

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2009.33.10.757

Plate Fin-Oval Tube 열교환기에서 익형 와류발생체에 의한
Fin 표면에서의 국소 열전달에 대한 특성

신석원[†] · 정인기* · 김수연*

(2009년 6월 9일 접수, 2009년 8월 20일 수정, 2009년 8월 24일 심사완료)

Local Heat Transfer Characteristics on Fin Surface of Plate Fin-Oval
Tube with Delta Wing Vortex Generators

Seok-Won Shin, In-Kee Chung and Soo-Youn Kim

Key Words : Delta Wing Vortex Generator(삼각 익형 와류발생체), Oval Tube(타원형 관), Heat Transfer Enhancement(열전달 촉진), Naphthalene Sublimation Technique(나프탈렌 승화법)

Abstract

In the present study, the effect of delta-wing vortex generators(DWVG) on the local heat transfer of the plate fin-oval tube was experimentally analyzed for Reynolds numbers for 2000, 2500 and 3200. The local heat transfer coefficient of the fin surface for four type DWVGs was measured by the naphthalene sublimation technique. As the results, the distribution of the heat transfer coefficient at rear of DWVGs showed longitudinal contours for common flow down DWVGs and wavy contours for common flow up DWVGs. The distribution showed many cell type contours at near wall and downstream for all DWVGs.

Compared to case without DWVGs in present experimental tests, all DWVGs showed the best enhancement of heat transfer at Re=2000. Of 4 cases of DWVGs, D type showed the best enhancement of heat transfer.

기호설명

- B : 덕트의 폭 (mm)
- e : 삼각형 날개(DWVG) 사이의 최소 거리
- H : 덕트의 높이, 특성길이 (mm)
- h_m : 물질 전달 계수 (m/s)
- h : 열전달계수
- L : 측정부의 덕트 길이 (mm)
- T : 공기 온도(K)
- Nu : Nusselt 수 ($= hH / \lambda$)
- Nu_m : 평균 Nusselt 수

- Nu_{om} : DWVG 미부착시의 평균 Nusselt 수
- Pr : Prandtl 수 ($= \nu/\alpha$)
- Re : Reynolds 수 ($= U_m H/\nu$)
- Sh : Sherwood 수, 식 (6)
- Sc : Schmidt 수, 식 (4)
- D : 공기중의 나프탈렌 확산계수 (cm^2/s)
- θ : 삼각형 날개의 영각
- x, y : 좌표계

그리스문자

- λ : 열전도율
- ν : 점성계수
- δ : 나프탈렌 승화 깊이 차 (mm)

[†] 책임저자, 회원, 영남대학교 기계공학부
E-mail : ssw0314@ynu.ac.kr
TEL : (053)810-3825 FAX : (053)810-4627
* 영남대학교 기계공학부

- ρ_s : 나프탈렌의 고체밀도 (kg/m^3)
 $\rho_{v,w}$: 시편표면에서의 증기 압력 (kg/m^3)

1. 서 론

최근 전 세계가 국제 유가의 가파른 상승으로 말미암아 에너지 비용의 증대에 따른 에너지 이용효율 향상의 필요성에 따라 열교환기의 고성능화에 대한 연구가 많이 수행되고 있다.

기-액 열교환용으로 많이 사용되는 평판 환-관 열교환기의 성능을 향상시키기 위해서는 열전달 측면에서 기체 측의 대류열전달을 촉진시켜 열전달 성능을 높여야 하고, 유동측면에서는 관군사이의 압력강하를 감소시켜야 하는 것이 관건이다. 지금까지 다양한 전열촉진방법이 제시되어 있는데, 평판 핀의 형상을 변화시키거나 평판의 표면에 각종 난류 촉진체나 와류 발생체를 부착하는 방법 등이 있다.

평판 표면에서 와류발생기를 이용하여 열전달을 촉진하는 연구가 1974년 Edwards와 Alker⁽¹⁾에 의해서 이루어졌으며, 약 40% 정도의 열전달 향상을 보고하고 있다. 그 후 Russell 등⁽²⁾은 평판 환-관 열교환기를 모델로 하여 평판 환 위에 돌기를 설치하고, 이 돌기에 의해 생성된 종방향 와류에 의해 약 50%의 열전달 증가와 약 40%의 압력강하의 증가가 있었음을 보고하였다. Fiebig 등⁽³⁻⁵⁾은 익형(half delta wing) 와류발생체가 설치된 덕트 내에 국소열전달계수와 마찰계수를 측정하고, 와류발생체에 의해 약 1~2배의 열전달 촉진효과를 얻었음을 보고하였다. 또한 Oyakawa 등⁽⁶⁾은 각종 형상의 난류촉진체에 대한 열전달 실험을 통하여 이들의 전열촉진성능을 서로 비교하였다.

한편 삼각형 날개(익형)를 와류발생체로 이용한 연구는 주로 1990년대 이 후에 비교적 활발하게 수행되고 있으며,⁽⁷⁾ 저속 유동영역에서 열전달 촉진효과가 크다고 알려져 있다. 하지만 날개 주위의 국소 열전달 특성에 대한 연구는 거의 없는 편이다. 저속유동영역에서 사용되는 많은 환-관 열교환기의 고성능화에 대한 연구가 시급하다 할 수 있다.

본 연구는 환-관 열교환기의 평판 환에 부착된 삼각형 날개 모양의 익형 와류발생체(delta wing vortex generator, 이 후 DWVG로 표시)가 국소 열

전달에 미치는 영향을 비교적 느린 유동영역에 대하여 살펴보는 것이다. 본 연구에서 한 쌍의 DWVG가 타원형 관의 앞쪽에 설치되어 있으며, DWVG의 설치에 따른 압력손실을 줄이기 위하여 원형관 대신 타원형 관⁽⁸⁾(oval tube)을 선택하였다.

흰 표면의 국소 물질전달 계수와 국소 열전달 계수는 나프탈렌 승화법에 의해 측정되었다.

2. 실험

2.1 실험 장치 및 방법

본 연구에서 실험장치는 Fig. 1과 같고, 풍동, 시험부, 흡입형 공기펌프 그리고 공기유량제어장치 등으로 구성되어 있다.

풍동은 흡입 개방형이고, 장방향 단면(종횡비 1:12)을 가진 전장 5,100mm의 직선 유로로 되어 있다. 풍동 내에 설치된 시험부는 Fig. 2와 같으며, 물질전달계수를 측정하기 위해 나프탈렌이 코팅된 시편 위에 타원형 모조관과 DWVG가 부착되어 있다. 충분히 발달한 유동영역에 위치하도록 하기 위하여 시험부는 풍동입구에서 충분히 떨어진 거리에 설치되었다.

시험부의 바닥은 교체식으로 제작되어 실험조건에 따라 적절한 DWVG를 부착할 수 있게 되어 있다. 타원형 관은 시험부의 중앙에 배치되어 있고, 그것의 장축은 흐름방향으로 향하고 있다. 시험부 내에 있는 시편의 중심에는 타원형 관이 배치되고, 그 전면에 DWVG가 한 쌍이 배치되어 있는데, 한 예로써 Fig. 3은 타원형 관과 그 전방에 배치된 한 쌍의 DWVG를 보여준다. Table 1과 Table 2는 시험부와 DWVG의 제원과 DWVG의 4가지 익형 배열을 보여준다.

DWVG는 두께 0.5mm인 알루미늄 판으로 제작되었고, 높이는 13mm로 일정하고, 길이는 두 가지인데 각각 20mm와 40mm이다. 한 쌍의 DWVG 사이의 최소간격은 $e=24mm$ 로 일정하게 고정되었으며, 공기 유동에 대한 영각도 $\theta=45^\circ$ 로 일정하였다.

본 연구에서 국소열전달계수는 나프탈렌 승화법을 사용하여 측정되었다. 따라서 시편의 표면은 나프탈렌으로 코팅되어 있고, 그 코팅은 표면정도가 좋은 주조법에 의해 이루어졌다. 주조에 사용된 금형은 두랄루민으로 제작되었고, 그것의 내부에 나프탈렌이 주조될 수 있도록 폭 180mm,

Table 1 Dimensions of test section

width of rectangular duct (B)	240mm
length of rectangular duct (L)	280mm
length of oval tube (Lt)	160mm
height of rectangular duct (H)	20mm
length of delta wing(l)	20mm
distance between delta wing(e)	40mm
attack angle of delta wing(θ)	45°

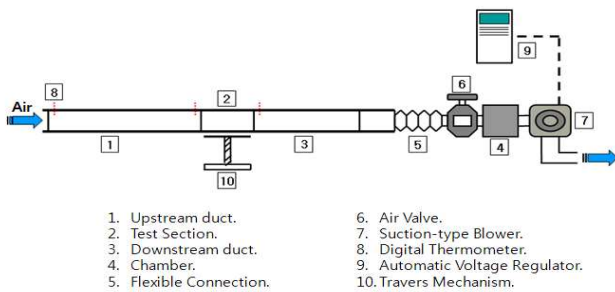


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

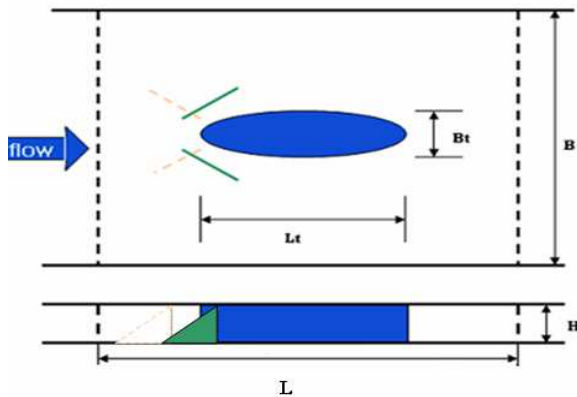


Fig. 2 Top and side views of test section

길이 280mm 그리고 깊이 5mm인 홈이 가공되었다. 시편의 표면에서 공기 중으로 승화된 나프탈렌의 양은 Labview프로그램(National Instrument PCI-Step-4CX, PK566-NAC)으로 제어되는 정밀표면조도기 linear variable differential transformer (LVDT : Schaevitz LBB375TA-20)에 의해 측정되었다.

Table 2 Types of arrangement of a DWVGs pair

Type	Arrangement of DWVG pair	Size of DWVG
A Type		l=40mm
B Type		l=40mm
C Type		l=20mm
D Type		l=20mm

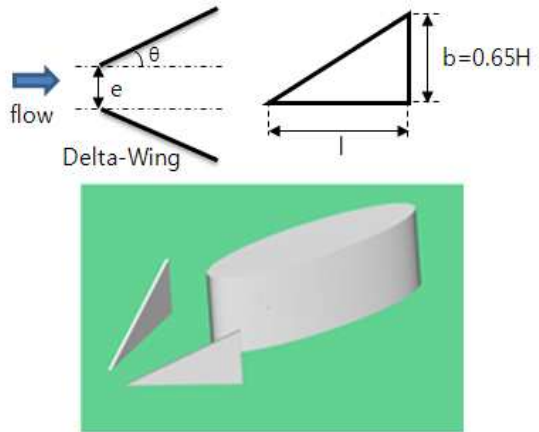


Fig. 3 An example of arrangement of an oval tube and a pair of DWVGs

본 연구에서 주된 변수는 DWVG의 크기와 익형 배열 그리고 Re이다. DWVG의 크기는 두 가지이고, 그 익형 배열은 네 가지인데 Table 2에서 보는 바와 같다. 여기서 A형과 C형 익형은 “common flow down type(CFD형)”으로, B형과 D형 익형은 “common flow up type(CFU형)”으로 불리기도 한다. Re는 2000, 2500, 3200인데, 공조기 등에 많이 사용되는 평판-환 열교환기의 경우, 이 Re의 영역은 비교적 느린 유동 영역에 해당한다.

2.2 물질전달 및 열전달 계수의 측정

열전달계수는 열전달과 물질전달의 상사를 이용한 나프탈렌 승화법에 의해 측정될 수 있다. 열전달에서 Nu와 물질전달에서 Sh는 각각 식 (1) 과 식 (2)와 같으며,

$$Nu = C Re^m Pr^n \tag{1}$$

$$Sh = C Re^m Sc^n \tag{2}$$

위 두 식의 상사에 의해 Nu 와 Sh 는 다음 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Nu = (Pr/Sc)^n \cdot Sh \quad (3)$$

만약 Sh 를 구하면, 식 (3)으로부터 Nu 를 구할 수 있다. 즉, 열전달과 물질전달과의 상사를 이용하여 시편 표면의 어떤 지점에서 승화된 나프탈렌의 양을 측정함으로써 그 지점에서의 열전달 계수를 구할 수 있다.

공기 중에서 나프탈렌이 확산될 때 Sc 는 $Sogin^{(9)}$ 에 의해 $Sc=2.5$ 로 제한되어 있으나, 본 연구에서는 $Cho^{(10)}$ 등이 정밀한 측정결과를 이용하여 작동유체의 온도보정이 가능한 다음의 관계식이 사용되었다.

$$Sc = 8.0743 / T^{0.2165} \quad (4)$$

측정한 나프탈렌 시편 표면의 한 지점에서 물질전달계수(h_m)는 나프탈렌 고체밀도 ρ_s , 승화 깊이의 차이 δ , 유동에 노출시킨 실험시간 Δt 를 이용하여 다음 식 (5)에 의해 계산된다.

$$h_m = \frac{\rho_s \delta}{\Delta t \rho_{v,w}} \quad (5)$$

그리고 그 지점에서 Sh 는 다음 식 (6)과 같이 표현 된다.

$$Sh = \frac{h_m H}{D} \quad (6)$$

여기서 H 는 덕트의 높이를 표시하고, D 는 공기 중에서 나프탈렌의 확산계수를 표시한다.

3. 실험결과 및 검토

3.1 물질전달 계수의 분포

본 연구는 평판 흰에 부착된 DWVG가 국소열전달에 미치는 영향을 살펴보는 것이다. DWVG가 부착되지 않은 경우를 비교 기준으로 하였다.

Fig. 4는 DWVG가 부착되지 않은 경우, 타원형관이 부착된 평판 흰 표면의 물질전달계수의 분포를 Re 에 따라 보여준다. 열 및 물질전달 사이의 상사에 의해 열전달계수와 물질전달계수의 특성은 정성적으로 서로 일치한다. 여기서 X 와 Y 는 각각 평판의 길이 방향(주흐름 방향)과 평판의 폭 방향(주흐름의 수직 방향)을 나타내고, 그림 위쪽 곡선부는 타원형관을 나타낸다. 공기는 그림의 왼쪽에서 흘러와 오른쪽으로 흘러나간다.

그림에서 보듯이 물질전달계수는 관 벽 부근에 다소 기다란 등고선 모양으로 분포하였다. 관 부

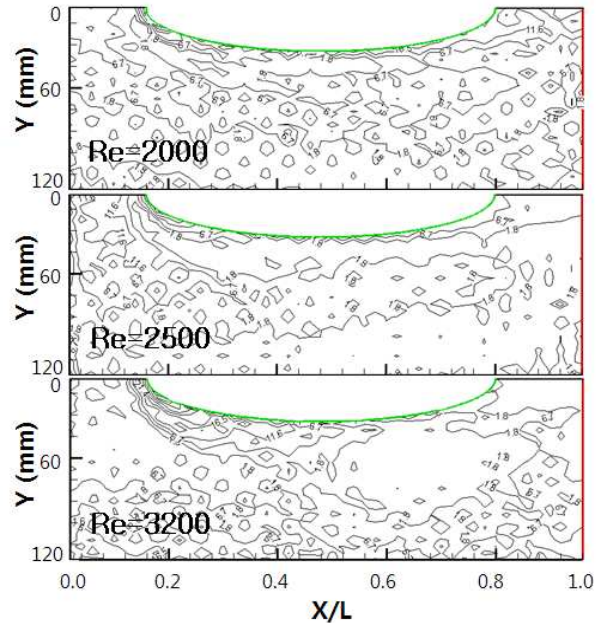


Fig. 4 Contour of local mass transfer coefficient on plate fin surface without DWVGs

근을 제외한 영역에서 물질전달계수는 다수의 작은 cell모양의 등고선으로 분포하고 있다. 이것은 공기가 시험부로 유입되면서 유로단면의 축소로 가속되는 영향에 의해 관 벽 주위의 유동이 다른 곳에 비해 보다 강한 난류가 되고, 동시에 덕트 벽 부근과 하류에 다수의 와류가 생성된 것에 기인하는 것으로 보인다.

주흐름 방향을 따라 살펴보면, 물질전달 계수는 타원형관이 시작되는 정체점에서 시작하여 바로 뒤에 흐름 방향으로 길쭉한 등고선 모양의 형태가 보임으로써 항상 최대값을 가지며, 상류에서 하류로 갈수록 완만하게 감소하는 경향을 보여 준다. 본 연구의 Re 범위 내에서 보면, Re 가 증가함에 따라 물질전달계수의 값은 다소 증가하였으며, 이것은 Re 의 증가에 따라 난류가 강해진 것에 기인하는 것으로 보인다.

Fig. 5는 4가지 익형 배열의 DWVG가 부착된 경우, Re 에 따른 물질전달계수의 분포를 보여 준다. 그림에서 삼각형 날개는 DWVG를 나타낸다. 여기서 A형과 C형 익형은 CFD형이고, B형과 D형 익형은 CFU형이다. A형과 B형 익형은 서로 같은 크기이다. 그리고 C형과 D형 익형은 서로 같은 크기이고, 그 길이는 A형과 B형 길이의 2배이다.

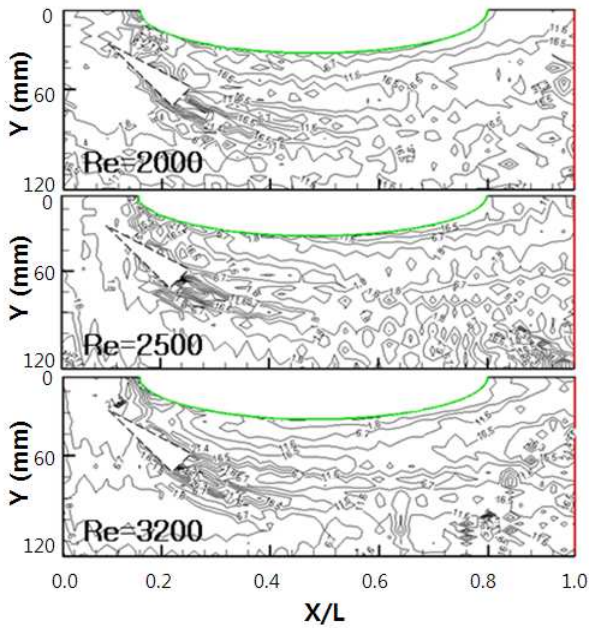


Fig. 5(a) Contour of local mass transfer coefficient on plate fin surface with DWVGs (A type)

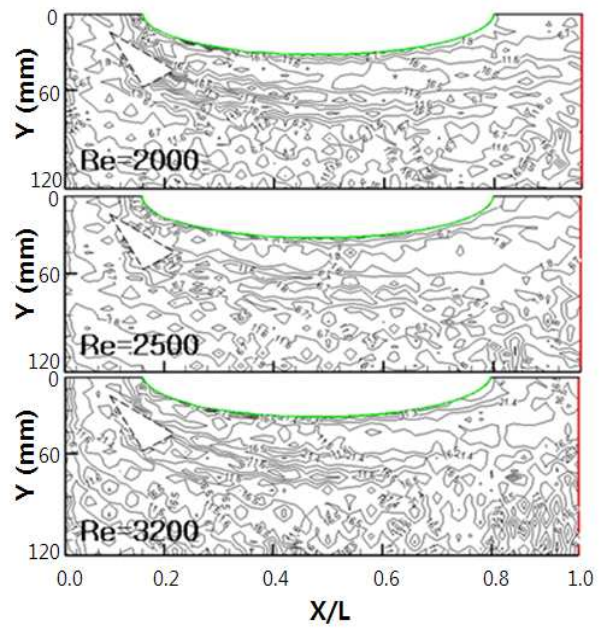


Fig. 5(c) Contour of local mass transfer coefficient on plate fin surface with DWVGs (C type)

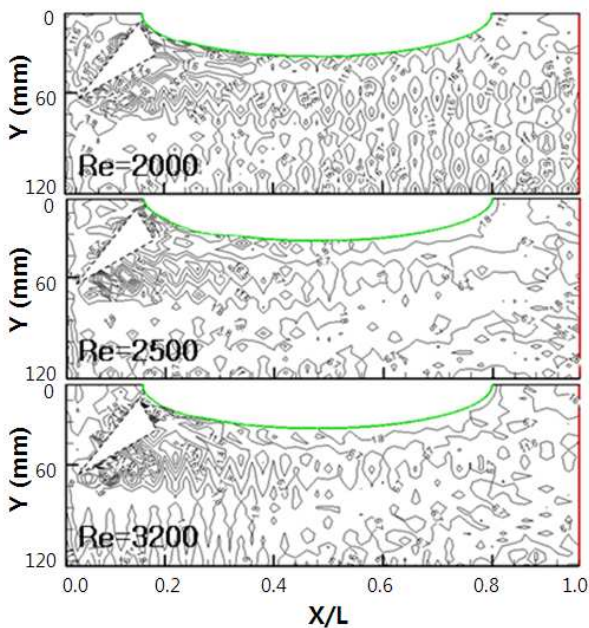


Fig. 5(b) Contour of local mass transfer coefficient on plate fin surface with DWVGs (B type)

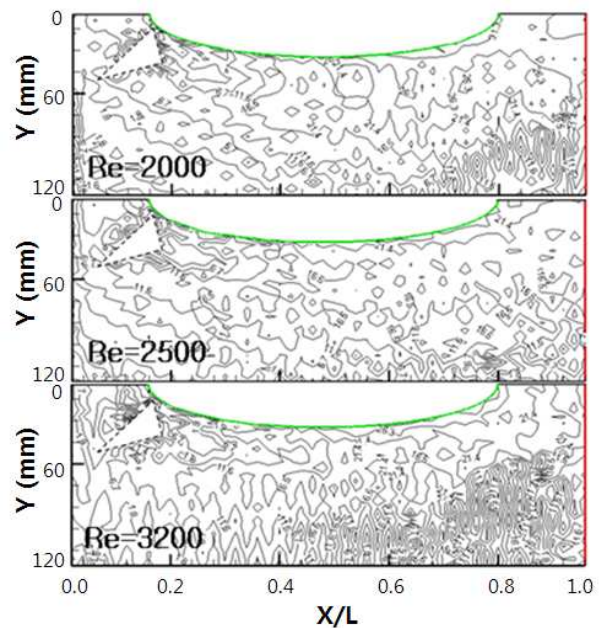


Fig. 5(d) Contour of local mass transfer coefficient on plate fin surface with DWVGs (D type)

Fig. 5(a)는 A형 DWVG가 부착된 경우 물질전달계수의 분포를 보여준다. A형은 C형과 같은 CFD형이며, A형의 길이가 C형의 2배이다. 그림에서 보듯이 날개 뒤 쪽에서 형성된 여러 개의

기다란 등고선들이 중간까지만 지속되고 있다. A형과 C형의 물질전달계수의 분포는 서로 매우 유사하지만, C형의 분포에 비해 A형의 분포는 날개 바로 뒤 쪽에서 그것의 등고선 밀도가 더 높다.

Fig. 5(b)는 B형 DWVG가 부착된 경우 물질전달계수의 분포를 보여준다. B형은 D형과 같은 CFU형이며, B형의 길이는 D형의 2배이다. 그림에서 보듯이 B형과 D형의 분포는 매우 유사하다. 그러나 D형에 비해서 B형의 분포는 날개 뒤쪽에 더 높은 밀도를 갖는 파형(wave형)의 등고선을 보여준다.

Fig. 5(c)는 C형 DWVG가 부착된 경우 물질전달계수의 분포를 보여준다. 그림에서 보듯이 날개 뒤 쪽에서 형성된 여러 개의 기다란 등고선들이 하류에 까지 지속되고, 덕트 벽 부근과 하류에 많은 cell 모양의 등고선이 분포하고 있다. 이러한 분포는 DWVG에 의한 난류의 촉진과 와류의 생성의 결과이며, 이 와류의 영향은 하류 영역까지 지속된다.

Fig. 5(d)는 D형 DWVG가 부착된 경우 물질전달계수의 분포를 보여준다. 그림에서 보듯이 날개 뒤 쪽에서 파형(wave형)의 등고선이 생성되어 하류까지 지속되고 있다. 하류와 덕트의 벽 부근에 특히 많은 수의 cell 모양의 등고선이 분포하고 있다.

Fig. 5(a)~(d)에서 본 물질전달계수의 분포특성을 종합해보면, A형과 C형 익형의 경우 익형 뒤에 기다란 등고선이 존재하고, 반면에 B형과 D형 익형의 경우 익형 뒤에 파형(wave형)의 등고선이 주로 존재한다. 그리고 Re가 증가함에 따라 덕트의 벽 부근과 하류에 작고 많은 cell 모양의 등고선이 분포한다. 물질전달 계수의 이러한 분포특성은 DWVG에 의한 난류의 촉진과 와류 생성의 결과이다. A형과 C형 익형의 경우, DWVG의 뒤에 생성되는 와류는 주로 기다란 형태로 보이나, 반면에 B형과 D형 익형의 경우 생성되는 와류는 주로 파형인 것으로 생각된다. 이들 와류는 하류 영역까지 영향을 미치는 것으로 보인다.

3.2 Nu의 분포

이제 주흐름 방향을 따라 평판 흰 표면의 Nu 분포를 살펴보자. 여기서 Nu는 평판의 어떤 지점(X)에서 평판의 폭(Y방향) 방향의 평균Nu를 나타낸다.

Fig. 6은 DWVG가 없는 경우 평판에서 Nu의 분포를 보여준다. 그림에서 보듯이 Nu는 타원형관이 시작되는 곳에서 최대값을 가지며, 하류로 갈수록 점차 감소하는 경향을 보인다. 그리고 Re

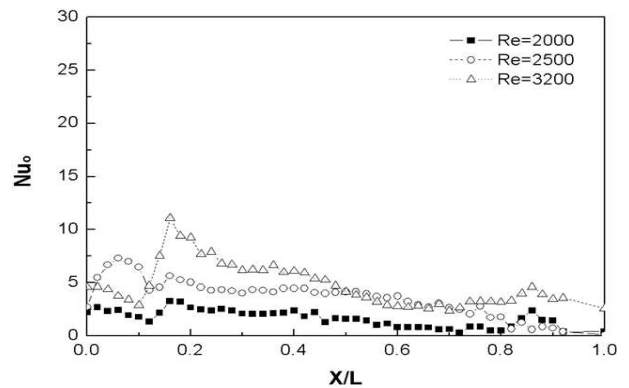


Fig. 6 Local Nusselt number on plate fin surface without DWVGs

가 증가함에 따라 Nu도 증가하나 증가의 정도는 비교적 적은편이다.

Fig. 7(a)~(d)는 네 가지 익형 배열의 DWVG가 부착된 경우의 Nu분포를 DWVG가 부착되지 않은 경우와 비교하여 Re에 따라 보여준다.

우선 전반적으로 보면, 그림에서 보듯이 Re=2000일 때 DWVG의 부착에 따른 Nu의 증가가 가장 크며, 특히 하류영역에서 Nu의 증가가 매우 크다. Re=2500일 때 Nu의 증가는 하류영역에서만 존재하고 있다. 그리고 Re=3200일 때, Nu의 증가는 미미하거나 거의 없는 수준이다. 이러한 Nu의 분포특성은 DWVG에 의한 난류의 촉진과 와류의 생성에 의해 나타난 결과로 보인다.

생성된 와류는 DWVG의 뒤부터 시작하여 하류영역 끝까지 영향을 미치는 것으로 보인다. 그리고 와류가 열전달 향상에 미치는 영향은 Re=2000일 때 가장 크고, Re=3200일 때 거의 없는 것으로 보인다. 즉, DWVG의 부착에 따른 열전달 향상 효과는 Re=2000일 때 가장 크고, Re가 2500, 3200으로 증가할수록 그 효과는 크게 떨어지고 있다. 특히 Re=3200인 경우 DWVG의 부착은 효과가 없거나 오히려 역효과를 내는 경우도 있다.

여기서 익형 배열은 서로 같고, 크기는 서로 다른 경우 Nu의 분포특성을 살펴보자.

Fig. 7(a)는 CFD형인 A형과 C형 익형을 부착한 경우 Nu의 분포를 보여준다. 그림에서 보듯이 두 경우의 Nu분포는 전반적으로 매우 유사하다. 그리고 Fig. 7(b)는 CFU형인 B형과 D형 익형을 부착한 경우 Nu의 분포를 보여준다. 그림에서 보듯이 두 경우의 Nu는 서로 유사한 증가추세를 보여주지만, D형의 Nu가 B형의 그것에 비해 더 크

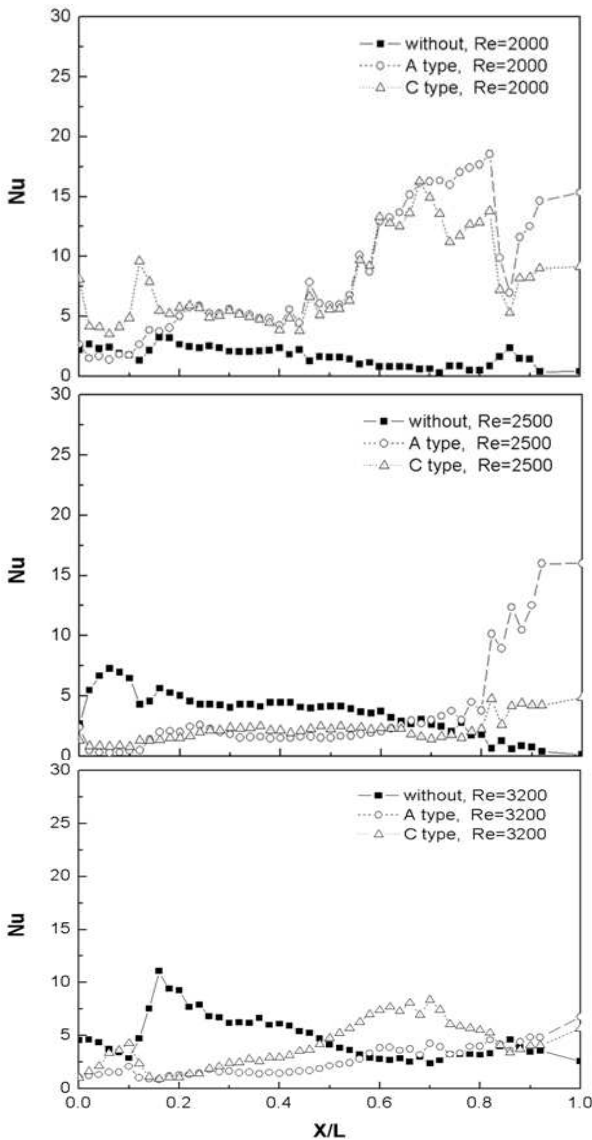


Fig. 7(a) Local Nusselt number on plate fin surface with DWVGs (A and C type)

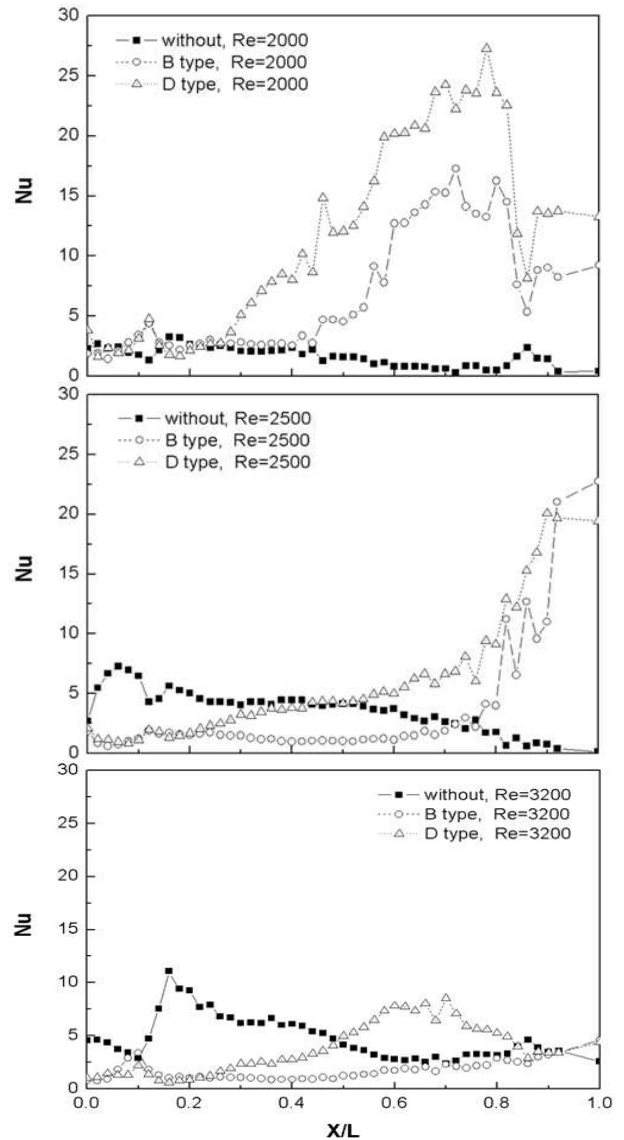


Fig. 7(b) Local Nusselt number on plate fin surface with DWVGs (B and D type)

다. 다음으로 DWVG의 크기가 서로 같고, 익형 배열이 서로 다른 경우 Nu의 분포특성을 살펴보자.

Fig. 7(c)는 A형과 B형 익형이 부착된 경우 Nu의 분포를 보여준다. 그림에서 보듯이 A형과 B형 익형이 부착된 경우, 두 경우 모두 거의 같은 Nu의 분포를 보여준다. 이로부터 A형과 B형 익형은 서로 크기는 같고 익형 배열은 다르지만, 압력강하를 제외하고, 열전달에 미치는 영향은 거의 같다고 볼 수 있다.

Fig. 7(d)는 C형과 D형 익형이 부착된 경우 Nu의 분포를 보여준다. 그림에서 보듯이 Re=2000,

Re=2500의 경우 D형의 Nu가 C형의 그것에 비해 더 높다. Re=3200인 경우, 두 가지 익형 모두 거의 같은 분포를 보여주고, DWVG의 부착에 따른 효과가 거의 없다.

3.3 전열촉진

Fig. 8은 익형배열 A, B, C 및 D형 익형 배열에 따른 전열촉진 정도를 Re에 따라 보여준다.

여기서 전열촉진 정도를 나타내는 전열촉진비 (Nu_m/Nu_{om})는 DWVG가 부착된 경우 평판 환 표면에서의 $Nu(Nu_m)$ 와 부착되지 않은 경우 평판 환 표면에서의 $Nu(Nu_{om})$ 의 비이다.

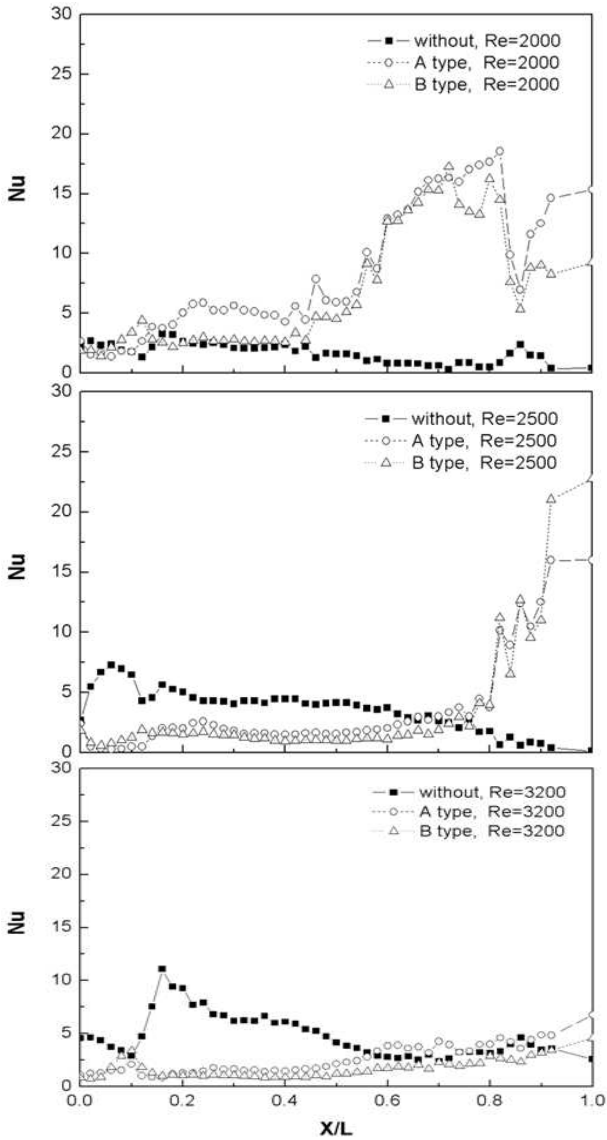


Fig. 7(c) Local Nusselt number on plate fin surface with DWVGs (A and B type)

그림에서 보듯이 DWVG의 부착에 따른 전열촉진 효과는 익형 배열에 관계없이 $Re=2000$ 일 때 가장 크고, Re 가 증가함에 따라 전열촉진 효과가 낮아짐을 알 수 있다. 특히 $Re=3200$ 인 경우 DWVG의 부착에 따른 전열촉진 효과가 미미하거나 오히려 역효과를 내는 경우도 있다. 본 연구의 Re 범위 내에서 보면 DWVG의 전열촉진 효과는 $Re \leq 2500$ 의 유동영역에서 충분히 기대할 수 있는 것으로 보인다. 이것은 평판 환-관 열교환기에서 DWVG에 의한 열전달 촉진 효과가 주로 공기의 유동이 층류 또는 저난류 유동영역일 때 큰 효과가 있음을 의미하는 것이다.

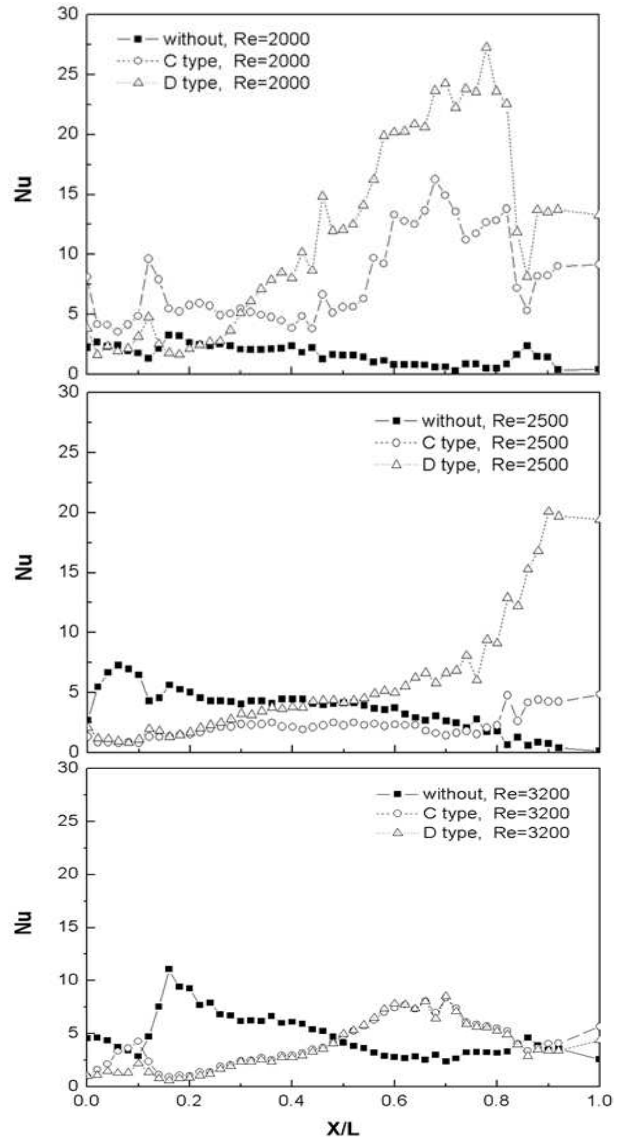


Fig. 7(d) Local Nusselt number on plate fin surface with DWVGs (C and D type)

익형 배열의 관점에서 보면, D형 익형의 전열촉진 효과가 가장 우수하지만, A형 익형의 그것도 상당히 우수함을 알 수 있다. 반면에 B형 익형의 전열촉진 효과가 가장 낮았다.

본 연구의 실험 범위 내에서 전열촉진 효과를 종합하면, $Re \leq 2500$ 의 유동영역에서 A형 혹은 D형 익형의 DWVG를 평판 환에 부착하면 전열촉진효과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

이러한 결과로부터 평판 환-관 열교환기의 열전달 성능을 층류 혹은 저난류 유동영역에서 DWVG에 의해 획기적으로 촉진시킬 수 있을 것으로 기대된다.

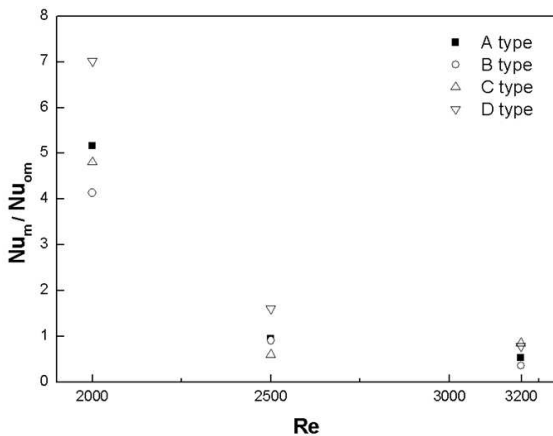


Fig. 8 Overall heat-transfer enhancement by a pair of DWVGs with $\Theta=45^\circ$

본 연구에서는 Kline과 McClintock⁽¹¹⁾이 제안한 방법에 의해 95%의 신뢰수준에서 측정오차를 분석하였다.

국소 Sherwood 수의 측정에서 총괄 불확실성은 약 5.85%로 나타났다. 여기서 나프탈렌 승화 깊이(δ)의 측정에 따른 불확실성이 2.98%로서 총괄 불확실성에 가장 큰 영향을 주었다. 그리고 나프탈렌의 증기압력($P_{v,w}$)과 고체밀도(ρ_s)에 대한 불확실성은 각각 2.61%와 2.13%이었다.

4. 결론

본 연구는 평판 환-타원형관 열교환기의 평판 환에 부착된 DWVG가 평판의 국소열전달 및 전열촉진에 미치는 영향을 실험적으로 살펴 본 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) CFD형 DWVG의 경우, 열전달계수는 DWVG 뒤에서 기다란 모양의 등고선으로, 벽 부근과 하류에서 많은 cell 모양으로 분포하였다.

CFU형 DWVG의 경우, DWVG 뒤에서 좌형 모양의 등고선으로, 벽 부근과 하류에는 많은 cell 모양의 등고선으로 분포하였다. 그리고 Re가 증가함에 따라 벽부근과 하류에서 cell모양의 등고선이 크게 증가하였다.

(2) DWVG가 부착된 경우가 부착되지 않는 경우에 비하여 $Re \leq 2500$ 의 범위에서 상류에서 하류까지 열전달계수가 증가하였고, 특히 하류에서 열전달계수가 크게 증가하였다. 또한 $Re=2000$ 의 경우 열전달계수가 익형 배열에 관계없이 가장

높은 값을 보였다.

(3) 본 연구의 실험 범위 내에서 볼 때, DWVG의 부착에 따른 열전달 촉진 효과는 D형과 A형 DWVG가 우수하였으며, $Re=2000$ 일 때 가장 큰 전열촉진 효과를 얻을 수 있었다.

참고문헌

- (1) Edwards, F.J. and Alker, C. Jr., 1974, "The Improvement of Forced Convection Surface Heat Transfer Using Surface Protrusions In the Form of (A) Cubes and (B) vortex Generators," *Proceedings of the 5th Int. Heat Transfer Conference*, Vol. 2, pp. 244~248.
- (2) Russell, C. M. B., Jones, T. V. and Lee, G.H., 1982, "Heat Transfer Enhancement Using Vortex Generators," *7th Int. Heat Transfer Conference*, New York, Vol. 2, pp. 283~288.
- (3) Fiebig, M., Kallweit, P. and Mitra, N.K., 1986, "Wing Type Vortex Generators for Heat Transfer Enhancement," *Proceeding of the 8th Int. Heat Transfer Conference*, Vol.6 pp. 2909~2914.
- (4) Fiebig, M., Valencia, A. and Mitra, N. K., 1993, "Wing-Type Vortex Generators for Fin and Tube Heat Exchangers," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 7, pp. 287~295.
- (5) Biswas G., Fiebig, M. Mitra, N. K., 1994, "Heat Transfer Enhancement in Fin-Tube Heat Exchangers by Winglet type Vortex Generators," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.37, No. 2, pp. 283~291.
- (6) Oyakawa, K., Shinzato, T. and Mabuchi, I., 1986, "Effect of Heat Transfer Augmentation of some Geometric Shapes of a Turbulence Promoter in a Rectangular Duct," *Bulletin of JSME*, Vol.29, No. 256 pp. 3415~3420.
- (7) Eibeck, P. A. and Eaton, J. K., 1987, "Heat Transfer Effects of a Longitudinal Vortex Embedded in Turbulent Boundary Layer," *Trans. ASME, J. of Heat Transfer*, Vol. 109, No. 1, pp. 16~24.
- (8) Kim, M. S., Baek, B. J., Pak, B. C., 2000,

- "An Experimental Study of Fouling Effect on the Heat Transfer Around a Tube in Staggered Tube Banks," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 24, No. 11, pp. 1478~1485.
- (9) Sogin, H. H., 1958, "Sublimation From Disks to Air Streams Flowing Normal to Their Surface," *Trans. ASME*, Vol. 80, NO. 1, pp. 61~69.
- (10) Cho, K., Irvine, T. F. and Kami, J., 1992, "Measurement of the Diffusion Coefficient of Naphthalene into Air," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 35, No. 4, pp. 957~996.
- (11) Kline, S. J. and McClintock, F. A., 1953, "Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments," *Mechanical Engineering*, Vol. 75, pp. 3~8.