

단관 환형배플 시스템의 전열성능에 대한 수치해석

홍 정 아, 전 용 두, 이 금 배[†]
공주대학교 기계공학과

A Numerical Study on the Heat Transfer Performance of Single-Tube Annular Baffle System

Jeong-Ah Hong, Yong-Du Jun, Kumbae Lee[†]

Dept. of Mechanical Engineering, Kongju National University, Cheonan 330-717, Korea

(Received May 2, 2012; revision received June 30, 2012)

ABSTRACT: A new baffle configuration, an annular baffles, are considered in the present study as an alternative to reduce the excessive pressure drop associated with the conventional segmental ones in typical operating conditions. The heat transfer and pressure drops are numerically simulated for a single tube shell-and-tube model and compared against the conventional-baffle cases. Baffle blockage ratio and number of baffles are considered as the major variables for the present study specifying a fixed baffle spacing. It is found that the heat transfer increases 1.4~2.2 times without significant pressure loss compared to the bare tube cases and the goodness factor increases 1.35 times compared to the conventional-baffle model.

Key words: Shell-tube heat exchanger(셸-튜브 열교환기), Annular baffle(환형배플), Blockage ratio(막음비)

기 호 설 명

하첨자

D	: Diameter [mm]
F_G	: Goodness factor
j_H	: Colburn factor
N	: Number of baffle
P	: Pressure [Pa]
Pr	: Prandtl number
Q	: Heat transfer rate [W]
Re	: Reynolds number
St	: Stanton factor
T	: Temperature [K]

c	: cold
h	: hot
i	: inner
o	: outer
s	: shell
t	: tube

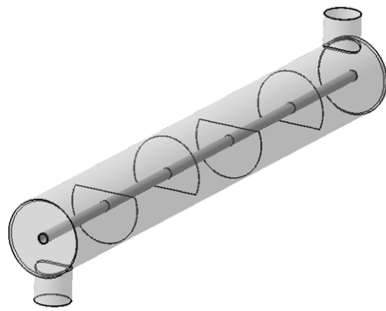
1. 서 론

산업용 열교환기에는 전열 성능을 극대화하기 위하여 많은 수의 원형 튜브와 함께 다양한 형태의 핀(fin) 또는 배플(baffles)이 사용되고 있으며, 산업현장에서 발생한 많은 문제점들을 해결하기 위한 여러 형태의 연구결과들이 보고되고 있다.⁽¹⁻⁴⁾ Maeng et al.⁽¹⁾은 폐열회수용 열교환기의 성능 개선을 위해

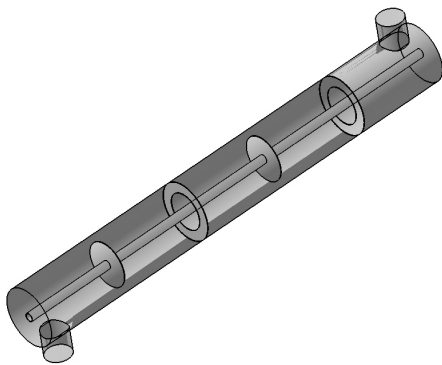
[†] Corresponding author

Tel.: +82-41-521-9246; fax: +82-41-555-9123

E-mail address: kumbae@kongju.ac.kr



(a) Conventional segmental baffles



(b) Annular baffles

Fig. 1 Baffle configuration.

서 다양한 핀 형상의 전열성능을 통해 사각 파형핀(wavy fin)의 우수성을 제시하였다. Kang et al.⁽²⁾은 7종의 단일 원형핀-원형관의 열전달 특성을 실험적으로 연구하여 유동특성(Re), 작동유체의 성질(Pr) 및 기하학적 특성(핀 간격)을 반영하는 Graetz 수를 고려한 새로운 상관식을 제시하였다. Oh et al.⁽³⁾은 단일관 열교환기를 모델로 하여 최적의 열전달을 얻기 위한 배플 높이와 배플 간격을 변수로 하여 연구를 수행하였다.

지금까지의 연구는 기존 배플 형상(Fig. 1(a))에서 크게 벗어나지 못하고 있으며, 특히 대용량시 발생되는 과도한 압력손실을 줄이면서, 전열능력을 높일 수 있도록 다양한 핀-배플 조합의 전열성능에 대한 연구가 필요한 것으로 사료되어 본 연구가 구상되었다.

본 연구에서는 쉘측의 유로 길이와 방향전환을 최소화하면서, 이미 잘 알려진 대류열전달 증진 및 유체혼합이라는 기능적 요구를 효과적으로 적용하고자 오리피스 배플⁽⁵⁾과 원형 핀의 조합으로 구성되는 환형 배플(Fig. 1(b))을 제안하고, 열교환기의 전열성능 특성에 대한 수치해석을 통하여 시스템의 전열특성을 검토해 보고자 한다.

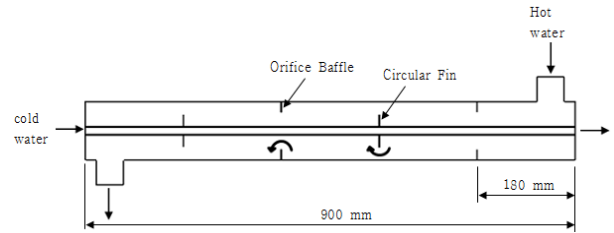


Fig. 2 Shell-and-tube heat exchanger with orifice baffle and circular fin.

2. 수치해석

2.1 수치해석 모델

환형 배플은 튜브 외벽에 부착된 핀 모양의 배플과 쉘측의 내면에 설치되는 배플의 반복적인 조합으로 구성할 수 있다(Fig. 2). 본 연구팀은 선행연구⁽⁴⁾를 통하여 주어진 배플의 설계변수로 고려되는 쉘측에서 유량이 통과하는 단면적과 쉘 단면적의 비로 막음비(blockage ratio, $A_{min}/(A_{shell}-A_{tube})$)을 정의하고, 이와 배플 수를 주요 변수로 하였다.

수치실험을 위한 열교환기 모델은 CATIA V.5를 이용하여 모델링 하였으며, 열교환기 전열성능 모사를 위한 수치해석에는 상용해석 소프트웨어인 ANSYS CFX V.12가 사용되었다.⁽⁶⁾ 전체적으로 계산 영역의 크기는 108.7 mm×900 mm($D \times L$)이다. 튜브와 쉘측의 재질은 구리로 하였다. 3차원 열유동 해석을 위한 계산격자는 상용격자생성기인 ICEM-CFD를 사용하여 육면체 요소로 구성하였다. 수치해석의 정확도를 위하여 튜브와 쉘측의 열전달 부분에는 격자를 밀집시키는 방법을 사용하였다. 격자계의 적정성을 판단하기 위하여 총격자수를 70만 개~400만 개 범위에서 모델 테스트를 수행하였고, 격자의 각도

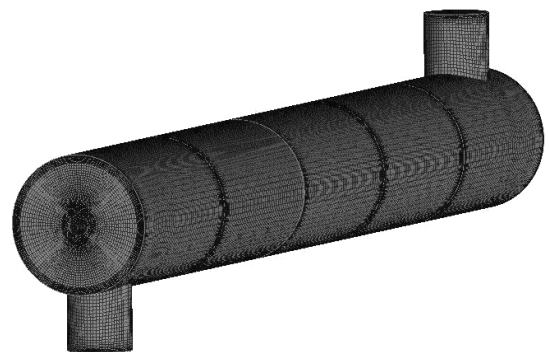


Fig. 3 Comprehensive mesh for analysis mode.

Table 1 Shell and tube specifications

	contents	size(mm)
Tube	$D_{t,o}$	15.88
	t_t	0.9
	L_t	900
Shell	$D_{s,o}$	114.3
	$D_{s,i}$	108.7
	t_s	2.8
	L_s	900
Baffle	Spacing	180(4 baffles)
	Blockage	0~0.8

Table 2 Boundary conditions and figurations

	Inlet temperature(°C)	70.6
Hot water	Inlet flow rates(l/min)	11.75~117.5
	Outlet pressure(atm)	1
	Inlet temperature(°C)	9.8
Cold water	Flow rate(l/min)	5.24
	Outlet pressure(atm)	1

와 중횡비를 기초로 한 격자 퀄리티를 검토하였다. 최종 수치모델은 약 300만 개의 hexa 메쉬가 적용되었다. 계산에 사용된 격자계(grid system)는 Fig. 3에 제시하였다. 계산에 사용된 모델의 주요 사양은 Table 1과 같다.

2.2 지배방정식과 경계조건

유동장 해석을 위한 지배방정식으로는 Navier-Stokes 방정식이 사용되었으며, 난류해석을 위해서 k-ε 모델을 적용하였다. Table 1은 셸-튜브의 사양을 보여주고 있으며, 수치계산을 위한 경계조건으로는 셸표면과 배플은 단열조건을 적용하였고, 수치모사에 적용된 경계조건은 Table 2에 제시하였다.

3. 수학적 계산

고온의 전열량은

$$Q_h = \dot{m}_h c_{p,h} (T_{h,i} - T_{h,o}) \quad (1)$$

저온 수의 전열량은

$$Q_c = \dot{m}_c c_{p,c} (T_{c,o} - T_{c,i}) \quad (2)$$

무차원 열전달계수(Colburn)는

$$j_H = St Pr^{2/3} \quad (3)$$

여기서

$$St = \frac{h_0}{G_{\max} c_p}, \quad Pr = \frac{\mu c_p}{k}$$

G_{\max} 은 ρU_{\max} 이며, U_{\max} 는 고온 수의 최소통과단면적에서의 평균속도이다. 산업현장에서 무차원 전열량과 압력의 비로 열교환기 성능을 나타내는 Goodness factor는

$$F_G = \frac{(Q/Q_{\max})}{(\Delta P/P_{atm})} \quad (4)$$

여기서 Q_{\max} 는 저온 및 고온 수에서 얻을 수 있는 최대 전열량이다.

$$Q_{\max} = \dot{m}_h c_{p,h} (T_{h,i} - T_{c,i}) \quad (5)$$

4. 결과 및 고찰

Fig. 4는 전형적인 환형배플이 장착된 단일관 열교환기 내부의 유동장 및 열 해석 결과를 나타내는 것으로서, 배플(N) 4개, 막음비(blockage ratio) 0.6, 고온 수 유량 58.75(l/min)의 경우이다. 결과들로부터 셸측 표면에 부착된 배플은 셸측 유동이 튜브 전열면을 지나갈 때 축방향 유속을 증대시킴으로써 대류 열전달을 촉진시키고 압력손실을 줄이며, 튜브 표면(전열면)에 부착된 배플은 유동의 혼합과 유효 전열면의 증가에 기여토록하여 고온 수 온도가 빠르게 감소하고 있다.

Fig. 5~Fig. 7은 배플의 막음비에 따른 열교환기의 전열성능, 압력강하와 F_G (goodness factor) 값을 보여주고 있다. 막음비는 0(배플없음)~0.8, 고온 수 유량은 11.75~117.5 l/min에서 수치모사를 하였다. Fig. 5는 막음비에 따른 셸측 전열량 변화를 나타낸다. 전열량은 막음비가 증가함에 따라 거의 선형적으로 증가하고, 이러한 경향은 수치해석 유량 범위에서 거의 유사하게 나타난다. 유량 증가폭에 따른 전

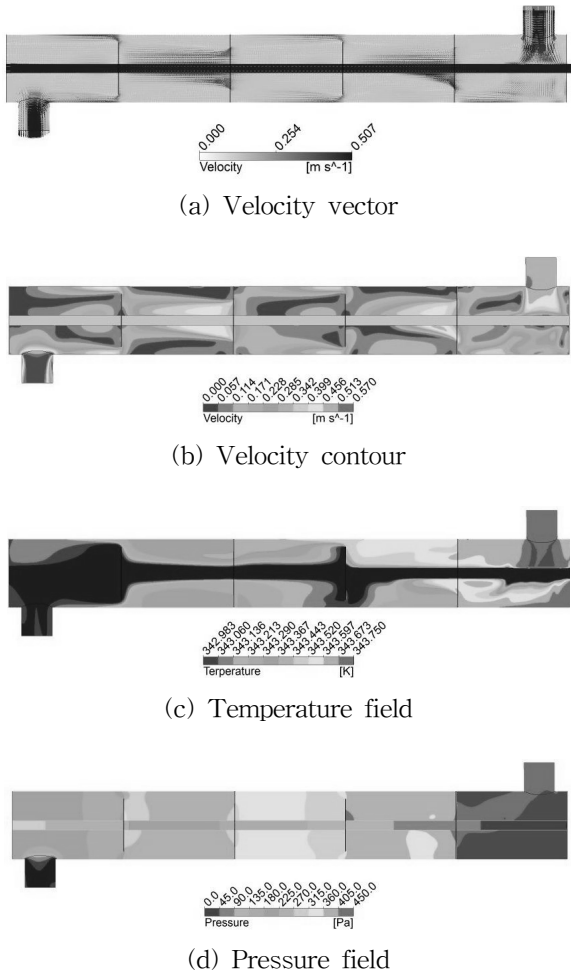


Fig. 4 Typical analysis results.

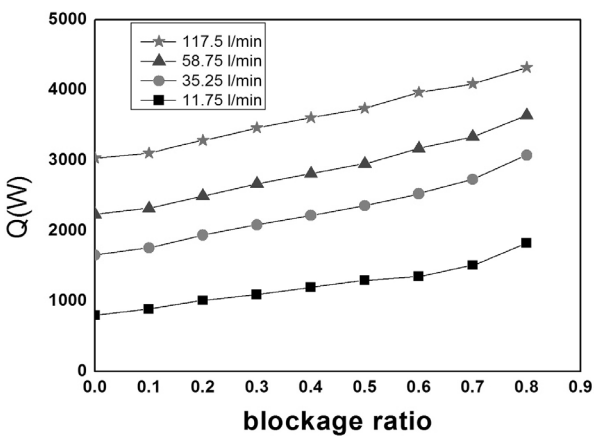


Fig. 5 Shell-side heat transfer rate.

열성능의 변화는 저유량 범위에서 그 효과가 크게 나타난 반면, 고유량 영역에서는 유량 증가에 따른 증가율이 상대적으로 작게 나타나는데 이는 유속(Re) 변화에 따른 일반적인 전열성능 변화특성을 반영하는 것으로 보인다. 수치 결과 환형배플을 적용하였

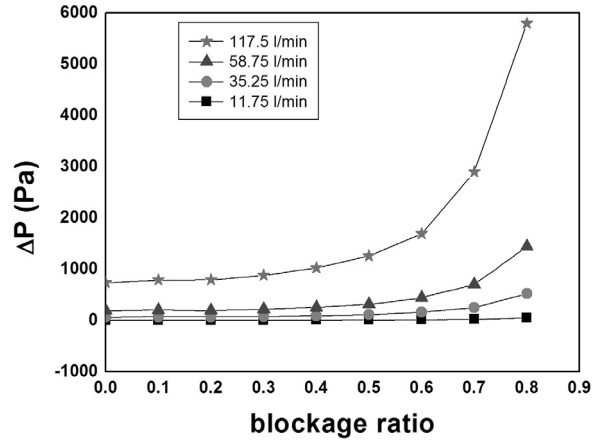


Fig. 6 Shell-side pressure drop.

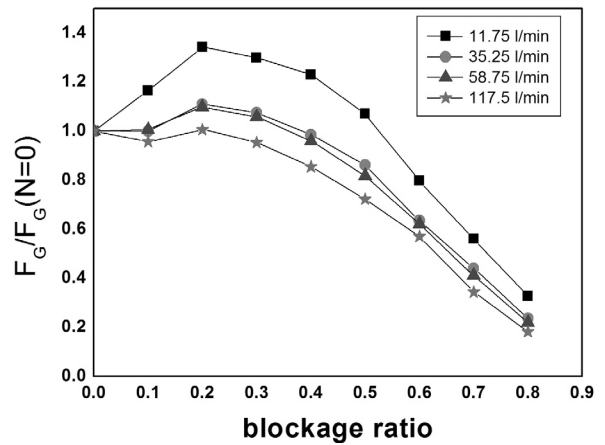


Fig. 7 Goodness factor.

을 때 유량에 따라 1.4~2.2배의 전열성능 개선을 기대할 수 있는 것으로 나타났다.

Fig. 6은 막음비에 따른 셸측 압력손실 변화를 나타낸다. 일반적으로 압력손실은 유량 혹은 유속변화에 민감하며 유속의 제곱에 비례하게 되는데 이러한 경향을 그림에서도 확인할 수 있다. 유량이 큰 경우(☆)에는 압력손실이 막음비 변화에 따라 큰 차이가 남을 알 수 있다. 유량이 커질수록 압력손실이 증가하고, 막음비가 높을수록 압력손실이 증가하는 경향을 확인하였다. 또한 유량이 상대적으로 낮은 경우에는 유량변화(11.75~58.75 l/min)에 따른 압력손실 변화는 매우 미미하고 전열성능변화가 큰 반면, 유량이 큰 경우 유량변화(58.75~117.5 l/min)에 따른 압력손실 변화가 크고, 전열성능변화는 상대적으로 작게 나타났다. 이로부터 열교환기의 유량범위에 따라 최적의 운전조건이 존재할 수 있음을 유추할 수 있다.

Fig. 7은 산업현장에서 열교환기 성능 비교를 위

해 많이 사용되는 Goodness Factor(FG)의 값을 보여주고 있으며, 무차원 전열량과 압력손실의 비로 나타낸다. $FG(N = 0)$ 은 배플이 없을 경우의 FG 값이다. FG는 막음비가 0.2부근까지는 증가하나, 그 이후부터는 급격하게 감소하고 있다. 특히 적은 유량에서는 막음비가 0.2까지 증가 폭이 더 커지고 있다. 이런 결과들은 전열량 증가와 압력손실과의 관계에서 어느 항목이 더 커지느냐에 따른 현상으로 보여진다. 여기서 전열량의 증가에 따른 에너지 절약, 압력손실에 따른 동력비, 배플 설치에 따른 제작비 증가 등이 고려가 되어야만 경제적으로 최적의 모델을 도출할 수 있을 것이다.

Fig. 8~Fig. 10은 막음비 0.6, 유량 50 l/min로 고정하였을 때, 배플 수에 따른 FG 및 j_H 값을 각각 보여주고 있다. Fig. 8에서 배플 수가 증가함에 따라 전열량은 증가하나, 압력 손실량이 더 빠르게 증가함으로 인하여 FG 값은 가파르게 감소하고 있다.

Fig. 9는 배플 수에 따른 무차원 전열계수 값의 변

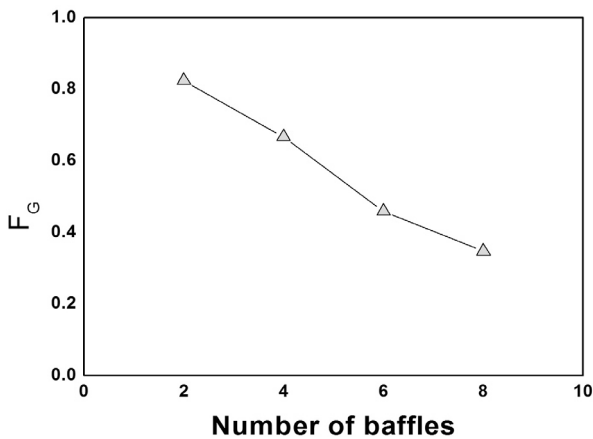


Fig. 8 Goodness factor with number of baffle.

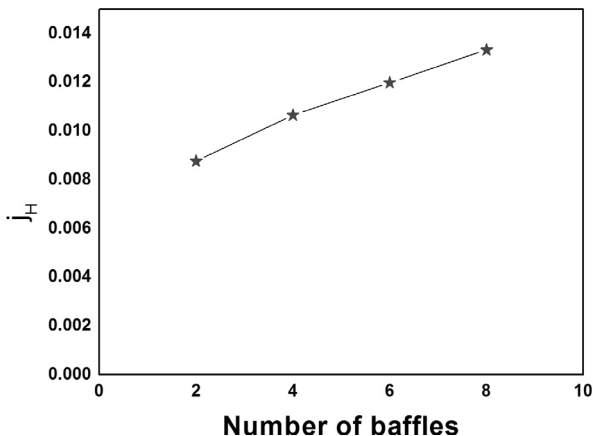


Fig. 9 Dimensionless heat transfer coefficient.

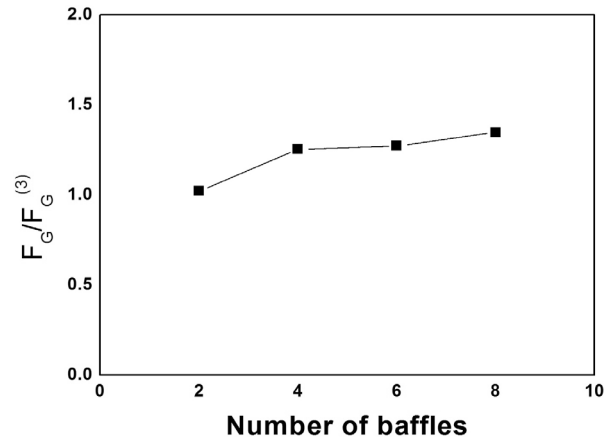


Fig. 10 Goodness factor with number of baffle.

화를 보여주고 있다. 배플 수가 증가함에 따라 전열면과 접촉하는 면적이 증가하고, 이로 인하여 전열량이 증가하여 전열계수 값도 증가하고 있다. Fig. 10은 Oh et al.⁽³⁾이 다룬 Fig. 1(a) 모델에 대한 본 연구에서 다룬 모델의 우수성을 비교 및 고찰하였다. 배플 수가 적을 경우 두 모델의 FG 값이 거의 비슷하나, 배플 수가 증가함에 1.35배까지 더 우수함을 보여주고 있다.

5. 결 론

오리피스 배플과 원형핀으로 구성된 환형배플이 설치된 셸-튜브 열교환기의 막음비와 배플 수를 변화시켜 열전달 및 압력강하에 미치는 영향에 대하여 수치해석을 수행한 결과 아래와 같은 결론을 얻었다.

(1) 환형배플을 적용하였을 때 유량에 따라 1.4~2.2배의 전열성능 개선을 기대할 수 있는 것으로 나타났다.

(2) $FG/FG(N = 0)$ 은 막음비가 0.2부근까지는 증가하나, 그 이후부터는 급격하게 감소하고 있다. 특히 적은 유량에서는 막음비가 0.2까지 증가 폭이 더 커지고 있다. 이런 결과들은 전열량 증가와 압력손실과의 관계에서 어느 항목이 더 커지느냐에 따른 현상으로 보여진다.

(3) 기존모델과 성능비교 결과 배플 수가 적을 경우 두 모델의 FG 값이 거의 비슷하나, 배플 수가 증가함에 따라 1.35배까지 더 우수함을 보여주고 있다.

(4) 환형배플은 잘 유도된 유로를 따라 전열면에서의 전열조건 개선, 열적 혼합을 효과적으로 수행할 수 있으므로 기존모델의 대안으로 고려될 수 있

을 것으로 기대된다.

(5) 단관에 대한 환형 배플의 적용성은 다관의 경우에도 적용될 수 있을 것으로 사료된다. 따라서 이 분야에 대한 추가적인 연구가 필요한 것으로 보인다.

후 기

이 논문은 공주대학교 BK21 사업 및 공주대학교 자체학술연구비(기초연구과제) 사업의 지원으로 작성되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Maeng, J. H., Koo, B. S., Jun, Y. D., and Lee, K. B., 2011, Performance analysis of fin-tube heat exchangers with various fin shapes for waste gas heat recovery, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 23, No. 9, pp. 627-632.
2. Kang, H. C. and Kang, M. C., 2004, Forced convection correlation for single circular fin-tube heat exchanger, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 16, No. 6, pp. 584-588.
3. Oh, G. N., Jun, Y. D., and Lee, K. B., 2010, Research of heat transfer characteristics with baffle parameters in shell and tube heat exchanger, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 22, No. 9, pp. 599-604.
4. Hong, J. A., Lee, K. B., and Jun, Y. D., 2011, Numerical experiments on the heat transfer performance of annular baffles, *Proceedings of 2011 Annual Winter Conference, Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea*, pp. 237-242.
5. Kern, D. Q., 1950, *Process heat transfer international student edition*, McGraw-Hill Kogakusha, Ltd., pp. 129-131.
6. ANSYS CFX-Solver Theory Guide, ANSYS.