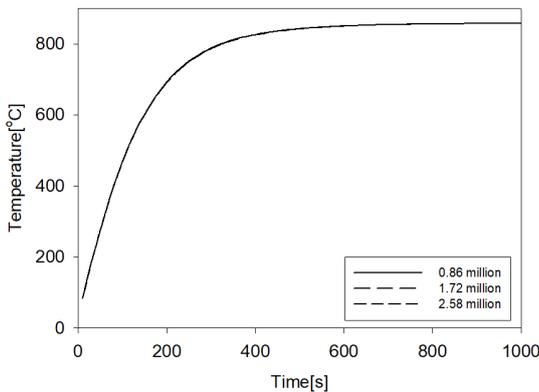


Fig. 4. Grid independence tests(Area ave Temperature at surface)

2.2 수치해석기법

본 연구에서는 상용 코드인 ANSYS FLEUNT[6]를 이용하여 3차원 유동해석을 수행하였다. 본 연구에서는 자연대류가 주 유동이기 때문에 공기는 이상기체로 가정하였다. 연속방정식을 사용하였고, 난류유동을 해석하기 위해 Reynolds-averaged Navier-Stokes(RANS)을 사용하였다. 난류 모델은 Realizable k-ε model을 사용하였다. 또한 복사에너지를 계산하기 위해 Discrete Ordinates(DO) model을 사용하였다. 시간에 따른 소성로내 열교환기의 온도변화를 확인하기 위해 Transient 해석을 수행하였으며 시간간격은 15초이다.

유동해석 결과인 열교환기 온도분포를 하중조건으로 ANSYS WORKBENCH[7]를 이용해 열응력 분포 및 변형 계산하였다.

2.3 경계조건 및 재료 물성치

소성로의 벽면에서는 정지 조건과 벽함수를 사용하였으며 벽면에 고정온도 경계조건을 적용하였다. 소성로 벽면온도는 Table 2와 같이 소성조건에 따라 3가지의 Case로 구분되어 있다. Case1의 경우 860°C 소성로에 예열 없이 25°C의 열교환기를 바로 넣는 것이며 Case2의 경우 1차 소성로 내부 온도를 445°C로 유지하고 열교환기를 넣어 예열시킨 뒤 860°C의 2차 소성로에 넣는다. Case3는 2단계의 예열 과정을 거쳐 3단계인 소성로에서 코팅이 완료하게 된다. 이러한 예열 과정은 소성로의 크기와 공정 단계가 추가 되어 코팅비용이 증가하지만 제품의 온도편차를 줄여 코팅품질 문제를 방지할 수 있으므로 적절한 소성공정 수립은 법랑코팅에서 중요한 문제이다.

법랑코팅 표면에서 방사율은 소성로 실험값을 토대로 온도에 따른 1차 함수로 설정하여 해석을 진행하였다[8].

Table 2. Operating temperature condition for firing

	Case1	Case2	Case3
Step1	860°C	445°C	300°C
Step2		860°C	580°C
Step3			860°C

Initial temperature of heat exchanger : 25°C

Table 3. Properties of stainless steel

Temp. (°C)	Young's Modulus (Pa)	Coefficient of Thermal Expansion (mm/mm/°C)	Thermal Conductivity (W/m/°C)
25	1.95E+11	1.53E-05	18.1
100	1.89E+11	1.62E-05	15.6
200	1.83E+11	1.70E-05	13.4
300	1.76E+11	1.77E-05	11.48
400	1.69E+11	1.81E-05	9.65
500	1.6E+11	1.84E-05	7.92
600	1.51E+11	1.88E-05	6.31
700	1.4E+11	1.92E-05	4.59
800	1.36E+11	1.94E-05	4.19
860	1.31E+11	1.89E-05	3.22

$$\varepsilon = \varepsilon_0 - aT \quad \dots\dots\dots (1)$$

여기서, ε_0 은 상온에서의 방사율으로 0.90이고 a 는 0.000698이다.

열교환기의 재질은 Stainless steel이며 정압비열 (C_p)은 502.4J/kgK를 적용하였으며 온도에 따른 물 성치는 AMSE Sec. 2D를 참고하였으며 Table 3과 같다[9].

2.3 수치해석 결과

2.3.1 소성조건에 따른 열전달 해석

Fig. 5는 Case별 소성로내 열교환기에서 Tube와 Shell의 온도 변화를 시간이력에 따라 나타낸 그림이다. 소성로 표면에 노출되어 있는 Shell측이 Tube측 보다 온도가 빨리 올라가고 초기에는 둘의 온도편차가 점점 커지다가 후기로 갈수록 점점 줄어드는 것을 경향을 보인다. 온도편차는 열교환기의 열응력을 발생시키는 주요한 요인으로 소성 공정에서 후반기 보다 초반기에 열응력의 영향이 클 것으로 판단된다.

Table 4에 Case별 Tube와 Shell의 최대온도차와 그때의 시간을 정리하였다. 예열구간이 없는 Case1이 가장 큰 온도차인 388.7°C를 보이며 예열구간이 있는 Case2와 Case3는 상대적으로 적은 온도차인 178.9°C, 112.2°C를 보이고 있다.

Fig. 6는 각 Case별 온도편차가 가장 큰 지점의 온도분포를 나타낸 그림이다. 온도는 Shell이 가장 높으며 Tube sheet는 두께에 따라 천천히 올라가며 Shell로 둘러싸인 Tube가 가장 낮다. Tube는 소성로 내부 아래에서 올라가는 상승류와 Sheet에 의한 전도 의해 아래부터 서서히 온도가 올라간다.

Table 4. Maximum temperature difference between tube and shell for enamel coating heat exchanger

	Case1	Case2	Case3
Step1	388.7°C 300s	135.2°C 660s	69.6°C 900s
Step2		178.9°C 240s	112.1°C 420s
Step2			112.2°C 240s

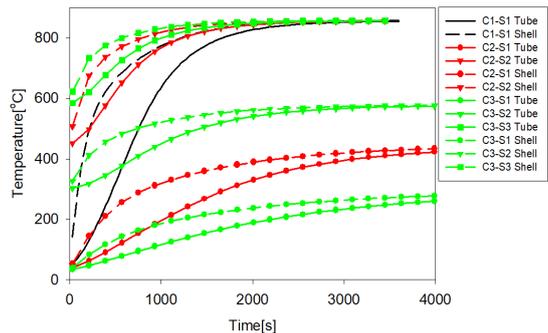


Fig. 5. Temperature history of tubes and shell for heat exchanger in firing kiln

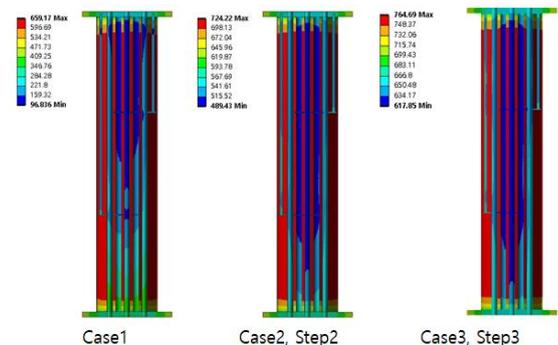


Fig. 6. Contour for maximum temperature difference

2.3.2 열응력 해석

Fig. 7.는 각 Case 별로 최대 온도차가 발생하는 지점에서 열교환기의 변형량을 나타낸 그림이다. Tube와 shell의 온도편차가 클수록 변형량이 증가하며 Case1이 가장 큰 변형량을 보였다. 열교환기의 부위중 가장 가운데 있는 Tube에서 최대 변형량이 나타났다. 이는 열교환기 중심부가 Shell에서 거리가 가장 멀어서 전도 및 복사에 의한 열전달 량이 작아 낮은 온도가 형성되었기 때문이다.

Fig. 8는 Case별 열교환기의 응력분포를 나타낸 그림이다. 최대응력은 최대 변형량이 나온 Case1이며 Tube와 shell의 온도편차가 작은 Case2, Case3는 열응력도 작게 형성되어 있다.

열교환기의 구조 건전성을 평가하기 위해 Fig. 9와 같이 최대 응력이 발생하는 가운데 Tube와 Tube Sheet가 만나는 지점에 Path를 만들어 응력을 계산한 결과는 Table 5에 정리되어 있다. 응력평가방법은 압력용기, 열교환기 등의 설계평가가 방법인 AMSE Sec. VIII의 기준을 따랐다[10]. Case1의 경우 응력 평가기준에 만족하지 못하는 것을 확인하였으며 Case2와 Case3는 평가기준을 만족하였다.

Fig. 10는 Case1의 소성조건으로 열교환기를 코팅했을 때의 결과 사진이다. 보는 것과 같이 열교환기 튜브에서 변형이 발생하는 문제를 확인 할 수 있다. 따라서 상온(25℃)의 열교환기를 바로 860℃도 소성로에 넣으면 문제가 발생하므로 온도편차를 줄이기 위한 예열 과정이 필요하며 소성공정 단계가 적은 Case2가 가장 적합한 것으로 판단된다.

Table 5. Results of stress evaluation

	Step	PL	PL/1.5S<1	PL+PB+Q	PL+PB+Q/3S<1
Case1	-	211.5	1.71 (N.G)	265	1.08 (N.G)
Case2	1	60.2	0.43 (OK)	95.7	0.34 (OK)
	2	104.9	0.98 (OK)	162.5	0.78 (OK)
Case3	1	25.1	0.16 (OK)	41.0	0.13 (OK)
	2	30.7	0.26 (OK)	83.8	0.35 (OK)
	3	9.4	0.16 (OK)	10.3	0.09 (OK)

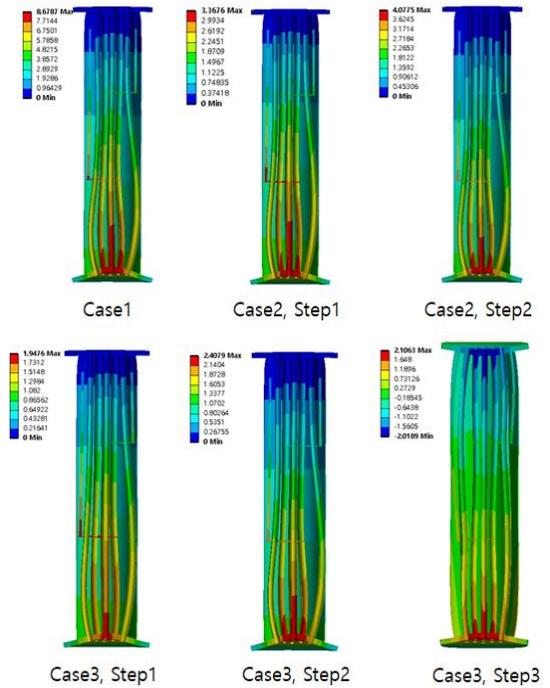


Fig. 7. Contour for y-direction deformation (mm)

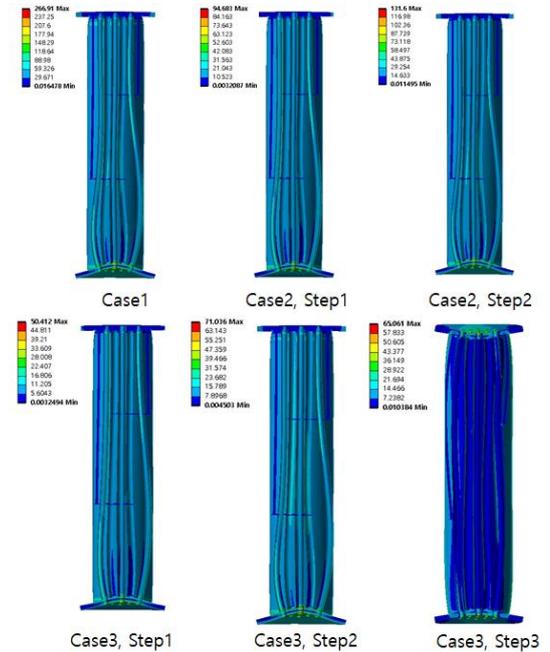


Fig. 8. Contour for stress intensity (MPa)

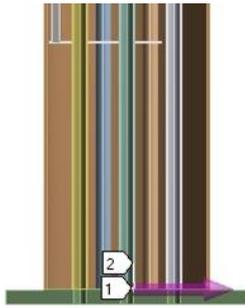


Fig. 9. Stress evaluation path



Fig. 10. Results for enamel coating heat exchanger

3. 결론

본 논문에서는 Shell & Tube 형태인 열교환기에 범량코팅 적용을 위해 적절한 소성조건을 수립하기 위해 CFD해석과 열구조 연성해석을 수행하였다. 소성로 내부온도를 예열 과정의 유무와 예열온도 설정에 따라 열교환기에 미치는 온도와 열응력 변화를 확인하였다.

수치해석 및 실험결과 상온의 열교환기를 바로 860℃도의 소성로에 넣으면 열교환기의 국부적 온도차로 인한 구조 안전성에 문제가 발생하므로 온도차를 줄이기 위한 예열 과정이 필요하다. 소성공정 단계가 적은 Case2와 같이 1단계 예열온도 445℃, 2단계 소성온도 860℃가 가장 적합한 것으로 판단된다.

REFERENCES

[1] S. K. Woo, K. S. Hong & B. Kang. (2000, Apr.). The Development of Corrosion Resistant Heat Exchanger Covered by Fluoropolymer. Resin. *Korea Society for Energy Engineering kosee Conference*, (pp. 215-222).

[2] K. S. Hong, S. K. Woo, I. S. Han, D. W. Seo & K. S. Lee. (2002) The Development of Glass Enamel Coating Heat Exchanger. *Korea Society for Energy Engineering kosee Conference*, 141-146.

[3] W. S. Kim. (2018). The War on Corrosion (Heat Exchanger Coating Technology). *Journal of the KSME*, 58(10), 28-32.

[4] S. H. Heo & H. J. Pi. (2016). Enamel Industry and Technology. *Journal of Ceramist*, 19(2), 54-58.

[5] K. J. Seong & C. S. Lee. (2017). Operation and Improvement Cases of FGD Non-leakage Type Gas-Gas Heater(GGH) for Coal Fired Power Plants. *Journal of Korean Soc. Combust*, 22(4), 35-42.

[6] ANSYS. (2018). *ANSYS Fluent V.19 User Guide*, USA.

[7] ANSYS. (2018). *ANSYS Workbench V.19 User Guide*, USA.

[8] H. K. Choi & G. J. Yoo. (2019, July). Numerical Study of Heat Transfer Characteristics for Enamel coating Heat Exchanger. *Conference of KSFM, Pyeongchang*.

[9] ASME. (2017). *Boiler & Pressure Vessel Code II Part D*, USA.

[10] ASME. (2017) *Rules for Construction of Pressure Vessels VIII Division 2*, USA.

최 훈 기(Hoon-Ki Choi)

[정회원]



- 1985년 2월 : 부산대학교 기계설계공학과(공학사)
- 1988년 2월 : KAIST 기계공학과(공학석사)
- 1993년 2월 : KAIST 기계공학과(공학박사)

- 2003년 3월 ~ 현재 : 창원대학교 기계공학부 교수
- 관심분야 : 열전달, 에너지시스템, 배기가스 저감
- E-Mail : hkchoi@changwon.ac.kr

임 윤 승(Yun-Seung Lim)

[학생회원]



- 2018년 2월 : 창원대학교 기계공학부(공학사)
- 2018년 2월 ~ 현재 : 창원대학교 기계공학부(공학석사과정)
- 관심분야 : 에너지시스템, 전산유체역학
- E-Mail : lys9348@naver.com

이 종 욱(Jong-Wook Lee)

[정회원]



- 2017년 8월 : 창원대학교 기계공학부(공학사)
- 2010년 8월 : 창원대학교 기계공학부(공학석사)
- 2010년 10월 ~ 현재 : 비에이치아이(주) 기술연구소

- 관심분야 : 에너지시스템, 전산유체역학, 배기가스 저감
- E-Mail : jwlee@bhi.co.kr