

# 평판에서의 열전달 및 와류발생기에 의한 열전달 촉진에 관한 연구

유성연<sup>†</sup> · 송시영<sup>\*</sup> · 박종학<sup>\*\*</sup>

## A Study on the Heat Transfer from a Flat Plate and the Heat Transfer Enhancement by the Vortex Generator

Seong-Yeon Yoo · Si-Young Song · Jong-Hark Park

**Key Words :** Heat transfer enhancement(열전달 촉진), Vortex generator(와류발생기), Naphthalene sublimation technique(나프탈렌승화법),

### Abstract

Vortex is very interesting flow phenomena on the heat transfer enhancement. In the present study, naphthalene sublimation technique is used to determine the average and local mass transfer coefficients on the flat plate with vortex generator. A parametric study with Reynolds number and angle of attack is carried out to investigate the heat transfer enhancement. The heat transfer coefficients on the flat plate with rectangular type and delta type vortex generator are compared with those of the flat plate without the vortex generator. Comparing heat transfer coefficients between rectangular type and delta type vortex generator, rectangular type vortex generator has much higher value than delta type vortex generator at the same condition.

### 1. 서 론

열교환기는 산업용과 가정용으로 가장 광범위하게 사용되고 있는 열에너지 이용기기로서 열교환기의 미미한 효율 향상만으로도 전세계는 막대한 양의 에너지를 절약할 수 있다. 따라서 열교환기의 성능 및 효율 향상은 에너지 절약 및 환경오염 감소라는 기계공학자들이 당면한 과제에 가장 잘 부합되는 연구분야라고 할 수 있다. 열교환기 효율향상을 위해 전열면적을 증가시키는 방법이 가장 일반적이지만, 가공기술이 발달함에 따라 핀의 형상이나 열전달 표면을 다양한 형상으로 제작하여 열전달 면적의 증가와 함께 난류촉진에 의한 열전달 증가를 함께 고려하고 있다. 그러한 난류촉진을 위한 가장 대표적인 것이 와류발생기라 할 수 있는데, 이러한 와류발생기에 의한 유동현상이나 열전달특성에 대한 선행연구들을 살펴보면,

Tiggelbeck 과 Mitra<sup>(1)</sup> 등은 4 가지 형상의 와류발생기를 유동방향에 대해 30~90° 로 채널 내에 설치하여 liquid crystal thermography 를 이용하여 열전달이 최대가 되는 각도가 형상마다 각각 따로 존재하는데 비해 마찰계수는 Re 수에 따라 일정하다는 사실을 밝혔다. Biswas 와 Chattopadhyay<sup>(2)</sup>는 와류발생기의 설치각도에 따른 유동 및 열전달 특성을 연구하였다. 이들은 Re 수가 증가할수록, 설치각도가 감소할수록 열전달이 증가함을 보여주었다. Pauley 와 Eaton<sup>(3)</sup> 등은 일정열유속조건을 갖는 채널에 와류발생기를 부착하여, 여기서 와류들 사이의 상호작용과 와류와 경계층 사이의 상호작용이 열전달을 촉진한다는 사실을 밝혔다. 하상조<sup>(4)</sup>는 한쌍의 delta 형 와류발생기를 사각덕트에 설치하여 유동가시화와 함께 와류발생기 사이의 간격과 설치각도에 따른 Sh 수, 그리고 마찰계수를 연구하여, 설치각도 30°, 간격 5~10 mm일 때 전열성능이 탁월했고 와류의 영향이 하류에까지 지속되어 넓은 영역에서 열전달이 향상됨을 밝혔다.

본 연구에서는 와류발생기가 없는 평판을 풍동 바닥면과 중앙위치에 설치하여 열전달 특성을 분석하고 rectangular 형과 delta 형의 와류발생기를 부

<sup>†</sup> 충남대학교 기계설계공학과  
E-mail : syyoo@hanbat.chungnam.ac.kr  
TEL : (042)821-6646 FAX : (042)822-7366

<sup>\*</sup> 현대자동차

<sup>\*\*</sup>한국가스공사 연구개발원 LNG 기술연구센터

작했을 때의 열전달 특성과 비교하므로써 와류에 의한 열전달 촉진효과결과를 알아본다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 실험장치

본 연구에서 사용된 실험장치들은 크게 풍동, 자동이송승화깊이측정장치, 실험시편 및 구조설비, 시편설치대, 배금저항온도계, 피토투브와 마이크로마노미터등이다.

개방흡입형 풍동의 시험부는 폭 400mm, 높이 300mm 인 직사각형으로 아크릴로 만들어졌으며, 최대풍속은 약 25m/s 정도이다.

국소물질전달계수 측정을 위해 사용된 시스템은 x,y 두 개의 볼스크류축으로 구성된 table 로, 각각 승화깊이측정센서와 시편을 고정할 수 있으며, 각각의 축은 스텝모터에 의해 구동된다. x-y table 의 최대이송가능거리는 450mm×400mm 이며, 이송분해능은 축에 연결된 스텝모터의 분해능과 볼스크류축의 리드(lead)에 달려 있다. 본 연구에 사용된 스텝모터의 기본분해능은 펄스당 0.72°이며 이때의 이송거리는 0.01mm 이다. 승화깊이측정을 위한 LVDT(Linear Variable Differential Transformer: Schaevitz Eng. LBB-375-TA-020)센서는 센서팁의 직선변위에 따라 전기적인 전류신호를 내는 장치로 측정가능 범위는 ±0.02inch 이고, 측정분해능은 센서에 연결된 Data acquisition system 의 분해능에 달려 있다. LVDT 에서 나오는 신호는 매우 미약하고 또한 LVDT 가 전기적인 신호를 발생하기 위해서는 전원을 공급하여 주어야 하기 때문에 LVDT 를 Signal Conditioner(DTR-451:Schaevitz Engineering)에 연결한다. Signal Conditioner 는 LVDT 에서 나오는 전류신호를 전압신호로 변환하여 증폭하고 전원을 공급하여 주는 역할을 하는데, 센서팁의 변위가 0.001inch 에 대해 0.5 volt 의 신호를 발생하도록

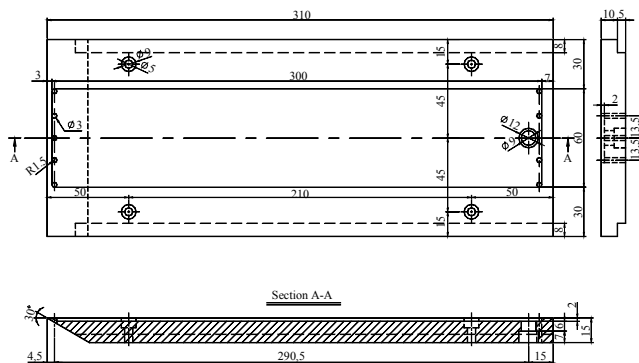


Fig. 1 Corrugated plate test piece

교정하였다. Signal Conditioner 에서 나온 증폭된 전압신호(±10V 범위)는 다시 Data-acquisition 에 의해 그 값이 읽히지는데, 이 Data Acquisition 은 본 실험에서 두가지 기능을 수행한다. 하나는 Signal Conditioner 로부터 들어오는 아날로그(Analog)신호를 읽어들이어 디지털(Digital) 신호로 변환하는 A/D 변환기능이고, 다른 하나는 시편과 센서를 이동하는데 사용되는 스텝모터를 제어하는 스텝모터 콘트롤러기능이다.

실험에 사용된 평판은 Fig.1 에서 보여지는 바와 같이 선단에서의 유동박리나 경계층이 급격히 발달하는 것을 막기위해 30 도의 경사를 갖도록 가공하였다. 시편 중앙의 폭 30mm, 깊이 2mm 의 홈은 나프탈렌이 주조되는 부분이다.

### 2.2 실험방법 및 후처리과정

실험을 수행하기 위해 먼저, 주조된 시편의 나프탈렌 주조면의 높이를 측정한 후, 풍동에서 1 시간정도 유동장에 노출한다. 이때 백금저항온도계로 풍동내부 유동장의 온도를 측정하고, 마이크로마노미터와 피토투브를 사용하여 유속을 측정한다. 풍동노출이 끝나면 시편을 풍동에서 꺼내어 앞서와 같은 방법으로 승화깊이를 측정한다.

나프탈렌의 승화량은 1 차 측정과 2 차 측정사이의 깊이 변화로부터 계산된다. 나프탈렌의 물질전달을  $\dot{m}$ 은 다음 식 (1)과 같이 나타내어진다.

$$\dot{m} / A = h_m (\rho_{v,w} - \rho_\infty) \quad (1)$$

여기서  $\rho_\infty$ 은 경계층 밖의 자유유동영역에서의 나프탈렌 농도인데 본 실험에서는 무시하였다. 시편 표면에서의 나프탈렌 증기밀도  $\rho_{v,w}$ 는 이상기체로 가정하여 다음 식(2)으로 부터 구하였다.

$$\rho_{v,w} = \frac{P_v}{RT} \quad (2)$$

식 (2)의 T 는 채널내의 유동온도로서 실험중에 백금저항온도계로 측정된 값을 평균한 것이다.  $P_v$ 는 나프탈렌 증기압으로 Ambrose<sup>(5)</sup>의 실험식으로부터 구하였다.

물질전달율은 나프탈렌 주조된 시편을 풍동의 유동장내에 일정시간 ( $\Delta\tau$ ) 노출하였을 때 단위시간당 나프탈렌승화량을 나타낸 것으로 국소물질전달계수 실험에서는 노출 전·후의 각각의 측정점에서의 승화깊이를 측정하여 다음과 같은 식(3)로 구한다

$$\dot{m} / A = \rho_s \Delta t / \Delta \tau \quad (3)$$

여기서  $\rho_s$ 는 고체 나프탈렌 밀도이다. 국소물질 전달실험은 측정하는데 상당한 시간(약 1 시간)이 소요되므로 측정하는 동안 자연대류에 의한 물질 전달이 일어나기 때문에 식 (3)의 승화깊이  $\Delta t$ 는 자연대류에 의해 발생한 승화깊이를 뺀 값이다. 자연대류에 의한 승화깊이는 시편을 제작하여 측정실 내에서 일정시간 노출시킨 후 처음과 나중의 승화깊이를 측정하여 미리 구한다.

국소물질전달계수는 식 (1)와 식 (3)로부터 다음과 같은 물질전달계수를 구하는 식(4)를 구한다.

$$h_m = \frac{\rho_s \Delta t / \Delta \tau}{\rho_{v,w}} \quad (4)$$

식 (4)로부터 구한 국소물질전달계수는 무차원 물질전달계수인 Sh 수로 표시하면 식 (5)와 같다.

$$Sh = h_m H / D_{diff} \quad (5)$$

식(5)에서 H는 특성길이로 본 연구에서는 진폭을 사용하였다.  $D_{diff}$ 는 공기중에서 나프탈렌의 물질 확산계수로서 식(6)와 같은 Goldstein<sup>(6)</sup>등에 의해 제시된 상관식을 이용하였다.

$$D_{diff} = 0.0681 \times 10^{-4} \left( \frac{T}{298.16} \right)^{1.93} \left( \frac{1.013 \times 10^5}{P_{atm}} \right) \quad (6)$$

그림 2에서 보는 바와 같이 와류발생기는 너비(w) 10mm, 간격(c) 10mm를 가진 rectangular 형과 delta 형으로 3쌍의 와류발생기가 유동방향에 수직으로 배열되고 각각의 형상에 대해  $0^\circ$ 의 입사각( $\theta$ )을 갖도록 제작되었다.

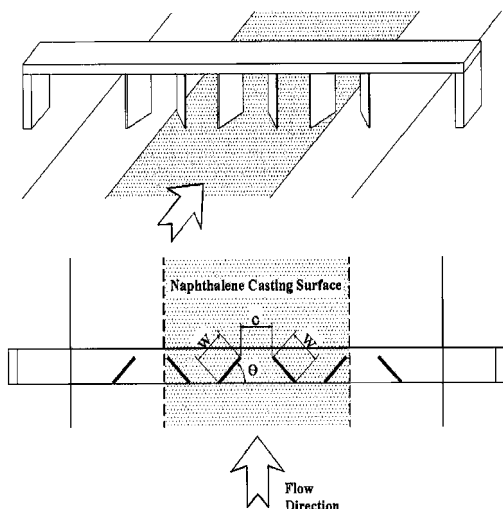


Fig. 2 Schematics of vortex generator configuration

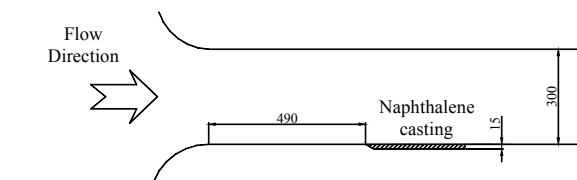
### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 Flat plate

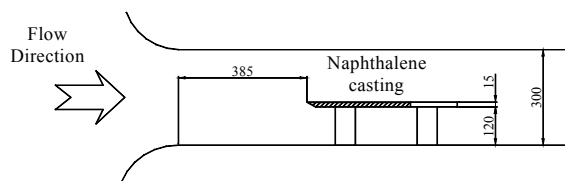
평판에서의 열전달특성을 알아보기 위한 실험은 두 가지 유동조건에서 실험되었는데, 하나는 열전달 경계층의 시작이 유동경계층 내에서 이루어지도록 풍동바닥에 설치하는 것과 열전달 경계층과 유동 경계층의 발달이 동시에 시작되도록 설치대를 이용하여 풍동중앙에 설치하는 것이다. 그림 3은 평판의 두가지의 풍동 내 설치방법을 보여주고 있다.

그림 4는 평판을 바닥에 설치했을 때, 유동직각 방향으로 평균한 열전달계수의 변화를 선단으로부터의 거리에 따라 보여주고 있다. 분포경향은 유속에 관계없이 경계층의 발달에 따라 급격히 감소하다가 일정해 지는 형태를 보이고 있다. 한가지 특이한 점은, 유속 6m/s를 기준으로 유속증가는 일정한데 열전달계수는 큰 폭으로 증가한다. 이는 평판의 물질농도경계층이 층류에서 난류로 천이되면서 나타나는 현상으로 판단된다.

물질농도경계층과 유동경계층의 발달이 동시에 시작되는 경우, 평판에서의 열전달계수 분포를 보여주는 그림 5를 보면, 선단에서의 층류경계층 영역으로 판단되는 부분의 거의 보이지 않고, 천이 영역에서 열전달계수가 급격히 상승했다가 난류경계층이 발달함에 따라 급격히 감소하는 분포를 나타내고 있다. 유속에 대해 열전달계수의 최대점의 위치를 비교해 보면 8m/s 이하의 저속에서는 속도의 증가에 따라 최대점이 점점 상류로 이동하지만, 8m/s 이상의 고속에서는 속도가 증가함에 따라 오히려 하류로 이동하는 현상을 발견했다. 그림 6은 평판에서의 국소 열전달계수를 평균한 값과 평판에서의 층류와 난류에 대한 열전달 관계식을 비교



(a) Installation of flat plate on the bottom of wind tunnel



(b) Installation of flat plate on the mounting board

Fig. 3 Schematic of flat plate installation

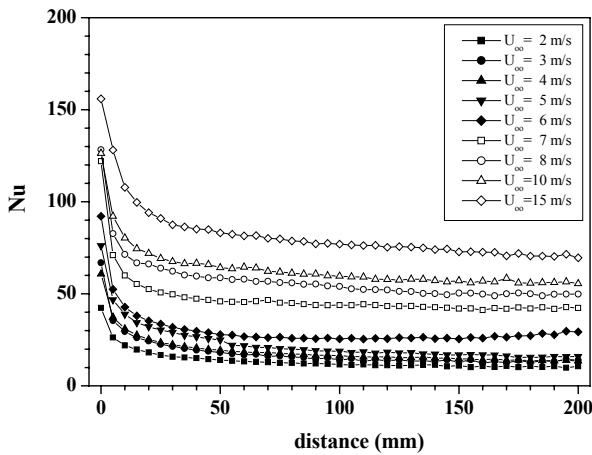


Fig. 4 Spanwise-average Nusselt number distribution of flat plate in the bottom position of wind tunnel at various velocities

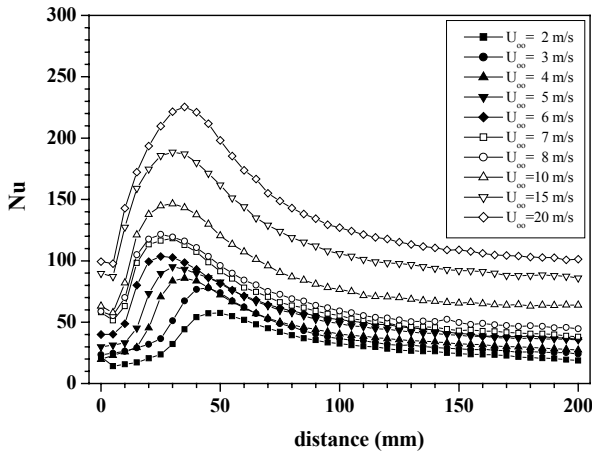


Fig. 5 Spanwise-average Nusselt number distribution of flat plate in the middle position of wind tunnel at various velocities

한 것으로, 풍동에 중간에 설치한 경우는 유속에 따라 거의 선형적인 변화를 보이는데 반해, 바닥에 설치한 경우는 저속에서는 평판에 대한 층류 열전달 관계식과 잘 일치하며 고속에서는 난류에 대한 열전달 관계식과 잘 일치함을 보인다. 중간에서의 기울기 변화는 천이영역을 나타낸다.

3.2 정사각형 와류발생기(Rectangular Winglet Pair : RWP)

평판의 나프탈렌 주조면을 풍동 바닥면과 동일한 높이에 설치하고 그 위에 너비와 높이가 동일한 rectangular 형 와류발생기를 부착하여 실험하였다. Fig. 7 은 와류발생기가 설치된 위치를 X=0 으로 놓고 이 위치로부터 떨어진 거리를 와류발생기의 폭(W=10mm)으로 무차원화하여 유동수직방향의 국소 Nu 수 평균값과 비교한 것으로 유동이 와류발생기가 설치된 부근에 도달하기 전까지는

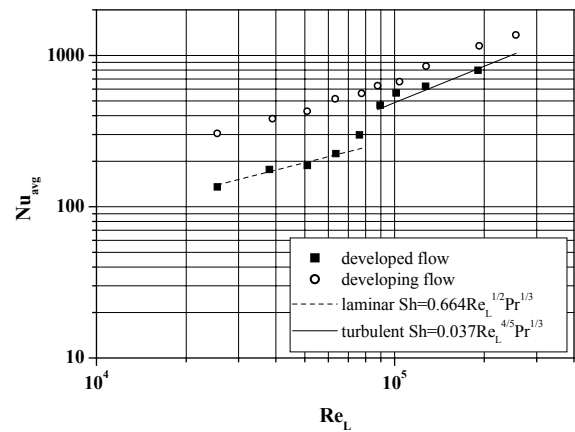


Fig. 6 Variation of average Nusselt number for flat plate with Reynolds number

평판의 분포와 동일한 결과를 나타내고 있다. 이 영역은 와류의 영향이 미치지 않고 따라서 열전달 축진이 이루어지지 않는 곳으로써 와류의 열전달 축진을 비교하기 위한 평균 열전달계수를 계산할 때 제외되어야 할 부분이다. 따라서 주조면 선단으로부터 20mm 까지(X/W = □3 ~ □1)의 부분을 제외하고 나머지 직접적인 영향을 받는 부분에 대해서만 평균열전달계수를 구하였다. Fig. 8 은 Nu 수 (Nu<sub>v,G</sub>)를 와류발생기가 없는 평판만의 Nu 수(Nu<sub>0</sub>)와 나눈 Nu 수 비를 보여주고 있다. 각각의 경우 모두에서 Nu 수 비가 1 인 지점, 즉 와류발생기가 없는 평판과 동일한 Nu 수 분포를 가지고 시작하여 입사각에 따른 와류의 영향이 주어지고 후류에서 다시 평판의 분포를 따라가는 모습을 보여주고 있다. 평판과 동일한 분포를 보이던 Nu 수는 와류발생기 바로 앞 부근에서 급격히 상승한다. 이것은 균일하게 유입되던 유동이 와류발생기를 만나면서 방해로 받아 교란되고 그 중 Fig. 9 에서와 같이 하단으로 내려간 유동이 바닥면과 만나면서 유동수직방향으로 회전하는 횡와류가 생성되기 때문인데, 이후에 유입되는 유동에 의해 이 횡와류의 강도가 지속되면서 연속적인 와류의 영향으로 와류발생기 하단 바로 앞부분이 큰 Nu 수를 갖게 된다. 이러한 횡와류는 Fig. 7 에서 볼 수 있듯이 자유흐름속도가 U<sub>∞</sub>=10m/s, 15m/s 인 고속의 경우, 빠르게 유입되는 유동에 의해 전방으로의 진행이 방해받기 때문에 그 영향이 협소한 영역으로 제한되고 따라서 와류발생기 전방에서 Nu 수가 급격한 상승을 보이는데 비해, 자유흐름속도 U<sub>∞</sub>=5m/s 인 저속인 경우에는 와류발생기 전방 넓은 영역에까지 횡와류의 영향이 미치게 되어 상대적으로 Nu 수가 완만하게 상승하는 경향을 보인다. 와류발생기에 접한 유동이 Fig. 9 에서와 같이

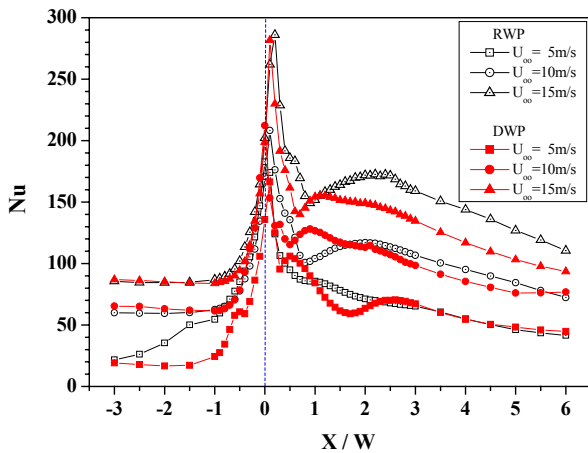


Fig. 7 Spanwise-average Nusselt number distribution of DWP and RWP at various velocities ( $\theta = 0^\circ$ )

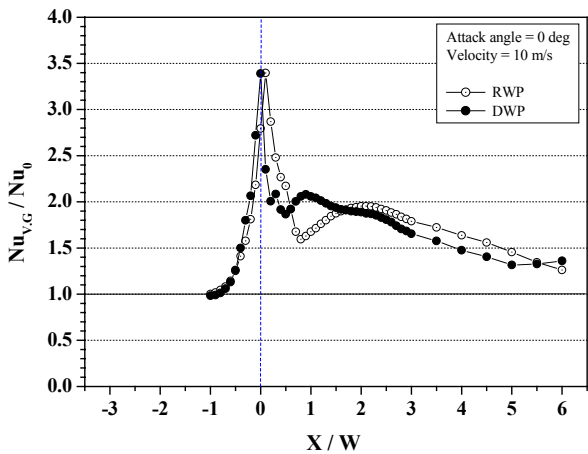


Fig. 8 Comparison of  $Nu_{VG} / Nu_0$  distribution of DWP and RWP ( $\theta = 0^\circ$ )

양측면으로 돌아나갈 경우, 와류발생기의 좌우 모서리 선을 따라 유동방향 와류, 즉 종와류가 형성된다. 이는 유동이 와류발생기를 만나면서 후면이 전면에 비해 더 낮은 압력을 갖게 되고 따라서 압력이 높은 전면에서 압력이 낮은 후면쪽으로 돌아 들어가면서 생성된다. 종와류는 유동방향으로 회전하면서 그 반경이 점차 증가하여 진행하기 때문에 와류가 생성된 후 일정거리를 벗어나면 그 영향이 사라지게 된다. 이는 Fig. 8 에서 후류로 진행함에 따라 평판의 분포에 접근하는 것으로부터 확인할 수 있다. 또한 종와류는 좌우 모서리 선을 따라 감아돌아가기 때문에 와류발생기 후면쪽에 Nu 수가 높은 영역이 나타난다.

3.3 직각삼각형 와류발생기 (Delta Winglet Pair : DWP)

너비와 높이를 10mm 로 동일하게 제작한 직각삼각형 형태의 와류발생기를 rectangular 형과 동일

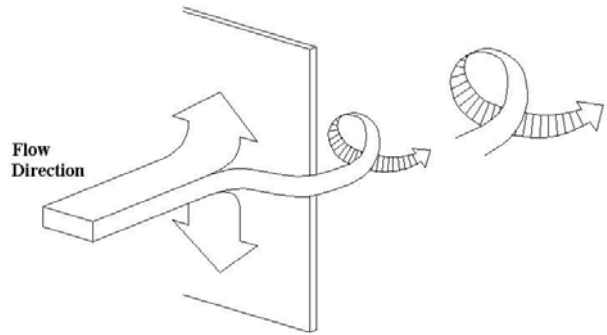


Fig. 9 Schematic of vortex formation by V.G

하게 설치하고 동일조건에서 실험하였다. Fig. 7 로부터 균일하던 Nu 수 분포가 와류발생기를 지나면서 국부적으로 상승한 후 다시 균일해지는 모습은 rectangular 형 와류발생기와 동일하다. 그러나 와류발생기의 후면에 생기는 언덕과 골이 rectangular 형에 비해 가늘고 후류로 길게 이어지는 모습을 볼 수 있다. 이것은 와류발생기의 형상에 따른 변화로써, 정사각형 형태를 갖는 rectangular 형 와류발생기에 비해 delta 형 와류발생기는 절반의 면적에 해당하는 직각삼각형 형태를 갖기 때문에 유동이 방해될 더 적게 받게 된다. 균일하게 유입되던 유동이 delta 형 와류발생기를 통과할 때, 와류발생기에 인접한 유동만이 모서리 선을 따라 와류를 형성하고 그 외 나머지 유동은 후류로 지나가는데, 이 와류형성과 무관한 지나가는 유동이 rectangular 형 와류발생기에 비해 더 많게 된다. 즉, delta 형 와류발생기는 rectangular 형 와류발생기에 비해 종와류를 형성하는 유동이 적고 상대적으로 와류형성과 관계없는 유동이 많기 때문에 종와류의 강도가 약하고 가늘게 후류까지 이어지게 된다. 또한 직각삼각형의 빗변쪽 모서리 선을 따라 발생한 와류가 수직 모서리 선을 따라 발생한 와류에 비해 더 많은 Nu 수 상승과 후류로 더 멀리 영향을 주고 있다.

종와류는 와류발생기의 좌우 모서리 선을 따라 발달하기 때문에 이 모서리 선에 많은 영향을 받게 된다. rectangular 형 와류발생기가 좌우 모서리 선이 수직선으로 동일한 정사각형 형태를 갖지만, delta 형 와류발생기는 한 쪽은 수직선을, 다른 쪽은 직각삼각형의 빗변에 해당하는 경사진 선을 모서리 선으로 갖는다. 따라서 delta 형 와류발생기가 경사진 선을 따라 넘어들어가면서 종와류가 생성되므로 더 일찍 회전을 시작하여 바닥에 부딪치게 된다. 이는 동일조건에서 rectangular 형과 delta 형 와류발생기의 Nu 수 비를 보여주고 있는 Fig. 8 에서도 확인할 수 있다.

Fig. 8 은 rectangular 형과 delta 형 와류발생기에 대해서 유동방향으로 20~90mm( $X/W = 0.1 \sim 0.6$ )까지 국소 Nu 수 값을 선택하여 평균한 평균 Nu 수 값을 보여주고 있다. 이를 비교해보면 동일조건에서 두 형태의 와류발생기 모두에서 속도가 증가함에 따라 평균 Nu 수 값이 증가하였고 이는 앞서 측정영역 모두를 나타내는 Fig. 7 에서와 동일하다.  $U_\infty = 10\text{m/s}$  일 때 두 형태의 와류발생기가 비슷한 평균 Nu 수 값을 갖으나  $U_\infty = 5\text{m/s}$  로 감소할 때는 delta 형 와류발생기가 최대 33%까지 더 큰 평균 Nu 수 감소를 보이고 반대로  $U_\infty = 15\text{m/s}$  로 증가할 때는 rectangular 형이 최대 49%까지 더 큰 평균수 증가를 보인다. 또한 동일한 속도에서 rectangular 형 와류발생기가 delta 형 와류발생기에 비해 평균 20% 정도 더 높은 평균 Nu 수 값을 갖고 있다. 이것은 Fig. 8 에서 볼 수 있듯이 rectangular 형 와류발생기에서 생성되는 종와류의 강도가 크고 후방에서 바닥에 부딪치는 영역이 넓게 분포하기 때문에 이 부분에서 Nu 수 차이가 평균 Nu 수 값에 크게 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

나프탈렌승화법을 이용하여 두 가지의 설치위치에서의 평판과 바닥면에 설치한 평판 위에 rectangular 형과 delta 형 와류발생기를 부착하여 유속에 따른 물질전달실험을 수행하고 열/물질전달의 유사성 관계식을 이용하여 다음과 같은 와류의 열전달 촉진에 대한 결론을 얻었다.

- (1) 평판을 풍동바닥에 설치한 경우와 중간에 설치했을 때, 국소열전달계수의 분포는 매우 다른 양상을 보였다.
- (2) 풍동바닥에 설치한 경우의 평균 열전달계수는 평판에 대한 층류와 난류의 열전달관계식들과 매우 잘 일치했다.
- (3) 와류발생기에 의해 생성되는 와류에는 유동수직방향으로 회전하는 횡와류와 유동방향으로 회전하는 종와류가 있고 횡와류는 와류발생기 전방에서, 종와류는 후방에서 열전달 촉진과 관련된다.
- (4) 횡와류의 영향은 고속일수록 와류발생기 전방 협소한 영역으로 제한되어 더 큰 Nu 수 최고값을 갖고 급격한 열전달 상승을 보인다.
- (5) 종와류는 delta 형 와류발생기에서 더 일찍 회전을 시작하여 바닥면에 부딪치는 영역이 와류발생기에 인접하고 협소하지만, rectangular 형 와

류발생기는 더 후방에 부딪치면서 넓은 범위에 영향이 지속된다.

- (6) rectangular 형 와류발생기가 delta 형 와류발생기에 비해 와류의 강도가 크고 오래 지속되므로 동일조건에서 더 큰 열전달 촉진이 이루어진다.

#### 후 기

본 연구는 과학기술부 지원으로 수행하는 21 세기 프론티어 사업(이산화탄소 저감 및 처리기술개발)의 일환으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- (1) St. Tiggelbeck, Mitra N. K., and Fiebig M., "Comparison of Wing-Type Vortex Generator for Heat Transfer enhancement in Channel Flows", J. Heat Transfer, Vol. 116, pp.880-885, 1994.
- (2) Biswas G. and Chattopadhyay H., "Heat Transfer in a Channel with Built-in Wing-Type Vortex Generators", Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 35, No. 4, pp. 803-814, 1992.
- (3) Pauley W. R. and Eaton J. K., "The Effect of Embedded Longitudinal Vortex Arrays on Turbulent Boundary Layer Heat Transfer", ASME J. of Heat Transfer, Vol. 116, pp. 871-879, 1994.
- (4) 하상조, "Delta Wing Type Vortex Generator 를 삽입한 4 각 덕트내의 강제대류 열전달 촉진", 석사학위논문, 영남대학교, 1995.
- (5) Goldstein R. J. and Cho H. H., "A Review of Mass Transfer Measurements Using Naphthalene Sublimation", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 10, pp. 416-434, 1995.