https://doi.org/10.7735/ksmte.2023.32.4.221

J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.
ISSN 2508-5107(Online)

Check for updates

사각 형태 Shell-and-Tube 열교환기의 유량 및 열 조건에 따른 열전달 성능에 대한 수치해석적 연구

이현우[a], 김민호[b], 김종남[c], 서영진[a,*]

Numerical Study on Heat Transfer Performance According to the Flow Rate and Thermal Conditions of Rectangular Shell-and-Tube Heat Exchanger

Hyunwoo Lee[a], Min Ho Kim[b], Jong Nam Kim[c], Youngjin Seo[a,*]

[a] *Department of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology*
[b] *Korea Testing & Research Institute*
[c] *Run Tech Corporation*

ARTICLE INFO

Article history:
Received 15 May 2023
Revised 28 June 2023
Accepted 13 July 2023

Keywords:
Shell-and-tube heat exchanger
Numerical analysis
Heat transfer
Flow rate
Temperature

ABSTRACT

With increasing interest in energy, research on improving the performance of heat exchangers is gaining interest. In this trend, studies are being conducted to predict and optimize the performance of heat exchangers using numerical analysis. In this study, numerical analysis was used to compare the effect of the flow rate on the heat transfer performance of a shell-and-tube heat exchanger. ANSYS FLUENT was used for numerical analysis, and thermal flow analysis was performed using a realizable k-ε turbulence model. Numerical analysis was conducted on five cases to compare the effect of flow rate and temperature on heat transfer performance. Results showed that increasing the cold water flow rate improved the heat transfer performance of the heat exchanger. Furthermore, a limit to the cooling of hot water was observed even with increasing injection temperature, and heating cold water was noted to be more effective.

1. 서 론

현대사회에서 에너지 소비가 늘어남에 따라 자원의 고갈과 환경에 대한 문제가 계속해서 제기되고 있다. 이러한 문제에 대하여 기존 열교환기의 성능을 개선하기 위한 많은 연구가 진행되고 있다. 열교환기는 온도 차를 이용하여 열을 효율적으로 이동시키는 장치로써 가열 또는 냉각에 사용되는 장치이다. 일반적으로 냉장고, 에어컨, 컴퓨터, 자동차 등에 사용되고 있다. 열교환 방법으로는 온도가 다른 두 개의 흐름이 평행하게 흐르는 방식과 서로 반대 방향으로 흘러 역류 형식으로 열교환이 진행되는 것이 대표적이다. 열교환기의 종류는 shell and tube type, plate heat exchanger, plate and shell heat exchanger, adiabatic wheel heat exchanger, plate fin heat exchanger 등으로 종류가 매우 다양하다[1]. 최근 연구에서는 다양한 열교환기들의 효율 향상을 위해 수치해석을 이용하여 열교환기의 성능을 예측 및 분석하고 있다. Oh et al.[2]은 판형 열교환기의 열전달 성능에 관한 연구를 하기 위하여 판의 형상을 다양하게 하였으며 성능에 대한 비교는 수치해석을 통하여 연구를 진행하였다. 수치해석으로 다양한 형상과 작동 조건에 관한 결과를 비교하기 위하여 실험을 함께 진행하여 수치해석의 신뢰성을 확보하였으며 그 결과 수치해석으로 판형 열교환기의 성능

* Corresponding author. Tel.: +82-54-478-7311
E-mail address: yjseo@kumoh.ac.kr (Youngjin Seo).

예측이 가능함을 확인하였다. W. Yaïci et al.[3]은 plate-fin-and-tube type의 열교환기를 설계하여 유량의 변화에 따른 열전달 성능 비교를 수치해석적으로 연구를 진행하였다. Oh et al.[4]은 차량용 공조기로 사용되고 있는 평행류 열교환기를 수치해석을 통하여 효율 향상을 위한 연구를 진행하였다. 평행류 열교환기의 효율에 대한 연구를 위하여 열교환기의 설계 변수에 다양한 변화를 주었으며 수치해석으로 결과를 도출하여 각 설계 인자가 미치는 영향에 대해서 분석하였다. 본 연구에서는 shell-and-tube heat exchanger에 관한 열전달 성능 및 작동 특성을 수치해석을 통하여 예측하고자 하였으며 이전 연구 사례로 shell-and-tube heat exchanger 내부에 칸막이의 개수와 주입 유량의 변화가 열전달 성능에 미치는 연구, 그리고 CFD를 활용하여 shell-and-tube heat exchanger의 열유동 특성에 관한 연구 등이 있다[5,6].

본 연구에서는 shell-and-tube heat exchanger에 대한 열전달 성능을 수치해석을 통하여 예측하고자 하였다. Shell-and-tube heat exchanger의 형상은 일반적으로 원통 형태이다[7-9]. 하지만 본 연구에 사용된 shell-and-tube heat exchanger의 형상은 shell이 사각 형태로 일반적인 형상과 다르게 설계되었다. 이러한 모습은 열교환기의 정비 및 세척이 용이하다는 장점이 있다. 사각 형태로 설계된 shell-and-tube heat exchanger 형상을 사용하여 수치해석을 진행하였으며 주입 유량에 따른열전달 성능과 주입되는 hot water의 온도에 따른 열전달 성능을 예측 및 비교분석 하였다.

2. 수치해석

본 연구에서는 사각 형태의 shell-and-tube heat exchanger 형상을 design modeler (Ansys version 19.1, ANSYS Inc., Canonsburg, Pennsylvania, United States)를 사용하여 설계하였다. 본 연구에서는 기존의 shell-and-tube heat exchanger와 다르게 shell과 tube의 형상을 사각 형태로 설계하였다. 사각 형태의 shell-and-tube heat exchanger의 모습은 Fig. 1에 2D, Fig. 2에 3D로 나타내었다. 총 13개의 사각 tube가 존재하며 칸막이는 하부에 3개 상부에 4개로 총 7개가 존재한다. Tube에는 cold water가 주입되며 아랫부분이 inlet, 윗부분이 outlet이다. 또한 hot water가 흐르는 inlet과 outlet은 shell의 상단에 존재하는 모습을 확인할 수 있다. Solid 영역인 tube의 벽면 소재는 STS 316으로 Table 1에 물성을 나타내었다. 수치해석을 위한 격자의 생성은 FLUENT meshing (Ansys version 19.1, ANSYS Inc., Canonsburg, Pennsylvania, United States)을 사용하였으며 총 6,802,147개의 tetrahedral cell을 생성하였다. 격자의 품질을 판단할 수 있는 max. skewness는 0.94로 양호한 품질의 격자임을 확인하였다. 형상이 다소 복잡하고 크기가 커 격자를 생성할 때 효율적인 수치해석 진행이 가능하도록 격자의 수를 다양하게 바꾸어가며 효율적인 격자 개수와 품질을 얻을 수 있었다. 이때 격자 품질 향상을 위해 auto node move 기능을 사용하였다. 수치해석의 신뢰성을 확보하는 과정으로 약 500만 개와 680만 개의 tetrahedral cell과 약 600만 개의 polyhedral cell을 생성하여 결과를 비교하였다. 그 결과, 약 680만 개의 tetrahedral cell과 약 600만 개의 polyhedral cell에서의 차압과 온도 변화의 오차가 최대 2%임을 확인하였다. tetrahedral cell에서 온도의 변화를 더 선명하게 확인할 수 있어 약 680만 개의 tetrahedral cell을 본 연구에 사용하였다. 생성된 격자의 모습은 Fig. 3에 나타내었다. 수치해석은 유동해석 상용 소프트웨어인 FLUENT (version 19.1; ANSYS Inc., Canonsburg, PA, USA)을 사용하였다. 수치해석에 사용되는 열유동 해석에 관한 지배 방정식은 질량 보존 방정식, 운동량 방정식, 그리고 에너지 방정식이 적용된다. 지배 방정식들은 다음과 같은 식으로 표현된다.

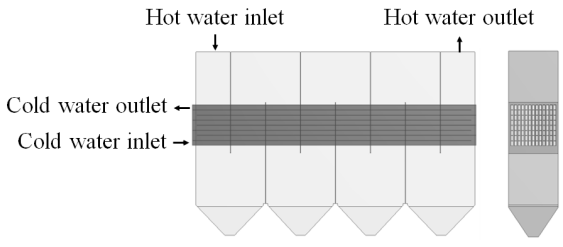


Fig. 1 Heat exchanger geometry (front & side view)

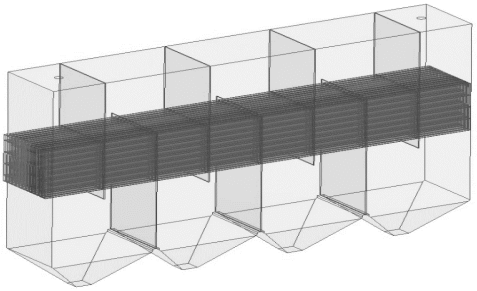


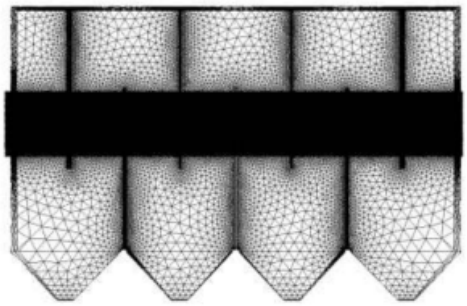
Fig. 2 3D view of heat exchanger

- 질량 보존 방정식

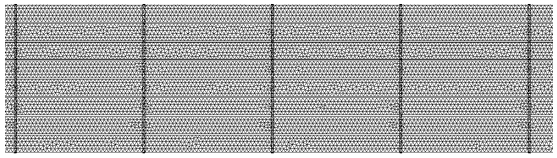
$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

Table 1 Water and STS 316 properties

	Density [kg/m^3]	Cp [j/kg-k]	Thermal conductivity [w/m-k]	Viscosity [kg/m-s]
Water	998.2	4182	0.6	0.001003
STS 316	7980	500	17	-



(a) Total mesh



(b) Tube mesh

Fig. 3 Shape of mesh

- 운동량 방정식

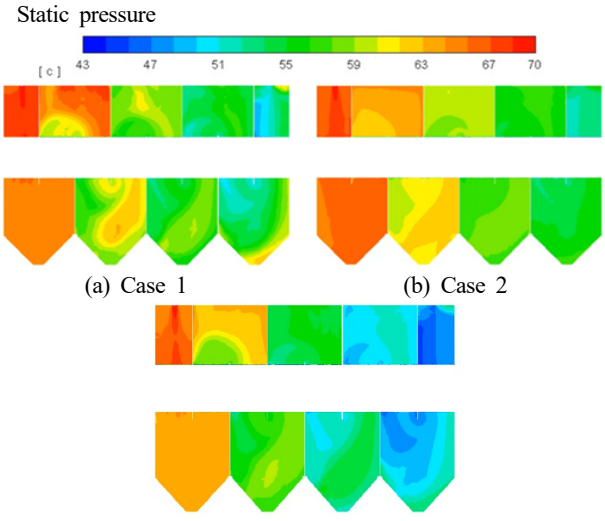
$$\rho\frac{\partial u_i}{\partial t}+\frac{\partial u_i\rho u_j}{\partial x_j}=\mu\frac{\partial}{\partial x_j}(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i})-\frac{\partial P}{\partial x_i} \quad (2)$$

$$\mu=\mu_t+\mu_l \quad (3)$$

- 에너지 방정식

$$\rho C_p u_j\frac{\partial T}{\partial x_i}=k\frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2} \quad (4)$$

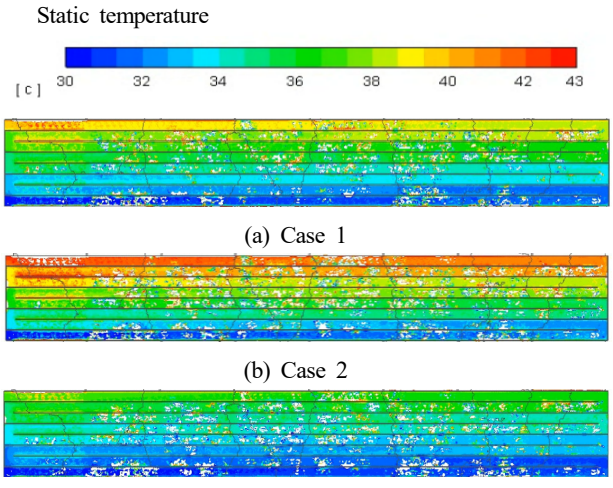
Shell-and-tube heat exchanger의 열전달 성능을 비교하기 위하여 정상상태 해석으로 realizable k-ε 난류 모델을 사용하였으며 열 해석을 위하여 energy 기능을 활성화해주었다. Cold water inlet과 hot water inlet은 velocity inlet으로 지정하여 목표 유량에 맞는 유속을 계산하여 입력해주었다. 그리고 cold water outlet과 hot water outlet은 pressure outlet으로 대기압 조건을 주었다. 본 연구에서 진행한 케이스는 총 5개이며 case 1-3은 유량에 의한 열전달 성능의 변화를 비교하기 위한 조건으로 cold water는 30℃, hot water는 70℃로 동일하게 설정하였으며 유량을 다양하게 해주었다. Case 1의 cold water inlet의 유량은 20 m^3/h이고 hot water inlet의 유량은 5 m^3/h이다. Case 2는 cold water 20 m^3/h, hot water 10 m^3/h, 그리고 case 3은 cold water 25 m^3/h, hot water 5 m^3/h이다. Case 1, 4, 그리고 5는 hot water의 온도에 대한 열전달 성능을 비교하기 위한 케이스이다. 주입되는 cold water



(a) Case 1 (b) Case 2

(c) Case 3

Fig. 4 Comparison of hot water temperature contour



(a) Case 1

(b) Case 2

(c) Case 3

Fig. 5 Comparison of cold water temperature contour

Table 2 Temperature and flow conditions in each case

	Temperature [℃]		Volume flow rate [m^3/h]	
	Hot water inlet	Cold water inlet	Hot water inlet	Cold water inlet
Case 1	70	30	5	20
Case 2			10	20
Case 3			5	25
Case 4	80		5	20
Case 5	90			

Table 3 Comparison of numerical analysis results by flow rate

	Temperature [℃]					
	Hot water inlet	Hot water outlet	△T	Cold water inlet	Cold water outlet	△T
Case 1	70	54.05	-15.95	30	39.93	+9.93
Case 2		53.52	-16.48		41.06	+11.06
Case 3		48.37	-21.63		37.34	+7.34

의 온도가 동일하며 hot water와 cold water의 유량 또한 case 1을 기준으로 동일하게 설정해주었다. 주입되는 hot water의 온도는 70, 80, 그리고 90℃로 온도를 다양하게 해주었다. 각 케이스의 조건은 Table 2에 정리하여 나타내었다.

3. 수치해석 결과

3.1 유량에 따른 열교환기 성능 비교

Case 1-3에 대한 수치해석을 진행하여 shell-and-tube heat exchanger의 온도 변화를 예측하였다. Fig. 4와 5에 각 케이스별 온도 분포에 대한 결과를 그림으로 나타내었으며 Table 3에 온도 변화에 대한 결과를 수치로 나타내었다. Fig. 4를 보면 case 3에서의 hot water 온도가 가장 빠르게 감소하는 모습을 확인할 수 있으며 case 1과 case 2에서는 유사한 온도 분포를 보여주고 있다. Fig. 5에서는 tube 내부의 cold water 온도 분포를 나타낸 모습으로 case 2에서의 온도 변화가 가장 크게 나타났음을 확인할 수 있다. 수치해석 결과, Case 1의 경우 주입된 hot water의 온도가 22.79% 감소하여 54.05℃로 나타났으며 cold water의 온도는 33.10% 상승하여 39.93℃로 예측되었다. Case 2에서는 hot water의 온도가 23.54% 감소하여 53.52℃를 보였고 cold water는 36.87% 상승하여 41.06℃의 결과를 보였다. Case 3에서는 hot water의 온도는 30.90% 감소하여 48.37℃였으며, cold water의 온도는 24.47% 증가한 37.34℃의 결과를 보였다. Case 1을 기준으로 하여 case 2에서는 hot water의 유량을 5 m^3/h에서 10 m^3/h로 증가시킨 것이며 case 3은 case 1에서 cold water의 유량을 20 m^3/h에서 25 m^3/h로 증가시킨 것이다. hot water의 유량을 증가시켰을 때는 cold water outlet에서의 온도가 case 1과 비교하여 1.13℃상승하였으나 cold water의 유량을 증가시켰을 때는 hot water outlet의 온도가 case 1과 비교하여 5.68℃ 감소하여 cold water 유량의 증가가 본 연구에 사용된 shell-and-tube heat exchanger에서는 더 큰 영향을 미침을 예측할 수 있다.

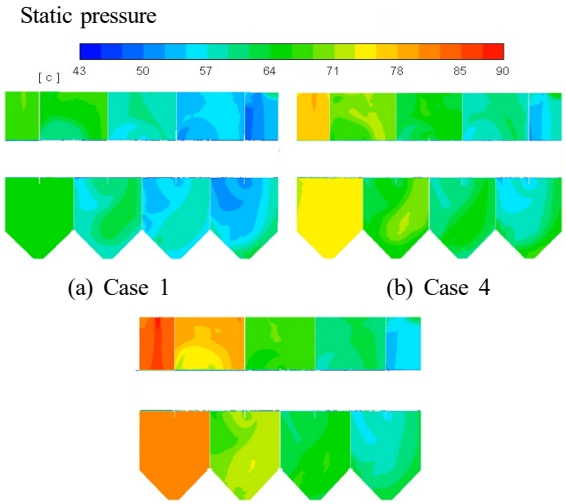
3.2 초기 온도에 따른 열교환기 성능 결과 비교

동일한 유량에서 주입되는 hot water의 온도에 따른 열교환기의 성능 비교를 위하여 hot water의 온도를 70, 80, 그리고 90℃로 다양하게 해주었다. hot water의 온도 이외의 조건은 모두 동일하다. Case 1, 4, 5의 온도와 유량 조건은 Table 2에서 확인할 수 있다.

동일한 유량에서의 주입되는 hot water outlet에서의 온도 변화 결과는 Table 4에 나타내었다. Hot water outlet을 기준으로 case 1은 70℃에서 22.79% 감소한 54.05℃, case 4는 80℃에서 27.54% 감소한 57.97℃, 마지막으로 case 5에서는 90℃에서 36.47% 감소한 57.18℃의 결과가 예측되었다. 그리고 cold water outlet을 기준으로는 case 1에서 30℃에서 39.93℃가 되어 33.10% 상승하였으며 case 4에서는 41.65℃로 38.83% 상승, 그리고 case 5에서 최종 42.39℃로 41.30% 상승한 결과를 보였다. 수치해석으로 얻은 hot water와 cold water의 온도 변화를 비교해보면 hot water의 온도가 높아질수록 cold water의 출구에서의 온도가 상승하는 모습을 보였으나 hot water의 온도 변화보다 차이가 적은 결과를 나타내었다. Hot water의 초기 온도의 차이가 보여준 온도 변화는 최소 15.95℃에서 최대 32.82℃까지 상승 폭을 보였으나 cold water의 온도 변화는 최소 9.93℃에서 최대 12.39℃상승으로 주입된 hot water의 온도 변화에 비해 적은 변화를 나타내었다. 이러한 결과를 통하여 hot water의 온도 증가로 얻을 수 있는 열전달 효율은 제한적임을 알 수 있었다. Hot water가 흐르는 부분의 온도 변화 모습은 Fig. 6에 나타내었으며 hot water inlet에서 hot water의 온도가 증가하여도 전체적인 온도의

Table 4 Comparison of numerical analysis results by hot water temperature

	Temperature [℃]					
	Hot water inlet	Hot water outlet	△T	Cold water inlet	Cold water outlet	△T
Case 1	70	54.05	-15.95	30	39.93	+9.93
Case 4	80	57.97	-22.03		41.65	+11.65
Case 5	90	57.18	-32.82		42.39	+12.39



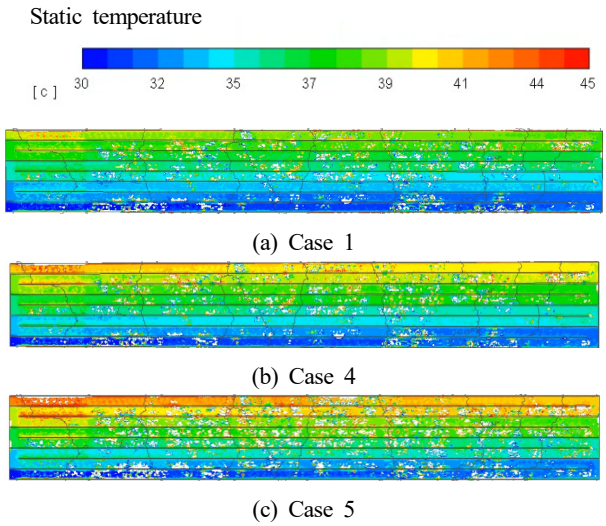
(a) Case 1 (b) Case 4

(c) Case 5

Fig. 6 Comparison of hot water temperature contour

변화가 크지 않음을 그림을 통하여 확인할 수 있다. Fig. 7은 열교환기 내부 tube에서의 온도 변화를 나타낸 것으로 cold water의 온도 변화를 확인할 수 있다.

Fig. 8과 9는 case 1-5까지의 온도 변화 결과를 모두 나타낸 그래프이다. Fig. 8은 hot water의 온도 변화이고 Fig. 9는 cold water의 온도 변화이다. Case 1, 2, 4, 그리고 5를 비교해보면 hot water의 최종 온도가 비슷함을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 cold water의 유량과 온도가 동일한 조건일 때 hot water의 냉각에는 한계가 있음을 보여준다. Cold water에서는 주입되는 hot water의 온도 및 유량 증가에 대한 cold water outlet에서의 각 케이스에 대한 상대적인 온도 증가율이 점차 감소하는 모습을 보였지만 hot water의 주입 온도 및 유량의 증가로 최종 온도를 더



(a) Case 1

(b) Case 4

(c) Case 5

Fig. 7 Comparison of Cold water temperature contour

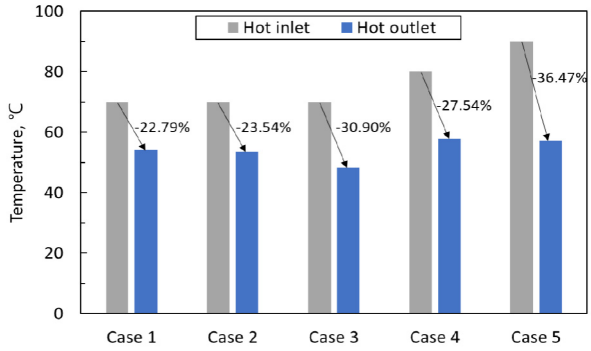


Fig. 8 Hot water temperature change graph in all cases

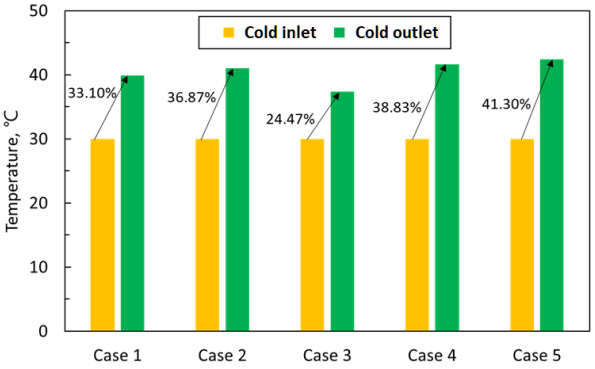


Fig. 9 Cold water temperature change graph in all cases

높일 수 있음을 확인하였다.

4. 결 론

수치해석 결과, 본 연구에 사용된 사각 형태의 shell-and-tube heat exchanger의 형상에서는 cold water의 유량 증가에 의한 온도 변화가 hot water의 유량 증가에 의한 온도 변화보다 온도차가 크게 나타나 cold water의 유량이 열전달에 더 큰 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있었다. 그리고 hot water의 주입 온도에 따른 결과로는 hot water의 주입 온도가 상승하여도 hot water의 냉각에는 한계가 있음을 확인하였으며 cold water의 가열에는 효과가 있음을 확인하였다. Case 1, 2, 4, 그리고 5의 비교로 cold water의 온도 및 유량 조건이 동일한 경우에서는 hot water의 냉각에는 한계가 있으나 cold water의 가열에는 hot water의 온도 및 유량 증가로 cold water outlet에서 더 높은 온도의 cold water를 얻을 가능성을 보여주었다.

본 연구를 통하여 사각 형태 shell-and-tube heat exchanger의 성능 예측에 대한 수치해석의 활용 가능성을 확인하였으며 수치해석을 활용하여 설계된 열교환기의 목적에 맞는 최적화된 작동 조건을 찾을 수 있음을 확인하였다.

후 기

이 연구는 금오공과대학교 학술연구비로 지원되었습니다(2022-2023).

References

[1] Lee, S. C., 1998, Shell-and-tube Heat Exchangers for Air-conditioning and Refrigeration System, The Magazine of the Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, 27:3 209-217, <https://koreascience.kr/article/JAKO199822454382437.page>.

[2] Oh, J. K., An, S. K., Nam, S. C., Cho, H. H., 2012, Theoretical Study on the Heat Transfer Performance in the Various Type Plate Heat Exchanger, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, 24:8 636-645, https://doi.org/10.6110/KJACR.2012.24.8.636.

[3] Yaïci, W., Ghorab, M., Entchev, E., 2014, 3D CFD Analysis of the Effect of Inlet Air Flow Maldistribution on the Fluid Flow and Heat Transfer Performances of Plate-fin-and-tube Laminar Heat Exchangers, Int. J. Heat Mass Transf., 74 490-500, https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.03.034.

[4] Oh, S. J., Chung, K., Lee, K. S., 2003, Heat and Flow Analysis Inside a Parallel-Flow Heat Exchanger, Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B, 27:6 781-788.

[5] Ozden, E., Tari, I., 2010, Shell Side CFD Analysis of a Small Shell-and-tube Heat Exchanger, Energy Convers. Manag., 51:5 1004-1014, https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.12.003.

[6] Mohanty, S., Arora, R., 2020, CFD Analysis of a Shell and Tube Heat Exchanger with Single Segmental Baffles, Int. J. Automot. Mech. Eng., 17:2 7890-7901, https://doi.org/10.15282/ijame.17.2.2020.08.0589.

[7] Kaleru, A., Venkatesh, S., Kumar, N., 2022, Numerical and Experimental Study of a Shell and Tube Heat Exchanger for Different Baffles, J. Heat Transf., 52:3 2186-2206, https://doi.org/10.1002/htj.22780.

[8] Cho, B. H., 2023, Numerical Study of Performance Characteristics in Shell and Tube Heat Exchanger, Master Thesis, Yonsei Univ., Republic of Korea.

[9] Lee, Y. H., Kim, S. Y., Park, M. K., 2001, An Experimental Study of Shell and Tube Heat Exchanger Performance with Baffle Spacing, Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B, 25:12 1748-1755.

Hyunwoo Lee
Ph.D. Student in the Department of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology. His research interest is Aerosol & Fluid Mechanics.
E-mail: eddi1993@kumoh.ac.kr

Min Ho Kim
Chief researcher in Korea Testing & Research Institute. His research interest is Mechanical Engineering.
E-mail: hujiitzky@ktr.or.kr

Jong Nam Kim
CEO of Run Tech Corporation. His research interest is Thermal-fluid Mechanics.
E-mail: rtc@chol.com

Youngjin Seo
Ph.D. Associate Professor, Kumoh National Institute of Technology. His research interest includes Aerosol Dynamics and Thermal-fluid Mechanics.
E-mail: yjseo@kumoh.ac.kr