

(論 文)

# 환상핀이 부착된 원봉 주위의 3차원 박리 유동 구조 및 물질 전달 특성 해석

박태선\* · 성형진\*

(1991년 7월 9일 접수)

## Local Convective Mass Transfer and Flow Structure around a Circular Cylinder with Annular Fins

Tae Seon Park and Hyung Jin Sung

**Key Words:** Annular Fin(환상핀), Naphthalene Sublimation Technique(나프탈렌승화법) Horseshoe Vortex(말굽와류, V1, V2, V3), Sherwood Number(물질전달계수)

### Abstract

Extensive experiments were carried out to investigate the mass transfer and flow structures around a circular cylinder with annular fins in crossflow. The naphthalene sublimation method was employed to measure the circumferential and longitudinal variations of mass transfer from the circular cylinder between annular fins with the different  $L/H$ , where  $L$  is the length between annular fins and  $H$  is the height of the fin from the cylinder surface. A remarkable enhancement of mass transfer due to the horseshoe vortices was observed near the corner junction between the annular fin and circular cylinder. The present results indicate that the local circumferential Sherwood number shows the higher values on the front stagnation point. The maximum augmentation of mass transfer rate at the center of cylinder is found near  $L/H \sim 0.15$  due to the separation bubble along the annular fins. The secondary flows, which are the corner vortices  $V_2$  and  $V_3$  near the end wall of the annular fin, are fairly predicted from the distributions of local Sherwood number in the spanwise direction. The average Sherwood number of overall surface at  $L/H = 0.15$  is larger 2.0 times than that of without annualr fins. The correlations of total average mass transfer rate with  $L/H$  and  $Re_L$  can also be obtained.

### 기호설명

$d$  : 원봉의 직경  
 $D_f$  : 공기중에서 나프탈렌의 물질 확산계수 ( $D_f = \nu / Sc$ )  
 $H$  : 원봉 표면으로 부터 환상핀의 높이  
 $H_1$  : 풍동의 높이  
 $h_m$  : 국부 물질 전달계수  
 $L$  : 환상핀 사이의 거리

$m''$  : 원봉 단위 면적당 국부 물질 전달률  
 $Nu$  : 누셀트 수 ( $Nu = hd/k$ )  
 $Re_d$  : 레이놀즈 수 ( $Re_d = U_d/v$ )  
 $Re_L$  : 레이놀즈 수 ( $Re_L = UL/v$ )  
 $P_v$  : 나프탈렌의 증기압  
 $R$  : 일반 기체 상수  
 $Sc$  : 슈미트수  
 $Sh$  : 셸우드 수  
 $T$  : 온도

\*정회원, 한국과학기술원 기계공학과

|                 |                    |
|-----------------|--------------------|
| $\tau$          | : 축정 시간            |
| $Tu$            | : 난류 강도            |
| $U$             | : 접근 유동의 평균 속도     |
| $y$             | : 원봉 길이 방향 좌표      |
| $\rho_{v,w}$    | : 벽에서 나프탈렌의 밀도     |
| $\rho_{\infty}$ | : 자유유동장에서 나프탈렌의 밀도 |
| $\rho_s$        | : 나프탈렌 밀도          |
| $\Delta t$      | : 승화 깊이            |
| $\Delta \tau$   | : 노출 시간            |

## 1. 서 론

원봉주위에 환상핀이 부착된 열교환 증진기구는 실제 열교환기 시스템에서 널리 사용되고 있다. 특히 환상핀에 의한 원봉으로부터의 열전달에 대한 연구는 환상핀의 전도 열전달과 함께 원봉주위의 대류 열전달이 공존하는 열교환기의 기본연구 중의 하나이다. 그러나 환상핀이 부착된 원봉주위의 대류 열전달 현상은 그 모형의 간단함에 비해 유동의 박리, 재부착 그리고 재순환 유동등 상당히 복잡한 유동구조를 수반한다. 특히 원봉과 환상핀의 접촉 벽면 가까이와 와류현상은 일반적으로 말굽와류(horseshoe vortex)에 의한 열전달 증진을 가져오며 그 유동현상은 3차원 유동이다. 실제 열전달 시스템에서 나타나는 이런 3차원 와류가 열전달에 미치는 영향은 시스템의 성능에 결정적인 역할을 하는 것으로 알려져 있으며 복잡한 난류유동의 조직적인 구조(coherent structure)에서의 말굽와류의 역할과 함께 많은 연구가 진행되고 있다<sup>(1)</sup>.

직교흐름(cross flow)에 원봉이 놓여져 있는 경우 원봉주위의 대류 열전달에 영향을 줄 수 있는 여러 변수들에 대해서는 과거로부터 많은 관심을 가져왔다. Achenbach<sup>(2)</sup>는 원봉 표면에 거칠기가 있는 경우가 없는 경우 보다 박리점 이전에서는 열전달률이 증가한다는 것을 실험적으로 보였고 또한 표면 거칠기가 증가할수록 경계층 유동 천이가 빨리 일어남을 보였다. Kestin과 Wood<sup>(3)</sup>는 원봉주위의 물질전달률 증가는 직교흐름의 레이놀즈수와 난류강도에 의해 결정되는 상수에 비례함을 보였다. 즉 난류강도의 증가는 유동 천이를 빨리 일어나게 하고 난류유동인 경우 원주방향 물질전달계수 분포곡선에 2개의 최소점이 나타나 난류박리점이 난류강도의 함수임을 보였다. Sung등<sup>(4)</sup>은 접근유동이 속도구배를 가지는 전단유동인 경우 원봉주위

의 물질전달률을 레이놀즈수와 전단계수에 따라 실험적으로 규명하였다. 원봉주위의 최소물질 전달계수는 전단계수에 영향을 받지만 전체 물질전달량에는 큰 영향을 주지 않으며 오히려 레이놀즈수에 영향을 받는 것을 발견하였다. Sutura<sup>(5)</sup>는 앞 정체점(stagnation point)에서의 열전달 증가를 접근유동의 난류로 인해서 발생하는 와류계(vortex filament)의 늘임(stretching)에 의한 와도증폭(vorticity amplification)으로 설명하고자 하였다. 원봉주위의 대류 열전달에 대한 풍동실험을 수행할 때의 blockage factor에 대한 실험도 수행되었는데 West와 Apelt<sup>(6)</sup>는 풍동 벽면의 blockage factor가 증가함에 따라서 전체적으로 열전달이 증가함을 보였다. 이것은 압력구배의 증가로 인하여 유체의 속도가 빨라지고 결국 경계층 두께를 얇게 하는 효과를 나타내기 때문에 열전달이 증가하게 된다. 이들의 결과는 blockage factor가 0.15보다 작은 경우 상대적으로 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

직교흐름(crossflow)에 돌출되어 있는 형상들 주위에서의 유동구조는 일반적으로 3차원 말굽와류에 의해서 특징지어 지는데 말굽와류의 존재에 대한 연구는 그 동안 많은 연구가 진행되어 왔다. Hunt등<sup>(7)</sup>은 3차원 물체주위의 유동장에 존재하는 평균 속도 혹은 전단응력이 0인 점(node, saddle point)들에 대해 위상수학을 적용해 운동학적으로 설명하였고 유동가시화(oil film technique)를 이용하여 실험한 결과 예측된 말굽와류를 증명하였다. Baker<sup>(8)</sup>도 유동가시화(smoke wire)를 이용하여 말굽와류를 발견하였다. 그는 말굽와류가 벽면에서의 압력분포에서 최소점이 있을 경우 정상와류 시스템, 최소점이 없을 경우 비정상 와류 시스템이 되어 앞뒤로 진동함을 보였다. 이들의 결과에서 3차원 물체 주위에 발생하는 와류의 숫자는 유동조건 즉 레이놀즈수, 물체의 크기, 경계층의 두께등에 의존함을 보였다. 한편 기하학적 특징에 의해 와류의 중첩등 복잡한 유동이 나타나는 터보기계의 익형선단 주위의 말굽와류가 형성됨을 Langston등<sup>(9)</sup>은 보였다.

말굽와류가 열전달에 미치는 영향을 살펴보면 Graziani등<sup>(10)</sup>은 익형의 선단근처에서 열전달이 증가하는데 이는 열전달과 말굽와류와의 관계가 밀접함을 예측할 수 있다. Eibeck과 Eaton<sup>(11)</sup>은 와류의 크기를 변화시켜가면서 열전달에 미치는 영향을 조사하였는데 와류의 회전운동에 의한 벽면 경계층

이 두꺼워지거나 얇아지는 경향이 열전달률 증가 또는 감소의 주 원인임을 보였다. 사각평판에 원관이 일렬로 늘어서 있는 열교환기 형상에 대해 물질전달 실험을 한 Soboya와 Sparrow<sup>(12)</sup>나 풍동 벽면에 수직으로 놓여 있는 원봉에 대해 액정기법(thermochromic liquid crystal)에 의해 열전달계수를 구한 Ireland와 Jones<sup>(13)</sup>의 결과를 보면 원봉의 정체점과 벽면이 만나는 부분에서 말굽와류에 의해서 물질 및 열전달계수가 크게 나타남을 알 수 있다. Goldstein등<sup>(14)</sup>은 벽면에 원봉이 수직으로 놓여져 있을 때 벽면에 대한 원봉주위의 물질전달 실험을 하였는데 말굽와류에 의한 물질전달계수가 크게 증가함을 보였다. Fisher와 Eibeck<sup>(15)</sup>은 액정기법을 이용하여 원봉과 벽면이 만날때 원봉 뒤 후류 벽면의 난류 대류 열전달에 말굽와류가 미치는 영향에 대해서 조사하였는데 원봉이 없을때 보다 열전달계수가 상당히 증가함을 발견하였다.

표면에 수직으로 놓여 있는 원봉표면에 끝 벽면의 영향을 받아 발생한 와류가 대류 물질전달률에 미치는 영향에 대해서도 또한 관심의 대상이 되어 왔다. Goldstein과 Karni<sup>(16)</sup>는 원봉에 대한 물질전달 실험을 한 결과 원봉의 크기 및 경계층의 두께, 레이놀즈수등에 의해 물질전달률이 변화됨을 보였다. 그리고 말굽와류 시스템안에 작지만 매우 강한 구석와류(corner vortex;  $V_2$ ,  $V_3$ )가 존재함을 보였다. 특히 2차 와류인  $V_2$ 에 의한 물질전달률은 단일 원봉에 비해 7배까지 크게 나타났다. Van Dresar와 Mayle<sup>(17)</sup>은 끝 벽면과 원봉에 모두 나프탈렌을 주조한 경우와 원봉에만 주조한 경우에 대해서 실험을 행하였는데 구석와류( $V_2$ ,  $V_3$ )의 존재를 재확인 하였고 물질전달률 증가는 Goldstein과 Karni의 결과와 비슷한 경향을 얻었다. 이들의 결과에서 보면  $V_2$ ,  $V_3$ 는 끝 벽면으로부터 아주 가까운 영역에 (예를들면  $V_2$ 는  $0.01d$ ,  $V_3$ 는  $0.04d$ 에 위치, 여기서  $d$ 는 원봉직경) 위치하고 원봉표면에서 물질전달 증가의 주된 역할을 함을 알 수 있다. 최근에 Goldstein등<sup>(18)</sup>의 연구결과에서도 이러한 경향을 볼 수 있고, 벽면과 원봉을 동시에 나프탈렌으로 주조할 경우  $V_2$ 와  $V_3$ 에 의한 정점이 끝 벽면쪽으로 이동함을 보였다.

말굽와류가 열전달에 미치는 중요성 못지 않게 말굽와류가 발생하는 조건 및 숫자나 유동구조에 대해서 유속계에 의해 측정하거나 유동가시화를 이용한 연구도 활발히 진행되어 왔다. Eckerle과

Langston<sup>(19)</sup>은 벽면에 원봉이 세워져 있을 때 5공 프루브(five hole probe)를 이용하여 측정한 결과 단지 한 개의 와류와 한 개의 saddle point만을 발견하였다. Pierce와 Harsh<sup>(20)</sup>은 익형주위에 5공 프루브를 이용하여 구한 속도분포에서는 측정점의 간격이 구석와류의 크기보다 크기때문에 구석와류를 발견하지 못했지만 유동방향 와도 분포에서 2개의 와류가 존재함을 예측하였다. 그렇지만 이 연구결과도 익형의 선단에서는 구석와류를 발견하지 못했다. Pierce와 Tree<sup>(21)</sup>는 2성분 LDV를 이용 유속을 측정한 결과 2 와류모델( $V_2$ 의 발견)을 제시하였으나 반면 유동가시화에서는 어떤 구석와류도 발견하지 못했다.

본 연구에서는 기존 유속계에 의한 측정이 어려운 점을 감안하여 나프탈렌 승화법을 이용하여 열교환기 시스템의 한 모델인 원봉에 유한한 길이의 환상핀이 부착된 경우 환상핀과 원봉이 만나는 부분에서 와류들 특히  $V_2$ ,  $V_3$ 등 구석와류가 물질전달을 증가시키는 구조에 대해 고찰한다. 이는 원봉주위의 환상핀에 의한 대류 물질전달에 영향을 줄 수 있는 레이놀즈수, 환상핀의 크기에 따른 형상비, 그리고 경계층 두께, 배제 두께 등의 유동변수를 변화시켜 가며 물질전달률과의 관계를 규명하여 열교환기 설계의 기본자료를 제공한다. 또한 환상핀 사이의 원봉표면에 대한 전체물질전달률을 측정하며, 환상핀에 인접한 곳에서 구석와류에 대한 환상핀의 끝 벽면 영향을 알아보고 이를 근거로 하여 말굽와류의 3차원 박리 유동구조를 정성적으로 규명하고자 한다.

## 2. 환상핀 주위의 말굽와류 특성

본 연구 모델과 같이 환상핀이 원봉에 부착된 경우 양쪽 환상핀 사이의 유동장은 원봉주위의 2차원적 박리 유동과 3차원적 와류거동에 의해서 특징지어진다. 환상핀 선단으로부터 유체의 점성으로 인하여 발달된 경계층은 원봉을 만나면서 역압력구배와 함께 원봉 길이방향의 압력구배를 받는다. 이런 압력구배는 유체를 환상핀쪽으로 향하게 하고 환상핀을 따라 접근유동의 역방향으로 움직이는 2차유동을 발생한다. 유동은 다시 접근유동과 만나면서 회전운동의 와류가 발생하고 원봉을 따라 3차원적 거동을 하게 된다(Fig. 1). 원봉 표면에서 2차 유동현상으로 인한 결손 부분을 채우기 위하여 경계

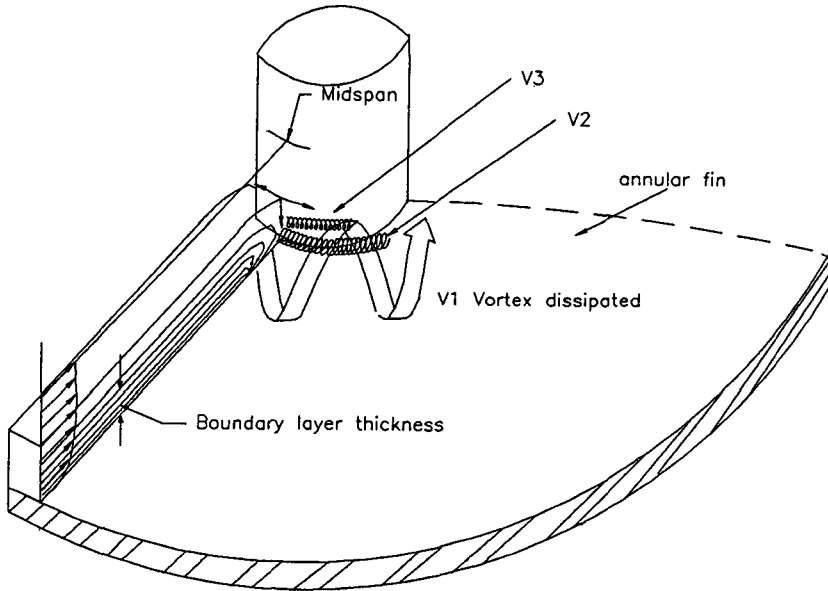


Fig. 1 Horseshoe vortex system between a circular cylinder and an annular fin

층 바깥의 비점성 평균유동으로 부터 운동량이 큰 유체가 유입(entrainment)된다. 이것은 벽면근처에서 레이놀즈 응력을 증가시키기 때문에 말굽와류 아래부분에서 열전달증가의 중요한 역할을 한다. 즉 경계층 크기 정도의 회전운동은 국부적으로 속도장을 변화시키고 열전달에 악영향을 미치는 점성저층(viscos sublayer)을 변화시키기 때문에 열전달 특성에 변화를 가져올 수 있다.

양쪽 환상핀사이의 간격에 대해 살펴보면 먼저 양쪽 환상핀의 간격이 크면 환상핀의 크기는 상대적으로 작기 때문에 경계층의 두께는 원봉 직경에 비해 상당히 작고 말굽와류의 크기 또한 간격이 충분히 떨어져 있을 경우 와류의 거동은 대칭으로 나타나고 양쪽 환상핀의 중앙에서는 단일 원봉의 경우와 비슷한 경향을 보인다. 그러나 환상핀의 간격이 좁아짐에 따라서 경계층 바깥의 비점성 영역이 줄어들고 연속법칙에 의해 환상핀사이 비점성 영역의 유체속도는 증가한다. 이러한 비점성 영역의 감소는 운동량이 큰 유체의 유입이 감소되는 결과를 낳고 구석와류의 선단으로부터 발달된 경계층은 원봉을 만나기 전에 중첩되는 즉 비점성 영역이 사라지게 될 것이고 양쪽 환상핀 사이의 내부유동은 V1에 의해 주도된다. 여기서 V2의 운동량 또한 감소한다.

### 3. 실험 방법 및 데이터처리

#### 3.1 풍동 및 유동장 측정

본 실험에 사용된 풍동은 개방 방출형으로서 송풍기, 확대노즐, 정류실, 축소, 측정덕트, 그리고 출구로 구성되어 있다. 측정부에서의 최대 풍속은 33m/sec이고 송풍기는 원심형 다단송풍기를 선택하였다(Fig. 2). 스크린(3장)과 하니콤의 압력 손실, 확대 노즐 및 출구에서의 손실 그리고 마찰 손실등을 고려하여 구동 모터는 15HP로 하였다. 확대 노즐은 유동 박리가 생기지 않도록 하기 위하여 중간 부분에 1장의 스크린을 설치하였으며, 전체 확대각이 5°이하가 되도록 하였다.  $\beta$ (open-area-ratio)가 0.6 이상인 3장의 스크린과 1장의 하니콤으로써 정류실을 구성하였고 축소면적비는 8.35이다. 그리고 출구로부터  $5H_1$ ( $H_1$ 은 측정 단면의 높이) 떨어진 곳에 측정 단면을 결정하였고, 측정 단면의 크기는  $450 \times 450 \text{mm}^2$ 이다.

덕트내의 속도 분포를 일괄적으로 구하기 위하여 24개의 작은관이 일렬로 구성되어 있는 레이크를 설치하였다. 레이크를 통해서 오는 압력은 전체 압력으로서 벽면에서의 정압을 빼면 순수동압이 되며 Scanni valve(SCANCO)를 통하여 디지털 압력계

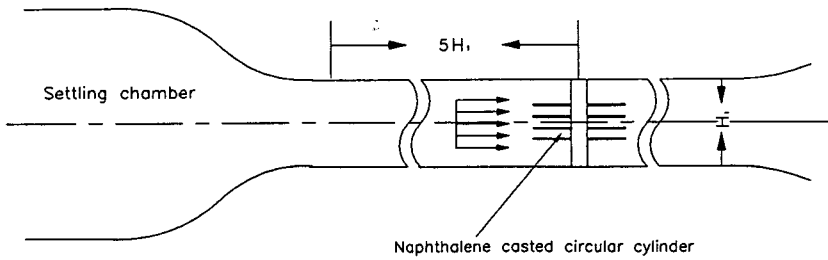


Fig. 2 Schematic view of the wind tunnel and the circular cylinder with annular fins

로 전달된다. Scanni valve는 각각의 피토크관을 순서적으로 레이크와 압력계로 연결시켜 주며, 신호의 증폭과 함께 컴퓨터에서 일괄처리 된다. 열선 풍속계에 의한 측정단면에서의 난류강도는 0.5%로써 상당히 균일한 유동조건이다.

### 3.2 나프탈렌 주조 및 승화량 측정

레이크 및 열선 풍속계로 측정된 유동장내에 시편 설치를 용이하게 하기 위해서 나프탈렌 피복부분을 포함해서 3개의 부분으로 나누었다. 원봉 직경은 전체 유동장을 방해하지 않는 범위에서 48mm로 선택하였고 (blockage factor 영향은 무시할수 있음) 중간원봉에 측정시 원점좌표가 되는 조그만 홈을 파 놓았다 (Fig. 3). 깨끗하고 정밀한 나프탈렌 표면 가공을 위하여 주조방법을 사용하였고 열전대를 설치한 다음 나프탈렌을 녹여 주입하였다. 나프탈렌이 주조된 후 분리시킬 때는 구리와 나프탈렌의

열팽창률 차이와 전단력을 이용하여 분리시킨다.

유동장내에 일정시간 (70~120분) 노출후 나프탈렌의 승화된 양을 정확히 측정하기 위하여 Fig. 4와 같은 자동이송 정밀 변이측정장치를 제작하였다. 이 측정장치는 변이측정센서, 디지털전압계 (HP3456A), 위치 고정장치, 스테핑 모터 콘트롤과 데이터 저장을 위한 286AT, IEEE488 인터페이스 카드를 사용하였다 (Fig. 5). 위치 고정장치는 3개의 스테핑 모터와 드라이버로 구성 되어져 있다. 변이측정센서는 LVDT (linear variable differential transformer)로 센서 끝의 직경은 1.2mm이다. 커다란 물질 전달 구배가 나타나는 지역이 매우 작기 때문에 원봉과의 접촉면적을 고려해서 끝 직경을 결정하였다. 스테핑 모터 3개는 진동과 소음을 줄이고 일정한 회전력을 얻기 위해 5상 모터 (oriental motor corporation)를 사용하였다. 2개의 스테핑 모터는 폴스텝에서 0.72°/step이고 반

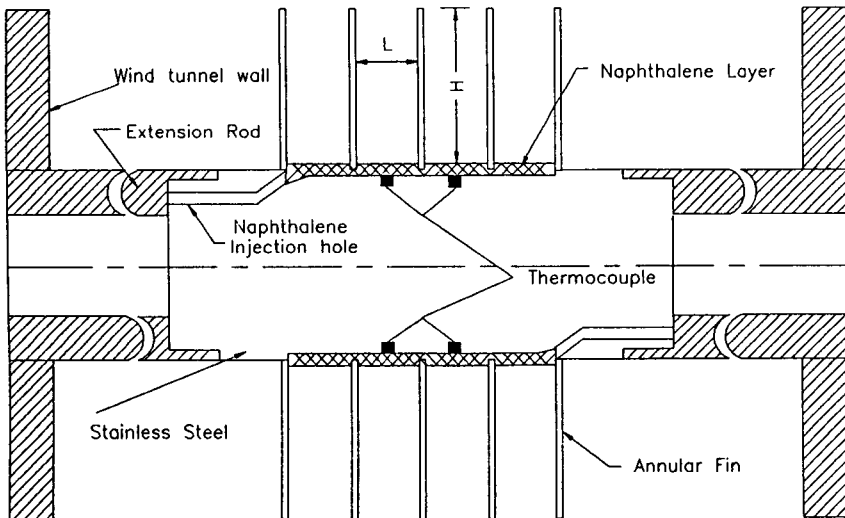


Fig. 3 Schematic view of the naphthalene casted cylinder with annular fins

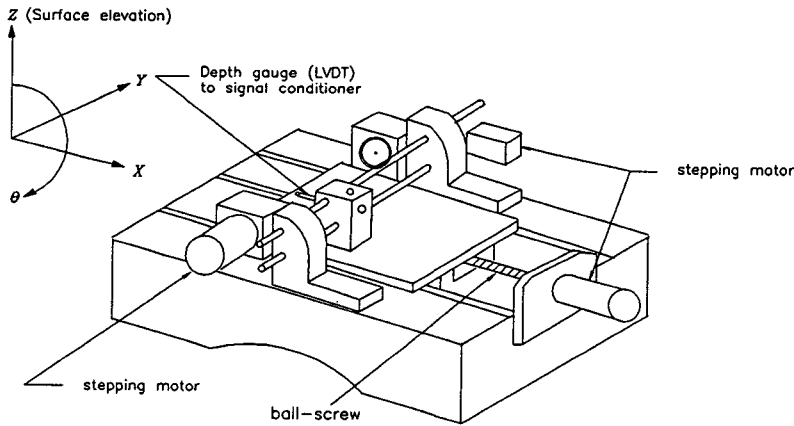


Fig. 4 Schematic view of the positioning apparatus

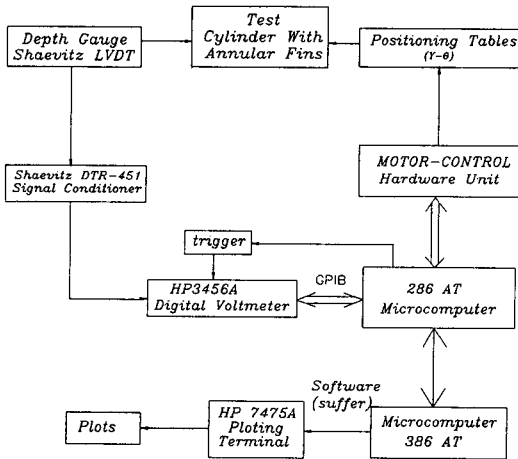


Fig. 5 Block diagram of the data acquisition and reduction system

스텝에서는 0.36°/step으로 움직인다. 나머지 스텝핑 모터 1개는 스텝당 0.18°로 선형 변화율은 0.0202mm/step(4.21 × 10<sup>-4</sup>d)로 움직인다.

측정 시간 동안 자연 대류에 의해 승화되는 양이 측정시간이 길어지면 영향이 크기 때문에 측정점을 어느 정도 한정하였고, 항온장치가 된 곳에서 측정되었다. 자연 대류에 의한 승화량이 1.0 × 10<sup>-4</sup> mm/min정도인데 풍동 노출시 승화되는 양은 0.1-0.2mm이므로 이것은 실험동안 승화한 양에 3%정도이다. LVDT센서의 분해기능은 4.0 × 10<sup>-4</sup> mm이고 실제 실험하는 동안 나프탈렌 승화량은 0.10-0.20mm정도 이므로 커다란 무리없이 정확하게 측정할 수 있었다.

### 3.3 데이터 처리

Fick's의 확산 법칙에 따라 표면에서 나프탈렌의 대류 물질전달률  $m''$ 은 물질 전달 계수  $h_m$ 과 표면에서의 나프탈렌 승화밀도  $\rho_{v,w}$ 로 나타낼 수 있다.

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

여기서  $\rho_{\infty}$ 는 경계층 밖의 나프탈렌 농도로서 무시할 수 있다. 또한 일정 시간 유동장내에 노출한 후 나프탈렌 원봉표면에서의 승화량은 나프탈렌의 밀도  $\rho_s$ 와 함께 나프탈렌의 대류 물질 전달률을 구할 수 있다.

$$m'' = \rho_s \Delta t / \Delta r \quad (2)$$

식 (1)과 (2)에서 국부 대류 물질 전달 계수는

$$h_m = (\rho_s \Delta t / \Delta r) / \rho_{v,w} \quad (3)$$

이 된다. 나프탈렌 표면에서의 승화 밀도  $\rho_{v,w}$ 는 이상 유체로 가정한다.

$$\rho_{v,w} = P_v / RT$$

$$P_v = \exp(31.49 - 8673/T) \quad (4)$$

여기서  $P_v$ (나프탈렌의 승화압력)는 온도의 함수이며 식(4)는 실험식이다.  $T$ 는 나프탈렌 표면 가까이에서의 절대온도로서 열전대로 평균하여 구하며  $R$ 은 이상 기체 상수이다. 결국 물질전달의 무차원 수인 Sherwood수( $Sh$ )는 대류물질 전달계수와 나프탈렌의 공기에서의 물질확산계수 ( $D_f$ )에 의해

$$Sh = h_m d / D_f \quad (5)$$

의 관계식이 된다.

3.4 오차 해석

본 실험을 수행하는데 있어서 발생할 수 있는 오차는 크게 실험장치의 한계성에 의한 오차, 물질상수의 불확실성에서 오는 오차, 자연대류에 의한 나프탈렌 주조물의 자연승화량, 나프탈렌 주조시 나프탈렌 주조물 표면의 정밀도에 따른 오차로 나누어질 수 있다.

국부 물질전달계수는 앞에서 정의된 식 (3), (4)에 의해서

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

$$\rho_{v,w} = P_v / RT$$

로 쓸 수 있다. 이 식에서 보면 측정된  $h_m$ 에 대한 평균오차는

$$\frac{\delta h_m}{h_m} = \frac{\delta \rho_s}{\rho_s} + \frac{\delta R}{R} + \frac{\delta(\Delta \tau)}{\Delta \tau} + \frac{\delta(\Delta t)}{\Delta t} + \frac{\delta T}{T} + \frac{\delta P_v}{P_v}$$

(1) (2) (3) (4) (5) (6)

로 표현된다. 여기서 물질상수들의 변화는 다른 항들에 비해 작은 양이기 때문에 (1)(2) 항은 무시하기로 한다. (3)항은 약 10sec이고 최소 측정시간은 40minutes이므로 0.42%이다. (4)항은 변위 측정 센서의 캘리브레이션 곡선으로부터 구한 변위의 최대오차의 평균은  $5.0 \times 10^{-3} \text{mm}$ 이고 최소 승화량에 대해서 5% 정도이다. (5)항은 최대 온도변화가 0.08°C이었기 때문에 0.4%이고 (6)항은 Ambrose Lawrenson과 Sprake<sup>(22)</sup>의 나프탈렌 증기압과 온도에 관한 실험식을 이용하였는데 이들의 실험식은 2% 정도의 오차를 함유하고 있다. (5)항의 0.08°C 온도변화에 따라서 2.4% 정도이다. 그러므로 국부

대류 물질전달계수 측정에 따른 전체 평균오차는  $0.42+5+0.4+2.4=8.22\%$ 이다. 여기에 측정장치와 자연 승화량에 따른 오차를 합하면 본 실험에서 측정된 모든 데이터는  $8.22+0.50+3.00=11.72\%$ 의 불확실성을 포함하고 있다고 할 수 있다. 그러나 실제 측정된 데이터는 위의 계산된 오차보다 작은 5% 이내라 생각된다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 환상핀이 없는 원봉주위의 물질전달

균일 직교흐름에 놓여 있는 환상핀이 없는 원봉주위의 대류 물질전달과정은 이미 문헌에 잘 알려져 있다. 원봉표면에서의 박리현상은 역압력구배에 의해 발생하게 되는데 이런 박리점은 여러가지 매개변수들(난류강도, 레이놀즈수, blockage factor 등)에 의해 변하고 박리 이후의 유동은 매우 복잡하게 된다. 이러한 경우 즉 핀의 영향을 받지 않는 원봉의 2차원 직교흐름에 대한 대류 물질전달분포는 Fig. 6에 점선으로 잘 나타나 있다. 이 경우 레이놀즈수는 대략 66,000이다.

원봉주위의  $Sh$ 수 분포를 살펴보면 정체점에서  $Sh$ 수가 크고 경계층 두께의 증가로 인하여  $\theta$ 가 증가함에 따라 감소한다. 이후 박리점에서의 경계층 두께의 급격한 증가로 인하여  $Sh$ 수는 최소로 된다. 그리고 박리된 후에 원봉 표면에서는 압력구배와 속도구배에 의한 역방향의 2차유동의 생성과 후류의 와류발산(vortex shedding)과 재순환 유동에 의한 활발한 혼합에 의해서 다시  $\theta=180^\circ$ 까지 증가하게 된다. 이영역은 주유동 난류강도의 영향보다

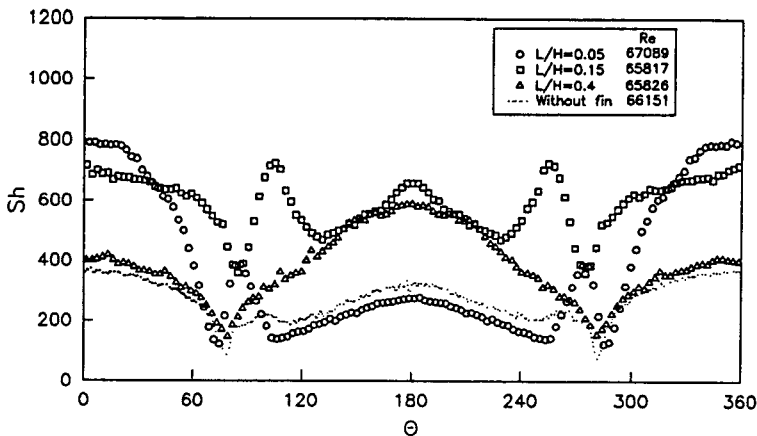


Fig. 6 Circumferential variations of  $Sh$  with  $L/H$  at center between annular fins

는 와류의 영향이 큰 영역이라 할 수 있다. 만약 정상적인 와류가 성장하지 못할 경우  $Sh$ 가 감소하게 된다. 층류에서 난류로의 천이영역 즉 층류 경계층의 박리점은 난류강도의 증가에 따라서 약간 앞 정체점쪽으로 이동하는 경향을 보이고 난류유동일 경우 물질 전달계수분포 곡선에서 2개의 최소점이 나타나는데 나중의 최소점은 바로 난류 박리기포가 형성되기 때문이다. 대체로 균일 유동장에 대해 상하 대칭의 형태를 보이고 있으며 본 실험의 정확도를 예측할 수 있다.

4.2 물질전달에 대한 양핀의 영향

환상형 핀이 부착된 원봉주위의 물질전달률에 대한 영향을 고찰하기 위해 우선 환상핀의 크기( $H$ )와 환상핀간의 간격( $L$ )에 의한 형상비( $L/H$ )를 변화시켰다( $L/H=0.05\sim 0.4$ ). 레이놀즈 수( $Re_d$ )는 대략 66,000으로 선택하였고 핀의 간격 변화시에 접근 유동의 속도를 거의 비슷하게 선택했기 때문에 핀의 선단으로부터 발달된 경계층의 두께( $\delta$ )는 거의 변화가 없다고 볼 수 있다. 즉 환상핀의 간격을 변화시켜 가면서 양쪽 핀의 끝 벽면효과에 의한 핀사이의 원봉표면에서 물질전달계수를 측정하였다.

Fig. 6은 환상핀 간격을 변화시킴에 따라 양쪽 환상핀의 중앙(center)에서 원봉의 원주방향에 따른 원봉주위의 국부 물질전달률( $Sh$ )을 나타낸 것이다. 처음 핀간격이 상당히 큰 경우( $L/H=0.4$ ) 정체점에서 박리점(최초  $Sh$ 수의 최소점)까지는 환상핀이 없는 경우와 별로 차이가 없으나 박리점 이후부터는 앞정체점에서 발생한 와류의 3차원적 영향에 의한 물질전달이 활발함을 보여주고 있다. 특히 후류영역에서는 앞의 정체점보다도 훨씬 물질전달률이 많다. 반면  $L/H$ 가 어느 값 이하가 되면( $L/H=0.15$ ) 앞 정체점 가까이에서 갑자기 물질전달이 많이 이루어짐을 발견할 수 있다. 또한 이 영역에서는  $Sh$ 수의 분포에서 2개의 최소점이 나타남을 알 수 있는데 이는 양쪽 핀에 의해 유동의 박리점을 후류방향쪽으로 가게하며 와류현상에 의해 급격한 물질전달이 이루어짐을 보여 준다. 환상핀의 양끝에서 발생한 경계층이 원봉표면 가까이에서 합쳐지게되면 경계층바깥 비점성 영역의 평균유동속도가 연속법칙에 의해 증가하게 되어 앞 정체점 부근에서 물질전달이 활발하게 된다. 또한 증가된 역압력구배로 인하여 양핀의 중앙에서 층류경계층

과 난류경계층이 공존하는 현상으로 2개의 박리점( $85^\circ$ 와  $130^\circ$ 부근)이 발생되게 된다. 그러나  $L/H$ 가 아주 작아지면, 즉 핀간격이 점차 줄어들면( $L/H=0.05$ ) 앞정체점에서의 물질전달이 많이 이루어지는 대신 양쪽 경계층의 완전 병합으로 원봉주위까지 물질전달이 잘 안되며 후류의 발달이 거의 없어지게 되어 전체적으로 작은 물질전달률을 보여준다. 유동의 박리점도 상당히 앞으로 당겨짐을 알 수 있다.

Fig. 7에서는 환상핀 사이의 중앙에서 원주방향 평균 즉 단위 원주길이 당 평균값( $\overline{Sh}$ 수)을 형상비에 따라 나타낸 것으로서 이 그림에서 보면  $L/H$ 가 0.15 근처에서 가장 물질전달이 많이 이루어지고 있음을 알 수 있다(핀이 없는 경우보다 약2배정도 큰 값을 보임). 이는 실제 열교환기의 환상핀 설계에서 핀의 간격을 설정함에 있어 중요한 최적 설계치임을 예측할 수 있다.

환상핀으로부터 원봉축을 따라서 일정한 위치에서 원주방향 국부물질전달률에 대해서는 Fig. 8에 나타나있다. 여기서 선정한 위치들( $y/d=0.01, 0.03$ )은 구석와류들에 의해 커다란 국부 물질전달률을 보이는 위치들이다. Fig. 1에서 보면 양쪽 끝 벽면효과에 의해 벽면가까이의 여러가지 구석와류들( $V2, V3$ )이 발생하는 것을 볼 수 있는데 특히  $y/d=0.01$ 에서는  $V2$ 가 벽면가까이에서 소용돌이(*swirling*)치는 것을 발견할 수 있는데 이는 Fig. 8에서  $Sh$ 수가 커졌다 작아졌다하는 즉 물질전달이 각도에 따라 심하게 진동함을 볼 수 있다. 특히 정체점 가까이에서 큰 진폭으로 진동하는 것을 발견할 수 있으며  $L/H=0.4$ 일때 가장 큰 물질전달률을 나타낸다.  $L/H=0.15$ 일때는 정체점 뿐만아니라 후류에서까지 계속 진동하나 간격이 작아지면( $L/H=0.05$ )이 효과는 감쇠된다. 반면 핀으로부터 어느정도 떨어진 위치 즉  $y/d=0.03$ 에서는 진

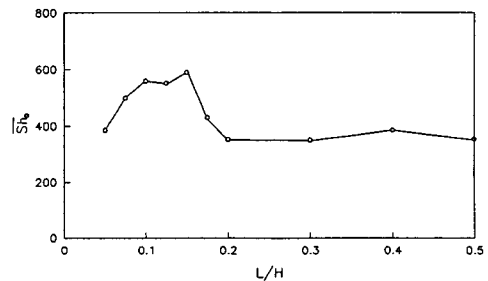


Fig. 7 Distribution of average  $Sh$  with  $L/H$  at center between annular fins



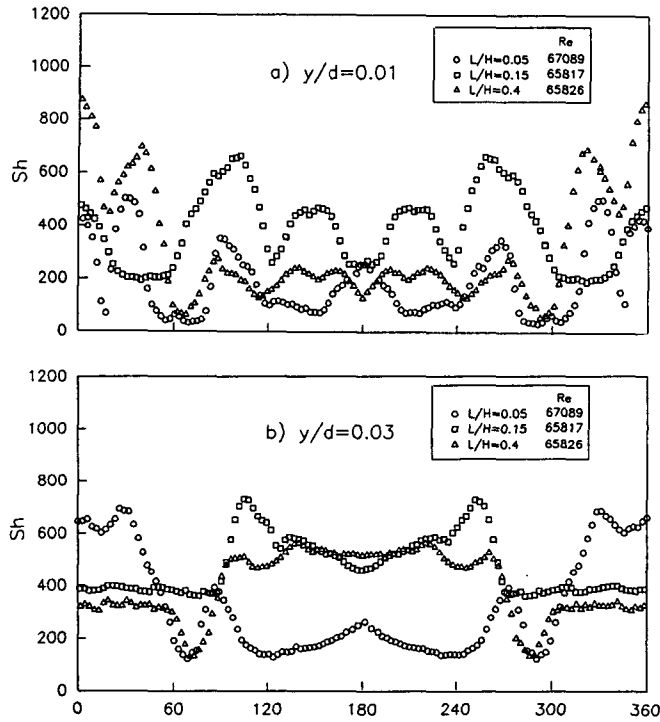


Fig. 8 Circumferential variations of  $Sh$  near the corner ( $y/d=0.01, 0.03$ ) between annular fins

동하는 모습을 상당히 감쇠되고 또한  $L/H=0.15, 0.4$ 에서는 양쪽핀에 의한 구석와류의 영향이 감소하며 후류의 성장이 점차 커짐을 알 수 있다. 이것은 핀의 간격을 변화시켰기 때문에 유동구조나 와류의 크기가 변하게 됨을 의미한다.

핀 근처에서 형성된 와류들이 원봉의 물질전달에 미치는 영향을 주어진 각도들에서 핀의 벽면에서 원봉축을 따라 Fig. 9(a)~(f)에 나타내었다. 그림에서 보면 아주 벽면 가까이에서  $V2$ 의 영향에 의한 첫번째 최대점이 나타나고( $L/H=0.4, \theta=0$ 에서  $y/L=0.0125$ 임) 첫번째 보다는 작지만  $V3$ 에 의한 최대점이 나타남을 알 수 있다. 그리고 앞 정체점에서 원봉을 따라 갈수록( $\theta$ 가 증가할수록)  $V3$ 에 의한 최대점은 핀으로 부터 중앙으로 밀려남을 알 수 있다.  $V2$ 에 의한 물질전달률은 원주방향의 각도가 증가 할수록 감소하고 반면  $V3$ 의 영향은 증가하나 박리점 이후( $90^\circ$  이후) 부터는  $V2$ 에 의한 최대점만 존재한다. 다음 핀 간격이 줄어들면( $L/H=0.15$ )  $V2$ 에 의한 물질전달률이 앞 정체점에서 존재하나 양핀의 중앙으로 갈수록 점차 증가함을 알 수 있다. 이것은 환상핀의 선단으로부터 경계층

이 충분히 발달하지 않았고 핀근처에서 작은 구석와류들이 충분한 크기로 성장하기 위한 원봉 길이 방향 압력구배가 충분히 크지 않기 때문에 물질전달률은 크지 않고 반면 접근유동과 큰 와류( $V1$ )에 의해서 후류에서 물질전달이 점차 증가하기 때문이다. 그리고 핀의 간격이 아주 좁은  $L/H=0.05$ 일 경우 각도가 증가 할수록 물질전달률이 감소하였는데 박리가 빨리 발생하고 앞 정체점에서 발생한 와류가 양쪽 환상핀의 구속을 받아 후류에서 혼합이 활발하게 발생되지 못하기 때문이다. 그리고 양핀의 선단으로부터 발달한 경계층이 중첩되기 때문에  $V1$ 만 형성되고 양핀의 중앙에서 속도가 제일 크기 때문에 중앙에서 물질전달이 많음을 나타내고 있다. 전체적으로 환상핀이 없는 단일 원봉보다는 커다란 물질전달률을 보였고 앞서 언급한대로  $L/H=0.15$ 일때가  $L/H=0.4$ 보다 큰 물질전달률을 나타냄을 알 수 있다. 또한 정체점으로 부터 각도가 증가할수록  $V2$ 와  $V3$ 에 의한 최대점이 점차 사라지며 이는 기하학적 형상에 의해서 정체점으로 부터 형성된 와류가 원봉 주위를 따라서 3차원적 소용돌이 운동을 하게 되는데 접근유동과 압력구배

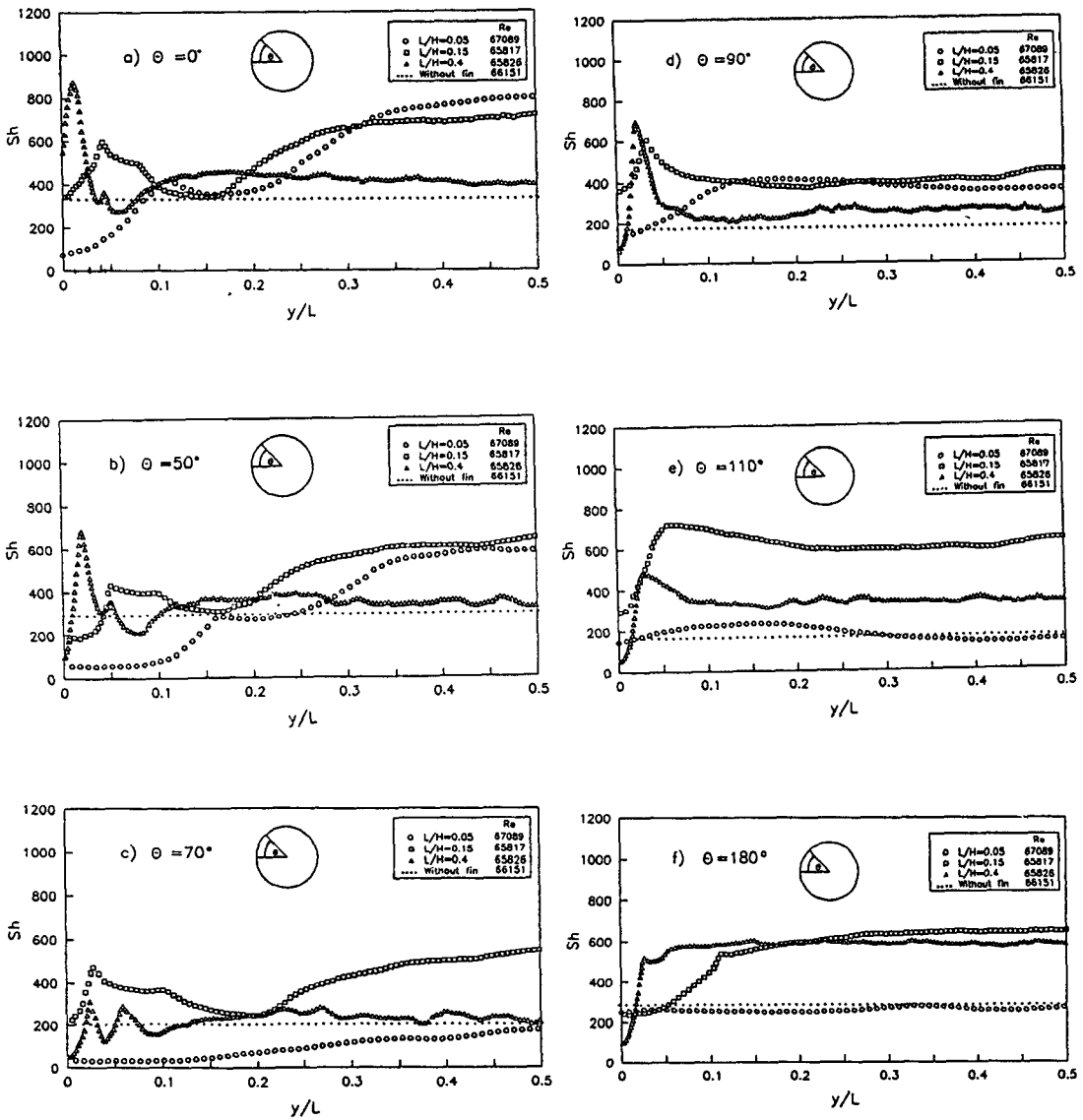


Fig. 9 Variation of  $Sh$  along the cylinder surface

에 의해서 이런 와류들이 원봉표면으로 부터 박리하게 되고 소멸되기 때문이다.

Fig. 10은 핀간격에 따른 양쪽 핀 중앙에서의  $Sh$  수가 최소가 되는 각도(Fig. 6)와 Fig. 9에서 구석 와류인 V3에 의한 물질전달계수의 최대점이 사라지는 각도를 나타낸것이다. 그림에서 보면  $L/H = 0.15$ 이후 부터 두각도의 크기가 같이 떨어짐을 알 수 있는데 핀의 간격이 커질수록 양편의 중앙에서  $Sh$  수가 최소로 되는 각도가  $80^\circ$ 로 접근해 감을 알

수 있다. 그리고  $0.075 < L/H < 0.15$ 에서는  $Sh$ 의 최소각도가  $92^\circ$ 이다.

Fig. 11에서는 원봉표면에 대한  $Sh$ 수 분포를 3차원적으로 그려져있다. 이 그림을 보면 전체적인 경향을 예측할 수 있는데 핀의 간격에 관계없이 핀 벽면에서 진동하는 모습을 알 수 있는데 이것은 원봉주위의 와류가 3차원적 거동을 하기 때문에 정상적인 경계층이 발달할 수 없는데 기인한다. 핀의 간격이 넓어 질수록 핀사이 중앙의 물질전달률에

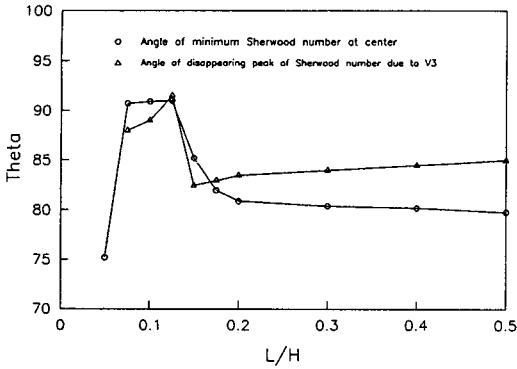


Fig. 10 Angle of minimum  $Sh$  at center and angle of disappearing peak of  $Sh$  due to  $V3$  with different  $L/H$

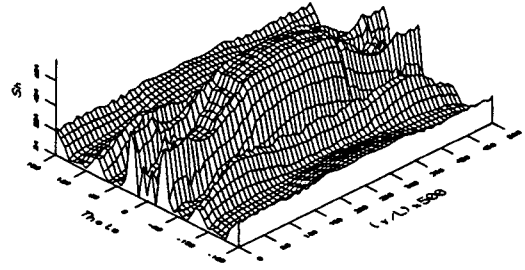
미치는 영향이 작아짐을 볼 수 있다. Fig. 12의  $Sh$  수의 등고선 그림에서도 중앙의 등고선이 핀간격이 넓어질수록 원형에서 타원 사각형으로 되는데 위의 결과를 보여주는 것이다. 국부적으로는 물질전달이 잘되는 부분이 임의의 형상을 가진 떠를 형성함을 볼 수 있고 각도에 따른 와류의 진전과정을 물질전달률 분포로 예측할 수 있다.

원주 방향의  $Sh$  수의 평균값을 원봉축을 따라 Fig. 13에 나타내고 있다. 여기서 원주방향 평균값은

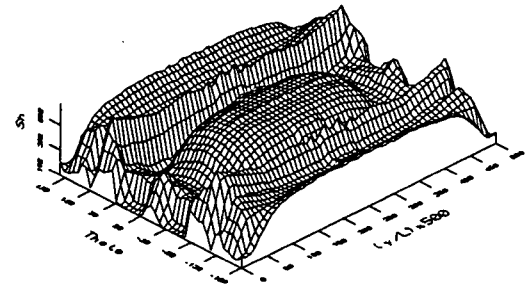
$$\overline{Sh}_\theta = \frac{1}{360} \sum_{j=1}^n Sh_j \Delta\theta_j \quad (7)$$

로 정의되어 계산되었으며 서로 다른 핀간격에 대해 구한 것이다. 그림에서 보면 핀에 인접한 부분을 제외하고는  $\overline{Sh}_\theta$  수 크기가 크게 두부분으로 나누어 짐을 알 수 있다. 그리고 간격이 클 경우에  $y/L=0.0125$  (즉,  $y/d=0.01$ )에서 첫번째 최대점 ( $V2$ )이 나타났다. 그러나 간격이 좁아질 경우  $V3$ 에 의한  $\overline{Sh}_\theta$  수에는 거의 영향이 없음을 알 수 있다. 결과적으로 물질전달률은  $L/H=0.05$ 일 때  $V1$ 에 의한 영향이 지배적이고  $L/H=0.15$ 일 때는  $V1, V2$ 의 영향이 지배적이라고 할 수 있으며  $L/H=0.4$ 일 경우는  $V1, V2, V3$  모두의 영향을 받는다. 그렇지만 양핀 사이의 전 표면적에 대해서 와류가 물질전달률에 영향을 주는 면적비는 간격이 넓어질수록 작아지기 때문에 단위면적당 물질전달률은 작아지고 간격이 더욱 더 커지면 단일 원봉과 같아지게 된다. 그리고  $V3$ 에 의한 물질전달률은  $V2$ 에 비해 작음을 알 수 있다.

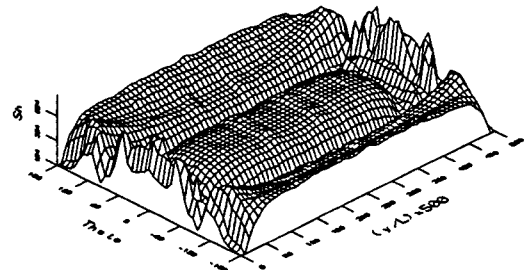
Fig. 14는 원봉 전 표면에서 구한 국부  $Sh$  수를



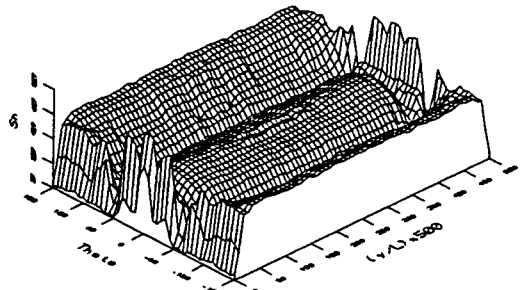
(a)  $L/H=0.05$



(b)  $L/H=0.15$



(c)  $L/H=0.2$



(d)  $L/H=0.4$

Fig. 11 Surface plots of local  $Sh$  distribution with  $L/H$  between annular fins

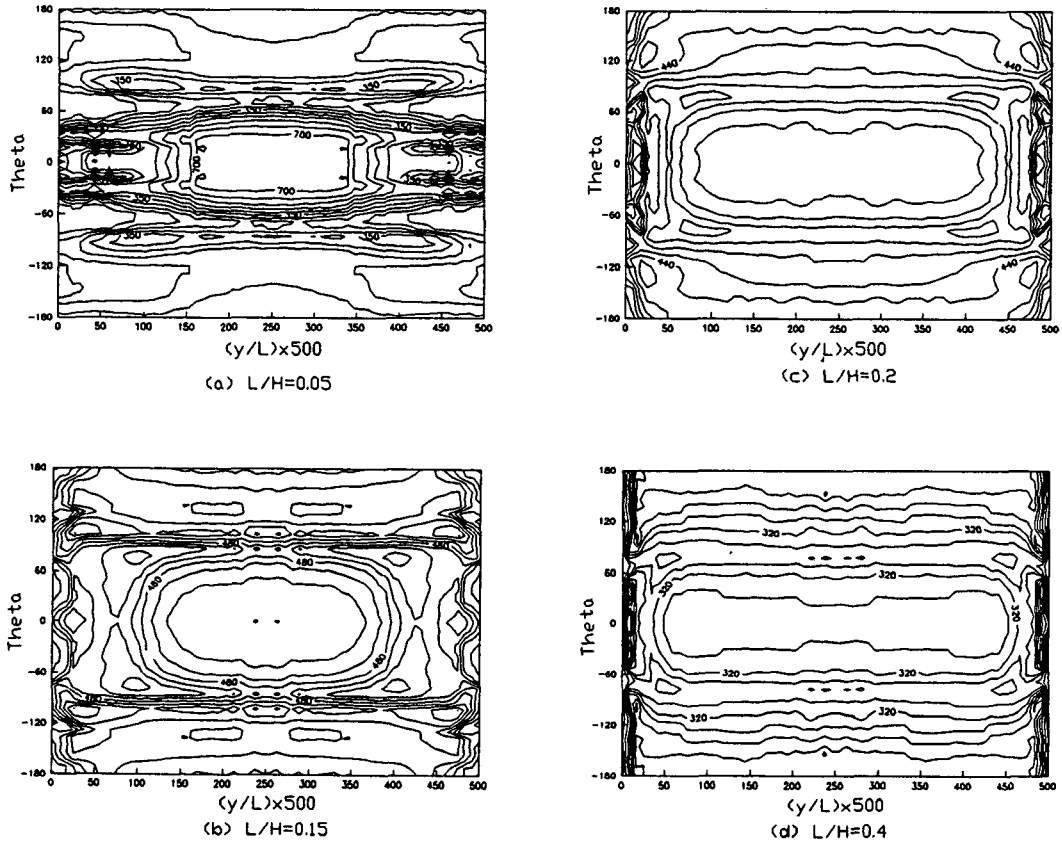


Fig. 12 Contour plots of  $Sh$  with  $L/H$  between annular fin

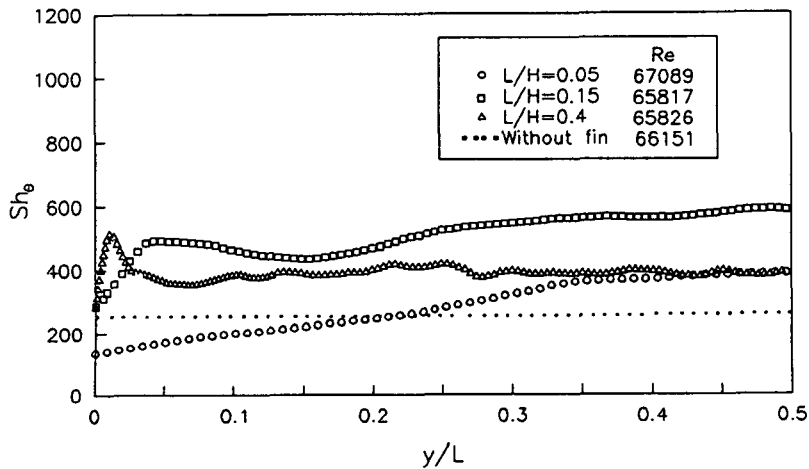


Fig. 13 Circumferential average  $Sh$  with different  $L/H$

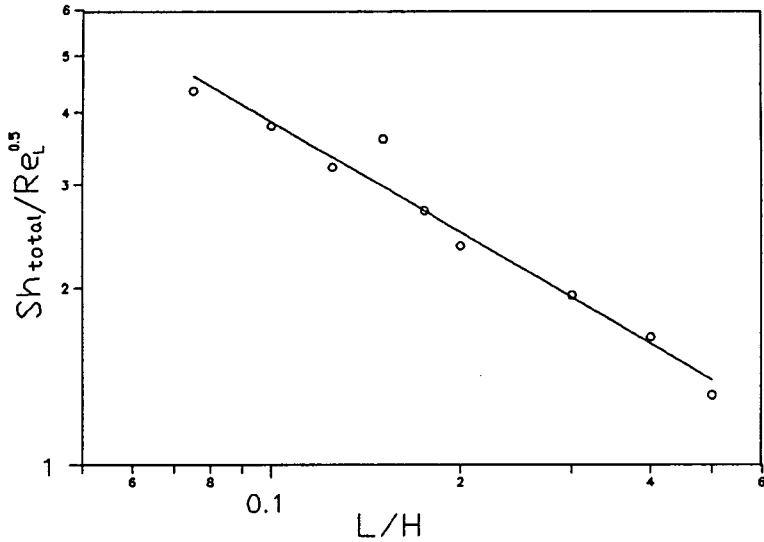


Fig. 14 Total mass transfer rate with different  $L/H$

환상핀 사이의 간격에 따라서 적분한 결과를  $Sh$ 수와  $Re_L$ 수등 무차원수의 관계식으로 그린 그림이다.

$$\overline{Sh}_{total} = \frac{1}{A} \int_A Sh(y, \theta) dA \quad (8)$$

여기서  $A$ 는 양핀 사이의 원봉 표면적이다. 즉 양핀의 중앙에서는 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$\overline{Sh}_0 = C_1 Re_L^{0.6} \left[ \frac{L}{H} \right]^{-0.86} \quad (9)$$

여기서  $C_1 = 0.254$ 이다. 그리고 전 표면에 대해서 식을 구하면 다음과 같다.

$$\overline{Sh}_{total} = C_2 Re_L^{0.5} \left[ \frac{L}{H} \right]^{-0.631} \quad (10)$$

여기서  $C_2 = 0.901$ 이다. 이것은 환상 핀을 가진 원봉에서의 대류 물질 전달 현상을  $Re_L$ 과  $L/H$ 로 설명할 수 있는 관계식이다. 위와같은 평균 물질전달량은 7.87%의 평균오차를 함유하고 있고 측정된 모든 국부 물질전달계수는 평균값에 대하여 3%이내에서 변화했다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 환상핀의 간격을 변화시켜 가면서 원봉 표면에서의 국부물질 전달 계수를 나프탈렌

승화법을 이용하여 측정하였다. 정밀한 자동이송 정밀 변이 측정장치를 이용하여 원봉주위의 물질전달량을 측정하였으며 이 결과로부터 끝 벽면 가까이에서의 구석와류 구조 해석이 가능하였다.

양쪽 환상핀 중앙인 원봉주위의 원주방향 물질전달계수 분포를 보면  $L/H = 0.15$  근처일때 최대의 물질전달을 보여 설계 최적치를 예측하였다.  $L/H = 0.15$ 보다 작을 경우 원주방향 분포에서 두 개의 최소점이 형성 되었고 환상 핀간격 변화시 그 크기가 변하였다. 물질전달계수가 최소로 나타나는 각도는  $L/H = 0.175$ 보다 작을 경우는  $92^\circ$  근처와  $130^\circ$  근처에서 나타났고 간격이 클 경우는 2차원 박리각도인  $80^\circ$ 로 접근해갔다. 이런 원주방향 분포를 고려하여 보면  $L/H = 0.4$  이후로는 단일 원봉의 물질전달과 비슷한 경향을 나타냈다.

원봉 길이방향 분포에서 원봉과 환상핀이 만나는 부분에서 작지만 질량 전달에 매우 강한 영향을 주는 2개의 구석와류( $V2$ ,  $V3$ )가 존재하였다. 환상핀의 간격이 아주 작을 때는  $V1$ ,  $V2$ 만 존재하였다. 이들이 물질전달에 미치는 영향은 환상핀 간격이 커질수록 심했다. 즉  $V2$ 에 의한 정점은  $L/H = 0.04$ 일때가 가장 크고  $L/H = 0.05$ 일때가 가장 작았다. 그러나 원봉 길이방향에 영향을 주는 정도는 핀 간격이 커질수록 핀 간격에 대한 상대적인 크기는 감소하였다. 즉 핀간격이 아주 좁을 때는

$V1$ ,  $L/H=0.15$  근처에서는  $V1$ ,  $V2$ 에 커다란 영향을 받았다. 그리고 간격이 아주 클 때는  $V1$ ,  $V2$ ,  $V3$  모두의 영향을 받지만 평균 물질전달에는 커다란 영향을 미치지 못하였다.

원주방향 평균 물질전달률이나 양쪽 환상핀사이의 원봉 전표면에 대한 평균 물질전달률은 핀간격 레이놀즈수  $Re_L$ 과  $L/H$ 로 관계지을 수 있었다. 그리고  $L/H=0.15$ 인 경우 물질전달률은 핀이 부착 안된 경우보다 2배의 큰 물질전달을 나타냈다. 또한 환상핀의 영향으로 핀간격이 상당히 떨어진  $L/H=0.4$  일때에도 물질전달률을 40% 정도 증진시키는 효과가 있었다.

### 참고문헌

- (1) Hussain A.K.M.F., 1986, "Coherent Structures and Turbulence," J. Fluid Mech., Vol.173, pp.303~356.
- (2) Achenbach, E., 1975, "Total and Local Heat Transfer from a Smooth Circular Cylinder in Cross Flow at High Reynolds Number," Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol.18, pp. 1387~1396.
- (3) Kestin, J. and Wood, R.T., 1971, "The Influence of Turbulence on Mass Transfer from Cylinder," ASME, J. Heat Transfer, pp.321~327.
- (4) Sung, H.J., Lyu, M.S. and Chung, M.K., 1991, "Experimental Study on Local Convective Mass Transfer From a Circular Cylinder in Uniform Shear Flow," Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol.34, No.1, pp.59~68.
- (5) Suter, S.P., 1965, "Vorticity Amplification in Stagnation Point Flow and its Effect on Heat Transfer," J. Fluid Mech. , Vol.21, No.3, pp.513~534.
- (6) West, G.S. and Apelt, C.J., 1982, "The Effect of Tunnel Blockage and Aspect Ratio on the Mean Flow Past a Circular Cylinder with Reynolds Numbers between  $10^8$  and  $10^5$ ," J. Fluid Mech., Vol.114, pp.361~377.
- (7) Hunt, J.C.R., Abell, C.J., Peterka, J.A. and Woo, H., 1978, "Kinematical Studies of the Flows around Free or Surface-Mounted Obstacles ; Applying Topology to Flow Visualization," J. Fluid Mech., Vol.86, part 1, pp. 179~200.
- (8) Baker, C.T., 1979, "The Laminar Horseshoe Vortex", J. Fluid Mech., Vol.95, part 2, pp.347~367
- (9) Langston, L.S., Nice, M.L. and Hooper, R.M., 1977, "Three-Dimensional Flow Within a Turbine Cascade Passage," ASME, J. Eng. for Power, pp.21~28.
- (10) Graziani, R.A., Blair, M.F., Taylor, J.R. and Mayle, R.E., 1980, "An Experimental Study of Endwall and Airfoil Surface Heat Transfer in a Large Scale Turbine Blade Cascade," ASME, J. Eng. for Power, Vol.102, p.257~267.
- (11) Eibeck, P.A. and Eaton, J.K., 1987, "Heat Transfer Effects of a Longitudinal Vortex Embedded in a Turbulent Boundary Layer," ASME, J. Heat Transfer, Vol.109, pp.16~24.
- (12) Saboya, F.E.M. and Sparrow, E.M., 1974, "Local and Average Transfer Coefficients for One-Row Plate Fin and Tube Heat Exchanger Configuration," ASME, J. Heat Transfer, pp.265~272.
- (13) Ireland, P.T. and Jones, T.V., 1986, "Detailed Measurements of Heat Transfer on and around a Pedestal in Fully Developed Passage Flow," Proceeding of 8th International Heat Transfer Conference San Francisco, CA, U.S.A., pp. 975~980.
- (14) Goldstein, R.J., Chyu, M.K. and Hain, R.C., 1985, "Measurement of Local Mass Transfer on a Surface in the Region of the Base of a Protruding Cylinder with a Computer-controlled Data Acquisition System," Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol.28, No.5, pp.977~985.
- (15) Fisher, E.M. and Eibeck, P.A., 1990, "The Influence of a Horseshoe Vortex on Local Convective Heat Transfer," ASME, J. Heat Transfer, Vol.112, pp.329~335.
- (16) Goldstein, R.J. and Karni, J., 1984, "The Effect of a Wall Boundary Layer on local Mass Transfer from a Cylinder in Crossflow," ASME, J. Heat Transfer, Vol. 106, pp. 260~270.
- (17) Van Dreasar, N. and Mayle, R.E., 1986, "Convection at the Base of a Cylinder with Horseshoe Vortex," Proceedings of 8th International Heat

- Transfer Conference San Francisco, CA, U.S.A, pp.1121~1126.
- (18) Goldstein, R.J. and Karni, J. and Zhu, Y., 1990, "Effect of Boundary Conditions on Mass Transfer near the Base of a Cylinder in Crossflow," ASME, J. Heat Transfer, Vol. 112, pp.501~504.
- (19) Eckerle, W.A. and Langston, L.S., 1987, "Horseshoe Vortex Formation around a Cylinder," ASME, J. Turbomachinery, Vol.109, pp.278~285.
- (20) Pierce, F.J. and Harsh, M.D., 1988, "The Mean Flow Structure around and within a Turbulent Junction or Horseshoe Vortex-part II. The Separated and Junction Vortex Flow," ASME, J. Fluids Eng., Vol.110, pp. 415~423.
- (21) Pierce, F.J. and Tree, I.K., 1990, "The Mean Flow Structure on the Symmetry Plane of a Turbulent Junction Vortex," ASME, J. Fluids Eng., Vol.112, pp.16~22.
- (22) Ambrose, D. and Lawrenson, L.J. and Sprake, C.H.S., 1975, "The Vapor Pressure of Naphthalene," J. Chemical Thermodynamcis, 7, pp. 1173~1176.