

Reynolds 수에 따른 꺾어진 덕트에서 열/물질전달 특성 고찰

장 인 혁, 황 상 동, 조 형 희[†]

연세대학교 기계공학과

Effects of Reynolds Number on Flow and Heat/Mass Characteristics Inside the Wavy Duct

In Hyuk Jang, Sang Dong Hwang, Hyung Hee Cho[†]

Department of Mechanical Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

(Received July 8, 2003 revision received August 18, 2003)

ABSTRACT: The present study investigates effects of flow velocity on the convective heat/mass transfer characteristics in wavy ducts of a primary surface heat exchanger application. Local heat/mass transfer coefficients on the wavy duct sidewall are determined by using a naphthalene sublimation technique. The flow visualization technique is used to understand the overall flow structures inside the duct. The aspect ratio and corrugation angle of the wavy duct is fixed at 7.3 and 145° respectively, and the Reynolds numbers, based on the duct hydraulic diameter, vary from 100 to 5,000. The results show that there exist complex secondary flows and transfer processes resulting in non-uniform distributions of the heat/mass transfer coefficients on the duct side walls. At low Re ($Re < 1000$), relatively high heat/mass transfer regions like cell shape appear on both pressure and suction side wall due to the secondary vortex flows called Taylor-Görtler vortices perpendicular to the main flow direction. However, at high Re ($Re > 1000$), these secondary flow cells disappear and boundary layer type flow characteristics are observed on pressure side wall and high heat/mass transfer region by the flow reattachment appears on the suction side wall. The average heat/mass transfer coefficients are higher than those of the smooth circular duct due to the secondary flows inside wavy duct. And also friction factors are about two times greater than those of the smooth circular duct.

Key words: Wavy duct(꺾어진 덕트), Taylor-Görtler vortex(테일러-괴틀러 와류), Primary surface heat exchanger(primary surface형 열교환기), Naphthalene sublimation technique(나프탈렌 승화법)

기 호 설 명

A : 전열부 면적 [mm^2]

D_h : 덕트 수력 직경 [m]

D_{naph} : 나프탈렌 확산계수 [m^2/s]

dy_N : 나프탈렌 승화 깊이 [m]

$d\tau$: 실험시간

f : 마찰계수(Fanning friction factor)

f_0 : 매끈한 덕트에서 마찰계수

[†] Corresponding author

Tel.: +82-2-2123-2828; fax: +82-2-312-2159

E-mail address: hhcho@yonsei.ac.kr

H	: 덕트 높이 [m]
h_m	: 물질전달계수, 식(1)
H/W	: 덕트 종횡비
L	: 덕트 길이 [m]
\dot{m}	: 단위면적당 나프탈렌 질량유속 [Kg/(m ² · s)]
n	: 식(4)에서의 지수
Nu	: Nusselt 수
P	: 꺾임 피치 [m]
ΔP	: 단위피치당 압력손실 [Pa/m]
P.F.	: 성능계수
Pr	: Prandtl 수
Re	: Reynolds 수
Sc	: Schmidt 수
Sh	: Sherwood 수
\overline{Sh}	: 폭 방향 평균 Sherwood 수, 식(3)
$\overline{\overline{Sh}}$: 평균 Sherwood 수, 식(4)
Sh_0	: 매끈한 덕트에서 Sherwood 수
U	: 평균 덕트 입구속도 [m/s]
W	: 덕트 폭 [m]
x	: 유동 방향 좌표
y	: 높이 방향 좌표
z	: 폭 방향 좌표

그리스 문자

α	: 꺾임각
ρ_{air}	: 공기의 밀도
ρ_s	: 고체 나프탈렌 밀도
$\rho_{v,\infty}$: 나프탈렌 증기 밀도
$\rho_{v,w}$: 벽에서의 나프탈렌 증기 밀도

하첨자

T	: 난류기준
L	: 층류기준

1. 서 론

일반적으로 발전시스템이나 마이크로 터빈 시

스템에서는 시스템의 성능을 향상시키기 위해 열교환기를 사용하게 된다. 특히 마이크로터빈(microturbine)의 경우 특성상 낮은 시스템 성능을 나타내게 되는데 이를 극복하기 위해 높은 효율을 가지는 리큐퍼레이터(recuperator)의 사용이 필수적이며 폐열을 이용한 마이크로 열병합시스템이 주목을 받고 있다.⁽¹⁾ 최근 기술의 발달로 마이크로 터빈뿐만 아니라 다양한 분야에서 널리 사용되고 있으며,⁽²⁾ 이와 함께 낮은 압력손실, 적은 부피 및 무게, 높은 신뢰성 및 낮은 가격 등의 요소들이 열교환기 설계에 중요한 역할을 하게 된다.⁽³⁾ 이와 같은 열교환기에서는 열전달을 향상시키기 위해 주름지거나 꺾어진 형태의 다양한 유로 및 단면 형상의 유로를 사용하게 된다. 따라서 복잡한 형태의 꺾어진 내부 유로에서 유동 방향에 수직인 2차 유동이 생성되게 되고, 생성된 2차 유동에 의해 주유동이 교란되어 열전달 향상을 가져오게 된다. 하지만 2차 유동에 의해 전열면에서 불균일한 열전달 특성 및 마찰손실 증가를 수반하게 된다. 최근 다양한 유로 및 단면 형상을 가지는 덕트에 대한 유동 및 열전달 특성에 관한 연구가 진행되어 왔다. Asako and Faghri⁽⁴⁾와 Sawyers et al.⁽⁵⁾은 층류영역에서 꺾어진 형태의 덕트에 대해 열전달 및 유동 특성에 대한 수치연구를 수행하였다. Nishimura et al.⁽⁶⁾은 꺾어진 형상의 덕트에서의 내부 유동구조 및 특성을 유동가시화를 통해 고찰하였으며, 유동 불안정에 기인한 Taylor-Görtler 와류가 발생함을 밝혔다. Rokni and Sunden⁽⁷⁾와 Rokni and Gatski⁽⁸⁾는 사다리꼴 단면 형상을 가지는 덕트에 대해 열전달계수 분포를 수치적 방법으로 구하여 덕트 형상을 변화시킴으로써 열전달을 향상시킬 수 있음을 밝혔다. 실험적인 연구로서, Goldstein and Sparrow⁽⁹⁾는 42.5의 종횡비를 가지는 꺾어진 덕트에서 열/물질전달 특성을 나프탈렌 승화법을 이용하여 구하였고 결과로 꺾어진 형상에 의해 내부에 복잡한 2차 유동이 발생하며, 이와 같은 복잡한 유동현상에 의해 낮은 Re 수에서 열전달이 향상됨을 알 수 있었다. Utriainen and Sunden⁽¹⁰⁾는 primary surface형 열교환기의 성능특성에 대해 연구하였다.

이와 같은 꺾어진 형상의 덕트에 관한 연구들은 수치해석적 연구가 대부분을 이루고 있다. 또한 실험적 연구의 경우에도 주로 유동특성에 대

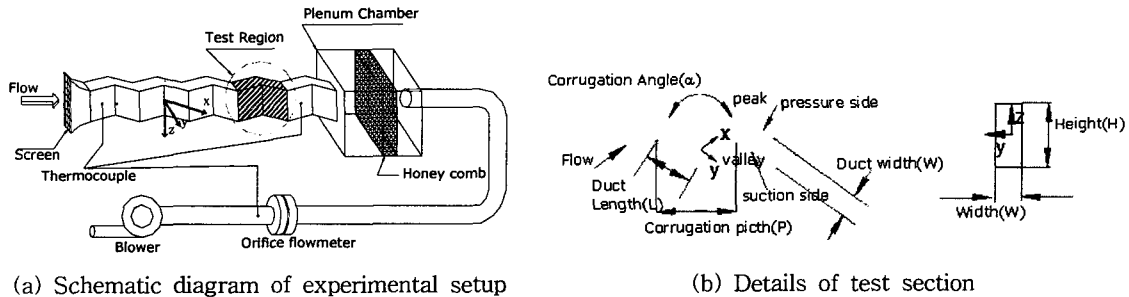


Fig. 1 Schematic view of experimental apparatus.

한 연구와 평균 열전달계수분포에 대한 연구에 국한되어 있다. 따라서 본 연구에서는 최근 많이 사용되고 있는 primary surface형 열교환기의 꺾어진 덕트에서 나프탈렌 승화법을 이용하여 Re 수 변화에 따른 전열면에서의 국소적인 열/물질 전달 특성을 고찰하였으며, 유동가시화를 통해 내부 유로에서의 유동특성을 고찰하였다. 또한 Re 수 변화에 따른 압력손실을 구하고 전체적인 성능계수 특성에 관한 연구를 수행하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 실험장치의 개략도를 나타낸다. 덕트 입구를 통해 유입된 공기는 시험부를 지나 플레넘 챔버(plenum chamber)와 오리피스 유량계를 거쳐 송풍기(blower)를 통해 외부로 배출되게 된다. 유량은 플레넘 챔버와 송풍기 사이에 설치된 오리피스 유량계를 사용하여 측정하였으며, 시험부의 구체적인 형상 및 좌표계는 Fig. 1(b)에 나와 있다. 꺾어진 덕트는 각 압력면(pressure side)과 흡입면(suction side)의 쌍으로 구성되며, 시험부는 총 10개의 압력면/흡입면으로 구성되어 있다. 전열면에서의 열/물질전달 분포는 덕트 입구로부터 4번째 피치부분에서 측정하였다. 꺾어진 덕트에서의 꺾임각(α)은 145° 이며 덕트의 높이(H), 폭(W), 길이(L)은 각각 53.0 mm, 7.3 mm, 33.5 mm로 고정하였다. 따라서 사각단면 형상을 가지는 덕트의 종횡비(H/W)는 7.3이다. 덕트의 수력 직경을 기준으로 한 Re 수는 100에서 5,000까지 변화시켜 가면서 Re 수에 따른 유동 및 열전달 특성을 고찰하였다.

본 연구에서는 꺾어진 덕트 형상에 의한 유동 특성을 고찰하기 위해 연기분사법(smoke injection method)을 이용한 유동가시화를 수행하였다. 연기분사법은 연기발생기(smoke generator)를 통해 발생된 연기를 시험부에 유입시킨 뒤 유입된 연기에 조명을 비추고 사진을 찍어 유동특성을 파악하는 방법으로, 본 실험에서는 2차원 레이저 시트(laser sheet ; Dantec 5 W)와 디지털 카메라(digital camera ; Coolpix990)를 사용하였다.

덕트 전열면에서의 열전달 특성을 고찰하기 위해 열전달과 물질전달 사이의 유사성을 이용한 나프탈렌 승화법을 사용하였다. 나프탈렌 승화법은 일반적인 열전달 측정방법에 비해 국소적인 열/물질전달계수 분포를 구할 수 있으며, 전도 및 복사에 의한 오차를 없앨 수 있다는 장점이 있다. 또한 물질전달계수는 열전달과 물질전달 사이의 유사에 의해 열전달계수로 바꿀 수 있게 된다.⁽¹¹⁾ 열/물질전달계수를 계산하기 위해서 시험 시편에 코팅된 나프탈렌의 표면형상을 실험 전후에 측정하여 실험 중 승화된 나프탈렌의 깊이를 측정하여 물질전달계수를 구하게 된다. 이를 위한 측정장치는 LVDT(Linear Variable Differential

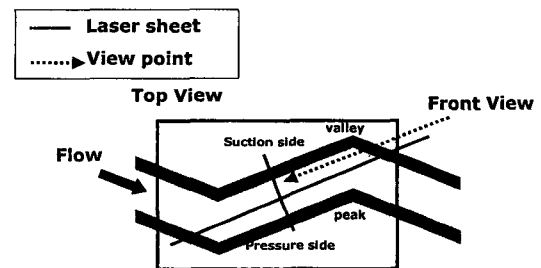


Fig. 2 View and lighting planes for the flow visualization.

Transformer ; LBB-375TA-020) 및 2차원 자동 이송장치로 구성되며, 측정장치의 자세한 사양은 Cho and Rhee⁽¹²⁾와 동일하다.

꺾어진 덕트에서의 압력손실은 덕트의 바닥면에 설치된 직경 1.0 mm의 5개의 압력탭(pressure tap)을 사용하여 측정하였으며, 각각의 압력탭 사이의 간격은 덕트의 피치(P)와 동일하게 하였다. 각 지점에서의 정압은 디지털 마이크로 마노미터(digital micro manometer ; DPI 145)와 멀티플 스캐너(multiple scanner ; MS 1000)를 사용하여 측정하였다.

2.2 열/물질전달계수

국소 물질전달계수는 다음과 같이 정의된다.

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

본 연구에서는 덕트로 유입되는 공기는 나프탈렌이 포함되어 있지 않으므로 $\rho_{v,\infty} = 0$ 이다. 따라서 물질전달계수는 나프탈렌 승화 깊이(dy_N), 실험시간($d\tau$), 고체 나프탈렌 밀도(ρ_s), 나프탈렌 증기 밀도($\rho_{v,w}$)로 구할 수 있게 된다.

Sh 수는 다음과 같이 표현된다.

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

여기서, D_{naph} 는 Goldstein and Cho⁽¹³⁾가 제시한 나프탈렌의 물성치에 근거하였다.

폭 방향(spanwise) 평균 Sh 수는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\overline{Sh} = \frac{\int_{-H/2}^{H/2} Sh dz}{\int_{-H/2}^{H/2} dz} \quad (3)$$

전열면에서의 평균 Sh 수는 다음과 같이 수치적 방법을 통해 구할 수 있다.

$$\overline{\overline{Sh}} = \frac{\int_0^L \int_{-H/2}^{H/2} Sh dz dx}{A} \quad (4)$$

물질전달계수는 열전달과 물질전달 간의 유사성을 이용하여 다음과 같이 물질전달계수를 열전달계수로 전환할 수 있다.⁽¹²⁾

$$\frac{Nu}{Sh} = \left(\frac{Pr}{Sc} \right)^n \quad (5)$$

식(5)에서의 지수 n 은 유동조건에 따라 0.333에서 0.4 사이의 값을 갖는다.

실험결과에 대한 오차해석은 Kline and McClintock⁽¹⁶⁾이 제시한 방법을 이용하여 수행하였다. 전열면에서의 Sh 수는 95%의 신뢰구간에서 7.2%의 불확실성을 갖는 것으로 계산되었으며, 이 같은 불확실성은 대부분 나프탈렌 물성치의 불확실성에 기인하는 것으로 나타났다.

2.3 압력강하

실험에서 마찰계수 f (Fanning friction factor)는 다음과 같이 정의된다.

$$f = \frac{\Delta P}{4(1/D_h)(1/2)\rho_{air}U^2} = \frac{1}{2} \Delta P \frac{D_h}{\rho_{air}U^2} \quad (6)$$

여기서, ΔP 는 단위길이당 압력강하량이다. 마찰계수는 덕트의 피치당 압력강하량을 선형적으로 보간하여 구할 수 있었다.

일정한 송풍력에서 압력손실에 대한 열전달비를 나타내는 성능계수(performance factor)는 다음과 같이 정의된다.

$$P.F. = \frac{Sh/Sh_0}{(f/f_0)^{1/3}} \quad (7)$$

여기서, Sh_0 는 Dittus and Boelter⁽¹⁴⁾에 의해 제시된 매끈한 원형 덕트 내에서의 Sh 수를 나타내며, f_0 는 Bhatti and Shah⁽¹⁴⁾에 의해 제시된 매끈한 원형 덕트 내에서의 마찰계수 수를 나타낸다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 유동특성

Fig. 3은 연기분사법(smoke injection method)

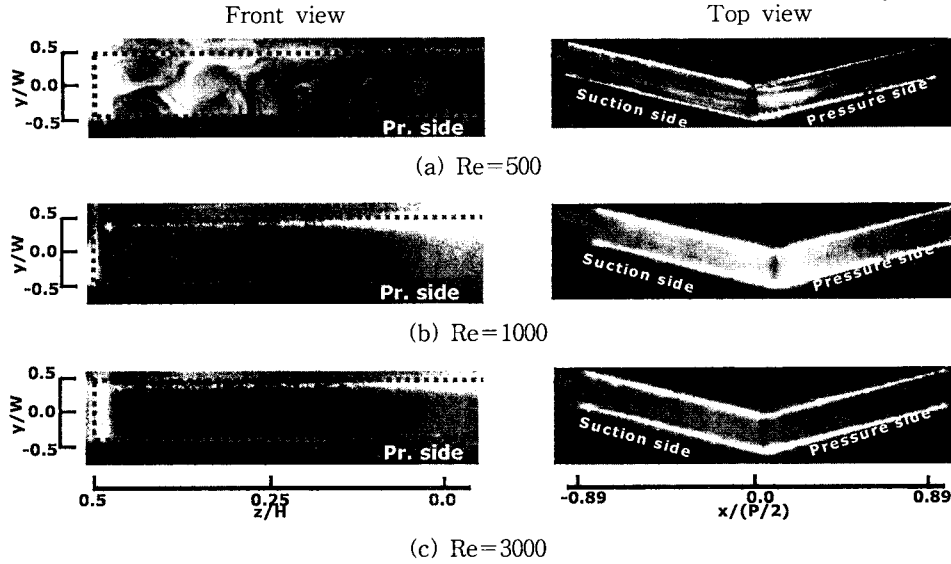


Fig. 3 Flow visualization result using smoke injection method for various Re.

을 이용한 유동가시화 결과를 보여주는 그림이며 조명 및 유동단면의 위치는 Fig.2에 나타나 있다. $Re=500$ 일 때(Fig. 3(a)) 주유동에 수직한 단면의 유동(front view)을 살펴보면, 두 종류의 2차 유동이 존재하는 것을 볼 수 있다. 하나는 일반적인 사각덕트의 벽 근처에서 발생하는 모서리 와류(corner vortex)이며, 다른 하나는 주유동에 수직한 방향으로 회전하는 2차 유동이다. 이 2차 유동은 꺾어진 형태의 덕트형상에 의한 오목면에서 유동의 불안정성 때문에 생성된 것이며, 일반적으로 곡면에서 발생하는 일종의 Taylor-Görtler 와류로 볼 수 있다. 유동 방향을 따른 유동(Top-view)을 보면 유동은 덕트를 잘 따라 흐르는 것을 볼 수 있었으며 유동이 관성력에 의해 압력면 쪽으로 약간 편향되는 것을 볼 수 있다. $Re=1000$ 에서는(Fig. 3(b))는 꺾어진 형상에 의한 2차 유동의 생성이 약해졌으며(front-view), 이것은 Re 수가 증가함에 따라 2차 유동의 생성이 점점 소멸되어 가는 것으로 생각되어진다. 또한 top-view에서 유동은 압력면 쪽으로 약간 편향되며, 흡입면에는 유동박리에 의한 재부착이 약하게 관찰되었다. $Re=3000$ 으로 증가할 경우(Fig. 3(c)) 2차 유동은 완전히 소멸되었으며(front-view) 유동은 압력면으로 더욱 편향되며 흡입면에서 유동박리에 의한 재부착 현상이 뚜렷하게 관찰되었다(top-view).

Fig.4는 꺾어진 덕트 내에서 유동특성을 도식적으로 나타낸 그림이다. 유로 내 유동은 꺾어진 덕트의 형상에 의해 2차 유동이 발생하게 된다. 우선 사각단면을 가지는 덕트의 형상에 의해 벽 근처에서 모서리 와류가 발생하게 된다. 그리고 낮은 Re 수에서는 유동가시화 결과에서 알 수 있듯이 모서리 와류와 함께 주유동에 수직한 2차 유동이 생성되게 된다. 이는 꺾어진 덕트의 형상에 의해 발생하는 2차 유동으로 곡면에서 유동 불안정성에 의해 발생하게 되며, 이와 같은 2차 유동에 의해 압력면에서 상향류(upward flow)와 하향류(downward flow) 영역이 존재하게 된다. 따라서 하향류 영역에서는 압력면에 충돌효과를 나타내며, 충돌 후 흡입면 쪽으로 올라가는 유동

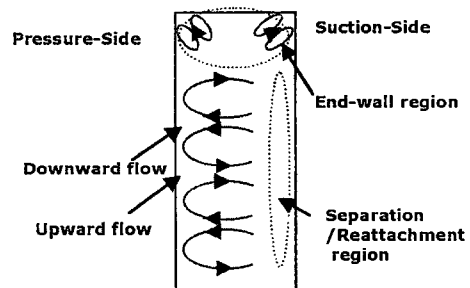


Fig. 4 Schematic flow patterns perpendicular to the main flow direction.

은 흡입면에서 박리 및 재부착 유동에 의해 다시 영향을 받게 된다. 하지만 이후 유속이 증가하게 되면, Taylor-Görtler 와류에 의해 난류로의 천이 가속되어 난류영역에서는 2차 유동이 사라지게 되고, 유동의 박리 및 재부착의 유동특성이 나타나게 된다. 또한 Re 수 증가에 따라 유동이 압력면 쪽으로 편향되게 된다.

3.2 열/물질전달 특성

Fig. 5는 Re 수의 증가에 따른 전열면에서의 Sh 수 분포를 나타내는 그림이다. Re=300인 경우

(Fig. 5(a)) 낮은 Re 수에서 꺾어진 덕트 형상에 의해 Taylor-Görtler 와류가 생성되고, 이 2차 유동의 하향류의 충돌효과에 의해 압력면에서 셀 모양의 높은 Sh 수값을 가지는 영역($z/(P/2) \cong \pm 0.2, \pm 0.45$)($0 < x/0.2$)이 존재한다. 반대로 생성된 2차 유동의 상향류의 영향으로 낮은 Sh 수값을 가지는 영역($z/(P/2) \cong 0, \pm 0.45, \pm 0.65$)이 존재하게 된다. 모서리 부근($z/(P/2) \cong \pm 0.8$)에서는 모서리 와류의 영향으로 높은 Sh 수값을 가지는 셀이 존재하였다. 흡입면에서도 압력면과 같이 상향류 및 하향류의 영향으로 높은 Sh 수값을

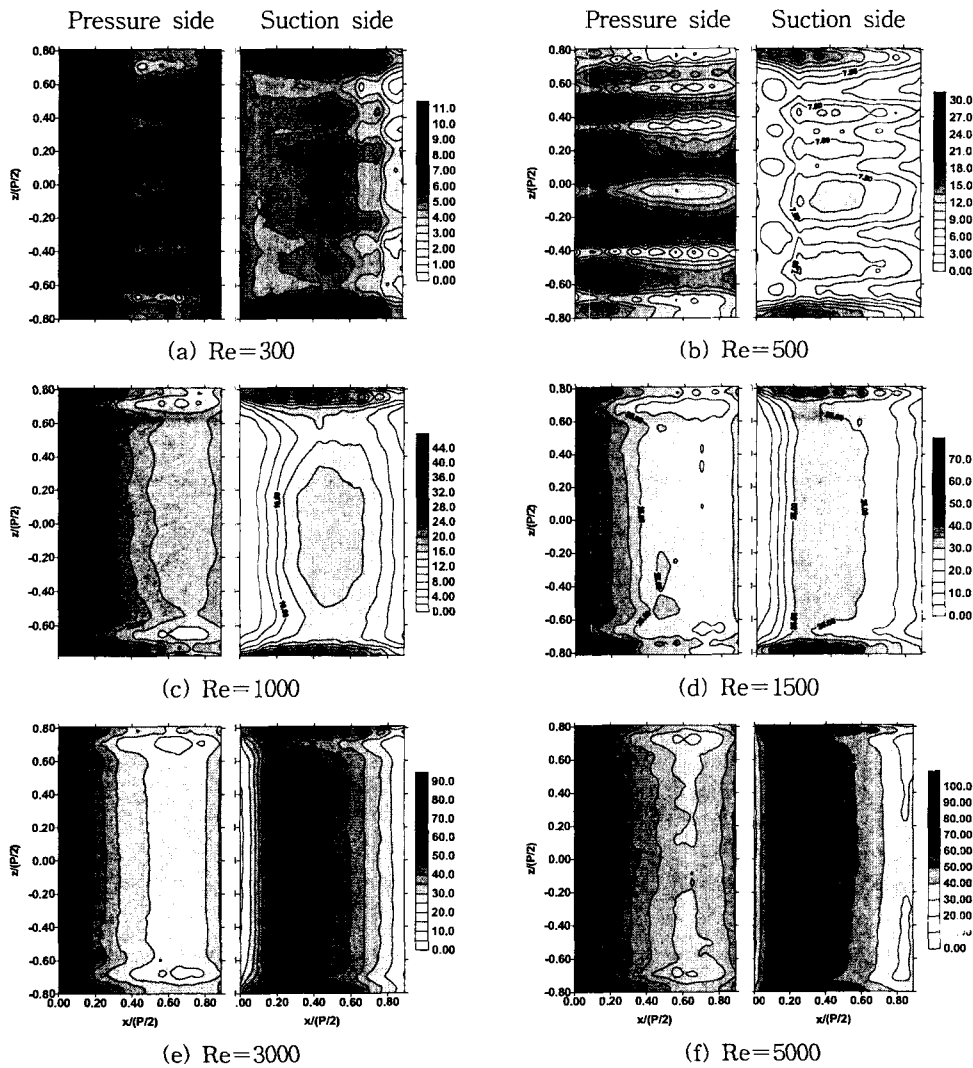
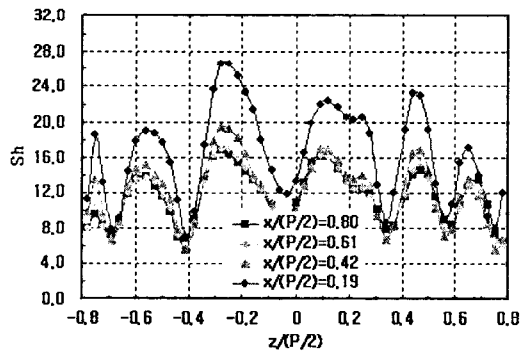


Fig. 5 Contour plots of Sh for various Re.

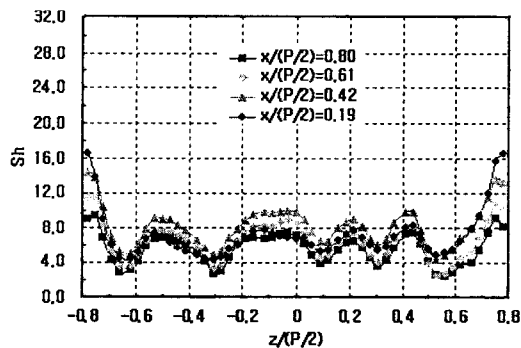
가지는 셀 영역($z/(P/2) \cong \pm 0.2, \pm 0.45$)과 모서리 와류에 의한 영역($z/(P/2) \cong \pm 0.8$)이 형성되었다. $Re=500$ 으로 증가하면(Fig. 5(b)) 2차 유동에 의해 형성되는 셀은 더욱 명확해지며 Sh 수값은 증가하게 된다. $Re=1000$ 인 경우(Fig. 5(c)) 압력면에서 벽면에서의 모서리 와류에 의한 영향을 제외한 2차 유동은 점점 소멸되어 가는 것을 확인할 수 있었으며, 이는 Re 수가 증가함에 따라 Taylor-Görtler 와류가 난류의 천이를 촉진시키면서 소멸되어 가는 것으로 생각되어진다. 흡입면에서는 소멸되어 가는 2차 유동의 영향으로 좀더 넓은 영역에 걸쳐 높은 Sh 수값을 가지는 영역이 형성되었다. $Re=1500$ 인 경우(Fig. 5(d)) 압력면에서 2차 유동에 의한 셀은 완전히 소멸되었으며 입구부분에서 비교적 높은 Sh 수 분포를 가지고 하류부분으로 갈수록 경계층 발달로 인한 Sh 수는 점점 감소하였다. 흡입면에서는 유동의 박리에 의한 재부착의 영향으로 높은 Sh 수값을

가지는 영역이 나타나기 시작하였으며 역시 하류로 진행함에 따라 경계층의 발달로 Sh 수는 점점 감소하였다. $Re=3000$ 인 경우(Fig. 5(e)) 압력면에서 입구 쪽에서 높은 Sh 수 분포를 가지며 하류로 유동이 진행하면서 경계층 유동발달에 따라 Sh 수가 감소하는 분포를 나타냈다. 흡입면에서는 유동의 박리에 의한 재부착에 의해 높은 Sh 수값을 가지는 영역($x/(P/2) \cong 0.3$) 존재하였으며 이후 경계층 발달로 Sh 수는 감소하는 경향을 나타냈다. $Re=5000$ 으로 증가하게 되면(Fig. 5(f)), 이와 같은 경향이 확실해졌으며 유속증가로 인해 Sh 수값도 증가하였다.

Figs. 6, 7은 유동 방향($x/(P/2) = 0.19, 0.42, 0.61, 0.8$)일 때 폭 방향으로 국소 Sh 수 분포를 나타낸 그림이다. $Re=500$ 일 때 압력면은(Fig. 6(a)), 2차 유동에 의해 국소적으로 높은 Sh 수값을 갖는 영역이($z/(P/2) = \pm 0.2, \pm 0.5, \pm 0.7$)에서 나타나고, 흡입면의 경우도(Fig. 6(b)) 마찬가지로 압력면에

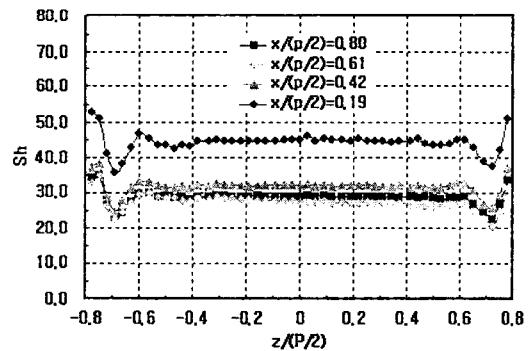


(a) Pressure side

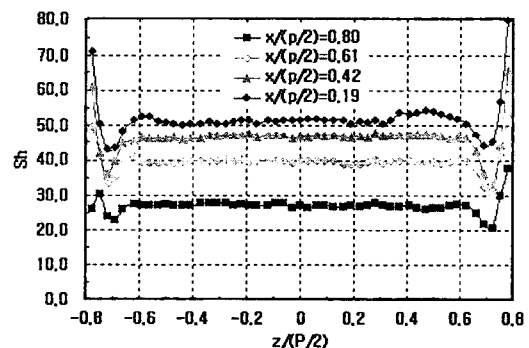


(b) Suction side

Fig. 6 Local plots at $x/(P/2) = 0.19, 0.42, 0.61, 0.8$ at $Re=500$.



(a) Pressure side



(b) Suction side

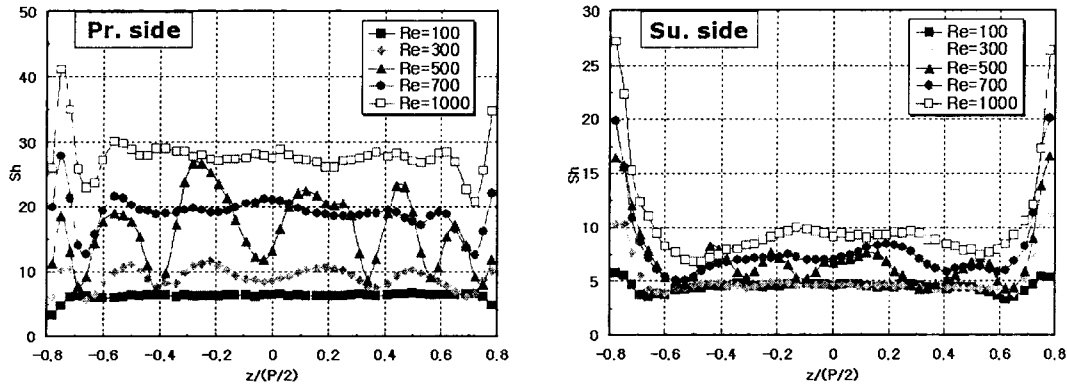
Fig. 7 Local plots at $x/(P/2) = 0.19, 0.42, 0.61, 0.8$ at $Re=3000$.

비해 그 크기는 작지만 2차 유동에 의한 피크 (peak)가 존재한다. 하지만 $Re=3000$ 으로 증가하였을 때(Fig. 7) 압력면, 흡입면에서 폭 방향으로 균일한 Sh 수값 분포를 나타냈으며 양 끝단에서 모서리 와류에 의한 영향이 나타났다. 압력면의 경우(Fig. 7(a)) 2차 유동이 사라지고 입구부분에서 높은 Sh 수값을 보이며 하류로 진행함에 따라 경계층의 발달로 Sh 수값이 점점 감소하는 경향을 보여주었으며, 흡입면에서는(Fig. 7(b)) 유동박리에 의한 재부착에 의한 특성을 나타냈다.

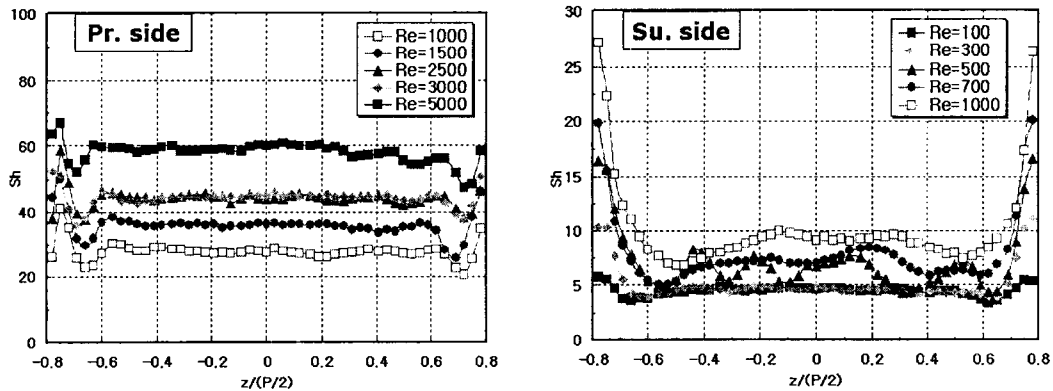
Fig. 8은 $x/(P/2)=0.19$ 에서 Re 수에 따른 전 열면에서의 국소 Sh 수 분포를 나타내는 그림이다. $Re \leq 1000$ 인 경우(Fig. 8(a)) 압력면은 Taylor-Görtler 와류의 하향류의 충돌효과로 인한 높은 피크값들을 나타내는 영역($z/(P/2) \cong \pm 0.2, \pm 0.5$)이 존재하였고, 상향류에 의해 낮은 Sh 수를 나타내는 영역($z/(P/2) \cong 0, \pm 0.4, \pm 0.6$)이 존재하

였다. 흡입면은 역시 주유동에 수직한 2차 유동의 영향으로 높은 Sh 수를 보이는 피크값들이 존재하였다. $Re \geq 1000$ 인 경우(Fig. 8(b)) 이와 같은 경향은 사라지고 압력면은 벽 부근을 제외한 중심에서 균일한 Sh 수 분포를 보이고 있으며 이는 Taylor-Görtler 와류가 소멸되었기 때문이다. 흡입면에서는 Re 수가 증가함에 따라 2차 유동에 의한 영향은 소멸되었으며 유동의 박리에 의한 재부착의 영향으로 높은 Sh 수 분포를 보이는 영역을 확인할 수 있었다. 압력면 및 흡입면의 양 끝단에 나타나는 피크값은 모서리 부근에서 모서리 와류의 영향으로 Re 수에 상관없이 형성되었다.

Fig. 9는 압력면과 흡입면에서 유동 방향을 따라 $x/(P/2)=0.19, 0.42, 0.61, 0.8$ 에서 폭 방향으로 평균 Sh 수값을 한곳에 나타내는 그림이다. $x/(P/2)=0.8$ 을 기준으로 왼쪽이 압력면 오른쪽이 흡입면을 나타내고 있다. $Re \leq 1000$ 인 경우



(a) $Re \leq 1000$



(b) $Re \geq 1000$

Fig. 8 Sh distribution for the various Re at $x/(P/2)=0.19$.

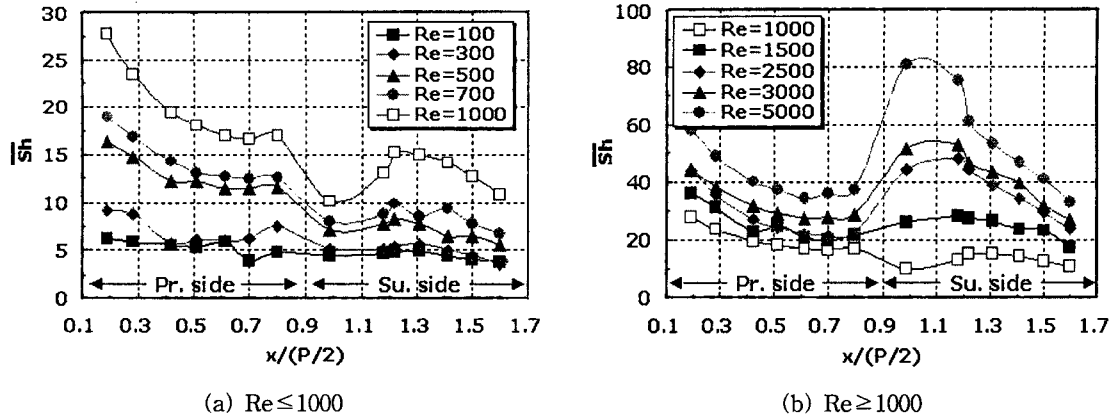


Fig. 9 Span average Sh distribution for the various Re .

(Fig. 9(a)), 압력면은 $x/(P/2)=0.19$ 에서 2차 유동의 영향으로 높은 Sh 수값을 가지는 영역이 존재하므로 높은 쪽 방향 평균 Sh 수값을 나타냈으며 이후 감소하는 경향을 나타냈다. 흡입면은 2차 유동의 영향을 받는 영역($x/(P/2)=1.2$)에서 높은 Sh 수값을 나타냈다. 하지만 2차 유동의 하향류 영향을 받는 영역($x/(P/2)=1.0$)에서는 낮은 Sh 수값을 나타내었다. $Re \geq 1000$ 인 경우(Fig. 9(b)) 압력면은 유동의 편향으로 인해 입구 쪽에서 높은 Sh 수값을 나타내며 하류로 진행함에 따라 경계층의 발달로 인해 Sh 수값은 점점 감소하게 된다. 흡입면은 유동의 박리에 의한 재부착에 형성되는 영역($x/(P/2)=1.0$)에서 높은 Sh 수값을 보이며 하류로 진행함에 따라 역시 경계층의 발달로 Sh 수값은 점점 감소하는 분포를 나타냈다.

Fig. 10은 Re 수 증가에 따른 평균 Sh 수 변화와 평균 Sh 수값을 매끈한 원관에서의 값으로 무차원한 결과를 나타내는 그림이다. 여기서 $Sh_{0,L}$ 은 매끈한 원형덕트에서 층류에서의 Sh 수를 나타내고, $Sh_{0,T}$ 는 매끈한 원형덕트에서 난류일 때 Sh 수를 나타내는 것이다. 평균 Sh 수는 Re 수 증가에 선형적으로 증가하는 경향을 보였다. 각각 압력면 및 흡입면에서 평균 열/물질전달값을 비교하면, $Re=3000$ 이하에서는 압력면이 흡입면보다 비교적 높은 Sh 수를 나타내었다. 이는 낮은 Re 수에서 발생하는 Taylor-Görtler 와류가 압력면에 더 많은 영향을 미치게 되므로 압력면에서 높은 Sh 수 분포를 보였기 때문이다. 하지만 $Re=3000$ 이상에서는 유동의 박리에 의한 재부착의

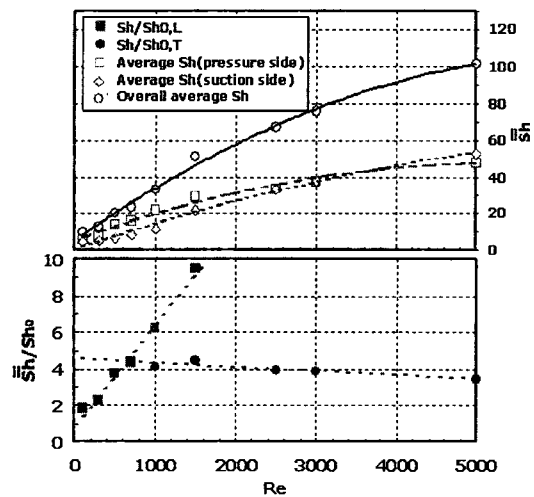


Fig. 10 Average Sh and normalized Sh distribution for the various Re .

영향이 증가하여 흡입면에서 Sh 수가 압력면보다 높아졌다. 무차원화 결과를 보면 Re 수가 1000보다 작은 경우 ($Sh_0/Sh_{0,L}$), Re 수에 따라 Sh 수값은 원형관에서의 값보다 열/물질전달 증가량이 선형적으로 증가하며, 원형관에 비해 2배에서 4배까지 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 꺾어진 형상에 의한 2차 유동에 의해 열/물질전달이 향상되었기 때문이다. 하지만 Re 수가 1000보다 클 경우 2차 유동의 영향이 사라지고 유동박리에 의한 재부착 영향이 나타나게 되므로 평균 Sh 수값은 Sh_0 값보다 3배 정도 일정하게 증가하는 것을 볼 수 있었다.

3.3 압력강하 특성

Fig. 11은 마찰계수와 이 마찰계수를 매끈한 원관에서 마찰계수로 나누어 무차원시켜 비교한 그림이다. 여기서 $f_{0,L}$ 은 매끈한 원형덕트에서 층류일 때 마찰계수이며, $f_{0,T}$ 는 매끈한 원형덕트에서 난류일 때 마찰계수이다. 꺾어진 덕트에서 마찰계수의 경우 일반적인 마찰계수 분포와 마찬가지로 Re 수가 증가할수록 감소하는 경향을 나타낸다. 하지만 꺾어진 덕트에서 압력손실은 원형관보다 2배에서 4배 정도 더 높은 값을 보여주고 있다. 특히 낮은 Re 수 영역($Re \leq 1000$)에서 꺾어진 덕트형상에 의해 덕트 내 압력손실이 증가하게 된다. 하지만 $Re \geq 1000$ 인 경우 Re 수 증가에 따른 f 값은 원형관에서의 경우보다 약 3배 정도 큰 값으로 일정한 분포를 보여주고 있다.

Fig. 12는 일정 송풍력에서 압력손실 증가에 따른 열/물질전달 향상비를 나타내는 성능계수 분포를 나타내는 그림이다. 열교환기에서는 형상변화에 따른 열/물질전달 향상뿐만 아니라 이에 따른 압력손실 또한 중요한 고려대상이 되므로 열/물질전달 향상과 함께 압력손실을 동시에 고려해야 한다. 여기서 $P.F._{0,L}$ 은 매끈한 원형덕트에서 층류일 때 성능계수이며, $P.F._{0,T}$ 는 매끈한 원형덕트에서 난류일 때 성능계수이다. 결과를 살펴보면 $Re \leq 1000$ 일 경우 Re 수 증가에 따라 성능계수가 2배에서 4배까지 증가하는 분포를 나타낸다. 이것은 낮은 Re 수 영역에서 2차 유동 생성에 의해 전열면에서 열/물질전달이 향상되게 되

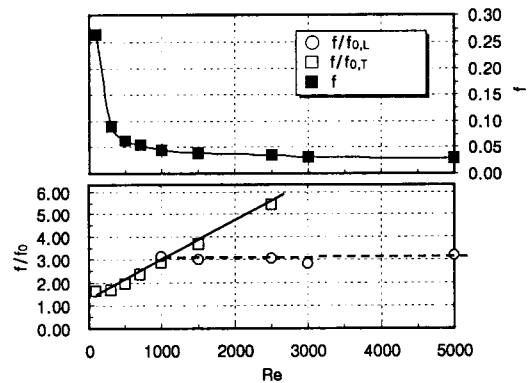


Fig. 11 Friction factor and normalized friction factor distribution for various Re.

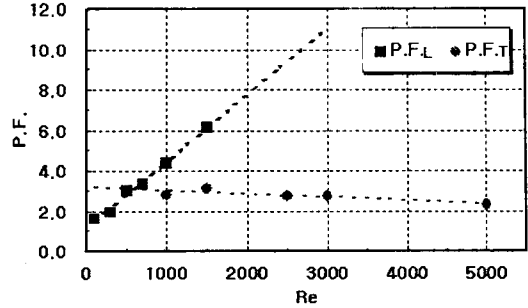


Fig. 12 Performance factor distribution for various Re.

는데 이 경우 압력손실 또한 증가하게 된다. 하지만 상대적으로 압력손실 증가량에 비해 열/물질전달 증가량이 크게 나타나기 때문에 높은 성능계수값이 나타났다. 하지만 Re 수가 증가하면 ($Re \geq 1000$) 성능계수가 서서히 감소하는 경향을 나타내는데, 이는 높은 Re 수에서는 Taylor Görtler 2차 유동이 사라지고 유동박리 및 재부착에 의한 영향만 나타나게 되지만, 열/물질전달 증가량에 비해 상대적으로 압력손실의 영향이 커지기 때문이다.

4. 결 론

본 연구에서는 primary surface형 열교환기에 적용되는 꺾어진 덕트에서 Re 수 증가에 따른 유동특성 및 열/물질전달 특성을 고찰하였으며 이러한 결과를 토대로 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) Re 수에 따른 유동을 살펴보면, 낮은 Re 수 ($Re \leq 1000$)에서는 꺾어진 덕트 내에서 유동의 불안정성에 의한 2차 유동이 Taylor Görtler 와류의 생성으로 압력면 및 흡입면에서 높은 Sh 수 분포를 가지는 셀 모양의 영역이 존재하였다. 하지만 높은 Re 수 ($Re \geq 1000$)에서는 Re 수가 증가함에 따라 난류로 천이되는 과정에서 2차 유동은 소멸되기 때문에 2차 유동의 영향에 의한 셀 발달은 사라졌다. 압력면에서는 모서리 와류의 영향을 받는 벽 근처를 제외한 중심에서 폭 방향으로 균일하게 높은 Sh 수 분포를 보이며 하류부분으로 진행될수록 유동 경계층의 발달로 Sh 수는 감소하는 분포를 나타냈다. 흡입면에서 유동박리에 의한 재부착의 효과로 높은 Sh 수 분포를 갖는 영역이 존재하였다.

(2) 평균 열/물질전달계수의 경우 Re 수 증가에 따라 증가하는 경향을 나타냈으며, 원형관에 비해 2~4배 이상 증가된 평균 열/물질전달계수를 얻을 수 있었다. 낮은 Re 수에서는 2차 유동의 영향으로 압력면에서의 평균 Sh 수가 흡입면에서의 값보다 높게 나타났다. 하지만 Re 수가 증가하게 되면서 2차 유동의 영향이 사라지고 유동의 박리 및 재부착에 의해 흡입면에서 평균 Sh 수가 압력면에서 보다 높게 나타났다. 따라서 2차 유동의 영향이 나타나는 $Re \leq 1000$ 에서 무차원화한 열/물질전달 증가량(\overline{Sh}/Sh_0)은 원형관에 비해 Re 수 증가에 따라 선형적으로 증가하게 되는 경향을 보였으며, $Re \geq 1000$ 에서 서서히 감소하는 경향을 나타냈다.

(3) 마찰계수를 살펴보면 꺾어진 덕트의 형상에 의해 Re 수 증가에 따라 원형관에 비해 높은 값을 나타냈다. 원관에서의 마찰계수로 무차원화한 마찰계수를 살펴보면 낮은 Re 수($Re \leq 1000$)에서는 꺾어진 덕트형상에서 발생된 2차 유동의 영향으로 Re 수가 증가할수록 무차원화한 마찰계수는 선형적으로 증가하였으며, 높은 Re 수($Re \geq 1000$)에서는 2차 유동의 소멸로 일정하게 유지되었다.

(4) 열/물질전달 증가와 마찰손실을 동시에 고려한 성능계수에 있어서 낮은 Re 수($Re \leq 1000$)에서는 2차 유동 생성에 의한 열/물질전달 증가량이 압력손실에 비해 크기 때문에 선형적으로 증가하는 경향을 나타내었고, Re 수가 증가하면($Re \geq 1000$) 열/물질전달 증가에 의한 압력손실이 커지기 때문에 서서히 감소하는 분포를 나타냈다.

후 기

본 연구는 2000년 국가지정연구실 사업 지원에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- Kim, S. W., 2002, Development of cogen system using micro turbine, Proceedings of the SAREK Winter Annual Conference, Nov. 21, pp. 656-662.
- McDonald, C. F., 1990, Gas turbine recuperator renaissance, Heat Recovery Systems & CHP, Vol. 10, No. 1, pp. 1-30.
- McDonald, C. F. and Wilson, D. G., 1996, The utilization of recuperated and regenerated engine cycles for high-efficiency gas turbines in the 21st century, Applied Thermal Eng., Vol. 16, No. 8, pp. 635-653.
- Asako, Y. and Faghri, M., 1987, Finite-volume solutions for laminar flow and heat transfer in a corrugated duct, J. Heat Transfer, Vol. 109, pp. 627-634.
- Sawyers, D. R., Sen, M. and Chang, H. C., 1998, Heat transfer enhancement in three-dimensional corrugated channel flow, Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 41, pp. 3359-3573.
- Nishimura, T. and Yano, K. and Yoshino, T. and Kawamura, Y., 1990, Occurrence and structure of Taylor-Görtler vortices induced in two-dimensional wavy channels for steady flow, J. Chemical Engineering of Japan, Vol. 23, No. 6, pp. 697-703.
- Rokni, M. and Sunden, B., 1998, 3D numerical investigation of turbulent forced convection in wavy ducts with trapezoidal cross-section, Int. J. Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, Vol. 8, pp. 118-141.
- Rokni, M. and Gatski, T. B., 2001, Predicting turbulent convective heat transfer in fully developed duct flows, Int. J. Heat & Fluid Flow, Vol. 22, pp. 381-392.
- Goldstein, L. Jr. and Sparrow, E. M., 1977, Heat/mass transfer characteristics for flow in a corrugated wall channel, J. Heat Transfer, Vol. 99, pp. 187-195.
- Utriainen, E. and Sunden, B., 2000, Numerical analysis of a primary surface trapezoidal cross wavy duct, Int. J. Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, Vol. 6, pp. 634-648.
- Eckert, E. R. G., 1976, Analogies to heat-transfer processes, in Measurements in Heat Transfer, ed. E. R. G. Eckert and R. J. Goldstein, Hemisphere Pub., New York, pp. 397-423.
- 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.
13. Goldstein, R. J. and Cho, H. H., 1995, A review of mass transfer measurements using naphthalene sublimation, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 10, pp. 416-434.
14. Rohsenow, W. M., 1998, *Handbook of Heat Transfer Part I*, McGraw-Hill, pp. 5.22-5.31
15. Ambrose, D., Lawrenson, I. J. and Sparke C. H. S., 1975, The vapor pressure of naphthalene, *J. Chem. Thermodynamics*, Vol. 7 pp. 1173-1176.
16. Kline, S. J. and McClintock, F., 1953, Describing uncertainty in single sample experiments, *Mech. Engineering*, Vol. 75, pp. 3-8.