

핀-튜브에서 와류 발생기와 가이드 베인의 유동 및 전열 성능 특성에 관한 비교 연구

배지환¹ · 오영택¹ · 이창형¹ · 이득호¹ · 김귀순^{1†}

¹부산대학교 항공우주공학과

A Comparative Study on the Flow and Heat Transfer Performance Characteristics of Vortex Generators and Guide Vane in Fin-Tube

JiHwan Bae¹, YeongTaek Oh¹, ChangHyeong Lee¹, DeukHo Lee¹ and KuiSoon Kim^{1†}

¹Department of Aerospace Engineering, Pusan National University, Korea

Abstract

In this paper, the effects of the delta winglet vortex generator, the airfoil vortex generator and the guide vanes on the friction factor and the Colburn factor in the fin-tube flow were studied. The vortex generator and guide vane were non-dimensionalized based on the channel height and tube diameter, and locations were selected according to the authors' suggestions. The Reynolds number based on the inlet velocity and the tube diameter was selected in the range of 1400-8000. As a result, the friction factor resulted in a 4.7% decrease in guide vanes at the Reynolds number 8000 over the conventional fin-tube, and the Colburn factor resulted in a 33% increase in the delta winglet vortex generator at the Reynolds number 3800 over the conventional fin-tube.

초 록

본 논문에서는 델타 윙렛 와류 발생기와 후퇴익형 와류 발생기 그리고 가이드 베인이 핀-튜브 유동에 서의 압력 손실과 전열 성능에 미치는 효과를 비교하는 연구를 진행하였다. 와류 발생기와 가이드 베인 은 채널 높이와 튜브의 지름을 기준으로 무차원화하였고, 위치는 저자들의 연구 결과에 따라 각각의 형 상이 우수한 지점을 선정하였다. 레이놀즈 수는 입구 속도와 튜브 지름을 기준으로 하여 1400~8000으로 선정하였다. 결과적으로 압력 손실은 레이놀즈 수 8000에서 가이드 베인이 기존 핀-튜브 대비 4.7% 감 소하는 효과를 보였고, 전열 성능은 레이놀즈 수 3800에서 델타 윙렛 와류 발생기가 기존 핀-튜브 대비 33% 정도 증가하는 결과를 확인하였다.

Key Words : Heat Exchanger(열 교환기), Fin-Tube(핀-튜브), Vortex Generator(와류 발생기), Heat Transfer (열전달), CFD(전산유체역학)

Nomenclature

A_{min}	Minimum flow cross-section area
A_T	Total heat transfer surface area
C_p	Specific heat
D	Diameter
f	Friction factor
f_0	Baseline friction factor

G	Goodness factor, $(j/j_0)/(f/f_0)$
h	Heat transfer coefficient
H	Channel height
j	Colburn factor
j_0	Baseline Colburn factor
k	Air thermal conductivity
N	Nusselt number, hD/k
P	Pressure
ΔP	Pressure drop
P_L	Longitudinal pitch
P_T	Transverse pitch

Received: Nov. 04, 2019 Revised: Jan. 30, 2020 Accepted: Feb. 12, 2020

† Corresponding Author

Tel: +82-51-510-2436, E-mail: kuskim@pusan.ac.kr

© The Society for Aerospace System Engineering

Re	Reynolds number, $\rho U_i D / \mu$
$T_{i,o,w}$	Temperature(inlet, outlet, wall)
U	Velocity
X	X coordinate
Y	Y coordinate

Greek symbols

α	Angle of attack
β	Backward sweep angle
γ	Air inlet angle
$\dot{\gamma}$	Blade inlet angle
δ_f	Fin thickness
ρ	Density
μ	Dynamic viscosity

1. 서 론

핀-튜브 열교환기는 항공기 터빈 냉각 시스템, 폐열 회수, 가열기, 응축기, 증발기처럼 많은 분야에서 사용이 되고 있다. 산업이 발달함에 따라 에너지 수요가 많아짐과 동시에 핀-튜브 열교환기의 사용도 점점 증가하고 있는 추세이다. 열교환기에 있어 압력 손실의 감소와 전열 성능 상승은 에너지 절약을 의미한다. 이에 따라 열교환기의 성능을 향상시키기 위한 연구는 지속적으로 수행되었다.

1861년 Joule에 의해 열교환기의 성능 향상 연구가 처음 발표되었고 현재까지 많은 연구가 진행되어 왔다 [1]. Gorman 등에 의하면 전열 성능에 효과가 있는 핀-튜브 열교환기는 1958년부터 1993년에는 주로 실험적인 연구가 많이 진행되었고, 1996년부터 2017년 사이에는 수치적인 연구가 많이 진행되었다 [2]. 핀-튜브 열교환기의 전열 성능 향상에는 핀-튜브 구간의 형상을 변경하는 방법 [3,4], 핀-튜브에 와류 발생기를 부착하는 방법 [5~8] 등 많은 방법으로 연구가 진행되어 왔다. 일반적으로 효율을 키우기 위해서는 핀-튜브에 와류 발생기를 부착하여 열전달 면적을 넓이거나 와류를 의도적으로 생성시켜 유동의 교란을 일으켜 효과를 얻는다. 하지만 와류 발생기를 설치하면 전열 면적이 늘어나 성능은 우수해지지만 압력 강하가 커지는 단점이 있다. 전열 성능을 올리고 압력 강하를 감소시키는 방법에 관하여 많은 연구가 진행되고 있다.

Mahmood 등은 레이놀즈 수 5000~35000의 영역에

서 덩플이 있는 채널에서의 열전달 특성을 실험적으로 연구하였다 [3]. 실험을 통해 각 레이놀즈 수에 따른 전열 성능과 압력 손실의 결과를 나타내었다. Tao 등은 물결 모양의 핀-튜브 열교환기에서의 열전달 특성을 레이놀즈 수, 핀 피치, 물결 모양 각도 그리고 튜브 열 개수의 4가지 변수에 대한 영향을 수치 해석으로 연구를 진행하였다 [4]. Joardar 등은 레이놀즈 수 330~850구간의 7열을 가지는 인라인 배열에서 델타 윙렛 와류 발생기 1~3개를 인라인 또는 엇갈린 배열로 위치하여 수치 및 실험적으로 연구를 진행하였다 [5]. Salviano 등은 레이놀즈 수 1400에서 Genetic Algorithm(GA)을 사용하여 소형 열교환기에서 Response Surface Methodology(RSM), Direct Optimization(DO)의 두 가지 방식으로 델타 윙렛 와류 발생기의 위치와 각도를 최적화하여 열전달 및 압력 강하를 수치적으로 연구하였다 [6].

열전달을 향상시키기 위해 델타 윙렛 와류 발생기를 부착하는 방법은 수치적 및 실험적으로 많은 연구가 이루어졌지만, 대부분의 연구는 단일 형상으로 각도와 위치 및 와류 발생기의 개수를 변경하여서 한 연구가 대부분이므로 서로 비교하기가 어렵다. 그러므로 본 논문에서는 Salviano 등의 핀-튜브 유로 [6]를 기반으로 열교환기에서 주로 사용되는 Joardar 등의 델타 윙렛 형상 [5]과 Lee 등의 유동의 저항을 줄일 수 있는 익형 형상 단면의 와류 발생기 [7] 그리고 Lee 등의 튜브 후류의 박리 영역을 제어하기 위한 가이드 베인 형상 [8]을 사용하였다. 각 형상들을 Salviano 등의 채널 높이와 튜브 지름을 기준으로 무차원화하였고 [6], 와류 발생기와 가이드 베인의 위치는 저자들의 연구에 따라 Goodness factor가 좋은 위치를 선정하였다. 각 형상 별로 압력 손실과 전열 성능에 관해 수치적 연구를 수행하여 효과를 비교하였다.

2. 수치 해석 방법

2.1 전산 해석 기법

본 연구에서 사용한 전산 해석 기법은 유동 및 열전달 해석이 가능한 상용프로그램인 ANSYS 17.2의 CFX를 사용하여 핀-튜브 열교환기의 수치 해석을 진행하였다 [9]. 공간에 대해서는 Upwind advection

scheme을 사용하였고, Velocity Pressure coupling은 4차 Rhie Chow 방법을 사용하였다. 난류 모델은 $k-w SST$ 를 사용하였다. $k-w SST$ 모델은 Menter에 의해 개발되었고 벽면 경계층 해석에 용이한 $k-w$ 모델과 자유 전단 유동 영역 해석에 용이한 $k-\epsilon$ 모델이 결합한 형태로 알려져 있다[10].

2.2 전산 해석 모델 및 경계 조건

Salviano 등의 핀-튜브 형상 조건을 Table 1에 나타내었고 이를 기반으로 Fig. 1에 핀-튜브 유로를 그림으로 나타내었다[6]. 전산 해석을 위해 사용된 해석 영역에서 상류는 핀의 길이(L)와 같고 하류는 해석의 정확도를 위해 핀 구간의 5배 길이(5L)로 만들었다. 델타 윙렛 와류 발생기, 후퇴익형 와류 발생기 그리고 가이드 베인의 형상 정보는 Table 2에 나타내었고, 각 형상들의 좌표인 X, Y는 첫 번째 튜브의 중점을 기준으로 설정하였다. Table 2를 기반으로 Fig. 2에 그림으로 각 형상들을 나타내었다. (a)는 일반적인 핀-튜브 형상이다. (b)는 델타 윙렛 와류 발생기가 있는 형상이고 15° 의 받음각(α)을 가진다. (c)는 후퇴익형 와류 발생기이고 15° 의 받음각(α)과 60° 의 후퇴각(β)을 가진다. 충분한 와류를 만들기 위해 캠버를 주었다. (d)는 가이드 베인이고 형상에 의한 압력 손실을 줄이기 위해 얇은 익형 형태를 사용하였다. 튜브 후류 박리 제어를 위해 캠버를 주어 휘어짐이 있게 하였다. 입사각은 가이드 베인의 각도에서 레이놀즈 수 별로 기존의 핀-튜브의 입구로 들어오는 유동의 각도를 빼것으로 정의하였다. 레이놀즈 수는 입구로 들어오는 유동 속도와 튜브의 지름을 기준으로 Eq. 1처럼 정의된다. 입구에는 균일한 유동 속도를 주었고 유동의 온도는 340K이다. 벽면에는 점착 조건을 주었고, 300K의 일정한 온도가 유지되도록 적용하였다.

$$Re = \frac{\rho U_i D}{\mu} \quad (1)$$

2.3 격자 의존도 평가 및 계산 검증

압력 손실과 전열 성능을 비교하여 격자 의존도를 평가하였다. 압력 손실과 전열 성능은 Eq. 2, Eq. 3처럼 정의한다.

Table 1 Geometric dimension of fin-tube channel

Parameter		Value
Tube diameter	(D)[mm]	7.66
Channel height	(H)[mm]	2
Transverse pitch	(P_T)[mm]	22
Longitudinal pitch	(P_L)[mm]	20
Fin length	(L)[mm]	40
Fin thickness	(δ_f)[mm]	0.08
Number of tube row	(N)	2

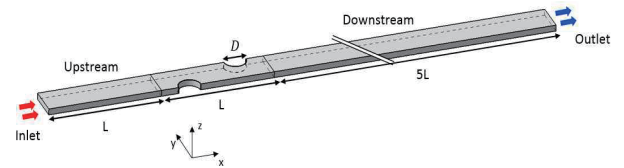


Fig. 1 Computational domain of fin-tube

Table 2 Geometric dimension of Delta winglet, Airfoil, Guide vane

Parameter	Delta winglet	Airfoil	Guide vane
Height ($H_{vg,gv}$)	$0.965H$	$0.1H$	H
Thickness (δ_{vg})	δ_f	-	-
Chord (C)	D	$0.45D$	$0.392D$
α [$^\circ$]	15	15	-
β [$^\circ$]	-	60	-
X	$1.4D$	$-1.125D$	$-0.131D$
Y	$0.72D$	$0.375D$	$0.561D$

$$f = \frac{2(\Delta P)}{\rho U_{\max}^2 N} \quad (2)$$

$$j = \frac{h}{\rho U_i C_p} Pr^{2/3} \quad (3)$$

ΔP 는 핀-튜브 구간의 입구와 출구의 압력 차이이고, U_{\max} 는 유동이 지나는 핀-튜브에서 단면적이 제일 작은 곳의 속도 값이다. 격자 의존도 평가는 핀-튜브, 델타 윙렛 와류 발생기, 후퇴익형 와류 발생기, 가이드 베인 총 4가지 형상에 대하여 격자 의존도를 평가하였고 Fig. 3에 나타내었다. 압력 손실과 전열 성능의 오차가 1~2% 미만일 때의 격자를 선택하여 핀-튜브 형

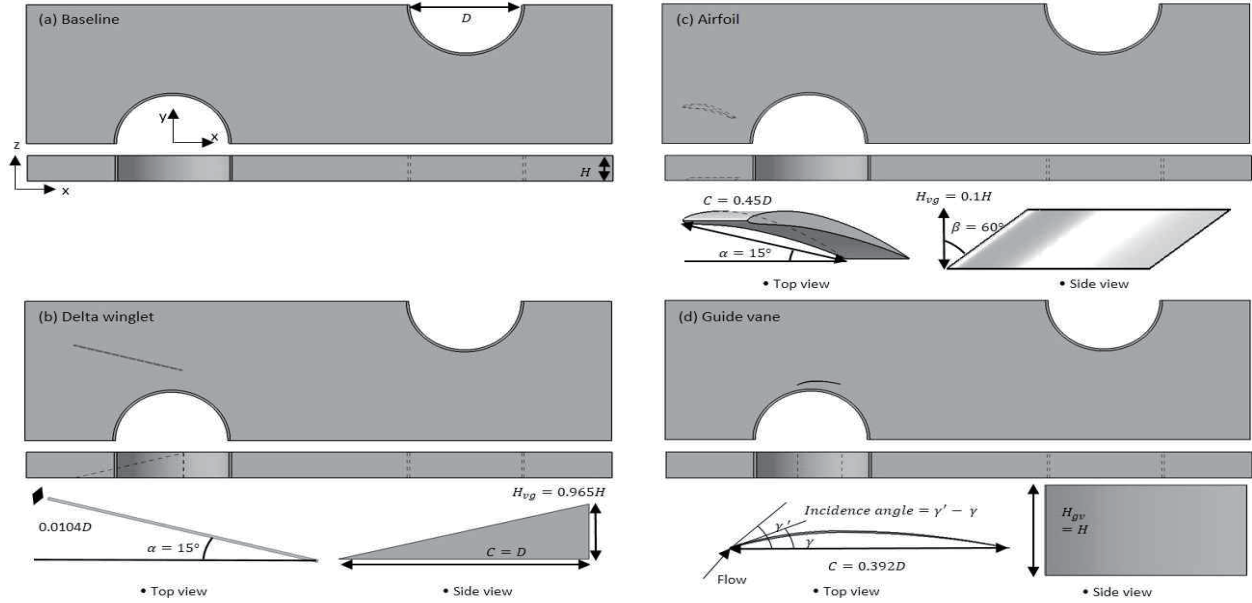


Fig. 2 Computational domain and Schematic : (a) Baseline, (b) Delta winglet, (c) Airfoil, (d) Guide vane

상은 약 200만 개, 나머지 형상들은 약 370만 개의 수준으로 사용하여 수치 해석을 진행하였다.

수치 해석의 타당성을 검증하기 위해 Fiebig 등이 실험한 와류 발생기가 없는 일반적인 핀-튜브의 연구 결과로 수치 해석을 진행하였다[11]. 해석 형상의 정보는 Table 3에 나타내었고, 계산은 Fiebig 등의 조건과 같은 조건에서 수행하였다[11].

Figure 4는 레이놀즈 수에 따른 누셀트 수의 결과를 나타낸 것이다. 레이놀즈 수가 커질수록 실험 결과와 해석 결과의 차이가 있는데 이는 수치적으로 약 5% 정도의 오차이므로 전산 해석 결과와 실험의 경향이 잘 일치한다고 볼 수 있다.

3. 계산 결과 및 고찰

3.1 압력 손실과 전열 성능의 수치적 분석

각 형상들의 압력 손실과 전열 성능을 비교하기 위해 f/f_0 와 j/j_0 를 확인하였다. f_0 와 j_0 는 형상이 부착되지 않은 핀-튜브만 있을 때의 값이고, f 와 j 는 형상이 부착되어있는 핀-튜브의 값이다. 압력 손실과 전열 성능의 무차원수를 비교하는 방법은 Goodness factor라 하고 Eq. 4처럼 나타낼 수 있다.

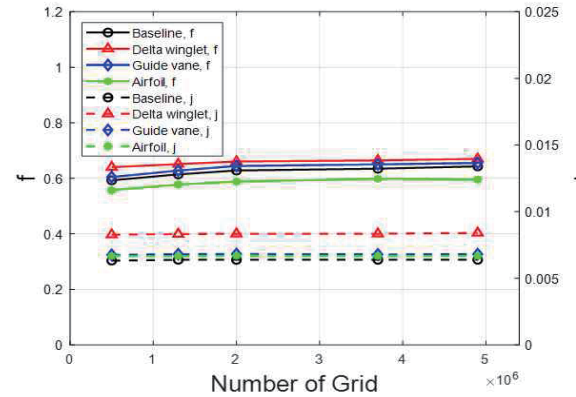


Fig. 3 Grid independency

Table 3 Geometric dimension of validation model

Parameter		Value
Tube diameter	(D) [mm]	32
Channel height	(H) [mm]	7
Transverse pitch	(P_T) [mm]	64
Longitudinal pitch	(P_L) [mm]	72
Fin length	(L) [mm]	216
Fin thickness	(δ_f) [mm]	0.84
Number of tube row	(N)	3

$$G = \frac{(j/j_0)}{(f/f_0)} \quad (4)$$

Figure 5에는 레이놀즈 수에 따른 f/f_0 와 j/j_0 의 결과를 각각 실선과 점선으로 나타내었다.

Figure 5의 압력 손실에 있어서 델타 윙렛 와류 발생기와 가이드 베인은 레이놀즈 수가 커질수록 줄어드는 경향을 보였다. 델타 윙렛 와류 발생기는 레이놀즈 수 3800에서 핀-튜브만 있는 형상에 비해 11.2%로 손실이 가장 높았고 레이놀즈 수가 커질수록 줄어들었다. 후퇴익형 와류 발생기는 압력 손실이 비교적 일정하였다. 레이놀즈 수 1400에서 핀-튜브만 있는 형상에 비해 4% 증가로 가장 높은 결과를 보였다. 가이드 베인은 전체적으로 줄어드는 경향을 보였다. 레이놀즈 수 1400을 제외한 나머지 영역에서 핀-튜브만 있는 형상에 비해 낮은 압력 손실을 가지는 것을 확인하였고, 8000에서 기존 핀-튜브에 비해 4.7% 개선된 값을 가지는 것을 확인하였다.

Figure 5의 전열 성능은 델타 윙렛 와류 발생기에서 압력 손실이 가장 높았던 레이놀즈 수 3800에서 핀-튜브만 있는 형상에 비해 33.7%로 가장 많이 증가하였고, 레이놀즈 수가 커질수록 줄어드는 것을 확인하였다. 후퇴익형 와류 발생기는 레이놀즈 수 6600에서 기존 핀-튜브에 비해 6.8%로 가장 많이 증가하였고, 8000에서는 감소하였지만 큰 차이는 나지 않는다. 가이드 베인은 레이놀즈 수 3800에서 핀-튜브만 있는 형상에 비해 5.3% 정도 증가하였고, 다른 영역에서도 비슷한 결과를 보이는 것을 확인할 수 있다.

Figure 6의 Goodness factor는 각 형상들에서 압력 손실이 가장 낮을 때의 레이놀즈 수에서 가장 높은 것을 확인할 수 있다. 전체적으로 레이놀즈 수가 커질수록 증가하는 경향을 보이고 델타 윙렛 와류 발생기는 레이놀즈 수 8000에서 기존 핀-튜브에 비해 22%로 가장 높았다. 후퇴익형 와류 발생기의 경우 레이놀즈 수 8000에서 압력 손실의 증가로 Goodness factor가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 가이드 베인은 압력 손실 대비 전열 성능의 향상 폭이 일정하기 때문에 레이놀즈 수가 높아질수록 Goodness factor도 비슷한 경향을 보이고 레이놀즈 수 8000에서 기존 핀-튜브에 비해 9.7%로 가장 높았다.

압력 손실과 전열 성능을 분석하기 위해 레이놀즈 수가 1400, 8000일 때의 평균 압력 값과 평균 Colburn factor의 값을 유동 방향에 따라 비교하였고,

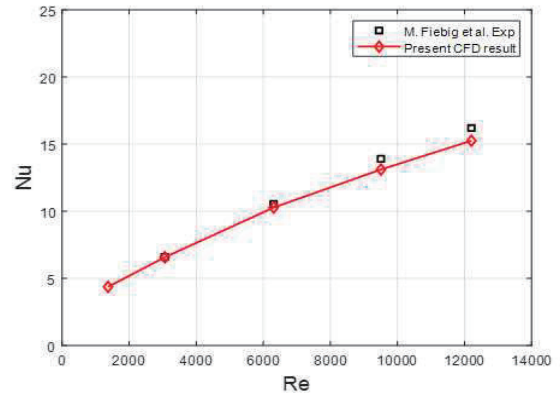


Fig. 4 Comparison of Nusselt number with experimental data

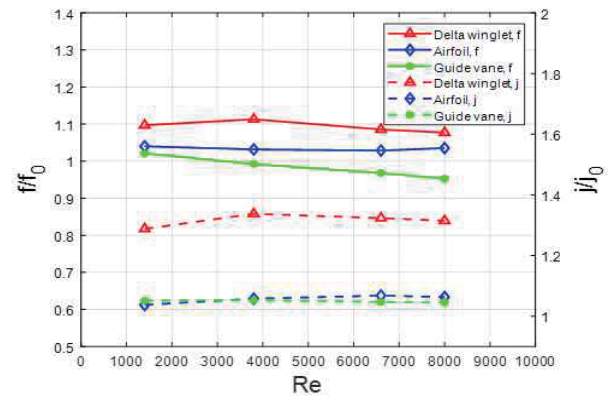


Fig. 5 Friction and Colburn factor distribution for Reynolds number

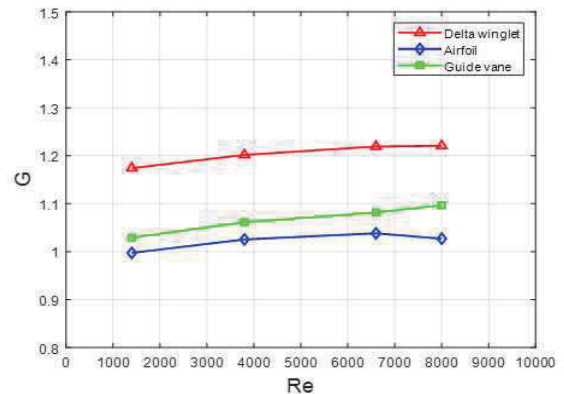


Fig. 6 Goodness factor distribution for Reynolds number

Fig. 7~10에 나타내었다.

Figure 7은 레이놀즈 수가 1400일 때의 평균 압력 값이다. 델타 윙렛 와류 발생기는 다른 형상들에 비해 평균 압력 값이 높은 것을 확인할 수 있는데 이는 델타 윙렛 와류 발생기의 면적이 다른 형상의 면적보다 크기 때문이다. 첫 번째 튜브 구간에서는 델타 윙렛 와류 발생기에 의해 압력이 증가하였지만 후류로 갈수록 영향이 줄어 차이가 작아지는 것을 확인할 수 있다. 후퇴익형 와류 발생기는 기존 핀-튜브의 경향과 거의 일치 하는 것을 보인다. 가이드 베인의 경우 경향은 기존의 핀-튜브와 비슷하지만 첫 번째 튜브와 두 번째 튜브 사이에서의 압력 값이 증가한 것을 확인할 수 있다.

Figure 8은 레이놀즈 수가 8000일 때의 평균 압력 값이다. 델타 윙렛 와류 발생기는 전체적인 경향이 레이놀즈 수 1400에서와 비슷하였다. 후퇴익형 와류 발생기는 레이놀즈 수 1400일 때 보다 높아진 것을 확인할 수 있는데 이는 유동의 속도가 빨라져 후퇴익형 와류 발생기에서 와류가 생성되는 것을 알 수 있다. 가이드 베인의 경우 레이놀즈 수 1400의 경향과 비슷하지만 첫 번째 튜브와 두 번째 튜브 사이의 압력 값이 커진 것을 확인할 수 있는데 이는 빠른 속도의 유동이 가이드 베인을 만나 가속되어 튜브 후류에 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

Figure 9는 레이놀즈 수가 1400일 때의 평균 Colburn factor의 값이다. 델타 윙렛 와류 발생기의 경우 다른 형상들보다 압력 손실이 큰 만큼 전열 성능도 가장 높았다. 이는 델타 윙렛 와류 발생기의 면적 효과와 초기 유동이 와류 발생기를 만나 가속되고, 이때 가속된 유동이 후류 전체에 영향을 주어 전열 성능이 향상된 것으로 볼 수 있다. 후퇴익형 와류 발생기는 초기 유동을 만났을 때 소폭 상승하고 후류로 갈수록 기존의 핀-튜브와 비슷한 경향을 보인다. 이는 와류 발생기의 높이가 낮아 와류가 제대로 생성이 안 되기 때문으로 분석된다. 가이드 베인의 경우 유동이 가이드 베인을 만나는 지점에서 전열 성능이 향상되고 후류로 갈수록 기존의 핀-튜브의 경향과 비슷해지는 것을 확인할 수 있다.

Figure 10은 레이놀즈 수가 8000일 때의 평균 Colburn factor의 값이다. 델타 윙렛 와류 발생기는 레이놀즈 수 1400과 마찬가지로 압력 손실이 큰 만큼

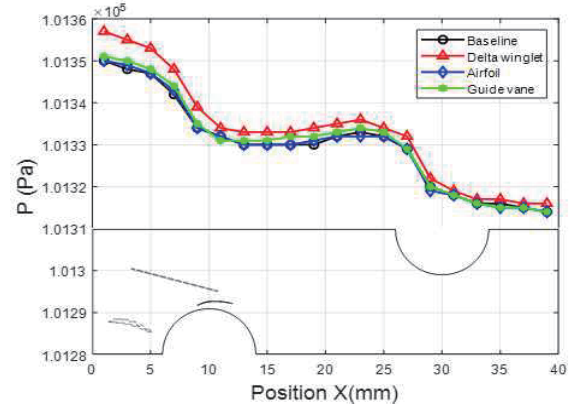


Fig. 7 Span-average pressure for Re=1400

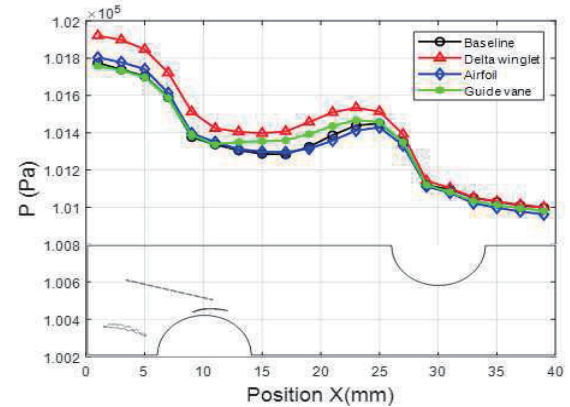


Fig. 8 Span-average pressure for Re=8000

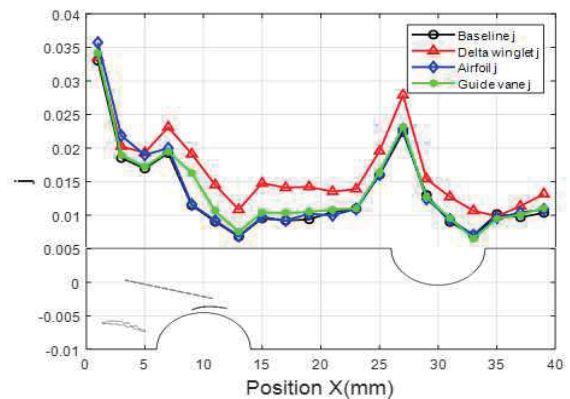


Fig. 9 Span-average Colburn factor for Re=1400

전열 성능도 가장 높았다.

후퇴익형 와류 발생기의 경우 초기 전열 성능 향상 폭이 레이놀즈 수 1400보다 높는데 이는 와류 발생기

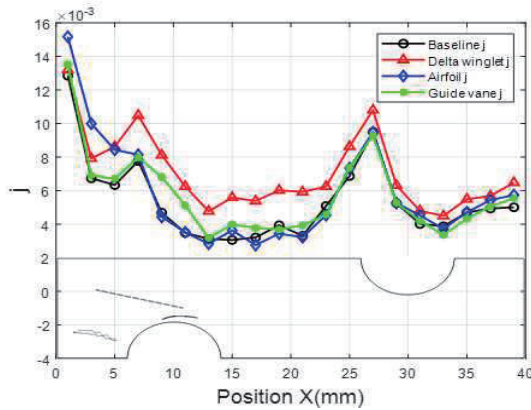


Fig. 10 Span-average Colburn factor for Re=8000

의 높이가 낮지만 레이놀즈 수 1400보다 빠른 유동이 후퇴익형 와류 발생기를 만나기 때문에 보다 많은 와류가 생성되어 전열 성능을 향상시킨 것으로 분석된다. 가이드 베인의 경우 후퇴익형 와류 발생기와 마찬가지로 레이놀즈 수 1400보다 빨라진 유동이 가이드 베인을 만나 가속되어 전열 성능이 향상되는 것을 확인할 수 있다.

3.2 형상에 따른 유동 특성 분석

위의 결과를 확인하기 위해 레이놀즈 수 8000에서의 속도 분포와 압력 분포를 Fig. 11, 12에 나타내었다.

Figure 11의 속도 분포에서 델타 윙렛 와류 발생기의 받음각에 의한 영향으로 생성된 와류가 튜브에서 생성된 말굽 와류와 합쳐져 빨라지는 것을 확인할 수 있다. 와류 발생기를 만나 가속된 유동이 튜브 후류의 박리 영역에 영향을 주어 기존 핀-튜브의 박리 영역보다 크기가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 후퇴익형 와류 발생기의 경우 튜브에서 생성된 말굽 와류가 와류 발생기에서 생성되는 와류에 영향을 받아 가속되는 부분이 기존의 핀-튜브와 비교하면 약간 상쇄되는 것을 확인할 수 있는데 후퇴익형 와류 발생기의 높이가 낮아 큰 효과를 얻지 못하였고, 튜브 후류의 박리 영역도 기존의 핀-튜브와 비슷하여 거의 영향을 미치지 않는 것을 확인할 수 있다. 가이드 베인은 튜브에서 생긴 말굽 와류가 튜브 주위를 지나면서 직접적으로 가이드 베인과 부딪히게 되는데 이로 인해 가속된 유동의 방향이 첫 번째 튜브의 뒤쪽으로 틀어지고 박리

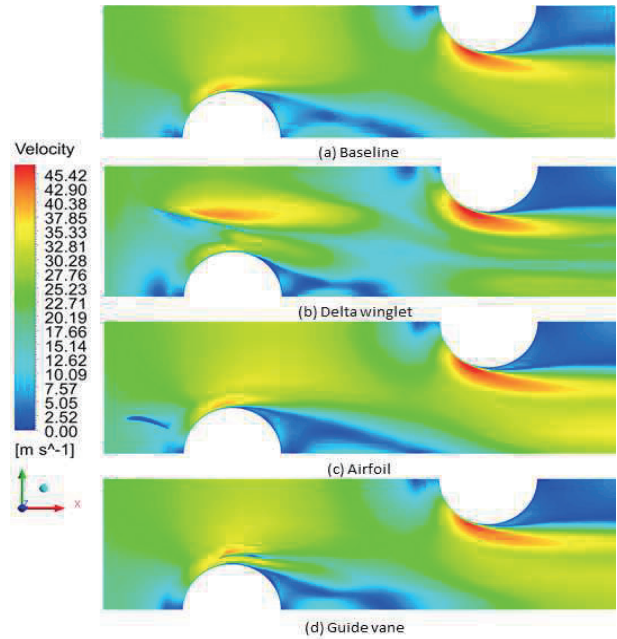


Fig. 11 Velocity contour top view at Z/H=0.1, (a) Baseline, (b) Delta winglet, (c) Airfoil, (d) Guide vane

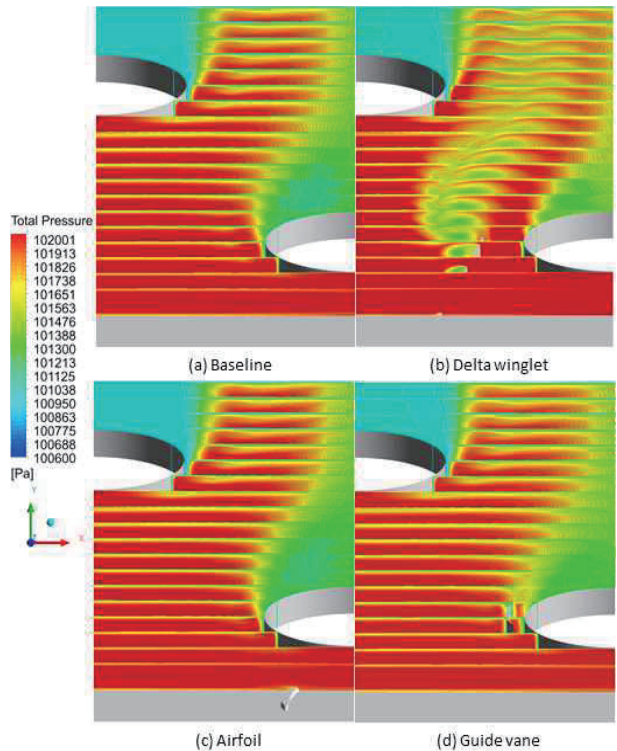


Fig. 12 Pressure contour about x-position (a) Baseline, (b) Delta winglet, (c) Airfoil, (d) Guide vane

영역에 영향을 주는 것을 확인하였다.

Figure 12의 압력 분포에서 델타 윙렛 와류 발생기는 와류 발생기에서 생성된 와류가 두 번째 튜브까지 영향을 주어 압력 손실을 높이고 전열 성능을 향상시키는 것을 알 수 있다. 후퇴익형 와류 발생기는 높이가 낮아 압력 분포에서는 거의 영향이 없는 것을 확인할 수 있고, 가이드 베인은 델타 윙렛 와류 발생기처럼 후류 전체에 영향을 주지 않고 첫 번째 튜브 후류의 박리 영역을 줄여주기 때문에 레이놀즈 수가 커질수록 압력 손실이 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 4가지 레이놀즈 수의 범위에서 델타 윙렛 와류 발생기와 후퇴익형 와류 발생기 그리고 가이드 베인이 부착되어 있는 핀-튜브의 수치적 비교 연구를 진행하였다. 압력 손실과 전열 성능에 대한 결과를 확인하였고, 형상에 따른 유동 특성을 확인하였다.

- 압력 손실에 있어서 기존의 핀-튜브와 비교하면 델타 윙렛 와류 발생기는 레이놀즈 수 3800에서 11.2%, 후퇴익형 와류 발생기는 레이놀즈 수 1400에서 4%, 가이드 베인은 레이놀즈 수 8000에서 -4.7%의 압력 손실을 발생시킨다. 결론적으로 압력 손실에 있어서는 가이드 베인이 가장 좋은 효과를 보였다.
- 전열 성능에 있어서 기존 핀-튜브 대비 델타 윙렛 와류 발생기는 레이놀즈 수 3800에서 33.7%, 후퇴익형 와류 발생기는 레이놀즈 수 6600에서 6.8%, 가이드 베인은 레이놀즈 수 3800에서 5.3% 각각 가장 높은 향상을 보였다. 결론적으로 면적이 가장 큰 델타 윙렛 와류 발생기가 가장 좋은 효과를 보였다.
- 델타 윙렛 와류 발생기는 와류 발생기에서 생성된 와류가 두 번째 튜브가 있는 후류까지 영향을 주어 압력 손실이 생기는 것을 확인하였고 후퇴익형 와류 발생기와 가이드 베인은 두 번째 튜브에 영향이 거의 없는 것을 알 수 있었다.

위의 결과처럼 3가지 형상 비교에서 압력 손실은 가

이드 베인이 레이놀즈 수가 높아질수록 낮아지므로 가장 좋은 효과를 보였고, 전열 성능은 델타 윙렛 와류 발생기가 가장 좋은 것으로 확인되었다. 향후 연구 방향으로는 후퇴익형 와류 발생기의 높이가 높아질수록 압력면에서 흡입면 방향으로 많은 유동이 흐르고 와류가 많이 생성되기 때문에 전열 성능의 효과를 얻을 수 있을 것이고, 가이드 베인의 경우 길이와 두께를 조절하면 튜브 후류의 박리 영역을 제어하여 더욱 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

이 성과는 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2017R1D1A3B03034107)

References

- [1] J. P. Joule, "On the surface-condensation of steam," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, vol. 151, pp. 133-160, 1861.
- [2] J. M. Gorman, E. M. Sparrow and J. Ahn, "In-line tube-bank heat exchangers: Arrays with various numbers of thermally participating tubes," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 132, pp. 837-847, 2019.
- [3] G. I. Mahmood, M. Z. Sabbagh and P. M. Ligrani, "Heat transfer in a channel with dimples and protrusions on opposite walls," *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, vol. 15, no. 3, pp. 275-283, 2001.
- [4] Y. B. Tao, Y. L. He, J. Huang, Z. G. Wu and W. Q. Tao, "Three-dimensional numerical study of wavy fin-and-tube heat exchangers and field synergy principle analysis," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 50, no. 5, pp. 1163-1175, 2007.
- [5] A. Joardar and A. M. Jacobi, "A numerical study of flow and heat transfer enhancement using an array of delta-winglet vortex generators in a fin-and-tube heat exchanger," *Journal of Heat Transfer*, vol. 129, no. 9,

pp. 1156-1167, 2007.

- [6] L. O. Salviano, D. J. Dezan and J. I. Yanagihara, "Optimization of winglet-type vortex generator positions and angles in plate-fin compact heat exchanger: Response surface methodology and direct optimization," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 82, pp. 373-387, 2015.
- [7] C. H. Lee, Y. T. Oh, J. H. Bae, D. H. Lee and K. S. Kim, "Numerical Study on Heat Transfer and Flow Characteristics of Pin Fin with Swept Airfoil Shape Vortex Generator," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, vol. 23, no. 4, pp. 28-34, 2019.
- [8] D. H. Lee, Y. T. Oh, J. H. Bae, C. H. Lee and K. S. Kim, "Numerical Study on the Effect of Guide Vane Position and Angle on Heat Transfer and Flow Characteristics of a Pin-fin Channel with a Guide Vane," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, vol. 23, no. 3, pp. 35-43, 2019.
- [9] ANSYS CFX V15.0, "ANSYS CFX Reference Guide," ANSYS Inc, Canonsburg, PA, U.S.A., November. 2013.
- [10] F. R. Menter, "Zonal Two Equation Turbulence Models For Aerodynamic Flows," 24th Fluid Dynamics Conference, Orlando, Florida., AIAA 93-2906, July. 1993.
- [11] M. Fiebig, A. Valencia and N. K. Mitra, "Local heat transfer and flow losses in fin-and-tube heat exchangers with vortex generators: A comparison of round and flat tubes," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 8, no. 1, pp. 35-45, 1994.