

열교환기 내부 유로의 꺾임각 변화에 따른 국소 열/물질전달 특성 고찰

장인혁*·황상동*·조형희†
(2004년 1월 5일 접수, 2004년 5월 25일 심사완료)

Effects of Corrugation Angle on Local Heat/Mass Transfer in Wavy Duct of Heat Exchanger

In Hyuk Jang, Sang Dong Hwang and Hyung Hee Cho

Key Words: Wavy Duct(주름진 덕트), Corrugation Angle(꺾임각), Taylor-Görtler Vortex(테일러-괴틀러 와류), Primary Surface Heat Exchanger(primary surface형 열교환기), Naphthalene Sublimation Technique(나프탈렌 승화법)

Abstract

An experimental study is conducted to investigate the effects of duct corrugation angle on heat/mass transfer characteristics in wavy ducts of a primary surface heat exchanger application. Local heat/mass transfer coefficients on the wavy duct sidewalls are determined by using a naphthalene sublimation technique. The corrugation angles(α) of the wavy ducts are 145° , 130° , 115° and 100° . And the Reynolds numbers based on the duct hydraulic diameter vary from 300 to 3,000. The results show that at the low Re($Re \leq 1000$), the secondary vortices called Taylor-Görtler vortices perpendicular to the main flow direction are generated due to effect of duct curvature. By these secondary vortices, high heat/mass transfer regions are formed on both pressure-side and suction-side walls. At the high Re($Re \geq 1000$), these secondary flows are vanished with helping flow transition to turbulent flow and the regions which show high heat/mass coefficients by flow reattachment are formed on suction side. As corrugation angle decreases, the local peak Sh induced by Taylor-Görtler vortices increase at $Re \leq 1000$. At high Re($Re \geq 1000$), by the existence of different kind of secondary flows called Dean vortices, non-uniform Sh distribution appears along spanwise direction at the narrow corrugation angle ($\alpha=100^\circ$). Average Sh also increase by the enhanced effect of secondary vortices and flow reattachment. More pumping power (pressure loss) is required with the smaller corrugation angle due to the enhancement of flow instability.

기호설명

A : 전열부면적
 D_h : 덕트 수력직경

D_{naph} : 나프탈렌 확산계수
 dy_N : 나프탈렌 승화 깊이
 f : 마찰계수(Fanning friction factor)
 f_0 : 매끈한 덕트에서 마찰계수
 H : 덕트 높이
 H/W : 덕트 종횡비
 h_m : 물질전달계수, 식 (1)
 L : 덕트 길이
 \dot{m} : 단위면적당 나프탈렌 질량유속

† 책임저자, 회원, 연세대학교 기계공학과

E-mail : hhcho@yonsei.ac.kr

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

* 회원, 연세대학교 대학원 기계공학과

Nu	: Nusselt 수
P	: 꺾임 피치
Re	: Reynolds 수($= \frac{UD_h}{\nu}$)
Sh	: Sherwood 수, 식 (2)
Sh _o	: 매끈한 덕트에서 Sherwood 수
\overline{Sh}	: 평균 Sherwood 수, 식 (3)
U	: 평균 덕트 입구 속도
W	: 덕트 폭
x	: 유동방향 좌표
y	: 높이방향 좌표
z	: 폭방향 좌표
ΔP	: 단위 피치당 압력손실
P.F.	: 성능계수

그리스문자

a	: 꺾임각
ρ_{air}	: 공기의 밀도
ρ_s	: 고체 나프탈렌밀도
$\rho_{v,\infty}$: 나프탈렌증기 밀도
$\rho_{v,w}$: 벽에서의 나프탈렌증기 밀도
d τ	: 실험시간
ν	: 동점성계수

1. 서론

최근 폭발적인 전력수요에 유동적으로 빠르게 대응할 수 있는 분산발전이 주목받고 있다. 따라서 이러한 분산발전에 사용되는 마이크로터빈(microturbine)에 대한 관심이 증가하고 있다. 마이크로터빈의 경우 특성상 낮은 시스템 성능을 극복하기 위해 열교환기의 일종인 리큐퍼레이터(recuperator)의 사용이 필수적이다.⁽¹⁾ 이와 함께 낮은 압력손실, 적은 부피 및 무게, 높은 신뢰성 및 낮은 가격 등의 요소들이 열교환기 설계에 중요한 역할을 하게 된다. 최근 리큐퍼레이터의 기술 발달로 마이크로 터빈뿐만 아니라 다양한 분야에서 널리 사용되고 있다.^(2,3) 이러한 리큐퍼레이터의 성능향상을 위해 주름지거나 꺾어진 형태의 다양한 유로 및 단면 형상의 유로를 사용하게 된다. 따라서 복잡한 형태의 꺾어진 내부 유로에서 유동 방향에 수직인 2차유동이 생성되게 되고, 생성된 2차유동에 의해 주유동이 교란되어

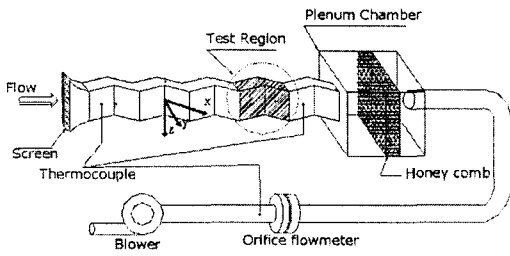
열전달 향상을 가져오게 된다. 하지만 2차유동에 의해 전열면에서 불균일한 열전달 특성 및 마찰손실 증가를 수반하게 된다. 최근 다양한 유로 및 단면형상을 가지는 덕트에 대한 유동 및 열전달 특성에 관한 연구가 진행되어 왔다. Asako와 Faghri⁽⁴⁾와 Sawyers 등⁽⁵⁾은 층류영역에서 꺾어진 형태의 덕트에 대해 열전달 및 유동 특성에 대한 수치연구를 수행하였다. Nishimura 등⁽⁶⁾은 꺾어진 형상의 덕트에서의 내부 유동구조 및 특성을 유동가시화를 통해 고찰하였으며, 유동 불안정에 기인한 Taylor-Görtler 와류가 발생함을 밝혔다. Rokni와 Sunden⁽⁷⁾과 Rokni와 Gatski⁽⁸⁾는 사다리꼴 단면 형상을 가지는 덕트에 대해 열전달계수분포를 수치적 방법으로 구하여 덕트 형상을 변화시킴으로써 열전달을 향상시킬 수 있음을 밝혔다. 실험적인 연구로서, Goldstein과 Sparrow⁽⁹⁾는 42.5의 종횡비를 가지는 꺾어진 덕트에서 열/물질전달 특성을 나프탈렌승화법을 이용하여 구하였고 결과로 꺾어진 형상에 의해 내부에 복잡한 2차유동이 발생하며, 이와 같은 복잡한 유동현상에 의해 낮은 Re 수에서 열전달이 향상됨을 알 수 있었다. Utrianen와 Sunden⁽¹⁰⁾은 primary surface형 열교환기의 성능 특성에 대해 수치해석적 연구하였다. 이 연구에서 다양한 형태의 primary surface형 열교환기 형상에 대해 유로 꺾임각 및 길이 등 성능에 영향을 미치는 다양한 인자 변화에 따른 열전달 및 압력특성을 고찰하였다.

현재 수행되고 있는 연구의 대부분이 수치해석에 관한 것이며, 실험데이터의 부족으로 결과에 대한 신뢰성이 확실치 않다. 따라서 본 연구에서는 primary surface형 열교환기의 내부유로를 모사한 꺾어진 형태의 덕트에서 나프탈렌 승화법을 이용하여 꺾임각 변화에 따른 전열면에서의 국소적인 열/물질 전달 특성을 실험적으로 고찰하였으며, 꺾임각 변화에 따른 압력손실을 구하고 전체적인 성능계수특성에 관한 연구를 수행하였다.

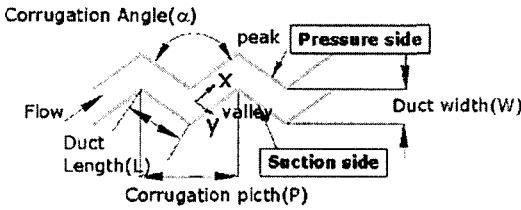
2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

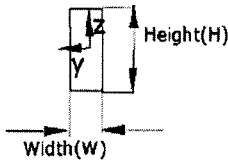
Fig. 1은 실험장치의 개략도를 나타낸다. 덕트 입구를 통해 유입된 공기는 시험부를 지나 플레넘 챔버(plenum chamber)와 오리피스 유량계를 거쳐 송풍기(blower)를 통해 외부로 배출되게 된다.



(a) Schematic diagram of experimental setup



(b) Details of test section



(c) Cross section

Fig. 1 Schematic view of experimental apparatus

유량은 플레넘 챔버와 송풍기 사이에 설치된 오리피스 유량계를 사용하여 측정하였으며, 시험부의 구체적인 형상 및 좌표계는 Fig. 1(b)에 나와있다. 주름진 덕트는 각 압력면(pressure side)과 흡입면(suction side)의 쌍으로 구성되며, 시험부는 총 10개의 압력면/흡입면으로 구성되어 있다. 전열면에서의 열/물질전달 분포는 덕트입구로부터 4번째 피치부분에서 측정하였다. 주름진 덕트에서의 꺾임각(α)은 145° , 130° , 115° 그리고 100° 로 변화시켰으며 덕트의 높이(H), 폭(W), 길이(L)은 각각 53.0 mm , 7.2 mm , 33.5 mm 로 고정하였다. 따라서 사각단면 형상을 가지는 덕트의 종횡비(H/W)는 7.3이다. 덕트의 수력직경을 기준으로한 Re 수는 300에서 3,000까지 변화시켜가면서 Re 수에 따른 유동 및 열전달 특성을 고찰하였다. 덕트 전열면에서의 열전달 특성을 고찰하기 위해 열전달과 물질전달사이의 상사성을 이용한 나프탈렌승화법을 사용하였다. 나프탈렌승화법은 일반적인 열전달 측정방법에 비해 국소적인 열/물질전달계수 분포를 구할 수 있으며, 전도 및 복사에 의한 오차를 없앨 수 있다는 장점이 있다. 또한 물질전달

계수는 열전달과 물질전달사이의 상사에 의해 열전달계수로 바꿀 수 있게 된다.⁽¹¹⁾ 열/물질전달계수를 계산하기 위해서 시험시편에 코팅된 나프탈렌의 표면형상을 실험진후에 측정하여 실험 중 승화된 나프탈렌의 깊이를 측정하여 물질전달계수를 구하게 된다. 이를 위한 측정장치는 LVDT(Linear Variable Differential Transformer; LBB-375TA-020) 및 2차원 자동이송장치로 구성되며, 측정장치의 자세한 사양은 이동호 등⁽¹²⁾과 동일하다.

꺾어진 덕트에서의 압력손실은 덕트의 바닥면에 꺾어진 덕트의 피치와 동일한 간격으로 설치된 직경 1.0 mm 의 5개의 압력탭(pressure tap)을 사용하여 측정하였으며, 각각의 압력탭 사이의 간격은 덕트의 피치(P)와 동일하게 하였다. 각 지점에서의 정압은 디지털 마이크로마노미터(digital micro manometer : DPI 145)와 멀티탭 스캐너(multiple scanner : MS 1000)를 사용하여 측정하였다.

2.2 열/물질 전달계수

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 포함되어있지 않으므로 $\rho_{v,\infty}=0$ 이다. 따라서 물질전달계수는 나프탈렌 승화 깊이(dy_N), 실험시간($d\tau$), 고체나프탈렌밀도(ρ_s), 나프탈렌증기 밀도($\rho_{v,w}$)로 구할 수 있게 된다.⁽¹³⁾

Sh 수는 다음과 같이 표현된다.

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

여기서, D_{naph} 는 Goldstein과 Cho⁽¹⁴⁾가 제시한 나프탈렌의 물성치에 근거하였다.

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

$$\overline{Sh} = \frac{\int_0^L \int_{-H/2}^{H/2} Sh \, dzdx}{A} \quad (3)$$

물질전달계수는 열전달과 물질전달간의 상사성

을 이용하여 다음과 같이 물질전달계수를 열전달 계수로 전환할 수 있다.⁽¹¹⁾

$$\frac{Nu}{Sh} = \left(\frac{Pr}{Sc} \right)^n \quad (4)$$

식 (4)에서의 지수 n 은 유동 조건에 따라 0.333에서 0.4사이의 값을 갖는다.

실험결과에 대한 오차해석은 Kline과 McClintock⁽¹⁵⁾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 사용된 마찰계수 f (Fanning friction factor)는 다음과 같이 정의된다.

$$f = \frac{\Delta P}{4(1/D_h)(1/2)\rho_{air}U^2} = \frac{1}{2} \Delta P \frac{D_h}{\rho_{air}U^2} \quad (5)$$

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

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

$$P.F. = \frac{Sh/Sh_0}{(f/f_0)^{1/3}} \quad (6)$$

여기에서 Sh_0 는 Dittus and Boelter⁽¹⁶⁾에 의해 제시된 매끈한 원형덕트내에서의 Sh 수를 나타내며, f_0 는 Bhatti and Shah⁽¹⁶⁾에 의해 제시된 매끈한 원형덕트내에서의 마찰계수 수를 나타낸다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 유동특성

Fig. 2는 꺾어진 덕트내에서 유동특성을 도식적으로 나타낸 그림이며 좌표는 Fig. 1(c)에 나타나 있듯이 유동방향에 수직인 방향이다. 유로내 유동은 꺾어진 덕트의 형상에 의해 2차유동이 발

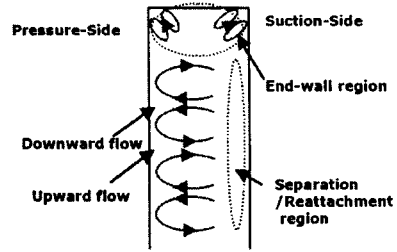
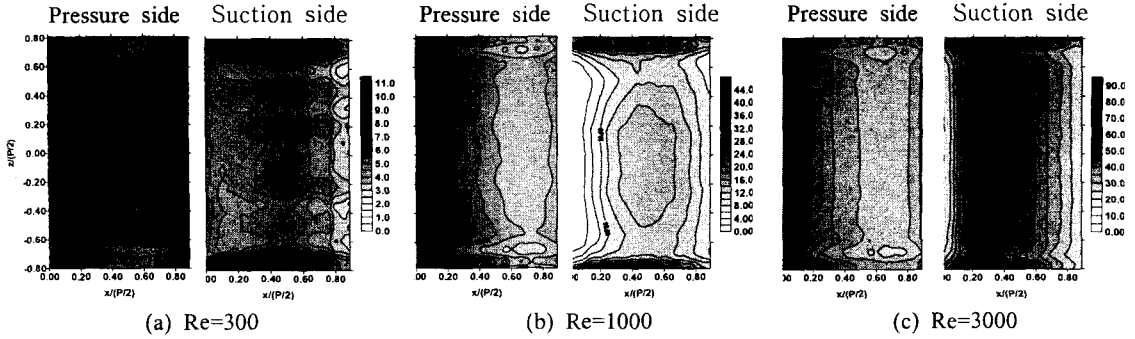
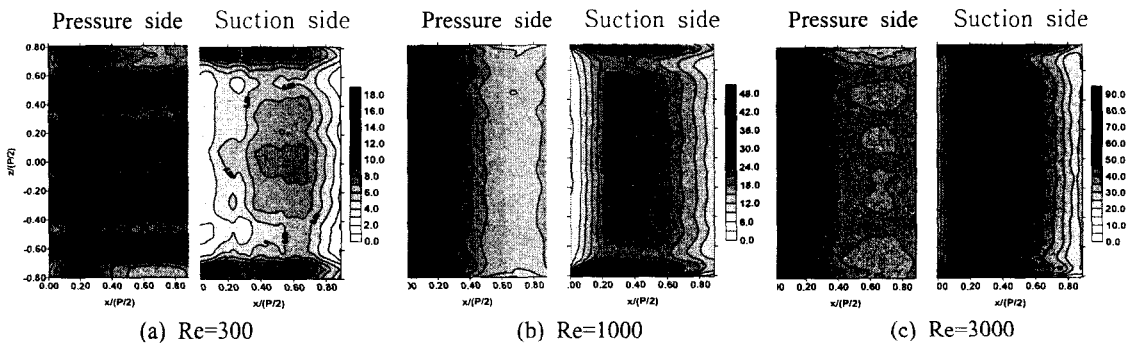


Fig. 2 Schematic flow patterns perpendicular to the main flow direction

생하게 된다. 우선 사각단면을 가지는 덕트의 형상에 의해 벽근처에서 모서리와류가 발생하게 된다. 그리고 낮은 Re 수에서는 모서리와류와 함께 주유동에 수직인 2차유동이 생성되게 된다. 이는 꺾어진 덕트의 형상에 의해 발생하는 2차유동으로 곡면에서 유동 불안정성에 의해 발생하게 되며 이와 같은 2차유동에 의해 압력면에서 상향류(upward flow)와 하향류(downward flow) 영역이 존재하게 된다. 따라서 하향류영역에서는 압력면에 충돌효과를 나타내며, 충돌후 흡입면쪽으로 올라가는 유동은 흡입면에서 박리 및 재부착유동에 의해 다시 영향을 받게 된다. 하지만 이후 유속이 증가하게 되면, Taylor-Görtler 와류에 의해 난류로의 천이가 촉진되어 난류영역에서는 2차유동이 사라지게 되고, 유동의 박리 및 재부착의 유동 특성이 나타나게 된다. 또한 Re 수 증가에 따라 유동이 압력면쪽으로 편향되게 된다.⁽¹⁷⁾

3.2 열/물질 전달특성

Fig. 3은 $\alpha=145^\circ$ 일 때 Re 수 증가에 따른 전열면에서 Sh 수 분포를 나타내는 그림이다. 모서리와류(corner vortex)의 영향으로 높은 Sh 수값을 가지는 영역($z/(P/2) \cong \pm 0.8$)을 제외한 중심부에서, $Re=300$ [Fig. 3(a)]일때 압력면에서 높은 Sh 수값을 가지는 셀들이 존재하였다. 이는 꺾어진 형태의 덕트형상에 의해 유동의 불안정성 때문에 생성된 일종의 Taylor-Görtler 와류의 영향 때문이다. Taylor-Görtler 와류는 충돌효과를 일으키는 하향류(downward flow)와 낮은 Sh 수값을 유발시키는 상향류(upward flow)로 구성된다. 흡입면에서도 압력면과 같이 상향류 및 하향류의 영향으로 높은 Sh 수값을 가지는 셀 영역이 형성되었다.

Fig. 3 Sh contours for the angle of 145° Fig. 4 Sh contours for the angle of 130°

$Re=1000$ [Fig. 3(b)]으로 증가하면 압력면에서 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 2차유동의 영향으로 좀더 넓은 영역에 걸쳐 높은 Sh 수값을 가지는 영역이 형성되었다. $Re=3000$ 인 경우[Fig. 3(c)] Taylor-Görtler 와류에 의한 2차유동은 완전히 소멸되었으며 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.

Fig. 4는 $\alpha=130^\circ$ 로 덕트 꺾임각이 유동방향에 대해 좁아졌을 때 Re 수 증가에 따른 전열면에서 Sh 수 분포를 나타내는 그림이다. 압력면과 흡입면에서 $\alpha=145^\circ$ 일 때와 거의 유사한 유동특성을 보였으나 국소적으로 향상된 Sh 수값을 나타내었다. $Re=300$ 일 때[Fig. 4(a)] 압력면에서 높은 Sh 수값을 나타내는 영역이 $\alpha=145^\circ$ 일 때 비해 상대

적으로 넓게 확장된 것을 볼 수 있다. 이는 좁아진 꺾임각의 영향으로 인해 유동불안정성이 증가하였고, Taylor-Görtler 와류의 강도가 강화되었기 때문이다. 흡입면에서도 2차유동의 영향으로 셀이 형성되는 것을 관찰할 수 있었다. $Re=1000$ [Fig. 4(b)]일 때 압력면에서 $\alpha=145^\circ$ 에서 Taylor-Görtler 와류에 의해 형성되었던 셀은 거의 소멸되어 갔다. 흡입면에서는 유동의 박리 및 재부착에 의해 높은 Sh 수를 보이는 영역이 형성되었다. 이는 꺾임각이 좁아짐에 따라 유동불안정성이 증가하여 난류로의 천이가 촉진되며 2차유동은 난류의 천이를 도우며 더 낮은 Re 수에서 소멸되어간다고 생각된다.

$Re=3000$ [Fig. 4(c)]인 경우 압력면에서 2차유동은 완전히 소멸되었으며, 관성력에 의한 유동편향에 의해 유동상류에서 높은 Sh 수 분포를 보였다. 흡입면에서는 유동의 박리 및 재부착에 의해 높은 Sh 수를 보이는 영역이 더욱 뚜렷이 형성되었다.

Fig. 5는 $\alpha=115^\circ$ 일 때 Re 수 증가에 따른 전열면에서 Sh 수 분포를 나타내는 그림이다. $Re=300$ [Fig. 5(a)]일 때 압력면에서 증가된 유동불안정성

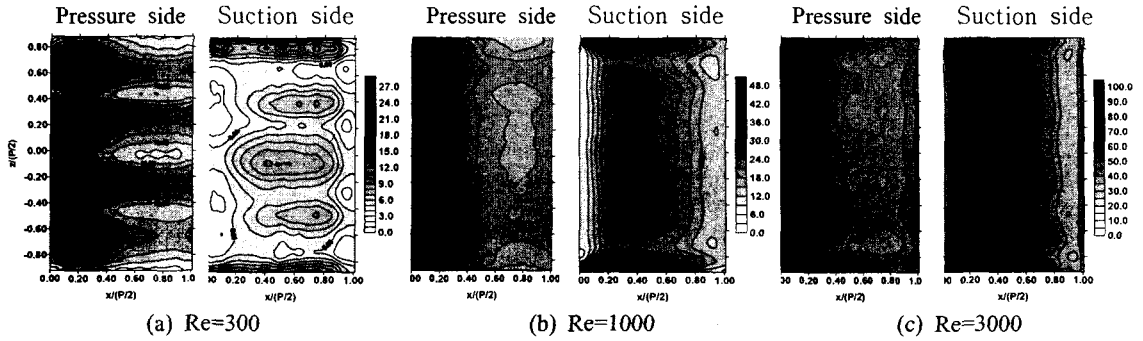


Fig. 5 Sh contours for the angle of 115°

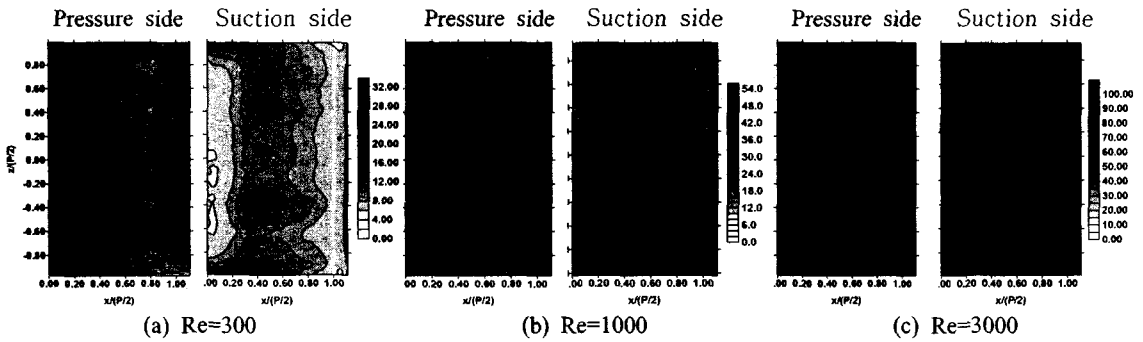
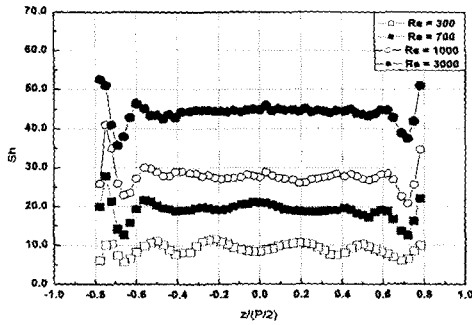


Fig. 6 Sh contours for the angle of 100°

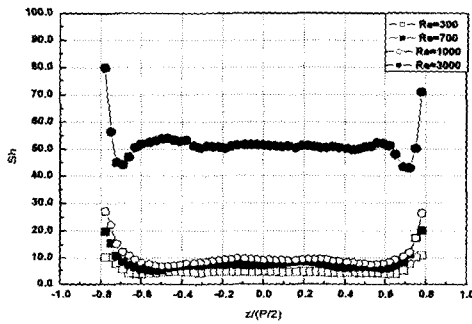
에 의해 셀 형상이 뚜렷해졌으며, 2차유동이 확장되어 모서리와류와 의해 형성되는 셀과 합쳐지는 것을 볼 수 있었다. 흡입면에서도 2차유동의 영향으로 높은 Sh 수를 나타내는 셀들을 확인할 수 있었다. Re=1000 [Fig. 5(b)]일 때 압력면에서 2차유동은 소멸되었으며, 흡입면에서는 유동의 박리에 의한 재부착의 영향으로 높은 Sh 수를 보이는 영역이 형성되었다. Re=3000 [Fig. 5(c)]일 때 압력면에서 2차유동에 의한 셀들은 완전히 소멸되었다. 넓은 꺾임각($\alpha=145^\circ, 130^\circ$)에서 보이지 않던 물결형태의 열전달특성이 형성되었다. 이는 난류에서 좁은 꺾임각의 영향으로 횡방향으로 압력의 구배가 발생되고 Dean 와류(Dean vortex)가 형성되었기 때문이다. 흡입면에서도 유동의 박리에 의한 재부착에 의해 높은 Sh 수를 나타내는 영역이 형성되었고, Dean 와류의 영향으로 의해 셀이 형성되었다.

Fig. 6은 본 연구에서 가장 좁은 꺾임각인 $\alpha=100^\circ$ 로 유동방향에 대해 좁아졌을 때 Re 수 증가에 따른 전열면에서 Sh 수 분포를 나타내는 그림이다. $\alpha=145^\circ, \alpha=130^\circ, \alpha=115^\circ$ 와 다른 열전달 분

포를 나타낸다. 이는 각도가 좁아지면 꺾어진 덕트에 발생하는 유동불안정성이 증가하며 난류의 천이가 촉진되기 때문이다. 따라서 $\alpha=100^\circ$ 도 꺾임각이 줄어들 경우, 낮은 Re 수 Re=300 [Fig. 6(a)]일 때 압력면에서 좁아진 덕트 꺾임각의 영향으로 난류로의 천이가 촉진되어 2차유동은 소멸되어 가는 경향을 나타내었다. 흡입면에서 미약해진 2차유동의 영향으로 다소 높은 Sh 수를 나타내는 셀 영역 및 유동의 재부착에 의한 영역이 형성되기 시작하였다. Re=1000 [Fig. 6(b)]으로 증가 하였을 때 2차유동은 완전히 소멸되었으며, 좁아진 꺾임각의 영향으로 덕트 횡방향으로 압력의 구배가 발생되었다. 따라서 압력면에서 압력의 구배의 의한 Dean 와류의 영향으로 유동상류 부분에서 물결형태의 높은 열전달특성을 나타내는 영역이 형성되었다. 흡입면에서 유동 재부착의 영향으로 높은 Sh 수 분포를 보이는 영역이 형성되었으며, Dean 와류의 영향으로 셀이 형성되기 시작하였다. Re=3000 [Fig. 5(c)]일 때 증가된 유속의 영향으로 Dean 와류의 강도가 더욱 증가하였다. 압력면에서 강화된 Dean 와류의 영향으로 유동상



(a) Pressure side

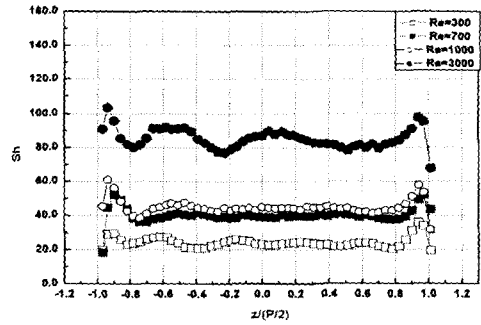


(b) Suction side

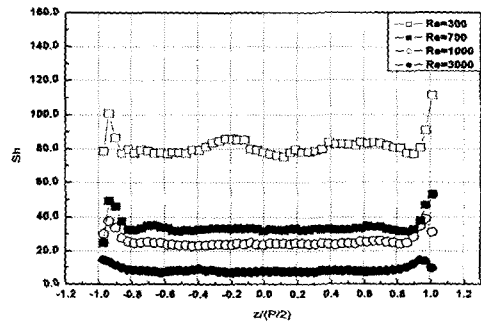
Fig. 7 Local Sh corrugated angle 145° and $x/(P/2)=0.2$ with increasing Re

류에서 물결형태의 높은 열전달특성을 나타내는 영역이 형성되었다. 흡입면에서 유동의 재부착의 영향으로 높은 열전달특성을 나타내는 영역이 형성되었고, Dean 와류의 영향으로 셀 영역이 형성되었다.

Fig. 7은 꺾임각이 145° 일 때, $x/(P/2)=0.2$ 에서 Re 수에 따른 폭 방향 국소 Sh 수 변화를 나타내는 그림이다. 압력면에서 Re 수가 300일 때 덕트의 곡률효과에 의해 생성된 2차유동의 하향류에 의해 $z/(P/2)=\pm 0.2, \pm 0.5$ 에서 높은 국소 Sh 수를 나타내는 피크(peak)가 형성되었다. Re 수가 700으로 증가 하였을 때 소멸되어가는 2차유동의 영향으로 피크값들은 감소되는 경향을 보였다. Re 수 1000에서 2차유동에 의한 피크값들은 거의 소멸되었다. Re 수 3000에서 2차유동에 의한 피크값들은 완전히 소멸되었고, 관성력에 의한 유동편향에 의해 높은 국소 Sh 수를 보였다. 흡입면에서 Re 수 300, 700, 1000으로 증가함에 따라 흡입면에서 약하게 보이던 2차유동에 의한 피크값



(a) Pressure side

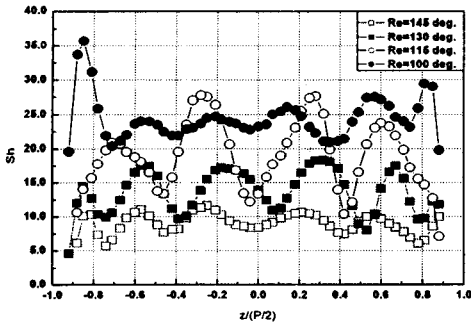


(b) Suction side

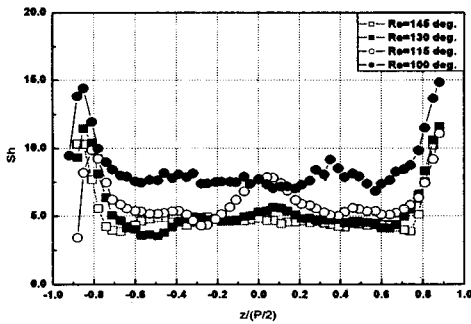
Fig. 8 Local Sh at corrugated angle 100° and $x/(P/2)=0.2$ with increasing Re

들은 감소하였다. Re 수 3000에서 피크값은 완전히 소멸되었으며, 유동의 재부착에 의한 영향으로 높은 국소 Sh 수를 나타내었다.

Fig. 8은 꺾임각 100° , $x/(P/2)=0.2$ 에서 Re 수에 따른 국소 Sh 수 변화를 나타내는 그림이다. 압력면에서 Re 수 300일 때 좁아진 꺾임각의 영향으로 난류로의 전이가 발생하였다. 따라서 관성력에 의한 유동편향으로 높은 국소 Sh 수를 나타내었으며, 소멸되어 가는 2차유동의 영향으로 다소 높은 피크값들이 형성되었다. Re 수 700일 때 2차유동에 의한 피크값들은 완전히 소멸되었으며, Re 수 1000, 3000일 때 Dean 와류의 형성으로 높은 국소 Sh 수 및 피크값들이 형성되었다. 흡입면에서 Re 수 300, 700일 때 유동 재부착효과에 의한 특성으로 폭방향으로 비교적 균일한 국소 Sh 분포를 나타내었다. 하지만 Re 수가 1000, 3000으로 증가하였을 때 유속증가에 따른 유동의 재부착효과의 증가로 국소 Sh 수는 증가하였으



(a) Pressure side

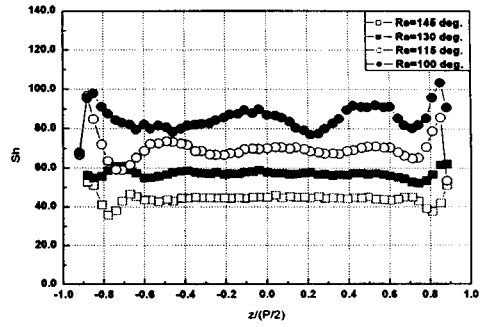


(b) Suction side

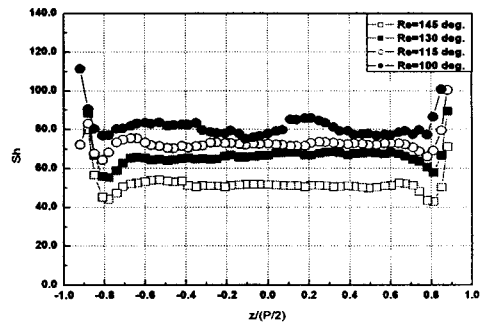
Fig. 9 Comparison of local Sh for corrugated angles at $Re=300$ and $x/(P/2)=0.2$

며, 좁아진 유로 꺾임각에 의해 난류 영역에서 발생하는 Dean 와류의 영향으로 피크값들이 형성되는 것을 볼 수 있었다.

Fig. 9는 $Re=300$, $z/(P/2)=0.2$ 에서 꺾임각 변화에 따른 폭방향으로 국소 Sh 수 변화를 나타내는 그림이다. 압력면[Fig. 9(a)]에서 꺾임각이 145° 에서 115° 좁아질수록 유동불안정성이 증가하여 2차유동의 강도가 증가하여 높은 국소 Sh 수 분포를 보이는 피크를 형성하고 있다. 꺾임각이 100° 로 좁아지게 되면, 좁은 꺾임각의 의한 유동불안정의 증가로 난류로의 천이이 촉진되었다. 따라서 유동편향에 의해 높은 국소 Sh 수를 나타내었으며, 소멸되어 가는 2차유동에 의해 생성되는 국소 피크값의 상대적인 크기가 감소되었다. 흡입면의 경우[Fig. 9(b)]에서 2차유동의 영향으로 피크가 형성되었다. 꺾임각이 115° 에서 가장 높은 피크가 형성되었으며, 꺾임각 100° 의 경우 소멸되어 가는 2차유동에 의해 피크들은 미약하였으며



(a) Pressure side



(b) Suction side

Fig. 10 Comparison of local Sh for corrugated angle at $Re=3000$ and $x/(P/2)=0.2$

유동의 재부착의 영향으로 균일하게 높은 국소 Sh 수 분포를 나타내었다.

Fig. 10은 $Re=3000$, $z/(P/2)=0.2$ 에서 꺾임각 변화에 따른 폭방향으로 국소 Sh 수 변화를 나타내는 그림이다. 압력면[Fig. 10(a)]에서 꺾임각이 145° 에서 130° 로 좁아짐에 따라 주유동의 관성효과에 따른 유동편향 효과의 증가로 높은 국소 Sh 수를 나타내었다. 꺾임각 115° , 100° 의 경우 꺾임각이 좁아짐에 따라 유동편향 효과 및 Dean 와류의 영향으로, 국소 Sh 수는 증가와 함께 높은 국소 Sh 수를 나타내는 피크가 형성되었다. 흡입면[Fig. 10(b)]에서는 꺾임각 145° 에서 130° 로 좁아짐에 따라 유동의 재부착효과가 증가하기 때문에 국소 Sh 수는 증가하였다. 꺾임각 115° , 100° 의 경우 꺾임각이 좁아짐에 따라 유동의 재부착효과 증대로 국소 Sh 수는 증가하였고, Dean 와류에 의해 상대적으로 높은 Sh 수를 나타내는 피크가 형성되었다.

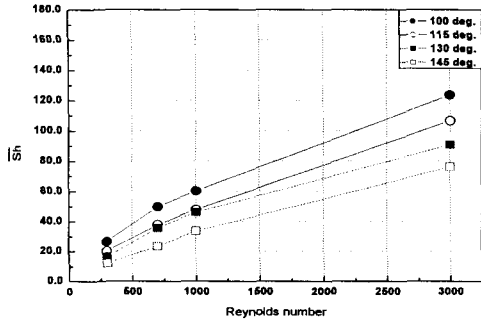


Fig. 11 Average distribution Sh for the corrugated angle with increasing Re

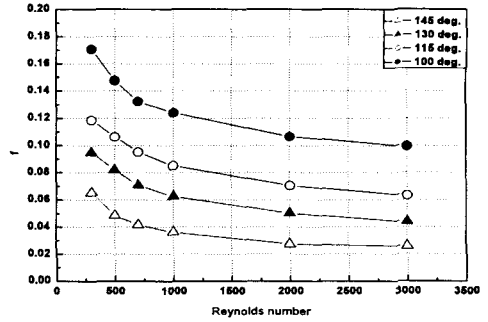


Fig. 13 Friction factor distribution for the corrugated angle with increasing Re

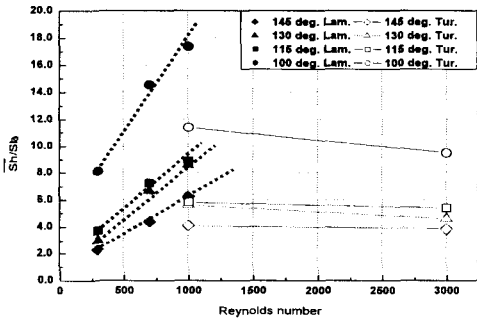


Fig. 12 Normalized average Sh ratio distribution for the corrugated angle with increasing Re

3.3 평균 Sh 수 및 성능계수

Fig. 11은 꺾임각 변화에 따른 전열면에서 면적 평균 Sh 수를 나타내는 그림이다. 전체적으로 Re 수가 증가할수록 유속의 증가에 의해 전열면에서 평균 Sh 수는 선형적으로 증가하는 분포를 나타냈다. 꺾임각에 대한 영향을 살펴보면, 낮은 $Re(Re \leq 1000)$ 수에서 꺾임각이 145° 에서 100° 로 좁아짐에 따라 유동불안정성의 증가하였다. 따라서 2차유동이 활발해지고 난류로의 천이가 촉진되기 때문에 같은 Re 수에서 보다 높은 평균 Sh 수를 보였다. 높은 $Re(Re \geq 1000)$ 수에서는 꺾임각이 좁아짐에 따라 유동편향효과 및 유동의 재부착효과 증가와 함께 Dean 와류의 형성으로 인해 같은 Re 수에서 보다 높은 평균 Sh 수를 나타내었다.

Fig. 12는 꺾어진 덕트에서의 평균 Sh 수를 매끈한 원형관에서 층류 및 난류에서의 Sh 수로 무

차원한 그림을 나타내고 있다. 여기서 Lam., Tur.은 각각 층류 및 난류에서 Sh_0 값을 나타낸다. Re 수 1000 이하에서 꺾임각 145° 의 경우 2차유동의 영향으로 매끈한 원형관에 비해 증가하는 평균 Sh 수 경향을 나타냈다. 꺾임각의 영향으로, 꺾임각이 좁아짐에 따라 유동의 불안정성이 증가하고 2차유동이 강화되기 때문에 매끈한 원형관에 비해 평균 Sh 수는 증가하였다. 또한 꺾임각 100° 의 경우 난류로의 천이가 촉진되기 때문에 매끈한 원형관에 비해 최고 17배까지 높은 열전달특성을 나타내었다. Re 수 1000 이상에서 꺾임각 145° 의 경우 2차유동은 소멸되고 유동박리 및 재부착에 의한 영향으로 매끈한 원형관에 비해 일정하게 증가된 평균 Sh 수 분포를 나타내었다. 꺾임각이 좁아짐에 따라 유동의 편향, 재부착 영향의 증가로 매끈한 원형관에 비해 평균 Sh 수는 증가하였다. 꺾임각 100° 의 경우 Dean 와류가 발생으로 매끈한 원형관에 비해 평균 Sh 수는 크게 증가하였다.

Fig. 13은 꺾임각에 따른 평균 마찰계수 분포를 나타낸 그림이다. Re 수가 증가함에 따라 f 는 감소하는 경향을 나타낸다. 꺾임각이 145° 에서 135° , 115° , 100° 로 좁아짐에 따라 2차유동 및 유동의 편향, 재부착 효과의 증가로 평균 마찰계수는 증가하는 경향을 보여준다. 특히 $\alpha=100^\circ$ 의 경우 $\alpha=145^\circ$ 에 비해 2.5배에서 3배까지 압력손실이 증가하였다.

Fig. 14는 실험에서 구한 평균 마찰계수와 완전 발달한 매끈한 원형관에서의 평균 마찰계수와 의 비를 나타내는 그림이다. Re 수 1000 이하에서 꺾임각 145° 의 경우 2차유동의 영향으로 Re 수

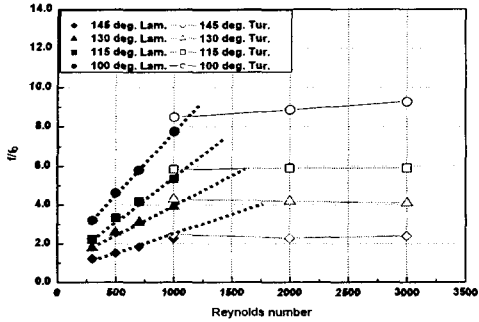


Fig. 14 Normalized friction factor distribution for the corrugated angle with increasing Re

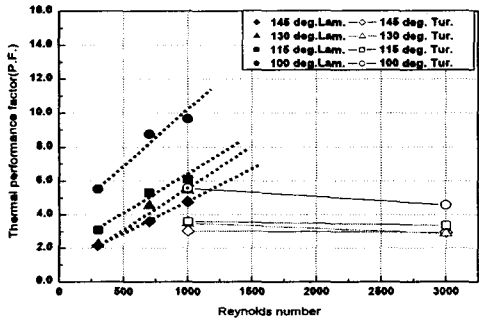


Fig. 15 Thermal performance factor distribution for the corrugated angle with increasing Re

증가에 따라 매끈한 원형관에 비해 평균 마찰계수는 증가하는 경향을 나타내었다. 꺾임각의 영향으로, 꺾임각이 좁아질수록 유동 불안정성이 증가하기 때문에 매끈한 원형관에 비해 평균 마찰계수는 증가하는 경향을 나타내었다. 꺾임각 100°의 경우 난류로의 천이가 발생하기 때문에 매끈한 원형관에 비해 최고 8배까지 평균 마찰계수는 증가하였다. Re 수 1000 이상에서 꺾임각이 145°의 경우 2차유동은 소멸하기 때문에 Re 수 증가에 따라 매끈한 원형관에 비해 일정하게 높은 평균 마찰계수 분포를 보였다. 꺾임각이 좁아짐에 따라 유동의 편향, 재부착의 영향으로 매끈한 원형관에 비해 평균 마찰계수는 증가하였다. 꺾임각 100°의 경우 Dean 와류의 형성되기 때문에 매끈한 원형관에 비해 평균 마찰계수는 크게 증가하였다.

Fig. 15는 유체이송동력이 같을 때(constant pumping power) 열/물질전달 향상 정도를 나타내는 성능계수(thermal performance factor)를 나타내

는 그림이다. 낮은 Re 수($Re \leq 1000$)에서 꺾임각 145°의 경우 2차유동에 의한 열전달특성 향상이 압력손실보다 상대적으로 크기 때문에 성능계수는 증가하는 경향을 나타내었다. 꺾임각의 영향으로, 꺾임각이 좁아짐에 따라 유동불안정성의 증가로 2차유동이 강화되기 때문에 성능계수는 증가하였다. 꺾임각 100°의 경우 난류로의 천이 발생으로 열전달특성이 크게 증가하기 때문에 성능계수도 크게 증가하였다. 높은 Re 수($Re \geq 1000$)에서는 꺾임각 145°의 경우 2차유동은 소멸되기 때문에 성능계수는 일정하게 유지되었다. 꺾임각의 영향으로, 꺾임각이 좁아질수록 유동의 편향, 재부착의 증가로 성능계수는 증가하였다. 꺾임각 100°의 경우 Dean 와류의 형성으로 열전달특성이 크게 증가하기 때문에 성능계수는 크게 증가하였다.

일반적으로 꺾임각 및 곡률이 꺾어진 덕트의 열전달 향상에 중요한 역할을 하게 되는데,⁽¹⁰⁾ 본 연구에서는 덕트 꺾임각이 좁아짐에 따라 성능계수는 증가하는 경향을 나타내었다. 하지만 좁은 꺾임각의 영향으로 압력손실이 열전달특성보다 상대적으로 커져서 성능계수가 감소하게 되는 적정의 꺾임각이 존재할 것이며, 이에 대한 연구가 필요하다.

4. 결론

본 연구에서는 primary surface형 열교환기에 적용되는 꺾어진 덕트에서 꺾임각 변화와 Re 수 증가에 따른 열/물질전달 특성을 고찰하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 덕트 꺾임각 145°에서 Re 수에 따른 열/물질전달 특성을 살펴보면, $Re \leq 1000$ 에서는 Taylor Gortler 와류의 생성으로 압력면 및 흡입면에서 높은 Sh 수 분포를 가지는 셀들이 존재하였다. 하지만 $Re \geq 1000$ 에서는 2차유동에 의한 셀들은 소멸되었고, 유동의 재부착에 의한 영향으로 높은 Sh 수를 보이는 영역이 형성되었다.

(2) 꺾임각 변화에 따른 열/물질전달 특성을 살펴보면 $Re \leq 1000$ 에서는 꺾임각이 145°에서 115°로 좁아짐에 따라 유동불안정성이 증가하여 평균 Sh수가 증가하였다. 꺾임각 100°의 경우 난류로의 천이가 촉진되어 평균 Sh 수는 크게 증가하였다. $Re \geq 1000$ 에서 꺾임각이 145°에서 115°로 좁아짐에 따라 유동의 편향, 재부착 효과의 증대로

평균 Sh 수는 증가하였다. 꺾임각 100°의 경우, 넓은 꺾임각에서 형성되지 않았던 Dean 와류의 형성으로 Sh 수가 크게 증가하였다.

(3) 꺾임각이 좁아질수록 2차유동, 유동의 편향, 재부착효과의 증가로 평균 Sh 수는 증가하였으나 압력손실이 증가하여 마찰계수 또한 증가하였다.

후 기

본 연구는 2000년 국가연구실사업(National Research Lab.) 및 한국터보기계(주)의 지원에 의하여 연구 되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Kim, J. H., Jeon, Y. J., Kim, T. S. and Ro, S. T., 1999, "Analysis of the Dynamic Characteristics of a Small Regenerative Gas Turbine," *Trans. KSME (B)*, Vol. 23, No. 6, pp. 769~777.
- (2) 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.
- (3) McDonald, C. F., 1990, "Gas Turbine Recuperaor Renaissance," *Heat Recovery Systems & CHP*, Vol. 10, No. 1, pp. 1~30.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (6) Nishimura, T., Yano, K., Yoshino, T. and Kawamura, Y., "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.
- (7) 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.
- (8) 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.
- (9) 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.
- (10) 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.
- (11) 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.
- (12) Rhee, D. H., Kim, B. G. and Cho, H. H., 1998, "Characteristics of Heat/Mass Transfer and Film Cooling Effectiveness Around a Single Film Cooling Hole with Compound Injection Angles," *Trans. KSME (B)*, Vol. 22, No. 10, pp. 1433~1444.
- (13) Ambrose, D., Lawrenson, I. J. and Sparke, C. H. S., 1975, "The Vapor Pressure of Naphthalene," *J. Chem. Thermodynamics*, Vol. 7, pp. 1173~1176.
- (14) 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.
- (15) Kline, S. J. and McClintock, F., 1953, "Describing Uncertainty in Single Sample Experiments," *Mech. Engineering*, Vol. 75, pp. 3~8.
- (16) Rohsenow, W. M., 1998, *Handbook of Heat Transfer Part I*, Mcgraw-Hill, pp. 5.22~5.31.
- (17) 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 Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 15, No. 6, pp. 809~820.