

배플 구조변경이 Shell-Tube 열교환기의 열전달성능에 미치는 영향

후영영¹, 조정권¹, 윤준규², 임종한^{*}

¹가천대학교 대학원 기계공학과, ²가천대학교 기계공학과

Effects of Baffle Structure Variation on Heat Transfer Performance in a Shell-Tube Heat Exchanger

Rong-Rong Hou¹, Joeng-Kwon Cho¹, Jun-Kyu Yoon², Jong-Han Lim^{2*}

¹Dept. of Mechanical Engineering, Graduate School, Gachon Univ.

²Dept. of Mechanical Engineering, Gachon Univ.

요약 셸-튜브 열교환기는 다양한 크기와 유동형태로 쉽게 제작이 용이함으로 산업분야에 널리 이용된다. 본 연구에서는 열교환기의 열전달성능을 도모하고자 배플의 컷 방향, 배플의 경사각 및 배플의 회전각 등을 변경하여 ANSYS FLUENT v.14를 사용한 SST $k-\omega$ 난류모델을 적용하여 셸 내부의 열전달률 및 압력강하 특성을 해석하였다. 그 해석결과로 배플의 컷 방향은 수평형 모델 A보다 수직형 모델 B 및 각도 45°형 모델 C가 이 열전달성능이 향상되는 것으로 나타났다. 또한 배플의 경사각을 10°로 적용한 경우와 배플의 회전각을 0°-90°-180°-270°로 배치한 모델 D의 경우가 열전달률 및 압력강하 특성이 우수한 결과를 나타냈다.

Abstract Shell-tube heat exchanger is widely applied in industrial field by easily manufacturing as to various size and flow patterns. In this study, by changing baffle's cut direction, tilt angle and rotational angle as well as by using SST (Shear Stress Transport) $k-\omega$ turbulence model in ANSYS FLUENT v.14, the heat transfer rate and pressure drop characteristics of inner shell will be analyzed to improve heat transfer ability. As a result of analysis, heat transfer performance according to cut direction of baffle has been improved with vertical model B and angle 45° model C than horizontal model A. In addition, the tilt 10° of the baffle and rotational angle 0°-90°-180°-270° of model D showed better result in heat transfer rate and pressure drop.

Key Words : Baffle Structure, Heat Transfer, Shell-Tube Heat Exchanger, SST Turbulent Model

1. 서론

최근 전열강화기술의 발전에 따른 에너지절약 및 생산성향상을 도모하기 위해 열교환기의 다양한 구조변경에 대한 해석연구가 활발히 진행되고 있다. 이로 인해 에너지가 부족함에 따라 가용열원의 온도를 낮추면서 열교환기 온도차를 가급적 낮추는 열교환기시스템의 신기술 개발에 대한 설계적용방안이 요구되고 있다[1-2]. 열교환기는 발전소, 석유화학공장, 선박 등 산업공정 전 분야

에 광범위하게 사용되고 있으며, 이 열교환기의 종류로는 전열면의 형상과 배열, 재료와 구조에 따라 이중관형 핀-튜브형, 셸-튜브형, 관형, 셸-플레이트형 히트파이프형 등이 있다. 그중에서도 셸-튜브 열교환기는 체적에 대한 열전달면적의 비가 크고, 다양한 크기와 유동형태로 쉽게 제작이 쉬우며 구조재료의 선택범위가 넓어서 조작성의 탄력성이 용이하여 폭넓게 이용되고 있다[3].

이와 관련된 연구동향으로서 Oh 등[4]은 단일관 열교환기에 대해 실험과 수치해석을 통해 주어진 유량조건에

*Corresponding Author : Jong-Han Lim (Gachon Univ.)

Tel: +82-31-750-5650 email: kkjong@gachon.ac.kr

Received January 19, 2015

Revised (1st February 16, 2015, 2nd March 9, 2015)

Accepted May 7, 2015

Published May 31, 2015

서 배플의 높이 및 수 등을 변경하여 열전달특성을 비교하여 고찰하였고, Hong 등[5]는 셸측의 유로길이와 방향전환을 최소화시켜 유체혼합 및 대류열전달을 효과적으로 증진시킬 수 있는 오리피스 배플과 원형 핀의 조합으로 구성된 환형 배플을 적용하여 수치해석을 통하여 열전달 및 압력강하에 미치는 영향을 고찰하여 전열성능의 개선안을 제시하였고, Shin 등[6]은 단일직관 셸-튜브 열교환기에 대해 배플의 수를 3~11개 범위로 설정하여 수치해석을 통해 배플 수에 따른 열전달특성에 미치는 영향을 고찰하였다. A. Tandiroglu 등[7]은 셸-튜브 열교환기에서 배플을 갖는 원형 관내에 유동형상의 주요인자인 튜브의 입구직경비, 배플의 각도, 배플의 면적비, 튜브의 길이와 배플의 간격비 및 레이놀즈수의 변화 등을 적용하여 이들 인자에 대한 강제대류 열전달특성을 비교하여 연구를 수행하였다. Thundil 등[8]는 셸-튜브 열교환기에서 튜브에 흐름경로를 형성하기 위해 셸측에 따라 6가지 배플의 방향을 위방향 및 아랫방향으로 교대로 설치하고, 배플의 경사각을 변화시켜 열전달특성을 고찰하였다.

본 연구에서는 Oh 등[4]이 고찰한 셸-튜브 열교환기의 열전달특성을 비교하기 위해 수치해석적으로 검증하였고, 배플의 컷 방향, 배플의 경사각 및 배플의 회전각 등의 다양한 구조를 변경하여 열전달 및 압력강하 특성에 미치는 영향을 고찰하였다.

2. 본론

2.1 해석모델

본 연구에서는 ANSYS v.14의 전처리 프로그램인 Design Modeler를 이용하여 셸-튜브 열교환기의 구조를 모델링하였으며, 해석모델의 형상 및 제원은 각각 Fig. 1 및 Table 1에 나타내었다. 여기서 셸 및 배플의 표면은 유체의 유동형태에 영향을 받지 않도록 단일상태로 가정하였다.

2.2 난류모델

열교환기의 내부유동은 3차원 정상상태, 비압축성 난류유동으로 가정하였으며, 지배방정식으로는 기본적인 연속방정식, 운동량방정식 및 에너지방정식, 에너지소산율방정식 등을 적용하였고, 본 연구에서는 적합한 난류모델을 설정하기 위해 기존에 상용화되고 있는 Standard

$k-\epsilon$ 모델, RNG(Re-Normalization Group) $k-\epsilon$ 모델, SST(Shear Stress Transport) $k-w$ 모델을 사용하였다.

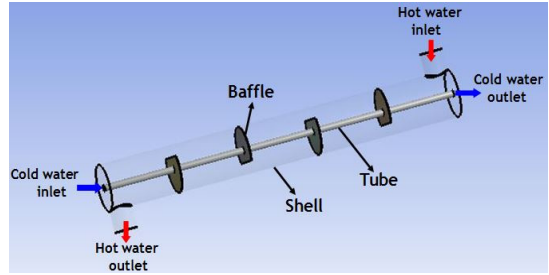


Fig. 1. Geometry of the shell-tube heat exchanger

Table 1. Configuration of shell and tube

	Contents	Size(mm)
Shell	Diameter	114.3
	Length	900
Tube	Diameter	15.88
	Length	900
Baffle	Thickness	0.8

2.3 수치해석

본 연구의 수치해석을 위한 모델의 격자계는 Fig. 2에 나타난바와 같이 ANSYS FLUENT Meshing Tool을 이용하여 삼각형격자와 사면체격자로 구성하였고, 물리적인 구배가 심하게 나타날 것으로 예상되는 유체부와 고체부가 만나는 부분에는 좀 더 조밀하게 격자를 생성하도록 하였으며, 격자수는 약 120만개로 하였다.

본 연구의 해석코드는 FLUENT v.14를 사용하였고, 수치해석을 위한 경계조건은 Table 2에서 나타내고 있으며, 셸-튜브 열교환기에서 난류모델의 민감도평가를 얻고자 Oh 등[4]이 고찰한 실험값을 비교하기 위해 입구의 속도와 온도 범위를 동일하게 적용하였다.

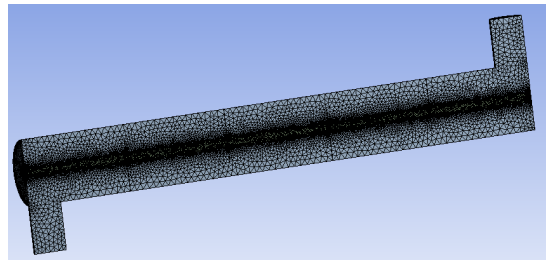


Fig. 2. Comprehensive mesh for the shell-tube heat exchanger

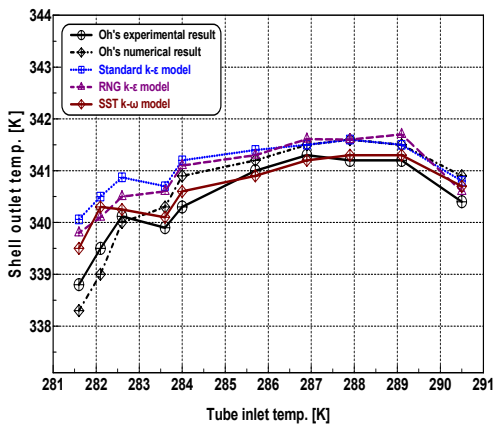
또한 수치해석시 쉘-튜브와 유체유동에 대해서는 올바른 압력장을 구하는 SIMPLE 알고리즘[11]을 이용하였고, 난류유동과 에너지방정식이 활성화된 경우 벽함수를 기반으로 해서 얻어진 열전달계수를 산출하였다.

Table 2. Boundary conditions of shell and tube

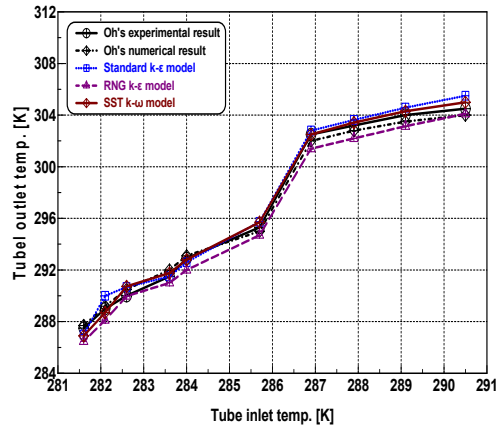
Hot water (shell)	Inlet temperature [K]	344
	Inlet flow rates [l/min]	6, 12, 18, 24
	Inlet velocity [m/s]	0.04, 0.08 0.12, 0.16
	Outlet pressure [Pa]	0
Cold water (tube)	Inlet temperature [K]	284
	Inlet flow rates [l/min]	4.5
	Inlet velocity [m/s]	0.43
	Outlet pressure [Pa]	0

2.4 난류모델의 타당성 검증

Fig. 3은 정확한 수치해석을 검증하기 위해 기존의 난류모델인 Standard $k-\epsilon$ 모델, RNG $k-\epsilon$ 모델, SST $k-w$ 모델을 사용하여 Oh 등[4]이 수행한 실험 및 해석의 결과와 비교하기 위해서 동일한 기하학적 형상 및 입구속도조건에 대하여 얻어진 쉘-튜브의 출구온도특성을 나타내었다. 그 결과로 쉘출구온도 및 튜브출구온도의 실험값에 비해 해석값의 평균오차범위는 Standard $k-\epsilon$ 모델의 경우가 0.12~0.19%, RNG $k-\epsilon$ 모델의 경우가 0.15~0.25%, SST $k-w$ 모델의 경우가 0.04~0.07%로 나타나어 3가지 난류모델 중에서 SST $k-w$ 난류모델이 민감도분석에서 실험값과 가장 근사한 결과를 얻게 되어 수치해석의 타당성을 검증할 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 SST $k-w$ 난류모델을 적용할 수 있었다.



(a) Shell outlet temperature



(b) Tube outlet temperature

Fig. 3. Outlet temperature characteristics of shell and tube

3. 결과 및 고찰

3.1 배플 컷 방향의 열전달 및 압력강하 특성

Table 3는 배플 컷 방향에 따른 열전달 및 압력강하의 특성을 고찰하기 위해 모델의 종류를 나타내고 있으며, 경계조건은 Table 2의 값을 적용하였다.

Table 3. Position of baffle cut direction

Baffle cut direction		
Horizontal model A	Vertical model B	Angle 45° model C

Fig. 4와 Fig. 5는 배플 컷 방향에 따라 입구속도를 변화시켰을 때 열전달 및 압력강하의 특성을 나타낸 것이다. Fig 4의 결과로 열전달특성은 입구유속의 증가에 따라 열전달률이 증가됨을 알 수 있으며, 특히 수직형 모델 B가 각도 45°형 모델 C보다 열전달률의 특성이 가장 우수하게 나타남을 알 수 있었다. 이는 유체가 유입할 때부터 유체가 y방향 수직으로 유입된 유동의 와류(swirl)가 y방향만이 아닌 y-x방향으로 모두 영향을 받아 유로의 시간이 상대적으로 길어져서 수직형 모델 B가 각도 45°형 모델 C보다 열전달하는 시간을 충분히 유지함으로써 열전달 특성을 더욱더 촉진시킴을 알 수 있었다.

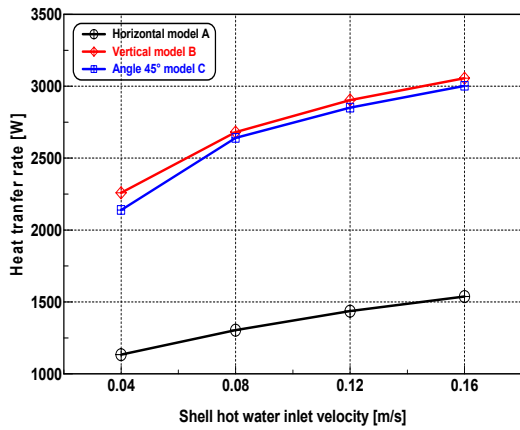


Fig. 4. Heat transfer characteristics according to the variation of baffle cut direction

Fig 5의 결과로 유속이 증가함에 따라 압력강하도 선형적으로 증가함을 알 수 있으며, C>B> A 모델 순으로 압력강하가 소폭의 차이로 나타지만, 각도 45°형 모델 C가 다소 와류의 영향을 받고 있는 것을 알 수 있었다. 그러나 이 3가지 모델은 배플의 배치와 면적이 동일하고, 배플 컷 방향만 다를 뿐 압력강하에는 크게 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다. 따라서 열전달특성을 고려한다면 수직형 모델 B가 가장 우수한 배플 배치임을 확인할 수 있었다.

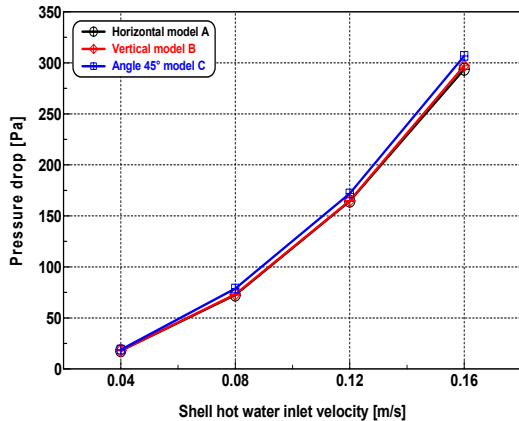


Fig. 5. Pressure drop characteristics according to the variation of baffle direction

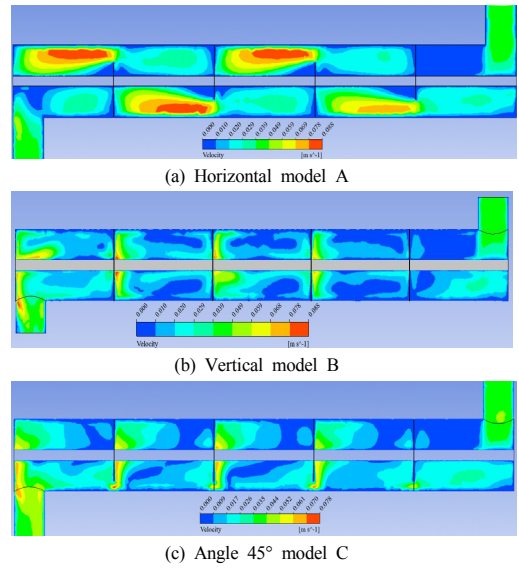


Fig. 6. Velocity contour according to the variation of baffle cut direction

Fig. 6과 Fig. 7은 셸의 입구유량 6 l/min 조건에서 배플 컷 방향에 따라 수평형 모델 A, 수직형 모델 B 및 각도 45°형 모델 C에 대하여 열교환기 내부의 중간부분을 해석한 속도분포 및 압력분포의 특성을 나타낸 것이다.

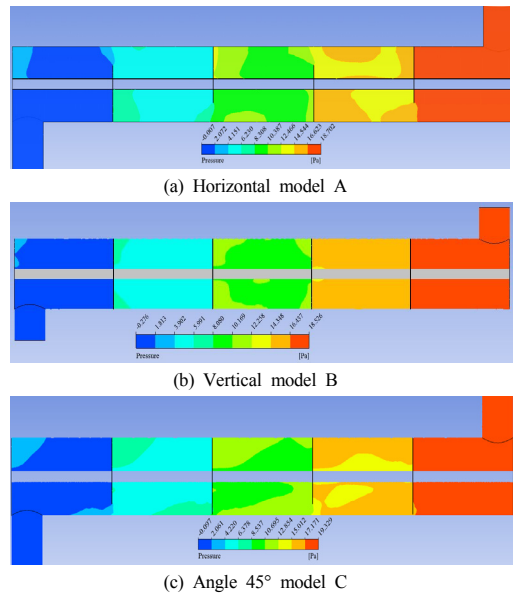


Fig. 7. Pressure drop contour according to the variation of baffle cut direction

유체가 배플을 지날 때 수직형 모델 B와 각도 45°형 모델 C는 수평형 모델 A보다 구조상 유체속도가 느려져 유체가 튜브와의 접촉하여 정체시간이 길어짐으로써 열전달특성이 더 양호함을 나타내었다. 결과적으로 열전달 및 압력강하의 특성을 고려할 때 수직형 모델 B가 각도 45°형 모델 C보다 압력강하는 다소 떨어지지만 열전달 특성이 가장 우수하여 설계시 고려될 수 있는 좋은 배플의 형상으로 사료된다.

3.2 배플 경사각의 열전달 및 압력강하 특성

Table 4는 배플 경사각에 따른 열전달 및 압력강하의 특성을 고찰하기 위해 모델의 종류를 나타내고 있으며, 경계조건은 Table 2의 값을 동일하게 적용하였다.

Table 4. Position of baffle tilt

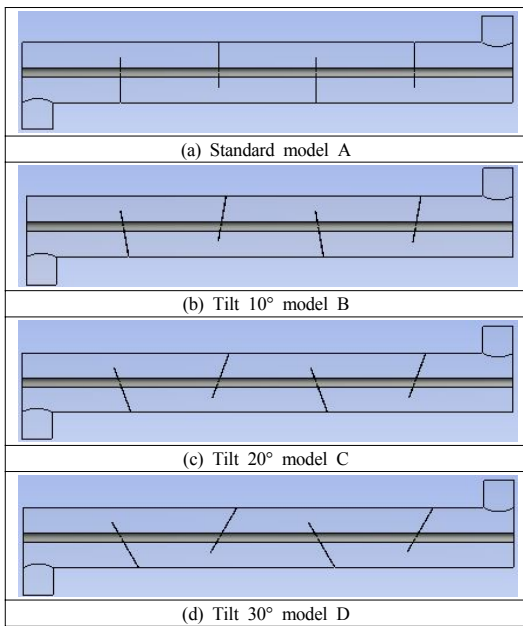


Fig. 8과 Fig. 9는 배플 경사각에 따라 입구속도를 변화시켰을 때 열전달 및 압력강하의 특성을 나타낸 것이다. Fig. 8의 결과로 배플 경사각을 크게 하고 유속을 증가시킴으로써 열전달률이 낮아짐을 알 수 있었다. 이는 경사각이 커질수록 유속이 증가함에 따라 배플 후면에서의 정체시간이 짧아져 열전달효과가 떨어지기 때문이라 사료된다.

Fig. 9의 결과로 배플 경사각이 클수록 열전달특성이 낮아지는 반면에 압력강하도 낮아짐을 알 수 있었다. 이

는 배플 경사각이 클수록 유체가 상대적으로 넓은 유로를 통과하여 배플 후면에서의 와류발생이 적음으로 압력강하의 영향을 작게 받음을 알 수 있다. 결과적으로 유체의 유동형태를 고려해 볼 때 경사각 10° 모델 B가 높은 열전달특성을 보이며, 압력강하도 적절한 결과를 보여 가장 양호한 모델로 고찰할 수 있었다.

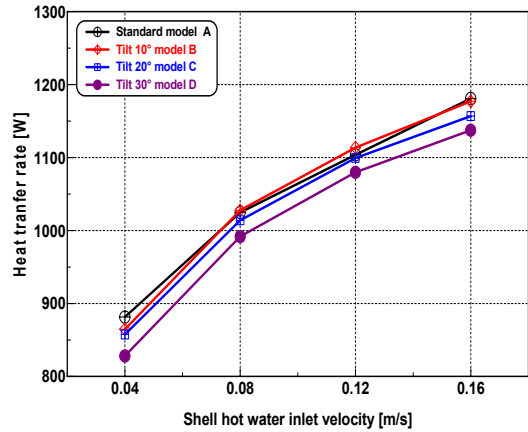


Fig. 8. Heat transfer characteristics according to the tilt of baffle

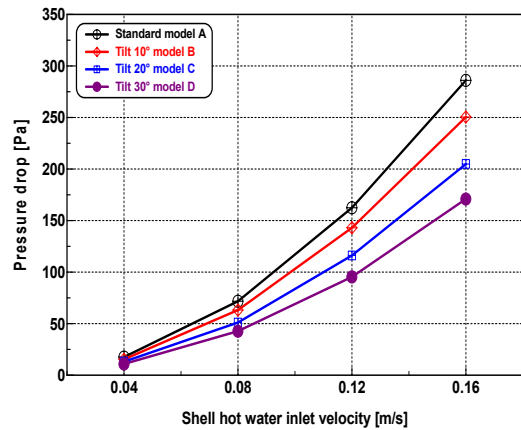
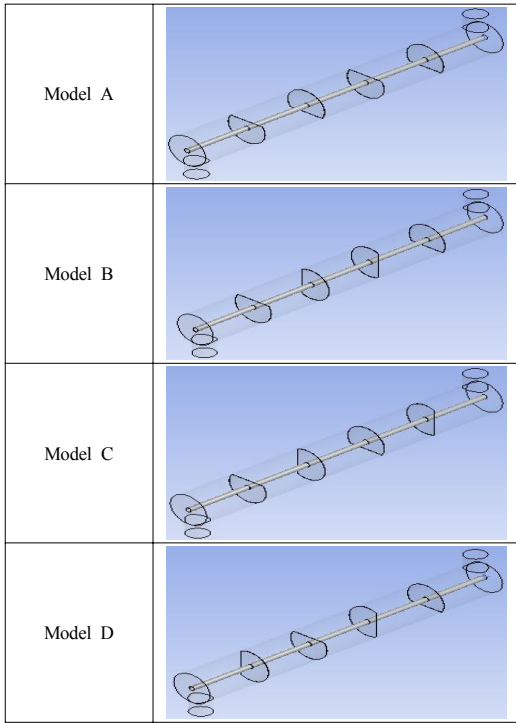


Fig. 9. Pressure drop characteristics according to the tilt of baffle

3.3 배플 회전각의 열전달 및 압력강하 특성

Table 5는 배플 회전각의 배치에 따른 열전달 및 압력강하의 특성을 고찰하기 위해 모델의 종류를 나타내고 있으며, 경계조건은 Table 2의 값을 동일하게 적용하였다.

Table 5. Rotational angle arrangement of baffle



여기서 배플 회전각의 배치는 유체가 입구부터 셸-튜브에 수평방향을 기준하여 모델 A는 0°-180°-0°-180° 순이고, 모델 B는 0°-90°-270°-180° 순이고, 모델 C는 90°-0°-270°-180° 순이고, 모델 D는 0°-90°-180°-270° 순으로서 일정한 간격으로 설치한 것이다.

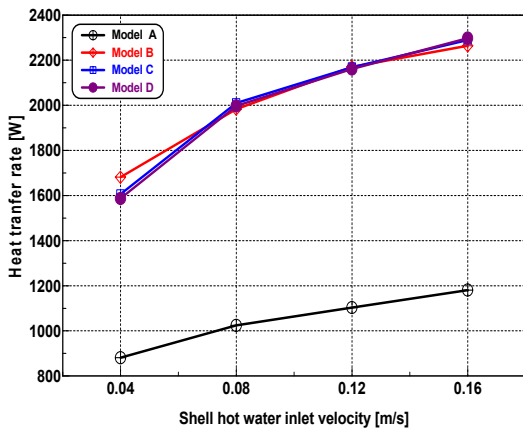


Fig. 10. Heat transfer characteristics according to rotational angle of baffle

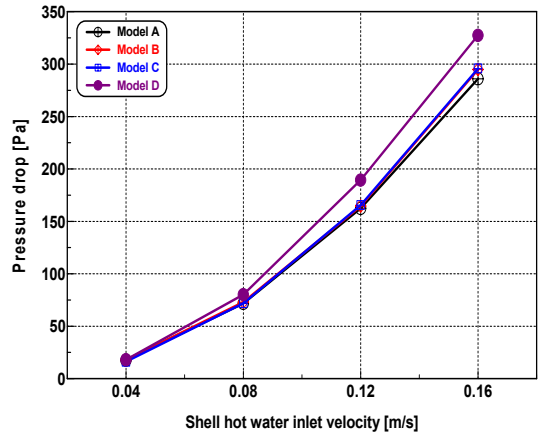


Fig. 11. Pressure drop characteristics according to rotational angle of baffle

Fig. 10과 Fig. 11는 배플 회전각의 배치에 따라 입구 속도를 변화시켰을 때 열전달 및 압력강하의 특성을 나타낸 것이다. Fig. 10의 결과로 유속의 증가에 따라 모델 B, C 및 D가 모델 A보다 열전달이 훨씬 향상됨을 알 수 있었다. 이는 셸 내부유동의 흐름이 전체적으로 입구측에서 다음 배플로 넘어갈 때 유체의 체순환영역의 영향을 받아 열전달특성을 크게 촉진시키는 효과라 여겨진다. Fig. 11의 결과로 유속에 따른 배플 회전각에 따른 압력강하의 특성을 보면, 모델 D가 압력강하가 가장 크게 나타났다.

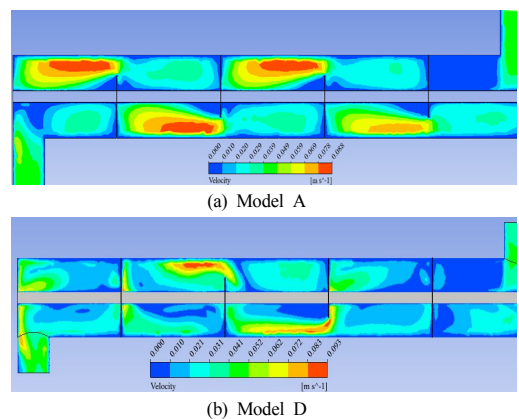


Fig. 12. Velocity contour according to rotational angle of baffle

이는 입구측의 배플 회전각을 수직으로 배치하면 유속의 영향을 크게 받음으로써 압력손실이 크게 발생함을

알 수 있었다. 그 결과로 Fig. 12와 Fig. 13에서 모델 A와 모델 D에 대하여 열교환기 내부를 해석한 속도분포 및 압력분포를 나타낸바와 같이 배플을 수직으로 한 모델 D가 유동흐름의 간섭으로 유속이 감소함으로써 압력강하가 크게 일어남으로 열전달특성을 고려한 배플 회전각의 배치를 잘 고려할 필요가 있다.

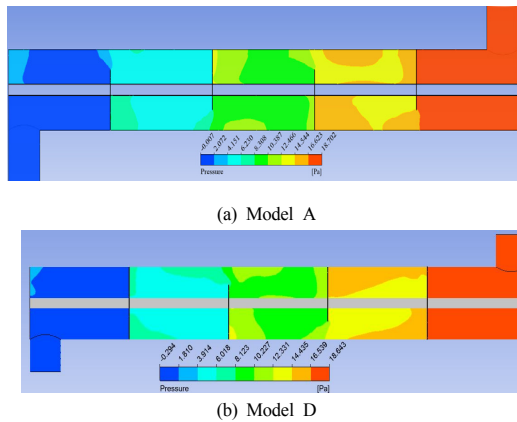


Fig. 13. Pressure drop contour according to rotational angle of baffle

4. 결론

본 연구에서는 Oh 등[4]이 고찰한 쉘-튜브 열교환기의 열전달특성을 비교하기 위해 수치해석적으로 검증하였고, 배플의 컷 방향, 배플의 경사각 및 배플의 회전각 등의 다양한 구조를 변경하여 열전달 및 압력강하 특성에 미치는 영향을 고찰한 결과는 다음과 같다.

- (1) 쉘-튜브 열교환기의 열전달특성을 정확히 해석하기 위해서 여러 난류모델 중에서 민감도평가에서 가장 양호한 SST 난류모델이 가장 적합하게 나타났다.
- (2) 쉘의 입구유량을 6 l/min로 동일한 조건에서 배플 컷방향에 따른 영향으로 수직형 모델 B가 수평형 모델 A보다 열전달 및 압력강하 특성상 가장 양호하게 나타났다.
- (3) 배플의 경사각에 따른 열전달 및 압력강하의 특성은 경사각 10° 모델 B가 높은 열전달특성을 나타내며, 압력강하도 적절한 결과를 보였다.

- (4) 배플 회전각의 배치에 따른 열전달 및 압력강하의 특성은 전체적으로 입구측에서 배플로 넘어갈 때 유체의 전열효과와 재순환영역을 잘 보여준 0°-90°-180°-270°로 배치한 모델 D가 가장 양호하게 나타내었다.

따라서 배플이 장착되는 쉘-튜브 열교환기에는 유체의 박리현상, 속도의 크기, 와류생성 등의 영향을 고려하여 배플의 설계인자를 적절하게 조합시킨다면 열교환기의 열전달성능은 더욱 더 향상될 것으로 사료된다.

References

- [1] Deng, S.J., "Shell and tube heat exchangers to improve heat transfer performance of the way," Chinese Journal of Chemical Engineering, vol.20, no.2, pp.30-36, 1992.
- [2] Ichiro Tanasawa, "Heat full latest trends in technology research and development," Japanese of Piping Technology, vol.30, no.7, pp.51-56, 1988.
- [3] M. Z. Shi, "Principle and design of heat exchangers", Southeast university press IV, pp. 1-6. 2009.
- [4] G. N. Oh, Y. D. Jun and K. B. Lee, "Research of heat transfer characteristics with baffle parameters in shell and tube heat exchanger", Society of Air-conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, vol. 22, no.9, pp.599-604, 2010.
- [5] J. A. Hong, J. D. Jun and K. B. Lee, "A simulation do single-tube heat exchanger with annular baffles", Society of Air-conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, pp. 1029-1034. 2012.
- [6] Y. H. Shin, H. D. Jeong, J. H. Lee and H. S. Chung, "A numerical study of heat transfer and flow characteristics in shell and tube heat exchanger", Society of Air-conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, pp.1070-1073. 2011.
- [7] A. Tandiroglu, "Effect of flow geometry parameters on transient heat transfer for turbulent flow in a circular tube with baffle inserts", International Journal of Heat and Mass Transfer, vol.49, pp. 1559 - 567, 2006.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.01.018>
- [8] Thundil Karuppa Raj, R. and Srikanth GANNE, "Shell side numerical analysis of a shell and tube heat exchanger considering the effects of baffle inclination angle on fluid flow", Thermal Science, vol.16, no.4, pp. 1165-1174, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.2298/TSCI110330118R>

[9] J. E. Bardian, P. G. Huang and T. J. Coakley, "Turbulence Modeling Validation," ALAA, pp. 98-212. 1997.
DOI: <http://dx.doi.org/10.2514/6.1997-2121>

[10] ANSYS Fluent Theory Guid, ANSYS Fluent v.14. 2013.

[11] J. Y. Park and J. H. Baek, "A comparative study of PISO, SIMPLE, SIPMLE-C algorithms in 3-dimensional generalized coordinate systems", Trans. Korean Society for Computational Fluids Engineering, vol.1, pp. 26-34. 1996.

후 영 영(Rong-Rong Hou)

[정회원]



- 2013년 2월 : 가천대학교 기계-자동차공학과 (공학학사)
- 2015년 2월 : 가천대학교 대학원 기계공학과 (공학석사)

<관심분야>
열전달, CFD

조 정 권(Joeng-Kwon Cho)

[준회원]



- 2000년 2월 : 서울과학기술대학교 기계공학과 (공학학사)
- 2002년 2월 : 고려대학교 대학원 기계공학과 (공학석사)
- 2014년 3월 ~ 현재 : 가천대학교 대학원 기계공학과 박사과정

<관심분야>
열공학, 자동차공학

윤 준 규(Jun-Kyu Yoon)

[정회원]



- 1987년 8월 : 경희대학교 대학원 기계공학과 (공학석사)
- 2001년 2월 : 명지대학교 대학원 기계공학과 (공학박사)
- 1996년 3월 ~ 현재 : 가천대학교 기계공학과 교수

<관심분야>
열유체공학, 자동차공학

임 종 한(Jong-Han Lim)

[정회원]



- 1986년 2월 : 경희대학교 대학원 기계공학과 (공학석사)
- 1992년 8월 : 경희대학교 대학원 기계공학과 (공학박사)
- 1995년 3월 ~ 현재 : 가천대학교 기계공학과 교수

<관심분야>
열유체공학, 자동차공학