

## 유동분배판에 의한 원통-다관형 열교환기의 성능 특성에 관한 수치해석적 연구(II): 전열특성

박영민,<sup>1</sup> 이태호,<sup>1</sup> 정희택,<sup>\*2</sup> 김형범<sup>2</sup>

<sup>1</sup>경상대학교 대학원 기계항공학부

<sup>2</sup>경상대학교 기계공학부 및 항공기부품기술연구소

### NUMERICAL STUDY ON THE PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF SHELL AND TUBE HEAT EXCHANGER BY FLOW DISTRIBUTORS : PART(II) HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS

Y.M. Park,<sup>1</sup> T.H. Lee,<sup>1</sup> H.T. Chung<sup>\*2</sup> and H.B. Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical and Aerospace Engineering, Gyeongsang Nat'l Univ.

<sup>2</sup>School of Mechanical Engineering & Research Center for Aircraft Parts Technology, Gyeongsang Nat'l Univ.

*In the previous study, it is proved by numerical simulation that the baffle shaped as the porous plate installed in the inlet chambers improves the redistribution of the flow injecting to the tube bundles. In the present study, numerical simulation has been performed to investigate the effects of the flow distributors on the thermal characteristics of the shell and tube heat exchangers. The flow fields have been analysed by the three-dimensional Navier-Stokes solvers including the thermal conditions on the shell sides. The numerical results showed that the presence of the baffles improves the redistribution of the heat transfer to the tube bundles though the overall performance drop slightly on the present flow conditions.*

**Key Words :** 유동분배판(Flow Distributor), 원통-다관형 열교환기(Shell and Tube Heat Exchanger), 열적 성능(Thermal Performance), 전열 특성(Heat Transfer Characteristics), 수치 해석(Numerical Analysis)

### 1. 서 론

열교환기는 발전 플랜트, 오일·가스, 조선·해양, 석유화학, 담수플랜트, 원자력 등에 핵심 기자재로 사용되며, 공정효율 및 온실가스 감축에 큰 영향을 미친다[1].

원통-다관형 열교환기의 다관부 설계에서는 유동의 균일성을 가정하나 다수의 전열관과 유동이 모이는 헤더의 형상 등에 의한 유동의 불균일성은 열교환기의 유동장 형태와 전열 특성에 영향을 준다[2]. 이러한 다관측의 유동질을 개선하기 위해서 입구부에 다공성 배플(baffle)을 유동 분배판을 설치하

는 경우가 있다.

Wen et al.[3,4]은 관-관형 열교환기에 대한 연구에서 유동 분배판에 의해 유량의 분배 성능이 크게 증가한다는 결과를 보고하였다. Mohammadi and Malayeri[5]은 단일 원통 다관형 열교환기의 다관부 부분에서의 총 유량 분배에 대한 수학적 모델을 제시하고 이를 통해 유동분배량을 정량적으로 예측하는 연구를 수행하였다.

Tu et al.[6,7]은 원통-다관형 열교환기의 입구부에 다공성 배플을 유동분배판을 설치하여 실험과 수치해석의 결과를 비교하고 최적화된 분배판의 배열을 제시하였다.

본 연구에서는 원통-다관형 열교환기의 다관측 입구부에 유동분배판을 설치하여 이에 대한 성능 특성을 수치해석적으로 연구하여 설계에 필요한 자료를 제공하고자 한다. 선행연구에서는 유동특성을 분석하여 배플에 의해 유동의 균일성이 개선되었음을 확인하였다[8]. 이어서 본 연구에서는 전열 특

Received: October 5, 2016, Revised: December 13, 2016,

Accepted: December 13, 2016.

\* Corresponding author, E-mail: htchung@gnu.ac.kr

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2016.21.4.028>

© KSCFE 2016

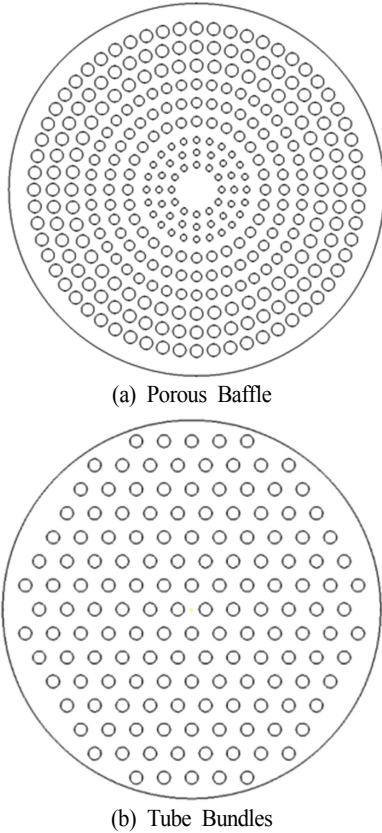


Fig. 1 Sectional view of porous baffles and tube bundles

성을 분석하여 열적 성능을 예측하고 분배관에 의한 열교환기의 성능 향상을 검토하고자 한다.

### 2. 적용 모델과 수치기법

본 연구의 적용 대상은 Wang et al.[9]의 실험 장치를 대상으로 하였다. 원통, 관 및 노즐부의 형상 조건은 Table 1과 같다. 관은 직경이 10 mm이고 길이가 323 mm이며 총 148개이다. 입·출구부는 직경이 300 mm인 반원형이며 80 mm의 노즐로 배관과 연결되어 있다. 유동 분배관은 반경 방향으로 5, 8, 10 mm의 직경을 가진 다공성 베플 형상으로 다공도는 26.8%이다. 다관과 유동 분배관의 배열 형상은 Fig. 1과 같다.

본 연구의 해석 영역은 다관부와 원통부로 나누어진다. 다관측 유동으로, 입구 노즐에서 출구 노즐 까지가 해석 영역이고 원통측은 입구-원통-출구로 구성된다. Fig. 2는 본 연구의 수치해석에 사용된 계산 격자점으로 적용 모델의 형상을 알 수 있다.

다관부에서의 작동 유체는 물이고 유량은 100 LPM 이다.

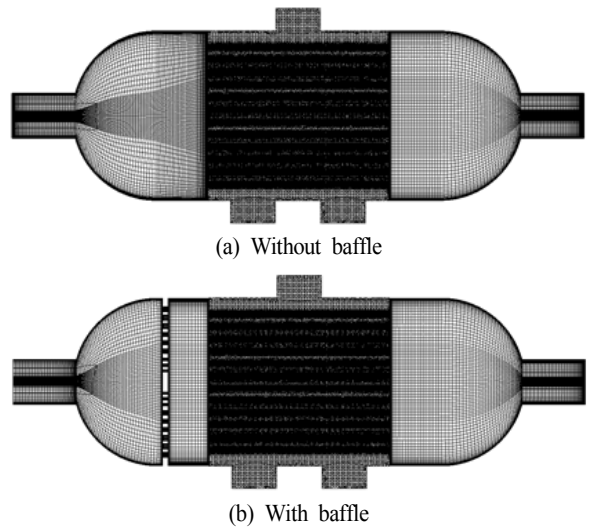


Fig. 2 Computational meshes for two models

관 내부의 평균 유동을 기준으로 한 Reynolds 수는  $1.6 \times 10^3$ 이다. 노즐입구에서의 온도는 20℃이다. 원통부에서는 80℃의 물이 32.2 kg/s로 유입된다.

베플이 있는 경우와 없는 경우를 비교하여 유동분배관에 의한 열적 성능 특성을 분석하고자 한다.

정상상태에의 3차원 비압축성 유동장(RANS-3D) 해석을 위해서 상용 소프트웨어인 ANSYS CFX를 사용하였다[10]. 난류 특성은 표준 k-ε 모델을 채택 하였다. 계산 영역을 줄이고 유동 특성을 잘 반영하는 정구 격자형을 채택 하였다. 베플이 없는 경우는 다관측은 약 400만개의 정구 격자를, 원통측은 약 300만개의 정구·비정구 혼합 격자로 총 700만개의 격자점이 소요되었다. 약 1500번의 반복 계산 후 0.1%의 전열량 보존성이 유지 되었다. 베플이 있는 경우에는 유동 분배관의 존재로 다관측 격자는 약 500만개가 사용되었다. 베플이 있는 경우는 없는 경우보다 격자수가 많고 유동이 다소 복잡성하

Table 1 Geometric parameters in tube and shell side

		Value	Units
Chamber	Diameter of Inlet	80	mm
	Diameter of Outlet	80	mm
	Diameter of Chamber	300	mm
Porous Baffle	Diameter	5, 8, 10	mm
	Length	10	mm
	Number of Holes	316	ea
	Porosity	26.8	%
Tube	Diameter	10	mm
	Length	323	mm
	Number of Tubes	148	ea
Shell	Diameter of Inlet Nozzle	80	mm
	Diameter of Outlet Nozzle	80	mm
	Diameter of Shell	300	mm

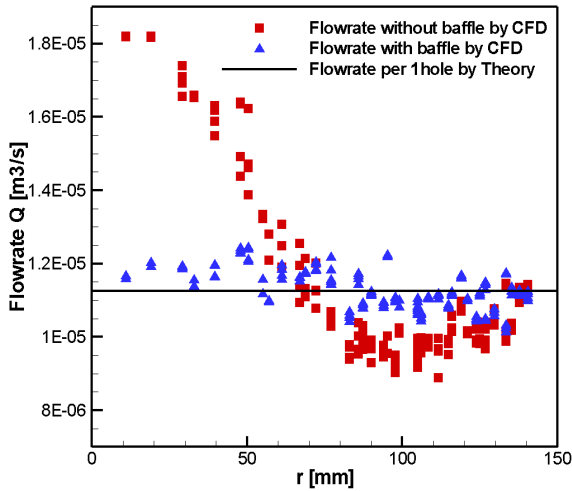


Fig. 3 Variation of flow rates along the radial direction

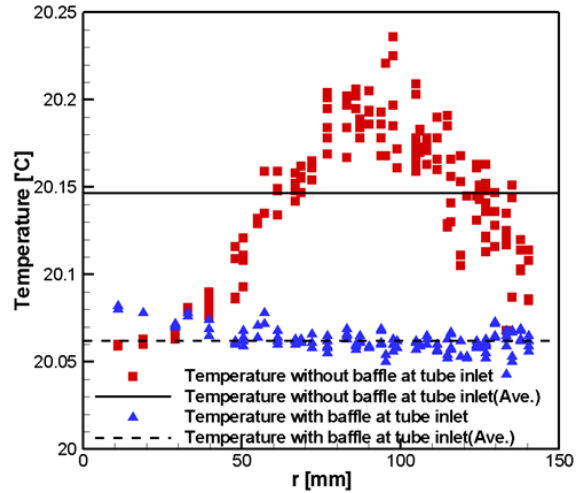


Fig. 5 Variation of temperature at tube inlet along the radial direction

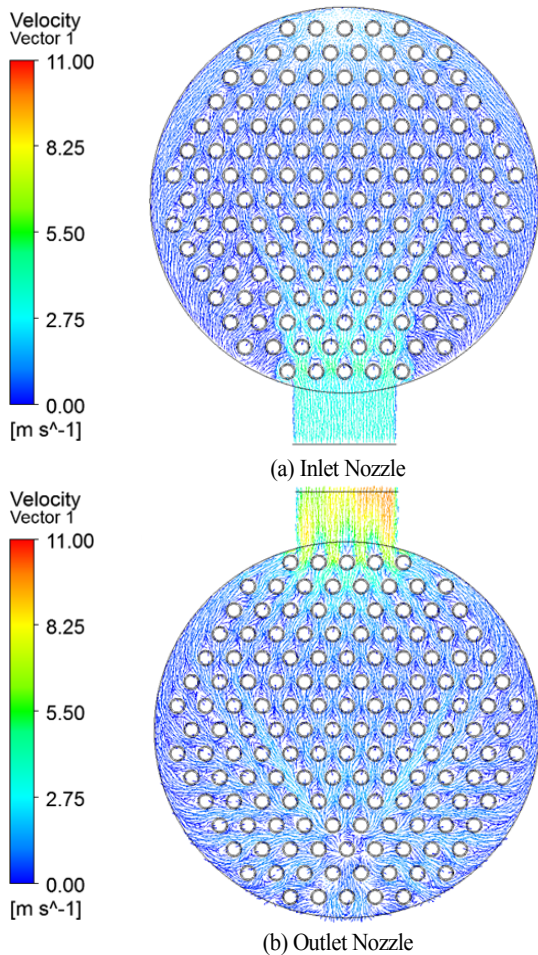


Fig. 4 Flow patterns on the cross-sectional planes of shell side

여 수렴성에 소요되는 시간이 20% 증가하였으나 전열량 보존성은 비슷하였다.

### 3. 해석 결과

선행 연구에서 유동 분배판의 설치로 Fig. 3와 같이 다관 입구에서 유동의 균일성이 개선되었음을 확인 하였다[8]. 본 연구에서는 이에 의한 다관부의 전열 특성을 분석 하고자 한다.

원통부에서는 2개의 입구 노즐에서 다관측 입구의 20배의 유량이 유입되며 다관측 유동과 직교하여 흐르며 원통의 가운데에 1개의 출구 노즐로 유출된다. 이러한 유동 구조로 Fig. 4와 같이 원통부의 고온의 유체는 다관부의 관 외부로 고르게 분포됨을 알 수 있다.

열교환기 입구 노즐에서의 온도는 20°C 이다. Fig. 5는 다관부의 관다발(tube bundles) 입구에서의 온도 분포를 나타낸 것이다. 배플이 없는 경우가 있는 경우보다 온도의 불균일성이 커 보이나, 평균 온도차는 0.1°C 정도이다. 출구에서의 평균 온도 증가는 10°C 정도로 예상 되므로 이를 감안하면 입구부 온도차는 무시할 수 있다.

Fig. 6는 다관부의 관다발(tube bundles) 출구에서의 온도 분포를 나타낸 것이다. 배플이 없는 경우는 온도 변화가 크고 온도 상승도 약간 크다. 원통의 반경 중심부에 출구의 온도가 큰데 이는 Fig. 3에 나타난 바와 같이 이 부근에 유량이 상대적으로 적어 관 외부에서 주어지는 전열량이 균일하면 관 내부의 온도 상승이 상대적으로 클 수 있다. 배플이 있는 경우에는 출구에서도 온도의 불균일성이 많이 개선되었음을 알 수 있다.

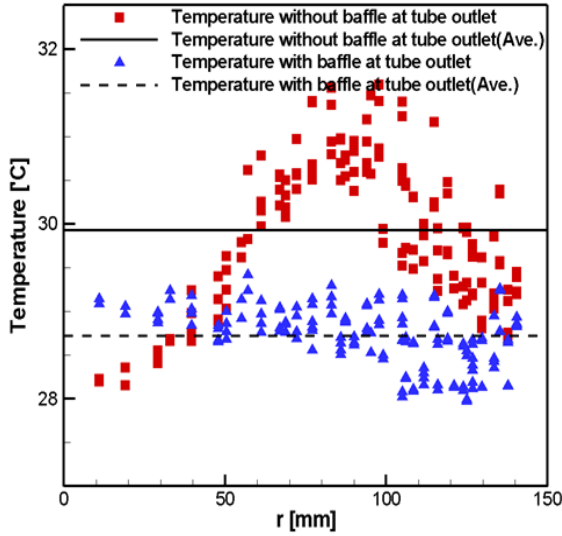


Fig. 6 Variation of temperatures at tube outlet along the radial direction

출구에서의 평균온도는 배플이 없는 경우는 29.8°C이고 배플이 있는 경우는 28.7°C로, 배플이 없는 경우가 약 1.1°C 높다. 이는 전열 특성에도 영향을 준다. 전열량,  $\dot{q}$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\dot{q} = \dot{m}c_f\Delta T \tag{1}$$

여기서,  $\dot{m}$ 은 질속유량,  $c_f$ 는 비열,  $\Delta T$ 는 온도상승이다.

Table 2는 각 구간의 전열량을 표시한 것이다. 입구부의 전열량은 배플이 없는 경우가 더 높다. 선행 연구[8]에 의하면, 배플이 없는 경우는 배플이 있는 경우보다 관다발(tube bundles) 입구에서 외류가 형성됨을 보고하였다. 이로 인해 전열이 동반된 경우에는 열혼합이 활발하여 배플이 없는 경우가 입구부에서 전열량이 다소 높게 나타남을 추정할 수 있다.

Table 2에 보듯이 대부분의 전열은 원통부에서 다관부로 유입되는 열전달로 일어난다. 다관부 전체의 전열량은 배플이 없는 경우가 10% 높다. Tu et al.[7,11]는 본 연구와 같은 조건에서 전열이 없는 경우에서 유동 특성에 대해서만 실험을 수행한 결과, 유동분배판의 설치로 다관측 입구에서는 난류강도

Table 2 Summaries of thermal performanc

[Units : W]

Location	Inlet Chamber	Tube side	Outlet Chamber	Total
Without Baffle	187.44	67937.3	13.89	68169.3
With Baffle	76.37	60425.7	13.38	60515.9

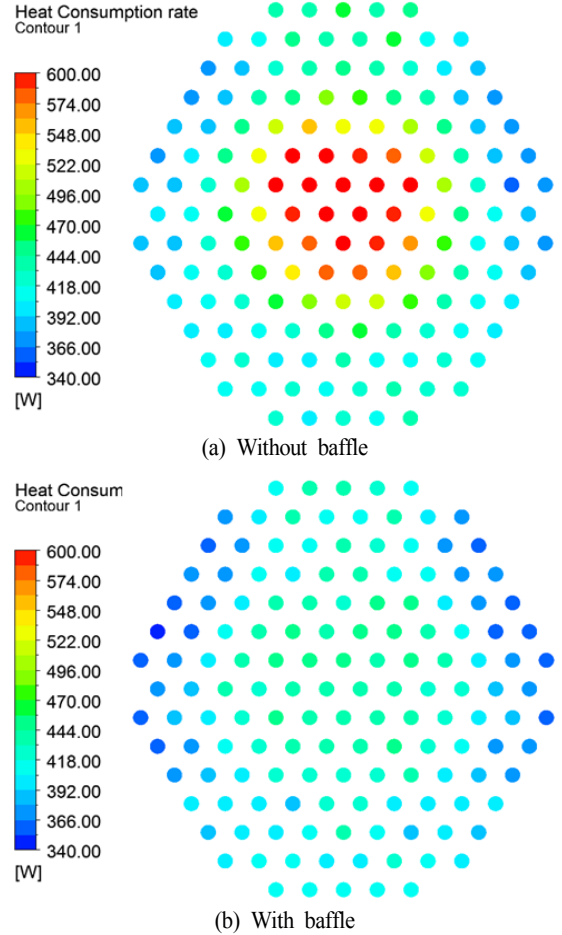


Fig. 7 Sectional view of heat consumption rate on the tube bundles

가 1/3로 감소하고 균일한 분포를 나타냈다. Wang et al.[12]은 단일관의 전열특성에 대한 수치 해석적 연구에서, 관 입구에서 난류 강도가 크면 전열 효과도 크다고 보고했다. 배플에 의한 난류 특성의 변화는, 유동분배판에 의한 총괄전열의 감소의 원인 중 하나로 추측된다. 이 부분은 전열이 동반된 실험 등을 통해 추후에 심도 있게 연구되어야 할 부분으로 사료된다.

각 관에서의 전열량을 나타내면 Fig. 7-8과 같다. 분배판이 없는 경우에는 중심부에서 있는 관이 받는 전열량이 외곽의 경우보다 약 1.5배 이다. 유동 분배판이 있는 경우에는 경향은 비슷하나 전열량의 편차 정도가 10% 내외로 나타나서 관 내부로 열이 비교적 균일하게 전달됨을 알 수 있다. 전열량이 불균일하고 국부적으로 온도 상승이 큰 관이 많이 존재하면 열교환기의 수명에도 나쁜 영향을 준다. 관의 안정적인 운전 을 위해서는 각 관에 균일한 전열 성능의 보장이 중요하다.

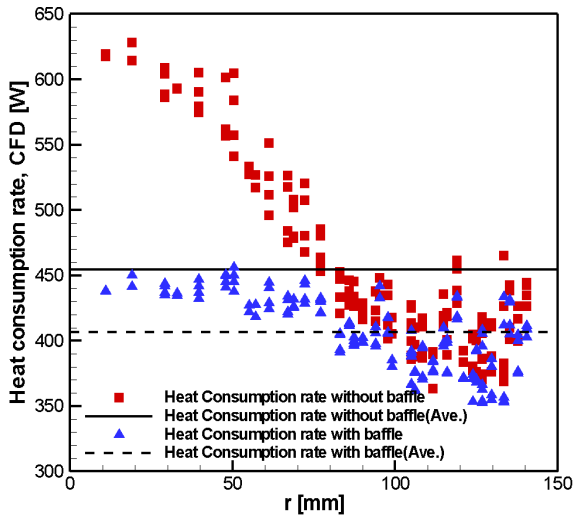


Fig. 8 Variation of heat consumption rate along the radial direction

이러한 점에서, 유동분배관의 설치로 비록 총괄전열의 상승은 다소 줄어들었지만 열적 분배의 균일성은 보장되는 이점이 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 수치 해석적 기법을 통해 원통-다관형 열교환기의 다관측 입구부에 설치된 유동분배관의 영향에 대한 두 번째 연구로 전열 특성의 관점에서 해석 하였다.

본 연구의 운전조건에서는 분배관을 설치하면 전열량 측면에서 성능이 약간 저하되지만, 각 관에 유동과 전열 특성이 균일해 짐으로써 장기간 운전에서 관의 안정된 성능을 보장할 수 있다는 이점을 예상할 수 있다.

추후 연구에서는 운전 및 형상 등 다양한 설계 변수 관점에서 유동분배관의 영향을 정성적 및 정량적으로 해석하여 열교환기의 성능 향상에 도움이 되고자 한다.

#### 후 기

본 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 대학중점연구소 지원 사업(2012-048078)과 기초연구사업(2013-008918), 부산특구연구개발사업의 LNG선용 2stage MSF 형 증발식 담수장치 상용화 과제의 지원을 받았습니 다. 박영민, 이태호 군은 BK21 플러스사업 차세대기계항공 창의인재양성사업단의 참여 대학원생입니다.

#### References

- [1] 2011, Lee, J.H., "Greenhouse Gases Reduction Technology Strategy Road Map: Heat Exchanger," (in Korean) *Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning*.
- [2] 1988, Mueller, A.C. and Chiou, J.P., "Review of Various Types of Flow Maldistribution in heat Exchangers," *Heat Transfer Engineering*, Vol.9, No.2, pp.36-50.
- [3] 2006, Wen, J., Li, Y., Zhou, A. and Zhang, K., "An Experimental and Numerical Investigation of Flow Patterns in the Entrance of Plate-Fin Heat Exchanger," *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol.49, pp.1667-1678.
- [4] 2004, Wen, J. and Li, Y., "Study of Flow Distribution and Its Improvement on The Header of Plate-Fin Heat Exchanger," *Cryogenics*, Vol.44, pp.823-841.
- [5] 2013, Mohammadi, K. and Malayeri, M.R., "Parametric Study of Gross Flow Maldistribution in a Single-pass Shell and Tube Heat Exchanger in Turbulent Regime," *Int. J. of Heat and Fluid Flow*, Vol.44, pp.14-27.
- [6] 2013, Tu, C., Wang, K., Park, S. and Kim, H., "Experimental Study of Inlet/Outlet Flow Characteristics of Tube-side in the Shell and Tube Heat Exchanger," (in Korean) *J. KSME(B)*, Vol.38, No.7, pp.581-588.
- [7] 2015, Wang, K., Tu, C., Bae, C. and Kim, H., "Optimal Design of Porous Baffle to Improve the Flow Distribution in the Tube-side Inlet of a Shell and Tube Heat Exchanger," *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol.80, pp.865-872.
- [8] 2014, Park, Y.M., Chung, H.T. and Kim, H.B., "Numerical Study on the Performance Characteristics of Shell and Tube Heat Exchangers: Part(I)\_ Flow Characteristics," (in Korean) *J. Comput. Fluids Eng.*, Vol.19, No.3, pp.20-23.
- [9] 2013, Wang, K, Tu, C. and Kim, H., "CFD Simulation and PIV measurement of a shell and tube heat exchanger," *PfVIP-9, Busan, Korea*, pp.398-401.
- [10] 2007, "CFX User's Guide," ANSYS Inc.,
- [11] 2015, Tu, C., Kim, S., Chung, H. and Kim, H., "Experimental Study on the Complex Features in the Inlet of STHX by Flow Distributors," *ISMAI-10, Jinju, Korea*, pp.233-234.
- [12] 2015, Wang, J., Chung, H. and Kim, H., "Numerical Simulation of the Effect of the Inlet Flow Conditions on the Heat Transfer inside the Circular Tube," *ISMAI-10, Jinju, Korea*, pp.227-232.