

2차 유동 영역에서 꺾임각 변화에 따른 주름진 사각 덕트에서의 열/물질전달 및 유동 특성

권현구*·황상동**·조형희†

Two dimensional flow and heat/mass transfer characteristics in rectangular wavy duct with corrugation angle

Hyun Goo Kwon, Sang Dong Hwang and Hyung Hee Cho

Key Words: wavy duct(주름진 덕트), corrugation angle(꺾임각), heat/mass transfer(열/물질전달), visualization(가시화), naphthalene sublimation technique(나프탈렌 승화법), pressure coefficient(압력 계수)

Abstract

The present study investigates the two dimensional flow and heat/mass transfer characteristics of wavy duct with various corrugation angles. For the heat/mass transfer coefficients, a naphthalene sublimation technique is used. Numerical analysis and wall pressure measurement show detailed two dimensional flow features. The corrugation angles change from 145° to 100°. The operating Reynolds numbers based on the duct hydraulic diameter vary from 700 to 3,000. The duct aspect ratio maintains 7.3.

On the pressure wall, strong flow mixing enhances heat/mass transfer coefficients at the front position. In addition, the rear side of pressure wall, the near of peak, is affected by the acceleration and the shedding of main flow. On the suction wall, however, flow separation and reattachment lead to the valley and the peak of heat/mass transfer coefficient. Also, highly increasing boundary layer at the suction wall affects the decrease of heat/mass transfer. As decreasing corrugation angles, the spanwise average Sherwood number increases and the peak or the valley positions of the local Sherwood number are varied.

기호설명

C_p : 정압 계수, 식 (5)
 D_h : 덕트 수력 직경
 D_{naph} : 공기중에서 나프탈렌의 물질확산계수
 H : 덕트 높이
 h_m : 물질전달계수, 식 (1)
 L : 덕트 길이

\dot{m} : 물질플럭스 (mass flux)
 P_s : 덕트 표면 정압
 P_∞ : 대기압
 Re_{Dh} : 덕트 수력직경 Reynolds 수 = $U_0 D_h / \nu$
 Sh : Sherwood 수, 식 (2)
 \overline{Sh}_{span} : 폭 방향 평균 Sherwood 수, 식 (3)
 $\overline{\overline{Sh}}$: 전체 면적 평균 Sherwood 수, 식 (4)
 dt : 나프탈렌이 유동장에 노출된 시간
 U_0 : 덕트 입구 속도
 W : 덕트 폭
 x : 주유동 방향(streamwise) 좌표, Fig. 1
 y : 높이 방향 좌표, Fig. 1
 dy_N : 나프탈렌의 승화 깊이
 z : 폭 방향(spanwise) 좌표, Fig. 1

* 연세대학교 대학원

** 특허청

† 회원, 연세대학교 기계공학부

E-mail : hhcho@yonsei.ac.kr

TEL : (02)2123-2828 FAX : (02)312-2159

그리스 문자

- α : 주름진 덕트의 꺾임각
- ρ : 공기 밀도
- ρ_s : 고체 나프탈렌의 밀도
- $\rho_{v,w}$: 벽면에서의 나프탈렌 증기농도
- $\rho_{v,\infty}$: 자유유동에서의 나프탈렌 증기농도

1. 서 론

주름진 덕트(wavy duct)는 전열 면적을 증가시켜 열전달 성능을 향상시킬 뿐 아니라 이차 유동의 발생으로 추가적인 열전달 성능을 기대할 수 있다. 이러한 덕트에서의 유동은 저속(층류) 영역과 고속(난류) 영역에서 다른 특성을 나타낸다. 층류 영역에서는 횡축 와류(transverse vortex)와 함께 종축 와류(longitudinal vortex)가 발생한다⁽¹⁾. 그러나 난류 영역에서는 종축 와류가 사라지고 횡축 와류의 영향으로 2차원 유동 특성만이 나타난다. 주름진 덕트에서의 꺾임각과 Reynolds 수에 국소 열전달 결과는 Jang 등^(2,3)이 설명한 바 있다. 145°의 꺾임각을 가지는 주름진 덕트에서 층류와 난류영역에서의 유동 및 열전달 특성에 대한 최근의 연구 결과는 Hwang 등⁽⁴⁾이 자세히 제시하였다. 이들의 결과에서 Reynolds 수가 1,000 이하에서만 종축 와류가 나타남을 실험적으로 보였다.

저속 영역에서의(일반적으로 $Re < 1,000$) 종축 와류는 오목면에서 유동의 원심력에 불안정성에 의해 발생하며 테일러-괴틀러 와류(Taylor-Görtler vortex)라고 불린다. Goldstein과 Sparrow⁽⁵⁾는 2차원 덕트에서 나프탈렌승화법을 이용하여 주름진 덕트에서의 2차 유동이 발생함을 보였으며, 그 결과 열전달이 향상됨을 실험적으로 제시하였다. Nishimura 등^(6,7)은 단면적비가 15.38인 주름진 덕트에서 발생하는 이차 유동에 대한 실험적 연구를 진행하였다. 이들은 물질전달 방법과 유동 가시화를 통해서 낮은 유속 영역에서 테일러-괴틀러 와류의 발생 및 특성에 대한 자세한 결과를 제시하였다.

Molki와 Yuen⁽⁸⁾은 난류 영역에서 주름진 덕트의 높이의 변화가 압력 손실 및 열전달 특성에 미치는 영향을 발표하였다. 이들은 유동 가시화 결과를 바탕으로 주름진 덕트에서 유동 특성을 파악하였으며 평균 열전달 계수를 통하여 덕트

높이의 영향을 제시하였다. 최근에는 Islamoglu와 Parmaksizoglu⁽⁹⁾이 plate형 열교환기에서 덕트 높이의 변화에 의한 열전달 계수를 주기 평균 열전달 계수로 제시하여 성능 계수를 발표하였다.

소형 열교환기(Compact heat exchanger)의 유량 조건은 Reynolds 수가 수 백에서 수 천 정도의 범위를 가진다. 따라서 낮은 유속에서의 유동/열전달 특성 뿐 아니라, 난류 영역에서의 연구 또한 필요하다. 지금까지 대부분의 주름진 덕트에서의 연구는 낮은 유속에서의 이차 와류 특성에 대한 연구나 높은 유속에서의 평균 열전달 특성에 대한 연구가 대부분이다. 따라서 본 연구에서는 높은 유속 범위에서 주름진 덕트의 꺾임각의 변화에 따른 유동 및 국소 열전달계수 분포를 측정하고자 하였다.

2. 실험 및 수치해석

2.1 실험 장치

주름진 덕트는 측정하고자 하는 전열면에서 완전 발달된 열/유동 특성을 파악하기 위해서 5 주기를 가지도록 설계하였으며 4번째 주기의 덕트에서 실험을 수행하였다. 실험 장치는 시험 덕트 하류에 유동 안정기가 설치된 챔버가 위치하며, 오리피스와 흡입형 송풍기가 설치되어 있다. 장치에 대한 자세한 설명은 선행 연구 결과에 제시되어 있다⁽⁴⁾. 덕트의 꺾임각에 따른 특성변화를 고찰하기 위해 주름진 덕트에서의 꺾임각(α)은 145°, 130°, 115°, 그리고 100°로 변화 시켰으며 덕트의 높이(H), 폭(W), 그리고 길이(L)는 각각 53.0 mm, 7.2 mm, 그리고 33.5 mm로 고정하였다. 주름진 덕트의 단면 종횡비는 7.3이다. 시험 덕트의 형상 및 자세한 제원은 Fig. 1과 Table 1에 나타나 있다. 본 연구에서는 덕트의 수력직경을 기준으로 한 Reynolds 수(Re_{Dh})가 700~3,000까지 변화시키면서 실험을 수행하였다.

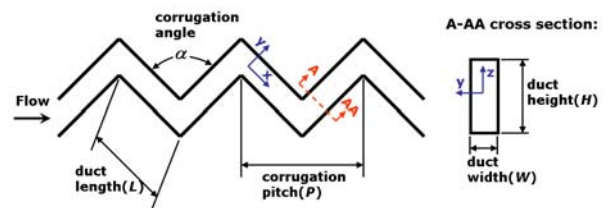


Fig. 1 Details of test wavy duct

Table 1 Dimensions of wavy duct

Duct height (H)	53.0 mm
Duct width (W)	7.3 mm
Aspect ratio (H/W)	7.3
Duct length (L)	33.5 mm
Hydraulic diameter (D_h)	12.8 mm
Corrugation angles (α)	145°, 130°, 115°, 100°

열전달과 물질전달 사이의 상사성을 이용한 전 열면에서 열/물질전달 특성은 나프탈렌 승화법을 사용하였으며, 물질전달계수 측정을 위한 높이 측정장치는 LVDT (Linear Variable Difference Transformer, LBB-375TA-020)를 사용하였다. 이송 장치 및 기타 물질 전달 측정 장치는 Cho와 Rhee⁽¹⁰⁾와 동일하다. 덕트 표면에서의 정압 계수를 측정하기 위해서 유동 방향과 수직하게 1.0 mm 직경의 구멍을 가공하였다. 각 지점에서의 압력은 디지털 마이크로마노미터 (Digital Micro-Manometer, DPI 145)와 멀티플 스캐너 (Multiple Pressure Scanner, MS 1000)을 사용하였다.

2.2 수치 해석

주름진 덕트에서의 유동 특성을 이해하기 위해서 상용 열유동해석 프로그램인 Fluent 6.2를 사용하였다. 계산 영역은 실험 장치와 동일한 치수와 유동 조건을 사용하였다. 해석 대상의 모델링 및 그리드(grid) 작성은 Gambit 2.1을 사용하였다. 그리드 테스트를 통하여 최종 작성된 모델의 총 그리드의 개수는 약 270,000개이다. 유동 계산을 위한 난류 모델은 Hwang 등⁽⁴⁾과 같은 RNG $\kappa - \epsilon$ 모델을 사용하였다.

2.3 물질(열)전달계수 측정

국소 물질전달계수는 식 (1)과 같이 정의된다.

$$h_m = \frac{\dot{m}}{\rho_{v,w} - \rho_{v,\infty}} = \frac{\rho_s(dy_N/dt)}{\rho_{v,w}} \quad (1)$$

본 실험에서는 덕트로 유입되는 공기가 나프탈렌을 포함하지 않으므로 $\rho_{v,\infty}=0$ 이다. 따라서 물질전달계수는 나프탈렌 승화 깊이(dy_N), 실험 시간(dt), 고체 나프탈렌 밀도(ρ_s), 그리고 나프탈렌

증기 밀도($\rho_{v,w}$)로 구할 수 있게 된다⁽¹¹⁾. 무차원 물질전달계수인 Sherwood 수는 식 (2)와 같이 표현된다.

$$Sh = \frac{h_m D_h}{D_{naph}} \quad (2)$$

여기서, D_{naph} 는 Goldstein과 Cho⁽¹²⁾가 제시한 나프탈렌의 물성치에 근거하였다. 덕트 벽면에서의 2차원 열전달 특성을 파악하기 위해서 식 (3)과 같이 폭 방향으로 평균된 물질전달계수 (spanwise average Sh)를 정의 하였다. 식 (3)의 계산에서 z 방향 범위는 모서리 와류의 영향을 제거하기 위해서 $-1.5 \leq z/D_h \leq 1.5$ 의 영역에서 계산하였다.

$$\overline{Sh}_{span} = \left[\frac{\int_{-H/2}^{H/2} Sh dz}{\int_{-H/2}^{H/2} dz} \right]_x \quad (3)$$

본 연구에서는 Kline과 McClintock의 방법⁽¹³⁾을 사용하여 물질전달계수 Sherwood 수에 대한 오차 해석을 수행하였다. 95% 신뢰구간에서 전체 오차는 약 7.2% 이내였다.

2.4 압력 측정

주름진 덕트의 네 번째 피치(pitch) 압력면 (pressure wall)과 흡입면(suction wall)에서의 압력 분포를 측정하기 위하여 각 벽면에 주유동과 수직하게 직경 1.0 mm의 압력 홀(pressure hole)을 가공하였다. 압력홀은 각 벽면에 10개씩 등 간격으로 위치되었다. 벽면의 압력 특성은 식 (5)와 같이 정압 계수를 사용하여 나타내었다.

$$C_p = \frac{P_s - P_\infty}{1/2 \rho U_0^2} \quad (5)$$

여기서, P_∞ 는 대기압을 사용하였고 U_0 는 시험 덕트로 유입되는 평균 유속을 의미한다.

3. 결과 및 검토

3.1 유동 특성

145° 꺾임각을 가지는 주름진 덕트에서 수치해석을 수행하였다. 난류 영역인 $Re_{Dh}=3,000$ 에서의 유속 및 난류 강도 특성을 Fig. 2에 제시하였다. 상류 압력면(upstream pressure wall)에서의 유동 특성은 다음과 같다. 4번째 피치입구부에서 저속의 혼합류 영역이 존재한다. 이 영역에서는 낮은 유속에도 불구하고 난류강도가 덕트 전체에서 가장 크게 나타난 곳이다. 이후 유동은 압력면으로 가속되면서 경계층의 두께가 크게 증가하지는 않지만 난류 강도 또한 급격히 줄어드는 특징을 보였다. 유동은 다시 상류 압력면과 하류 흡입면 사이의 피크 영역에서 유속 증가 및 유출(shedding)을 특성을 보이며 하류로 박리된다. 박리된 유동은 하류 흡입면에서 재부착(reattachment)되고, 역압력 구배를 만나면서 급격히 경계층이 성장하게 된다. 흡입면의 재부착 지점에서도 난류 강도가 매우 높게 나타났다. 이후 유동은 경계층이 발달 하면서 5 번째 피치 상류의 압력면 선단에서 혼합류 영역을 형성하게 된다.

압력면과 흡입면에서의 정압 특성은 Fig. 3에서 수치 해석 결과와 압력 측정 결과를 비교하여 제시 하였다. Fig. 3에서 점선은 상류 압력면과 하류

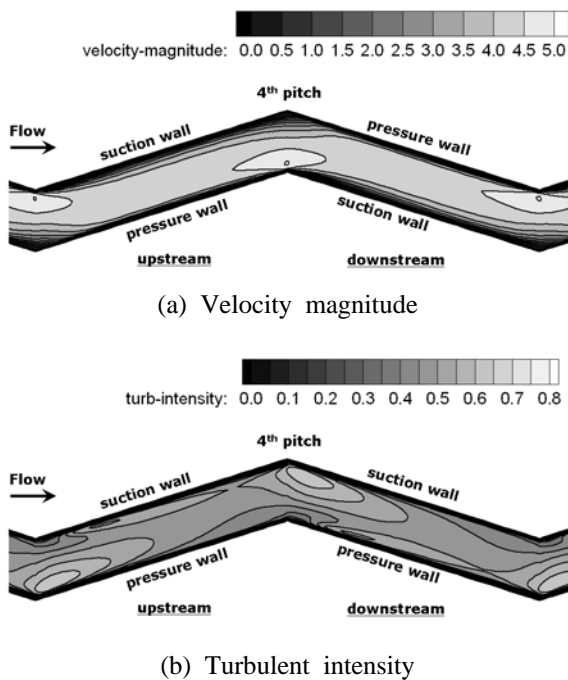


Fig. 2 Streamwise flow contours in wavy duct of 145° corrugation angle at $Re_{Dh}=3,000$ (CFD result)

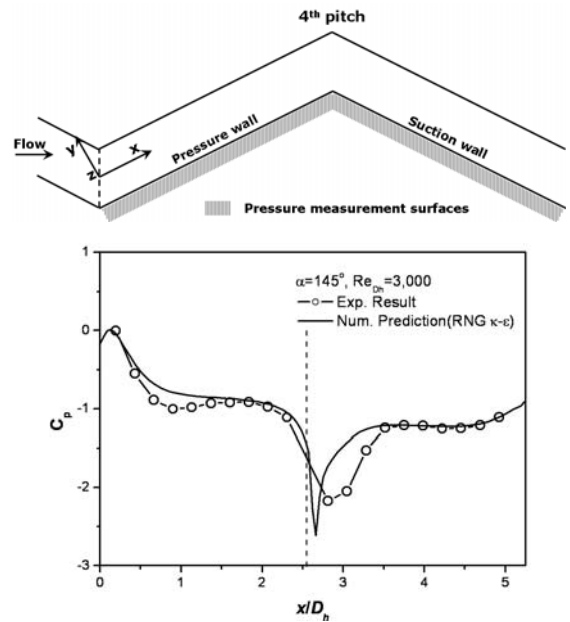


Fig. 3 Static pressure coefficients on the 145° corrugated walls at $Re_{Dh}=3,000$

흡입면의 경계를 나타낸다. 전체적으로 수치해석 결과와 측정값을 비교하면 박리 후 재부착 위치를 제외하고는 매우 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 꺾임각이 145°의 경우, 상류 압력면에서의 정압이 혼합류 영역에서 매우 높은 값을 가지다가 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다($x/D_h < 1.0$). 이는 압력면 선단에서 꺾임각의 영향으로 정체 유동이 형성되어 압력이 상승했기 때문이다. 이후 유동은 순압력 구배를 거쳐 $x/D_h=2.0$ 근처에서 유동 가속으로 압력이 급격히 떨어지는 것을 알 수 있다. 흡입면에서는 유동 박리로 인해서 압력이 급격히 감소하는 것을 볼 수 있으며, $x/D_h=3.5$ 부근에서 재부착하는 것을 알 수 있다. 재부착 후 역압력 구배를 만나면서 경계층이 성장하다가 혼합류 정체 유동 영역에서 압력이 상승하게 된다.

주름진 덕트 전열면에서의 압력 특성은 꺾임각이 변하여도 전체적인 유동 특성은 동일하게 나타남을 Fig. 4에서 볼 수 있다. 그러나 혼합류 영역에서의 압력 상승 및 흡입면 재부착 위치 등에서는 차이가 나타났다. 꺾임각이 작아짐에 따라서(α 가 감소함에 따라서) 혼합류 영역에서의 압력 상승 및 범위가 커짐을 알 수 있다. 꺾임각이 가장 작은 100°에서는 이러한 혼합류의 영역이 압력면에서는 $x/D_h=1.0$ 까지, 그리고 흡입면에서는

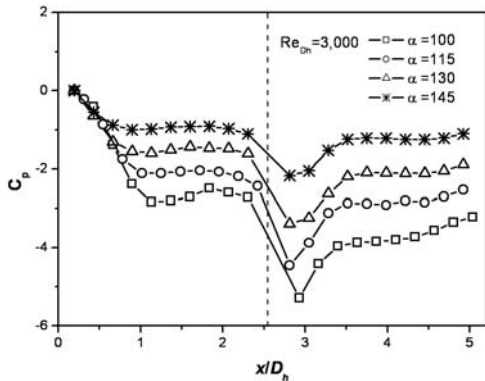
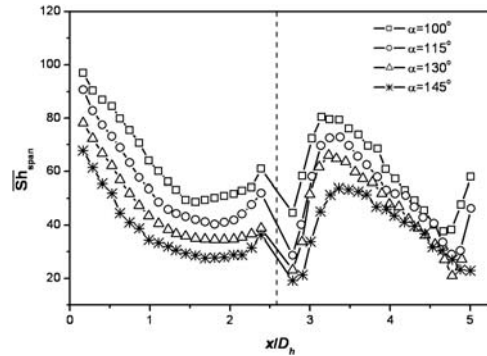


Fig. 4 Static pressure coefficients with corrugation angle at $Re_{Dh}=3,000$

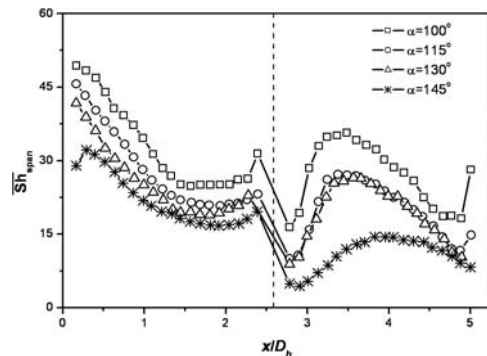
$x/D_h=4.0$ 까지 확대된 것을 볼 수 있다. 또한, 격임각이 작아질수록 재부착 지점이 흡입면 상류쪽으로 이동하는 것을 확인할 수 있다.

3.2 물질(열)전달 특성

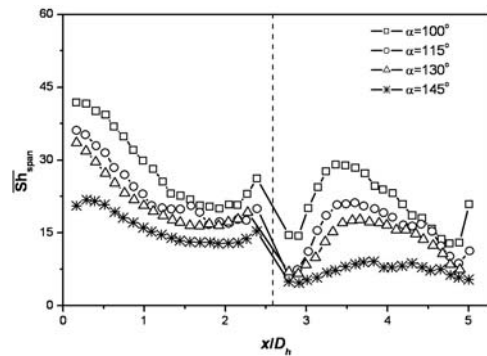
주름진 덕트에서 격임각이 2차원 열(물질)전달 특성에 미치는 영향을 나타내기 위해 벽면 근처에서의 모서리 와류 부분을 제외한 ($-1.5 \leq z/D_h \leq 1.5$) 폭 방향 평균 열(물질)전달계수 (식 3)를 Fig. 5에 제시하였다. 격임각의 변화 및 Reynolds 수의 변화에도 불구하고 지배적인 유동 구조가 바뀌지 않음으로, 열(물질)전달 특성도 유사한 경향을 나타내고 있는 것을 볼 수 있다. 격임각이 작아질수록 유동 가속의 영향과 재부착 강도의 증가로 인해서 전체적으로 열(물질)전달이 증가됨을 알 수 있다. 특히, 압력면 후미에서의 유동 가속으로 인한 열(물질)전달계수의 증가가 격임각이 작아질수록 보다 넓은 압력면에 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있다. 또한, 흡입면에서의 재부착으로 인한 열(물질)전달계수의 국소적 극대값이 격임각이 작아질수록 높게 나타나고, 흡입면 상류쪽으로 이동하는 것을 알 수 있다. 그러나 격임각이 작아지면 역압력 구배의 크기도 커져서 열(물질)전달계수 또한 급격히 감소하게 되어 흡입면 후미에서는 거의 동일한 열(물질)전달계수를 가지게 됨을 보게 된다. 흡입면 끝단에서는 격임각의 크기에 따라서 혼합류의 영향이 다르게 나타남을 또한 볼 수 있다. 145° 의 격임각에서는 흡입면 끝단에서 국소적인 열(물질)전달계수의 증가가 나타나지 않았으나, 격임각이 작아지면서 혼합류로 인한 강한 난류 강도의 영향이 압력면 선단 뿐 아니라



(a) $Re_{Dh}=3,000$



(b) $Re_{Dh}=1,000$



(c) $Re_{Dh}=700$

Fig. 5 Spanwise average Sh distributions with corrugation angle

흡입면 끝단까지 확장된 것을 볼 수 있다. 이러한 결과는 격임각 115° 와 100° 에서 두드러지게 나타났다. Fig. 5의 (b)와 (c)에서와 같이 유속이 낮아져도 위에서 언급한 동일한 결과가 나타났다. 유속이 낮아질수록 145° 주름진 덕트에서는 강한 혼합류로 인한 국소 열(물질)전달계수의 극대값이 압력면 하류 쪽으로 이동하고 있음을 볼 수 있는데, 이는 혼합류의 중심이 그 만큼 압력면 쪽으로 이동하였음을 의미한다.

4. 결 론

다양한 꺾임각($\alpha=100^\circ, 115^\circ, 130^\circ, 145^\circ$)을 가지는 사각 주름 덕트에서의 유동 및 열(물질)전달 특성을 수치해석 및 실험을 통하여 해석하였다. 본 연구에서 주름진 덕트에서의 2차 유동/열(물질)전달 특성에 대해서 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 압력면에서는 선단에서의 강한 혼합류 영향과 끝단에서의 가속 및 유출 유동으로 인해서 국소적인 열(물질)전달계수가 증가한다.

(2) 흡입면에서는 유동 재부착이 열(물질)전달의 증가에 가장 큰 영향을 미친다.

(3) 꺾임각이 작아질수록 유동 가속 및 재부착 강도가 커져서 전체적인 열(물질)전달계수가 증가한다.

(4) 꺾임각이 작은 경우, 압력면 끝단에서 유동 가속 및 유출 유동의 영향이 강해지고 그 범위 또한 넓어진다.

(5) 흡입면에서의 유동 재부착 위치는 꺾임각이 작아질수록 상류로 이동하며, 그 강도는 증가한다.

(6) 꺾임각이 작아질수록 혼합류의 영향으로 인한 열(물질)전달계수의 증가가 압력면 선단과 흡입면 끝단까지 확장되어 나타나며, 꺾임각이 클 경우($\alpha=145^\circ$) 그 영향이 압력면 선단으로 제한되며 국소적인 열(물질)전달계수의 극대값이 압력면 하류로 이동한다.

참고문헌

(1) Martine Fiebig, 1996, "Vortices: Tools to influence heat transfer - recent developments", 2nd European Thermal-Sciences and 14th UIT National Heat Transfer Conf., pp. 41~56.
(2) Jang, I.H., Hwang, S.D. and Cho, H.H., 2003, "Effects of Reynolds number on flow and heat/mass characteristics inside the wavy duct", Korean J. Air-Conditioning Refrigeration Eng., Vol. 15, No. 6, pp. 809~820.
(3) Jang I.H., Hwang, S.D. and Cho, H.H., 2004, "Effects of corrugation angle on local heat/mass transfer in wavy duct of heat exchanger", Trans. KSME (B), Vol. 28, No. 7, pp. 789~799.
(4) Hwang, S.D., Jang, I.H. and Cho, H.H., 2006,

"Experimental study of flow and local heat/mass transfer characteristics inside corrugated duct", Int. J. Heat Fluid Flow, Vol. 27, pp. 21~32.

(5) Goldstein Jr., Sparrow, E.M., 1977, "Heat/mass transfer characteristics for flow in a corrugated wall channel", J. Heat Transfer, Vol. 99, pp. 187~195.
(6) Nishimura, T., Kajimoto, Y., Tarumoto, A. and Kawamura, Y., 1986, "Flow structure and mass transfer for a wavy channel in transitional flow regime", J. Chem. Eng. Jpn., Vol. 19, No. 5, pp. 449~455.
(7) Nishimura, T., Yano, K., Yoshino, T. and Kawamura, Y., 1990, "Occurrence and structure of Taylor-Goertler vortices induced in two-dimensional wavy channels for steady flow", J. Chem. Eng. Jpn., Vol. 23, No. 6, pp.697~703.
(8) Molki, M. and Yuen, C.M., 1986, "Effects of interwall spacing on heat transfer and pressure drop in a corrugated-wall duct", Int. J. Heat Mass Transfer, J. Heat Mass Transfer, Vol. 29, No. 7, pp. 987~997.
(9) Islamoglu, Y and Parmaksizoglu, C., 2003, "The effect of channel height on the enhanced heat transfer characteristics in a corrugated heat exchanger channel", Applied Thermal Eng., Vol. 23, pp. 979~987.
(10) Cho, H.H. and Rhee, D.H., 2001, "Local heat/mass transfer measurement on the effusion plate in impingement/effusion cooling system", J. Turbomachinery, Vol. 123, pp. 601~608.
(11) Ambrose, D., Lawrenson, I.J. and Sparke, C.H.S., 1975, "The vapor pressure of naphthalene", J. Chem. Thermodyn., Vol. 7, pp. 1173~1176.
(12) Goldstein, R.J. and Cho, H.H., 1995, "A review of mass transfer measurements using naphthalene sublimation", Exp. Thermal Fluid Sci., Vol. 10, pp. 416~434.
(13) Kline, S.J. and McClintock, F., 1953, "Describing uncertainty in single sample experiment", Mech. Eng., Vol. 75, pp. 3~8.