

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2015.39.3.223>

ISSN 1226-4881(Print)
2288-5324(Online)

배플과 관군간의 적정 누설유동을 이용한 셸-관 열교환기의 성능향상

Nguyen Van Hap* · 이근식*†

* 울산대학교 기계공학부

Enhancement of Performance of Shell and Tube Heat Exchanger Using Pertinent Leakage Flow Between Baffle and Tube Bundles

Nguyen Van Hap* and Geun Sik Lee*†

* School of Mechanical Engineering, Univ. of Ulsan

(Received August 12, 2014 ; Revised December 18, 2014 ; Accepted January 11, 2015)

Key Words : Leakage Flow(누설유동), Shell-and-Tube Heat Exchanger(셸-관 열교환기), Baffle(배플), Heat Transfer (열전달), Pressure Drop(압력강하), Performance Enhancement(성능향상)

초록 : 배플과 관군간의 누설유동이 셸-관 열교환기 성능에 미치는 영향을 FLUENT 를 사용하여 조사하였다. 셸측 출구온도를 최대로 하는 최적누설유동을 찾기 위해 셸측 단면적에 대한 누설단면적 비가 0%-40% 범위의 5 가지 누설유동을 가진 셸-관 열교환기에 대하여 CFD 모델이 개발되었다. 관 입구 및 벽면온도를 일정하게 유지하고 Reynolds 수를 4952 부터 14858 증가시키면서 유동장 및 온도장을 계산하였다. 해석결과, 출구온도, 압력강하, 열전달률은 Reynolds 수뿐만 아니라 누설유동에도 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 누설유동은 열전달률과 압력강하를 동시에 낮추는 결과를 제시한 기존의 결과와는 달리, 본 연구에서는 적정의 누설유동은 배플 주위의 재순환영역에 추가적인 모멘텀을 공급함으로써 최대출구온도, 작은 압력강하, 높은 열전달률을 유도하는 효과를 발휘하는 새로운 결과를 얻었다. 20%의 누설단면적이 최적의 누설단면적으로 나타났다.

Abstract: In this study, the effects of the leakage flow between the baffle and tube bundles on the performance of a shell and tube heat exchanger (STHE) were examined using the commercial software ANSYS FLUENT v.14. A computational fluid dynamics model was developed for a small STHE with five different cases for the ratio of the leakage cross-sectional area to the baffle cross-sectional area, ranging from 0 to 40%, in order to determine the optimum leakage flow corresponding to the maximum outlet temperature. Using fixed tube wall and inlet temperatures for the shell side of the STHE, the flow and temperature fields were calculated by increasing the Reynolds number from 4952 to 14858. The present results showed that the outlet temperature, pressure drop, and heat transfer coefficient were strongly affected by the leakage flow, as well as the Reynolds number. In contrast with a previous researcher's finding that the leakage flow led to simultaneous decreases in the pressure drop and heat transfer rate, the present study found that the pertinent leakage flow provided momentum in the recirculation zone near the baffle plate and thus led to the maximum outlet temperature, a small pressure drop, and the highest heat transfer rate. The optimum leakage flow was shown in the case with a ratio of 20% among the five different cases.

- 기호설명 -

CFD : 전산유체역학
ECM : 에너지보존방법
LMTD : 대수평균온도차

G_s : 셸측 질량플럭스
 A_{cr} : 유동 단면적
 D_{olt} : 외부 관지름 한계값
 p_t : 관 피치
 X_t : 횡방향 관 피치
 L_{bc} : 배플 중앙 간격
 d_0 : 관 지름

† Corresponding Author, gslee@mail.ulsan.ac.kr

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

D_s : 셸 지름

1. 서 론

열교환기는 화력발전플랜트, 공조냉동, 화학 및 정유산업, 식품가공산업 등에서 널리 사용되는 주요 장치 중의 하나이다. 셸-관, 직접 접촉, 나선형, 관형 열교환기 등 여러 종류의 열교환기 중에서, 셸-관 열교환기(Shell and Tube Heat Exchanger, STHE)는 엄격한 기하학 구조, 쉬운 유지 보수와 업그레이드 가능성 때문에 열교환기의 약 40%를 차지하고 있다.^(1,2)

열교환기 설계의 목적은 열전달률을 최대로 하고 압력강하를 최소화하는 것이다. 그러나 이들은 서로 상반되는 경향을 가지므로 설계자의 의도에 따라 적정 타협점으로 설계되는 것이 보통이다. 관내 압력강하에 대하여는 비교적 간단하게 계산되지만 셸측 압력강하의 계산은 다소 복잡하다.⁽³⁾

최근 셸-관 열교환기의 열유동을 해석 및 실험적으로 상세히 조사하는 데 대한 관심이 고조되고 있다. Kapale 과 Chad⁽³⁾는 셸측 압력강하에 대한 이론적 모델을 개발하였다. 레이놀즈 수 10^3 과 10^5 에 대한 본 모델의 계산결과는 다른 연구자들에 의해 개발된 이론적 실험적 결과와 잘 일치함을 보여 주었다. Li 와 Kottke⁽⁴⁾는 셸과 배플 사이의 누설이 있는 셸-관 열교환기의 셸측 열전달과 압력강하를 구하는 실험을 하였으며, 누설유동의 존재로 인한 열전달 및 압력강하가 동시에 감소함을 밝혔다. Vera-Garcia 등⁽⁵⁾은 냉동사이클의 증발기와 응축기에서 작동하는 셸-관 열교환기의 모델과 열전달계수를 계산하는 데 사용되는 관계식을 제안하였다. 이들 모델은 실험으로 입증되었다. 증발기의 경우 냉각부하와 증발기 출구 냉매온도의 실험자료는 제안된 모델과 잘 일치하였다. 응축기의 경우 가열부하의 정확도는 $\pm 7\%$ 이내이며 출구 냉매의 온도차는 $\pm 6^\circ\text{C}$ 오차의 범위이었다. 비용 최적화에 대한 몇 가지 연구들도 수행되었다. Allen 과 Gosselin⁽⁶⁾은 응축을 동반하는 셸-관 열교환기의 총비용을 평가하였다. 최적화는 유전자 알고리즘에 기초하여 셸-관 열교환기의 11 개 변수를 최적화하였으며, 이 중 10 개 변수는 기하학적 형상이며 11 번째 변수는 작동유체이다. Sanye 과 Hajabdo⁽⁷⁾는 유전자 알고리즘을 적용하여 효율을 최대화하고 총비용을 최소화하는 다목적 최적화 (multi-objective optimization)를 수행하였다. 10 개 기

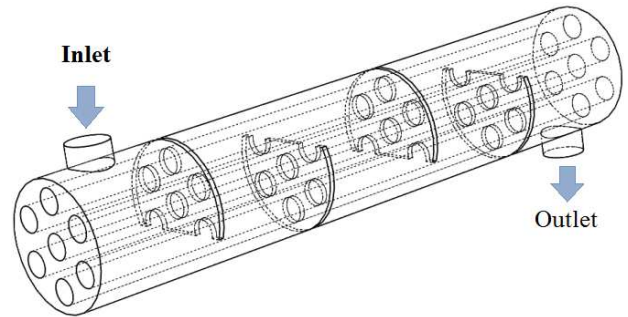


Fig. 1 The computational model

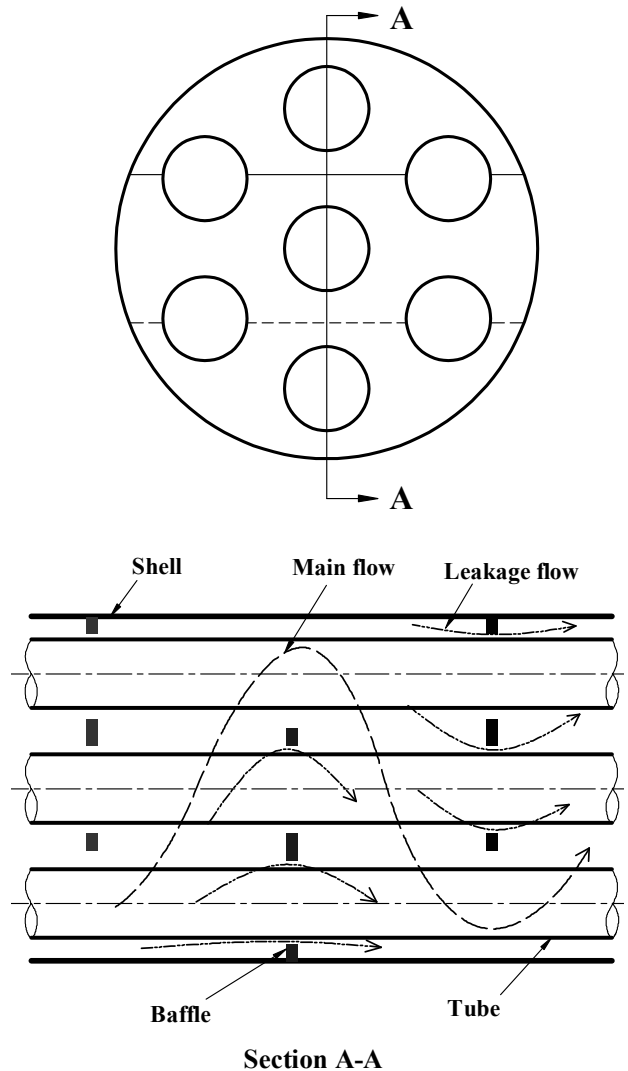


Fig. 2 Leakage flows and cross sectional view

하학적 형상 변수는 중요한 설계변수로서, 이들 두 목적함수(효율 최대화와 총비용 최소화)는 상반됨을 보여주었다. 한편 상용소프트웨어^(2,8,9)를 사

Table 1 Computational and geometric parameters

Items	Dimensions
Shell diameter, D_s	75mm
Shell length	400mm
Tube diameter, d_0	15mm
Tube bundle geometry	60°
Tube pitch	22mm
Number of tubes	7
Baffle cut	25%
Baffle spacing	80mm
Number of baffles	4
Ratio of leakage to baffle cross-section area	0,15,20,30,40%
Shell inlet temperature	300K
Tube wall temperature	373K
Reynolds number	4952-14858

용한 셸-관 열교환기의 CFD 모델이 개발되고 연구되었다. Zhang 등⁽¹⁰⁾은 40° 의 헬리컬 각도를 갖는 셸-관 열교환기를 수치해석한 결과 실험자료와 잘 일치함을 보여 주었다.

앞의 연구조사에서는 열전달 및 압력강하가 동시에 감소함을 밝혔지만, 셸유동의 배플과 관군의 부사이의 누설유동을 조절하면 적정 압력강하 범위 내에서 최대의 열전달량 혹은 최대출구온도를 얻을 가능성이 있을 것으로 착안하여, 이를 조사하는 것이 본 연구를 시작하게 된 주요 동기이다. 그러나 지금까지 셸측 배플과 관군 사이의 적정의 누설유동으로 셸-관 열교환기의 성능향상을 도모한 연구는 없다.

본 연구에서는 배플과 관군외부 사이의 누설유동이 발생하는 소형 셸 크기를 갖는 셸-관 열교환기의 열 및 유동장을 셸유동에서 배플과 관군 사이의 누설유동의 크기에 따라 수치적으로 조사하고자 한다. 또한, 레이놀즈 수에 따른 속도장 및 온도장을 조사하고, 열전달량 혹은 출구온도를 최대로 하는 셸-관 열교환기의 최적의 누설단면적을 ANSYS FLUENT v.14⁽¹¹⁾를 사용하여 계산하고자 한다.

2. 해석

2.1 셸-관 열교환기의 셸측 레이놀즈 수

셸측 레이놀즈 수는 셸측 수력직경과 질량유량을 기반으로 하여 계산되었다.

$$Re = \frac{G_s d_0}{\mu} \quad (8)$$

여기서,

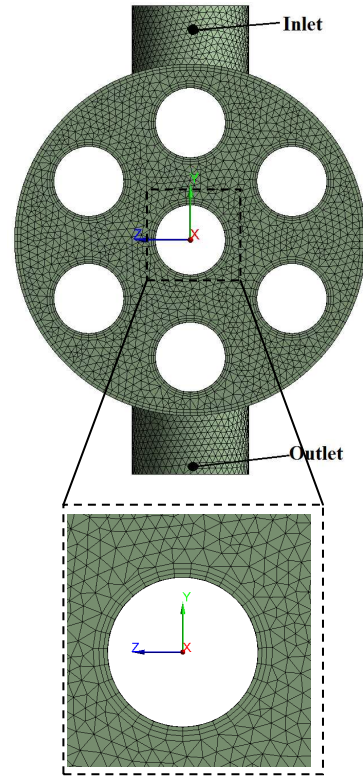


Fig. 3 Side view of the STHE surface mesh

$$G_s = \frac{m}{A_{cr}} \quad (9)$$

$$A_{cr} = \left[D_s - D_{olt} + 2 \frac{D_{olt} - d_0}{X_t} (p_t - d_0) \right] L_{bc} \quad (10)$$

2.2 3차원 계산모델

소형의 셸-관 열교환기(STHE)에 대하여 계산모델을 Fig. 1과 같이 설정하였으며, 계산영역에 대한 기하학적 치수, 레이놀즈 수와 누설유동의 설정 범위는 Table 1에 제시되어 있다. 통상적인 STHE에서 사용하는 25%의 배플 컷(baffle cut)⁽⁹⁾을 가진 4개의 배플과 직경 15mm 7개의 관군을 가진 STHE의 형상을 Fig. 1에서 볼 수 있다. 누설유동의 개략도는 Fig. 2에서 볼 수 있다. 누설단면적 백분율(이하, ‘누설단면적비’라 칭함)은 관단면적에 대한 퍼센트로서 정의되며, 본 연구에서는 0%, 15%, 20%, 30%, 40%의 5가지 경우를 선정하였다. 셸-관 열교환기의 셸측 작동유체는 물이며 물성치는 일정한 것으로 가정하였다.

2.3 경계조건

실현가능 k-ε 모델이 본 연구의 난류계산에서

Table 2 Comparison of heat transfer rates in case of without leakage flow (주 1)

Met hods \ Re	CFD (kW)	ECM (kW)	LMTD (kW)	Kern ⁽¹³⁾ (kW)
4952	51.41	54.58	54.95	61.02
9906	99.51	101.16	108.02	94.91
14858	143.47	143.58	156.67	120.1

(주 1) ECM: Energy Conservation Method
LMTD: Log Mean Temperature Difference

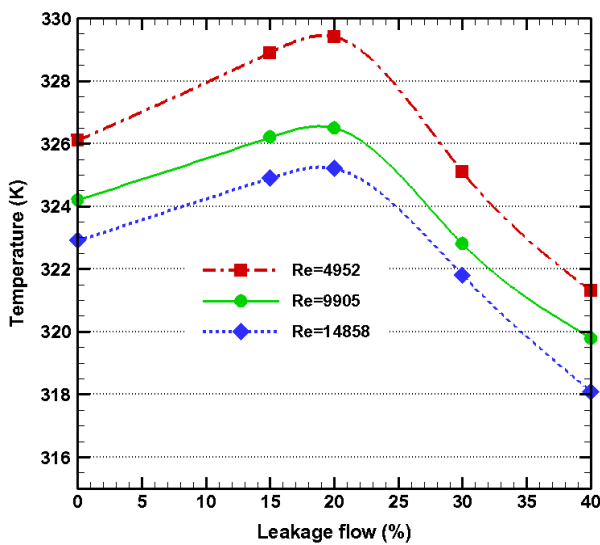


Fig. 4 The outlet temperature versus varying Re with the leakage flows

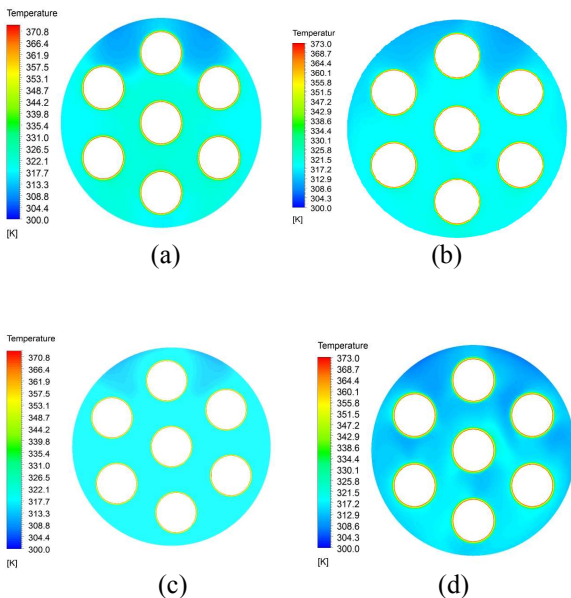


Fig. 5 Temperature contour of central cross sections of SHTE under Re=9906. (a) Without leakage flow, (b) 15% leakage flow, (c) 20% leakage flow, (d) 30% leakage flow

3 차원 격자는 ANSYS Mesh 를 사용하여 형성하였으며, Fig. 3 은 본 계산에 사용된 CFD 모델의 격자분포를 보여주고 있다. 체적격자에는 4 면체(tetrahedron)를 표면격자에는 3 각형(prism)을 사용하였다. 수치해가 격자(grid) 수에 따라 변하는 것은 적절치 않으므로, 격자 수에 무관한 해를 구하기 위하여, 누설유동이 없는 헬-관 열교환기에 대하여, 격자 수를 629,255 개, 950,460 개, 1,141,430 개로 늘려가며 계산을 수행하였다. 그 결과, 격자 수 950,460 개와 1,141,430 개에서의 열전달계수 및 압력강하의 차이는 2% 이내로 나타났으므로 격자 수에 무관한 해는 격자 수 950,460 개를 사용하였다.

3. 결과 및 토의

누설유동이 헬-관 열교환기에 미치는 영향을 조사하기 위하여 몇 가지 조건에 대하여 해석하였다. 먼저 누설단면적비가 각각 0%, 15%, 20%, 30%, 40%의 5 가지 경우로 정의하고 출구온도를 구하였다. 또한, 최적의 누설단면적비를 구하기 위하여 열전달계수 뿐만 아니라 압력강하도 고려하였다.

3.1 출구온도변화

누설단면적비와 레이놀즈 수에 대한 헬-관 열교환기의 출구온도는 Fig. 4 에 제시되어 있다. 5 가지 모든 경우에 대하여 레이놀즈 수가 증가하면 헬-관 열교환기의 출구온도는 감소함을 살펴볼 수 있다. 최고의 출구온도는 20%의 누설단면적비에서 얻어졌으며, 다음은 15%, 0%, 30%, 40%의 순서이다. 각 레이놀즈 수에 대응하는 최고의 출구온도는 329.4K (Re=4953), 326.5K (Re=9905), 325.2K (Re=14858)이다. 이들 최고출구온도를 기준으로 누설단면적비가 증가하면 출구온도는 급격히 감소함을 볼 수 있다. 따라서 본 연구의 범위 내에서 출구온도를 최대로 하는 적정의 누설단면적비가 존재하며 본 연구에서는 20%임을 알 수 있다.

3.2 CFD 해석결과의 타당성

본 CFD 해석결과의 타당성을 확인하기 위하여, 누설유동이 없는 경우에 대하여, 본 CFD, ECM, LMTD, Kern 의 4 가지 방법을 적용한 열전달률의 계산결과가 Table 2 에 제시되어 있다. Kern 의 방법은 Kern 의 상관관계식⁽¹³⁾을 사용한 해석적 계산 방법이며, LMTD 방법은 CFD 구동 결과로부터 얻어진 열전달계수를 사용한 방법이며, ECM 방법은 (질량유량)(작동유체비열)(입출구온도차)로 계산한 방법이다. ECM 과 Kern 의 방법은 열전달률을 적

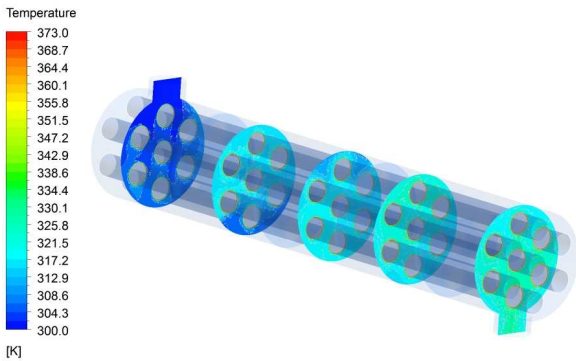


Fig. 6 The temperature contour of cross sections in case of 20% leakage flow under Re=9906

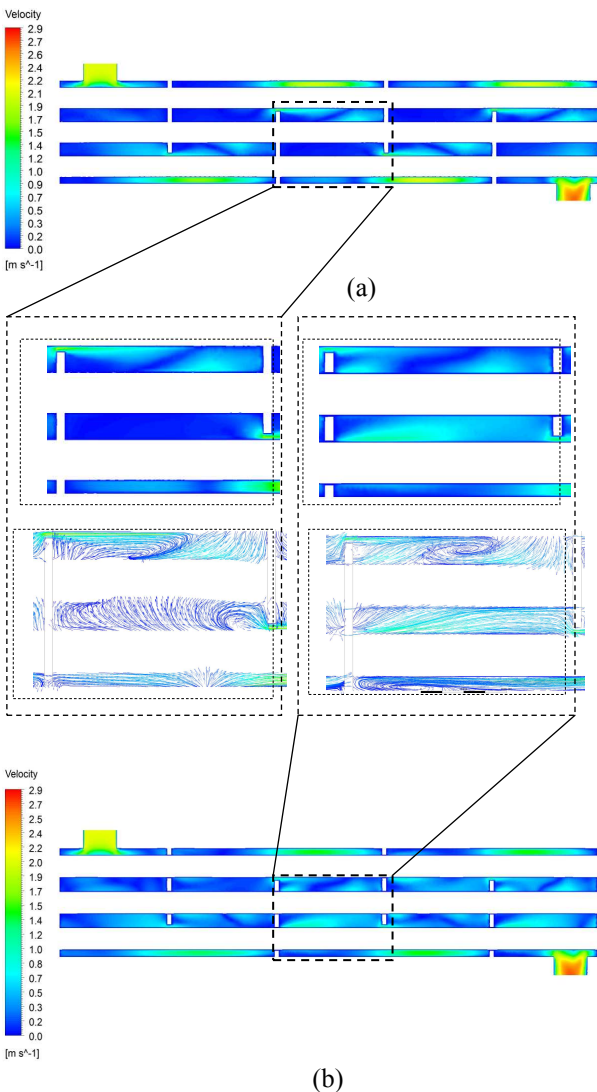


Fig. 7 The velocity contours and streamlines of central plane under Re=9906. (a) Without leakage flow, (b) 20% leakage flow

용되었으며, 2 차 풍상법이 운동량, 난류소산율, 난류운동에너지에 대하여 사용되었다. 압력에 대하여는 표준 2 차법이 적용되었다. 본 계산모델에서

경계조건은 다음과 같다. 유동은 완전히 발달되었다고 가정하며, 입구와 출구를 제외한 모든 고체 표면에서 점착조건(no slip)을 가정한다. 관군 표면은 등온조건으로 373K 이며, 출구압력은 대기압으로 가정하였다. 연속, 운동량, 에너지 방정식, 난류 변수들에 대한 수렴조건은 RMS 잔류오차(residual)가 10^{-4} 보다 작으면 수렴하는 것으로 가정하였다.

2.4 격자 수에 무관한 해

계산하기 위하여 CFD 로부터 계산된 쉘측 출구 온도를 사용하였다. Table 2 의 제 2 열에 표시된 본 CFD 결과가 다른 연구들의 결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 본 CFD 결과와 다른 연구들의 해석 결과와의 최대 차이는, Kern 방법의 레이놀즈 수 4952 의 경우, 약 19%이다. ECM 결과는 본 CFD 해석결과와 가장 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

누설유동에 대한 쉘-관 열교환기의 중앙 단면적에 대한 온도분포는 Fig. 5 에 제시되어 있다. 누설 단면적비 20%의 경우가 다른 경우보다 출구온도가 높고 균일함을 볼 수 있다. 레이놀즈 수 9960 이고 누설단면적비 20%인 경우, 유동방향에 수직인 몇 가지 단면에 대한 온도분포가 Fig. 6 에 제시되어 있다. 청색은 300 K 이며, 붉은 색은 370 K 이다. 입구에서 출구 쪽으로 갈수록 관군 측 열방출로 인하여 온도가 증가함을 알 수 있다. 누설유동이 없는 경우 Fig. 7(a)에 형성되었던 재순환 영역이, 경계층 부근의 블로잉(blowing) 효과와 유사한 기작(mechanism)으로 배플과 인접한 관군벽면 주위의 모멘텀 증가로 인하여, 누설단면적 백분율 20%인 경우 사라졌음을 Fig. 7(b)에서 볼 수 있다. 따라서 적정의 누설유동은 재순환 영역의 감소와 이 영역의 모멘텀 증가를 유발하여 열전달이 증가하게 됨을 추론할 수 있다. CFD 해석결과와 유선들은 Ender 와 Tari⁽⁹⁾의 결과와 잘 일치하고 있음이 관측되었다.

3.3 열전달과 압력강하

누설유동이 쉘-관 열교환기의 열전달 및 압력강하에 미치는 영향을 Fig. 8 과 Fig. 9 에서 살펴볼 수 있다. 압력강하는 레이놀즈 수 증가에 크게 의존하여 증가하며, 높은 레이놀즈 수에서는 누설유동의 유무에 크게 의존하나 낮은 레이놀즈 수에서는 누설유동의 유무에 따른 압력강하는 크지 않음을 볼 수 있다. 본 해석에서 (20%의 누설단면적비)에서 압력강하는 레이놀즈 수 4952, 9906, 14858 에 대응하는 (0%의 누설단면적비) 대비 각각 2, 5, 12 kPa 로 나타났다.

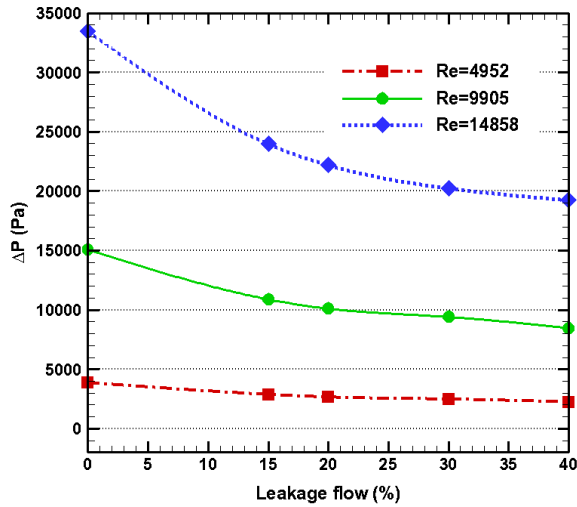


Fig. 8 The pressure drop versus varying Re with the leakage flows

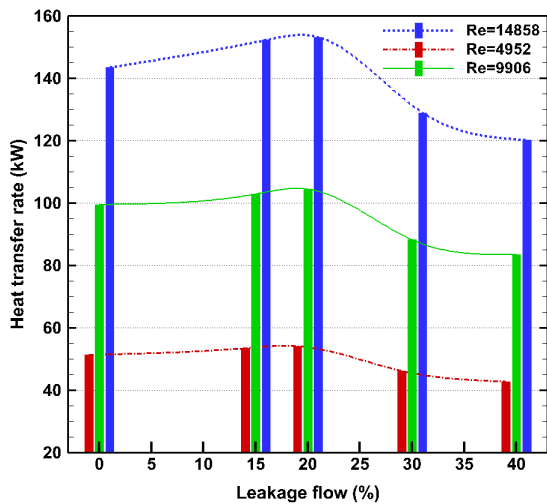


Fig. 9 The heat transfer rate versus varying Re with the leakage flows

한편, 열전달률 역시 레이놀즈 수 증가에 크게 의존하여 증가함을 Fig. 9에서 볼 수 있다. 그러나 열전달률은 누설단면적비의 크기에 대하여는 (20%의 누설단면적비)에서 최대값을 가지며, 다음이 15%, 0%, 30%, 40%의 순서이다. 따라서 본 연구의 범위 내에서 열전달률을 최대로 하는 최적의 누설유동(누설단면적비)이 존재하며 본 해석결과 (20%의 누설단면적비)가 이에 해당된다. 최대의 열전달률 상승값은 약 10 kW로서 상승 백분율은 (0%의 누설단면적비) 대비 약 7% (= (155 - 145) / 145)로 나타났다. 그러나 누설단면적비가 20% 이상 증가하면 배플의 설치효과가 감소하고 병행류의 특성으로 이동하게 되어 열전달률이 누설없는 유동의 경우보다 오히려 감소하게 됨을 추론할 수 있다.

4. 결론

셸-관 열교환기의 누설유동에 따른 열전달 및 압력강하 특성을 3차원 CFD 계산모델을 개발하여 조사하였다. 입구온도 및 관 벽면온도는 일정한 것으로 가정하고 출구온도, 열전달 및 압력강하량을 계산하여 출구온도, 압력강하와 열전달을 고려한 최적의 누설단면적비를 도출하였다. 주요내용은 다음으로 요약된다.

셸-관 열교환기의 압력강하는 레이놀즈 수의 증가와 누설단면적비의 감소에 따라 증가한다. (20%의 누설단면적비)에서 레이놀즈 수 4952, 9906, 14858에 대응하는 압력강하는 각각 2, 5, 12 kPa로 나타났다.

출구온도는 레이놀즈 수가 증가하면 감소하며, 누설단면적비의 증가에 대하여 최대값이 존재한다.

열전달률은, 출구온도 경향과 달리, 레이놀즈 수 증가에 따라 증가한다. 그러나 열전달률은 누설단면적비의 크기에 대하여는 (20%의 누설단면적비)에서 최대값을 가진다.

이상으로부터 셸-관 열교환기의 설계 및 운전에서 누설유동(누설단면적비)을 적절히 조절하면 압력강하 감소, 셸측 입구와 출구 사이의 온도차 증가와 열전달률의 증가 등 바람직한 설계 및 운전 조건을 달성할 가능성이 제시되었다. 이는 셸-관 열교환기에서 누설유동이 있으면 압력강하 및 열전달률이 동시에 감소하는 기존의 연구결과와는 다른 새로운 결과로써 이의 활용이 기대된다.

후 기

본 논문은 교육부의 재원으로 지원을 받아 수행된 산학협력 선도대학(LINC) 육성사업의 연구결과입니다.

참고문헌 (References)

- (1) Lutcha, J. and Nemicansky, J., 1990, "Performance Improvement of Tubular Heat Exchangers by Helical Baffles," *Transaction of the Institution of Chemical Engineering*, Vol. 68, pp. 263~270.
- (2) Zhang, J. F., He Y. L. and Tao, W. Q., 2009, "3D Numerical Simulation on Shell-and-tube Heat Exchanger with Middle-overlapped Helical Baffles and Continuous Baffles - Part I: Numerical Model and Results of Whole Heat Exchanger with Middle-overlapped Helical Baffles," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, pp. 5371~5380.
- (3) Kapale, U. C. and Chand, S., 1997, "Modeling for Shell-

- side Pressure Drop for Liquid Flow in Shell-and-tube Heat Exchanger," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 49, pp. 601~610.
- (4) Li, H. and Kottke, V., 1997, "Effects of the Leakage on Pressure Drop and Local Heat Transfer in Shell-and-tube Heat Exchangers for Staggered Tube Arrangement," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 41, No. 2, pp. 425~433.
- (6) Allen, B. and Gosselin, L., 2008, "Optimal Gometry and Fow Arangement for Minimizing the Cost of Shell-and-tube Condensers," *International Journal of Energy Research*, Vol. 32, pp. 958~969.
- (7) Sanaye, S. and Hajabdollahi, H., 2010, "Multi-objective Optimization of Shell and Tube Heat Exchanger," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 30, pp. 1937~1945.
- (8) You, Y., Fan, A., Huang, S. and Liu, W., 2012, "Numerical Modeling and Experimental Validation of Heat Transfer and Flow Resistance on the Shell Side of a Shell-and-tube Heat Exchanger with Flower Baffles," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 55, pp. 7561~7569.
- (9) Ozden, E. and Tari, I., 2010, "Shell side CFD Analysis of a Small Shell-and-tube Heat Exchanger," *Energy Conversion and Management*, Vol. 51, pp. 1004~1014.
- (10) Roetzel, W. and Lee, D., 1993, "Experimental Investigation of Leakage in Shell-and-tube Heat Exchanger with Segmental Baffles," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 36, No. 15, pp. 3765~3771.
- (11) ANSYS FLUENT, User's Guide v.14, Fluent Inc., USA.
- (12) Shah, R. K. and Sekulic, D. P., 2003, *Fundamental of Heat Exchanger Design*, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, pp. 587~597.
- (13) Kakac, S. and Liu, H., 1998, *Heat exchangers: Selection, rating, and thermal design*, CRC Press LLC.