

# 트리핑 와이어를 사용한 평판에서의 국소물질전달 특성에 관한 실험적 연구

유성연\* · 조웅선\*† · 조우식\*\*

\* 충남대학교 기계설계공학과, \*\* LG화학

## Experimental Study on Local Mass Transfer Characteristics of Flat Plate Using Tripping Wire

Seong-Yeon Yoo\*, Woong-Sun Cho\*† and Woo-Sik Jo\*\*

\* Dept. of Mechanical Design Engineering, Chungnam Nat'l Univ.

\*\* LG Chemical Co.

(Received July 10, 2012 ; Revised November 20, 2012 ; Accepted November 25, 2012)

**Key Words:** Flat Plate(평판), Tripping Wire(트리핑 와이어), Mass Transfer(물질전달), Heat Transfer(열전달), Naphthalene Sublimation Technique(나프탈렌승화법)

**초록:** 본 연구의 목적은 평판의 선단에 설치된 트리핑 와이어에 의한 경계층 박리가 층류에서 난류로의 천이에 미치는 영향과 그 결과로 발생하는 물질전달에 미치는 영향을 규명하는 것이다. 나프탈렌승화법을 사용하여 평판에서의 국소물질전달계수를 측정하였으며, 유동 경계층의 효과를 평가하기 위해 발달된 유동과 발달하는 유동의 조건에서 트리핑 와이어가 설치된 평판에서의 국소물질전달계수를 설치되지 않은 평판에서의 값과 비교하였다. 발달하는 유동에서 국소물질전달계수가 변화하는 경향은 트리핑 와이어가 설치된 평판과 설치되지 않은 평판이 비슷하지만 발달된 유동에서는 상당히 다르게 나타났다. 평균 Sherwood 수는 경계층 박리로 인하여 트리핑와이어가 설치된 평판이 설치되지 않은 평판에 비해서 훨씬 높았다.

**Abstract:** The purpose of this research is to investigate how the boundary layer separation caused by a tripping wire installed in front of the flat plate affects the transition from laminar to turbulent flow, and consequently mass transfer. A naphthalene sublimation technique is used to measure the local mass transfer coefficients on the flat plate, and two boundary conditions for the developed and developing flow are considered to evaluate the effects of the flow boundary. The local mass transfer data for a flat plate with a tripping wire are compared with the data for a flat plate without a tripping wire. The variation trends of the local heat transfer coefficients for the plates with and without the tripping wire are similar to each other in the case of the developing flow, but are quite different for the developed flow. The average Sherwood number for the flat plate with a tripping wire is much higher than that without a tripping wire because of the boundary layer separation.

- 기호설명 -

$A$  : 물질전달 면적  
 $D_{iff}$  : 공기 중에서 나프탈렌의 물질확산계수  
 $h_m$  : 평균물질전달계수  
 $h_{m,x}$  : 국소물질전달계수  
 $L$  : 평판의 길이  
 $\dot{m}$  : 물질전달률

$P_v$  : 나프탈렌 증기압  
 $Re_L$  : Reynolds 수( $=U_\infty L/\nu$ )  
 $Sh_L$  : 평균 Sherwood 수( $=h_m L/D_{iff}$ )  
 $T$  : 공기의 온도  
 $U_\infty$  : 주유동 속도

그리스문자

$\alpha$  : 공기의 열확산계수  
 $\Delta t$  : 나프탈렌의 승화깊이  
 $\Delta \tau$  : 주유동장에서 노출시간  
 $\nu$  : 공기의 동점성계수

† Corresponding Author, [cho7934@naver.com](mailto:cho7934@naver.com)

- $\rho_s$  : 고체 나프탈렌의 밀도  
 $\rho_{v,w}$  : 시편 표면에서의 나프탈렌 증기밀도  
 $\rho_\infty$  : 주유동 영역에서의 나프탈렌 증기밀도

## 1. 서론

관형 열교환기는 다양한 형태와 크기로 제작되어 일상생활과 산업에 널리 사용되고 있다. 관형 열교환기는 다수의 관을 적층하여 구성되기 때문에 관에서의 열유동 현상에 대한 이해는 열교환기의 설계와 응용에 매우 중요하다. 그리고 에너지를 효율적으로 이용하기 위해서는 열교환기의 성능과 효율을 향상시키는 것이 중요하다. 그래서 오래전부터 열전달을 촉진시키는 방법에 대한 연구를 꾸준히 진행시켜 왔으며, 대표적으로 열전달 면적을 증가시키는 방법과 열전달 표면을 다양하게 가공하여 대류열전달계수를 증가시키는 방법 등이 있다. 이러한 방법들 중 일부는 생성된 경계층을 파괴하여 열저항을 감소시키고, 난류를 증가시켜 열전달을 촉진시키는 것이다.

평판 및 다양한 형상의 관에서의 경계층 특성과 열전달 특성을 규명하는 기존의 연구들은 매우 많지만 측정상의 어려움과 데이터의 미흡함으로 인하여 국소적인 현상이나 특성을 명확하게 규명하지 못하였다. 특히 트리핑 와이어가 설치된 평판에서 일어나는 열유동 현상은 박리, 재부착, 재순환 와류 등을 수반하여 매우 복잡하므로 기존의 열전달 측정방법으로는 국소열전달계수의 측정이 매우 어렵다. 이러한 어려움을 해결하기 위해서 본 연구에서는 나프탈렌승화법을 이용한 물질전달 측정기술로 트리핑 와이어가 설치된 평판에서 국소물질전달특성을 규명하였으며, 열전달과 물질전달의 유사성을 이용하여 기존의 층류 및 난류 경계층에서의 평균 열전달 관계식과 비교하였다.

국내의 연구동향을 살펴보면, 박종학과 유성연<sup>(1)</sup>은 발달하는 유동과 완전히 발달된 유동으로 분류된 평판에서 발생하는 열전달 특성을 분석하였다. Ramaprian 등<sup>(2)</sup>과 Andreopoulos & Bradshaw<sup>(3)</sup>는 대칭, 비대칭 후류의 구조에 대해 조사하기 위해 트리핑 와이어 및 조건부 추출기법(conditional sampling technique)을 사용하였으며, 레이놀즈 응력(Reynolds stress)을 비롯한 난류성분(turbulent

parameters)과 평균속도분포를 측정하여 비대칭 후류의 구조에 대해 설명하였다. 그들은 비대칭 후류에서 근접후류에서의 교란은 상류 경계층 내부흐름의 길이크기(length scale)와 속도크기(velocity scale)에 비례한다고 보고하였다. 김동하 등<sup>(4)</sup>은 경계층의 유동조건을 유발하기 위해 트리핑 와이어를 여러 위치에 부착하여 발생하는 근접후류가 상류경계층에 미치는 영향을 실험적으로 연구하였다. H. I. Abu-Mulaweh<sup>(5)</sup>는 층류에서 난류로의 유동 전환을 가속화하기 위해 평판에 4 mm 트리핑 와이어를 설치하여 실제적으로 트리핑 와이어에 의해 층류에서 난류로의 전환이 가속화되는 것을 밝히고 이에 발생한 난류에 의한 부력의 영향을 실험적으로 연구하였다.

본 연구에서는 평판에 트리핑 와이어를 설치하여 국소물질전달계수를 측정하고, 트리핑 와이어가 없는 경우와 비교하여 트리핑 와이어가 국소물질전달에 미치는 영향을 고찰하였다. 또한, 평균물질전달계수를 비교하여 트리핑 와이어에 의한 물질전달 촉진 정도를 분석하였다. 유속의 변화 및 유동의 형태가 물질전달에 미치는 영향을 알아보기 위해 속도경계층이 물질농도경계층이 형성되기 훨씬 이전에 만들어지는 발달된 유동(developed flow)과 속도경계층과 물질농도경계층이 동시에 발달하는 유동(developing flow)인 경우에 대해 유속을 2 m/s에서 20 m/s까지 변화시켜가면서 실험을 수행하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 실험장치

본 연구에서 사용된 실험장치들은 풍동, 자동이송 승화깊이 측정장치, 자료획득 및 처리장치, 실험시편 및 구조설비, 트리핑 와이어, 백금저항 온도계, 피토투브와 마이크로 마노미터 등이다. 풍동은 개방 흡입형으로, 시험부는 길이 1.4 m, 폭 400 mm, 높이 300 mm이며, 투명 아크릴로 제작되었다. 유속은 직류모터에 연결된 인버터에 의해 조절되고, 최대 유속은 약 25 m/s이며 주유동의 난류강도는 0.5% 미만이다. 실험장치의 한계 때문에 경계층에서의 유동특성은 측정하지 못하였다.

국소물질전달계수 측정을 위해 사용된 시스템은 x, y 두 개의 볼 스크류축으로 구성된 table로,

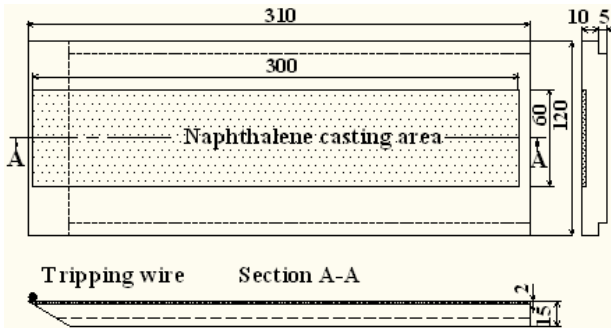


Fig. 1 Schematic of flat plate

각각 승화깊이 측정센서와 시편을 고정할 수 있으며, 각각의 축은 스텝모터에 의해 구동된다. x-y table의 최대이송가능거리는 450 mm × 400 mm이며, 이송분해능은 펄스당 0.72°이고, 이때의 이송거리는 0.01 mm이다. 승화깊이 측정을 위한 LVDT(Linear Variable Differential Transformer: Schaevitz Eng. LBB-e75-TA-100)는 센서 팁의 직선변위를 전기적인 전류신호로 변환하는 장치로 측정가능 범위는 ±0.1 inch이고, 측정분해능은 센서의 DAQ(Data Acquisition System)의 분해능으로 결정된다.

Signal Conditioner는 LVDT에서 나오는 전류신호를 전압신호로 변환하여 증폭하고 LVDT에 전원을 공급하여 주는 역할을 하며, 센서 팁의 변위가 0.01 inch에 대해 1 Volt의 신호를 발생하도록 교정하였다. Signal Conditioner에서 나온 증폭된 전압 신호(±10V 범위)는 다시 DAQ에 의해 그 값이 읽히지며, 이 DAQ는 본 실험에서 두 가지 기능을 수행한다. 하나는 Signal Conditioner로부터 들어오는 아날로그신호를 읽어 들여 디지털신호로 변환하는 A/D 변환 기능이고, 다른 하나는 시편과 센서를 이동하는데 사용되는 스텝모터를 제어하는 스텝모터 컨트롤 기능이다.

실험에 사용된 평판 시편은 Fig. 1과 같으며, 승화표면이 정밀한 평활도를 가지도록 나프탈렌 주조형틀을 제작하였다. 나프탈렌 주조면은 길이 300 mm, 폭 60 mm이고, 깊이 2 mm의 홈이 파여 있다. 유동박리를 막기 위해 평판의 선단을 30°의 경사로 예리하게 가공하였으나 평판의 두께 때문에 박리를 완전히 막을 수는 없었다. 나프탈렌 주조표면은 선단에서 3 mm 떨어져 있으며, 그 이격 구간에 트리핑 와이어를 설치하였다.

## 2.2 실험방법 및 후처리과정

시편 표면의 홈에 나프탈렌을 주조한 후 밀폐 용기에 넣어서 시편의 온도가 측정실 온도와 같아질 때까지 기다린다. 그 다음에 주조된 시편을 꺼내어 자동이송 승화깊이 측정장치로 나프탈렌의 표면 높이를 측정한다. 이때 유동 방향으로 5 mm, 유동과 직각방향으로 6.4 mm 간격으로 스텝모터를 움직여가면서 총 400여 개의 데이터를 얻는다. 높이 측정이 끝나면 시편의 선단에 트리핑 와이어를 설치한 후 풍동 내의 유동장에 90분 정도 노출시키며, 공기의 속도를 피토투브와 마노미터로 측정한다. 또한, 백금저항온도계로 일정 시간 간격으로 유동장의 온도를 측정한다. 유동 속도는 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 12, 15, 20 m/s에 대해 실험을 수행하였으며, 유동조건은 발달된 유동과 발달하는 유동 두 가지로 하였다. 풍동에서의 노출이 끝나면 시편의 선단에 설치된 트리핑 와이어를 제거한 후 노출시키기 전과 같은 방법으로 나프탈렌의 승화깊이를 측정한다.

1차 측정과 2차 측정사이의 깊이 변화( $\Delta t$ )로부터 승화율(물질전달률)  $\dot{m}$ 을 다음 식 (1)과 같이 계산한다.

$$\dot{m}/A = \rho_s \Delta t / \Delta \tau \quad (1)$$

여기서  $\rho_s$ 는 고체 나프탈렌 밀도,  $\Delta \tau$ 는 풍동에 노출된 시간이다. 국소물질전달실험은 풍동 안에서 노출 승화실험 전후의 나프탈렌 표면의 높이를 측정하는 데 42분, 시편을 측정 테이블과 풍동 안에 설치하는 시간을 합하면 약 18분이 소요되어 도합 60분 정도가 풍동 바깥의 공기에 노출된다. 승화깊이를 측정하는 동안에도 나프탈렌의 주조표면에서 자연대류에 의한 물질전달이 일어나기 때문에 식 (1)의 승화깊이는 자연대류에 의해 발생한 승화깊이를 뺀 값이다. 자연대류에 의한 승화깊이는 시편을 제작하여 측정실 내에서 일정시간 노출시킨 후 처음과 나중의 승화깊이를 측정하여 미리 구한다.

한편, 나프탈렌의 승화에 의한 물질전달률은 나프탈렌의 농도차에 비례하며 다음과 같이 계산된다.

$$\dot{m}/A = h_m (\rho_{v,w} - \rho_\infty) \quad (2)$$

여기서  $h_m$  은 국소물질전달계수이고,  $\rho_\infty$  은 경계층 밖의 자유유동 영역에서의 나프탈렌 농도로 본 실험에서는 무시하였다. 시편 표면에서의 나프탈렌 증기밀도  $\rho_{v,w}$  는 이상기체로 가정하여 다음 식 (3)으로부터 구하였다.

$$\rho_{v,w} = \frac{P_v}{RT} \quad (3)$$

식 (3)에서 T는 채널 내의 유동온도로서 실험 중에 백금저항온도계로 측정된 값을 평균한 것이다.  $P_v$  는 나프탈렌 증기압으로 Ambrose<sup>(6)</sup>의 실험식으로부터 구하였다.

국소물질전달계수는 식 (1)과 식 (2)으로부터 다음과 같이 구한다.

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

식 (4)로부터 구한 국소물질전달계수를 측정구간 전체 표면에 대해 평균하여 무차원 물질전달계수인 Sherwood 수로 표시하면 식 (5)와 같다.

$$Sh_L = \frac{h_m L}{D_{iff}} \quad (5)$$

여기서  $L$ 은 평판의 유동방향으로의 길이이며,  $D_{iff}$ 는 공기 중에서 나프탈렌의 물질확산계수로, Goldstein과 Cho<sup>(7)</sup>에 의해 제시된 상관식을 이용하였다.

본 실험에서 발생할 수 있는 오차는 계측장비의 정밀성에서 발생하는 오차, 나프탈렌의 물성에 의한 오차, 자연대류에 의한 나프탈렌승화량의 오차 등이 있다. 이들 중 나프탈렌의 물성에 의한 오차는 선행 연구자들의 결과를 인용하였으며, 계측장비의 정밀성에 관한 오차는 시험성적서와 교정실험을 통해서 도출하였다. 이들 오차를 종합하여 구한 물질전달계수와 Sherwood 수의 불확도는 각각 5.33%와 7.4%이다.

### 3. 실험결과 및 고찰

발달된 유동과 발달하는 유동 두 가지 조건을

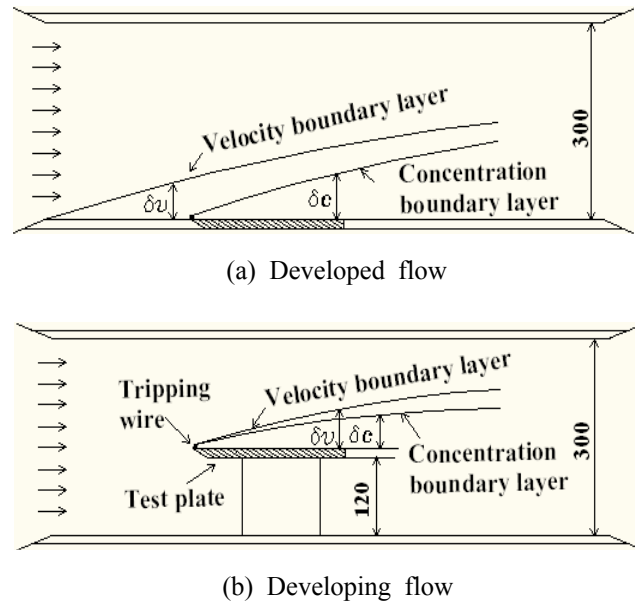
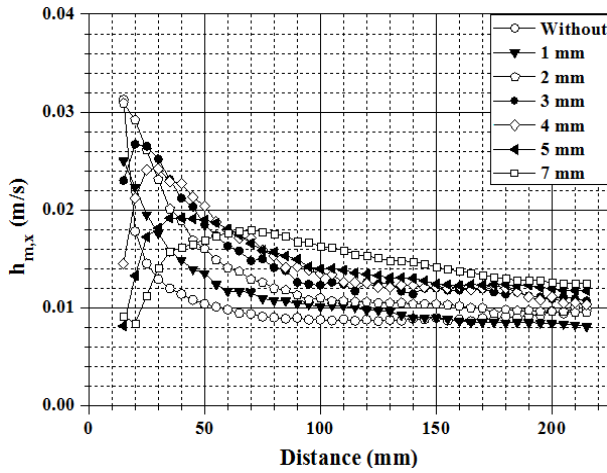


Fig. 2 Installation of test plate for two flow conditions in the wind tunnel

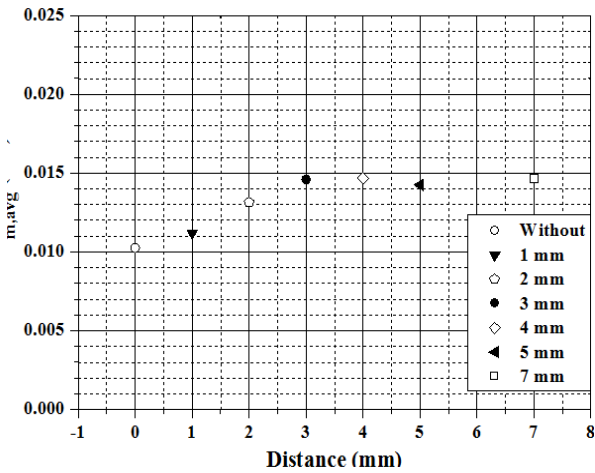
모사하기 위해 나프탈렌이 주조된 시편을 Fig. 2와 같이 설치하였다. Fig. 2(a)의 발달된 유동일 경우 시편을 풍동 시험부 시작점으로부터 490 mm 하류에 설치하였으며, 발달하는 유동의 경우는 Fig. 2(b)에 보인 바와 같이 풍동 중간 높이에 시편을 설치하였다. 발달된 유동은 시험편의 선단에 다다른 공기유동의 속도경계층이 이미 형성된 상태를 의미하고, 발달하는 유동은 시험편의 선단에서 속도경계층과 나프탈렌의 승화로 인한 물질농도경계층의 발달이 동시에 발생하는 것을 의미한다.

Fig. 3은 트리핑 와이어의 직경이 국소 및 평균 물질전달계수에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 풍동의 유동속도를 6 m/s로 고정하고, 트리핑 와이어의 직경을 1, 3, 4, 5, 7 mm로 변화시켜가면서 완전히 발달한 유동조건에서 실험을 수행하였다. 국소물질전달계수의 측정은 선단에서 15 mm 떨어진 부분에서 시작했으며, 하첨자  $x$ 는 실험평판의 선단으로부터 유동방향으로의 거리를 의미한다.

Fig. 3(a)에 나타낸 국소물질전달계수의 분포를 보면 트리핑 와이어가 없는 평판의 경우 선단으로부터 물질전달계수가 점차 감소하여 일정한 값에 도달하는 전형적인 경계층 유동에서의 변화를 보이고 있다. 이에 비해 트리핑 와이어가 설치된



(a) Local mass transfer coefficient



(b) Average mass transfer coefficient

Fig. 3 Effects of tripping wire diameters on local and average mass transfer coefficients

평판의 경우엔 트리핑 와이어에 의한 경계층 박리로 와이어 바로 뒤에서는 매우 낮은 물질전달 계수를 가지며, 이후 급격하게 증가하다가 최대점을 지나 다시 감소하는 경향을 보이고 있다. 최대값을 갖는 지점이 와이어에 의해 박리된 유동의 재부착점으로 여겨지며, 재부착점 이후는 경계층이 두꺼워지면서 물질전달계수가 감소한다. 트리핑 와이어의 직경이 두꺼워질수록 최대점은 후류로 이동하며 최대값의 크기는 감소하는 것을 알 수 있다. 직경이 1 mm인 트리핑 와이어가 설치된 경우는 재부착점이 나프탈렌 승화깊이 측정 시작점인  $x = 15 \text{ mm}$  이전에 존재하기 때문에 최대점이 그림에 나타나지 않았다.

Fig. 3(b)는 트리핑 와이어의 직경이 평균물질

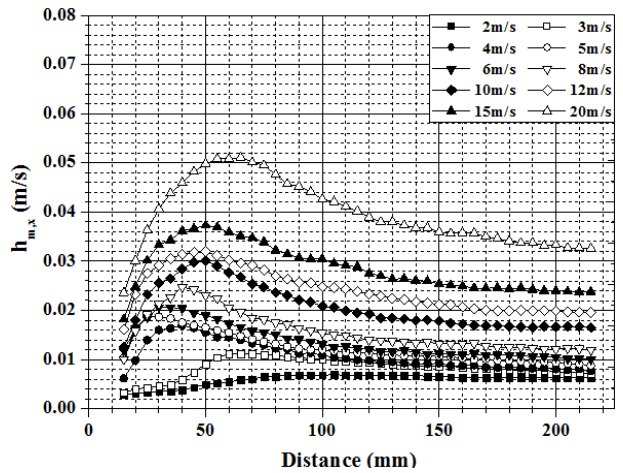


Fig. 4 Variation of local mass transfer coefficient on flat plate with tripping wire in the developed flow condition

전달에 미치는 영향을 나타낸 것으로, 평균물질 전달계수는 국소물질전달계수를 전체 승화표면에 대해 평균한 것이다. 1 mm 직경의 트리핑 와이어를 설치한 경우 트리핑 와이어를 설치하지 않은 평판에 비해 13% 증가된 값을, 3 mm 이상의 트리핑 와이어를 설치한 경우 40% 이상 증가된 값을 나타내었다. 그러나 직경 3 mm 이상의 트리핑 와이어에서는 직경 증가에 따른 평균물질전달계수의 주목할 만한 차이가 없었기 때문에 이후의 실험에서 4 mm 직경의 트리핑 와이어를 사용하였다.

Fig. 4는 발달된 유동 조건에서 트리핑 와이어가 물질전달에 미치는 영향을 유속별로 실험한 결과이다. 트리핑 와이어가 설치되지 않은 평판의 경우 경계층이 바로 시작되는 선단에서 가장 높은 물질전달계수가 나타나며, 후류로 가면서 경계층이 점점 두꺼워짐에 따라 물질전달계수가 감소한다. 그러나 트리핑 와이어가 설치된 평판의 경우는 트리핑 와이어에 의해 경계층 박리가 일어나 물질전달계수가 감소하다가 급격하게 증가하며 박리된 유동의 재부착점에서 최대가 되며 그 이후는 경계층의 발달로 다시 감소한다. 또한 가지 특이한 현상은 박리된 경계층의 재부착으로 물질전달이 최대가 되는 지점이 5 m/s까지는 평판의 선단으로 이동하다가 그 이후는 유속이 빨라질수록 하류로 이동한다는 것이다. 5 m/s까지는 층류경계층이며 그 이후는 천이를 거쳐 난류경계층으로 바뀌는데 층류경계층에서는 속도

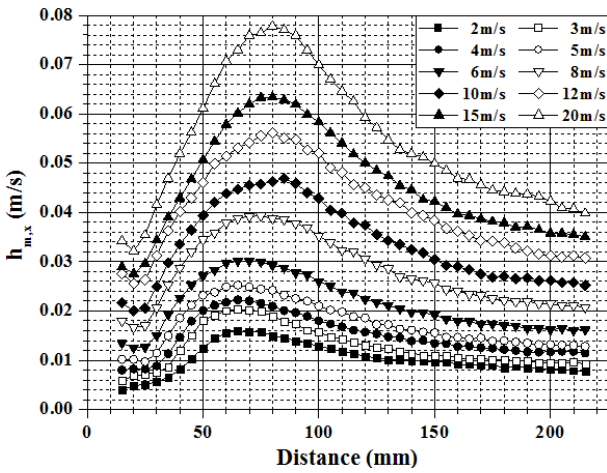


Fig. 5 Variation of local mass transfer coefficient on flat plate with tripping wire in the developing flow condition

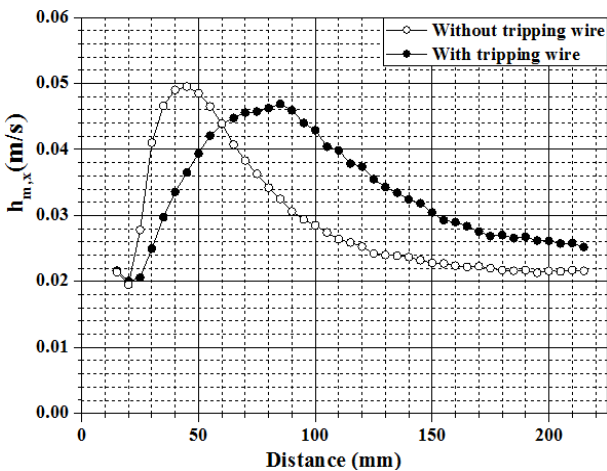
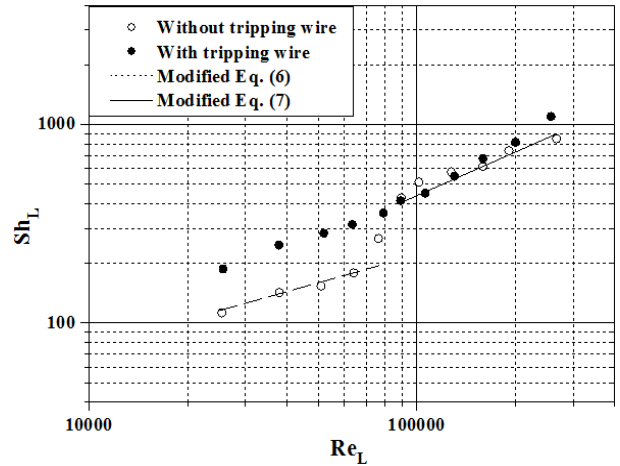


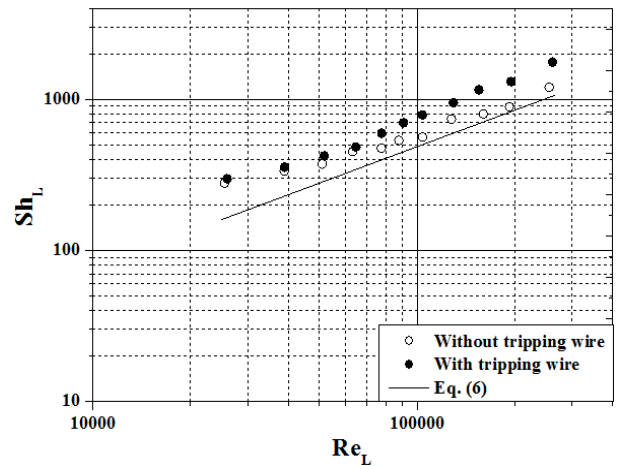
Fig. 6 Comparison of local mass transfer coefficient on flat plate between with and without tripping wire for developing flow

차에 의한 확산에 의해서 운동량전달이 일어나므로 속도가 빨라지면 재부착이 빨리 일어나지만, 난류경계층에서는 난류 에디들에 의한 운동량전달이 더 지배적이기 때문에 속도가 빨라지면 재부착이 늦게 일어난다.

유동조건에 따른 차이를 살펴보기 위해 발달하는 유동에서 트리핑 와이어가 국소물질전달계수에 미치는 영향을 Fig. 5에 나타내었다. 트리핑 와이어가 설치된 발달하는 유동에서 국소물질전달계수의 변화는 Fig. 4에 보인 발달된 유동에서의 국소물질전달계수의 변화 경향과 대체적으로 비슷하다. 그러나 최대점의 위치는 유속이 증가함에 따라 하류로 이동하며, 최대점의 크기도 발달된 유동에서의 경우보다 훨씬 크다. 트리핑 와



(a) Developed flow



(b) Developing flow

Fig. 7 Comparison of average Nusselt number on flat plate with tripping wire between developed and developing flow

이어의 영향을 좀 더 자세히 고찰하기 위해 Fig. 6과 같이 유속 10 m/s에서 트리핑 와이어가 설치되지 않은 평판의 국소물질전달계수와 비교하였다. 트리핑 와이어가 없는 평판의 경우는 물질전달계수가 선단에서부터 감소하다가 최소점을 지나 급격하게 증가하고 최대점 이후 점차적으로 감소하는 경향을 보이고 있다. 유동의 박리로 박리기포(separation bubble)가 생기고, 유동의 재부착에 의해 재순환유동(recirculation flow)이 생성된다. 최소점은 재순환 와류의 박리점으로 생각되고, 최대점은 박리된 유동의 재부착점으로 생각되며, 재부착 이후에 경계층이 발달함에 따라 물질전달계수가 감소하는 것으로 판단된다.<sup>(8)</sup> 트리핑 와이어가 설치된 경우는 국소물질전달계수의 최대점이 약 25 mm 하류로 이동하는 것을 제외

하고는 국소물질전달계수가 변화하는 경향이 트리핑 와이어가 없는 경우와 비슷하다. 그 이유는 선단에서 유동의 박리에 의해 나타나는 재순환 영역이 트리핑 와이어의 영향으로 더 넓어지기 때문으로 판단된다.

트리핑 와이어에 의한 경계층 박리가 물질전달촉진에 미치는 영향을 알아보기 위해 트리핑 와이어가 있는 경우와 없는 경우의 평균 Sherwood 수를 Fig. 7에 비교하여 나타내었다. 평균 Sherwood 수는 국소물질전달계수를 전체 측정면에 대하여 평균하여 구하였으며, 유동방향으로의 물질전달 측정은 선단에서 15 mm 떨어진 지점부터  $x = 215 \text{ mm}$  지점까지 하였다. 특성길이  $L$ 은 측정이 끝나는 지점까지의 길이를 사용하였다. 또한, 평판에서의 층류에서의 열전달 상관식 (6) 및 난류열전달 상관식 (7)을 열전달과 물질전달의 유사성을 이용하여 변환한 다음 함께 표시하였다.<sup>(9)</sup> 발달된 유동의 경우는 열전달과 물질전달의 시작길이의 차를 고려하여 수정한 상관식을 표시하였다.

$$\text{Laminar} : Nu_L = 0.664 Re_L^{0.5} Pr^{1/3} \quad (6)$$

$$\text{Turbulent} : Nu_L = 0.037 Re_L^{0.8} Pr^{1/3} \quad (7)$$

Fig. 7(a)에 보인 발달된 유동에서 Reynolds 수에 따른 평균 Sherwood 수의 변화를 보면 유속이 증가함에 따라 층류경계층에서 난류경계층으로 바뀌는 것이 뚜렷하게 나타나고 있다. 트리핑 와이어가 없을 때 2, 3, 4, 5 m/s에서의 평균물질전달계수는 층류경계층에서의 열전달 상관식과 잘 일치하고 있고, 7 m/s 이상에서는 난류경계층에서의 상관식을 잘 추종하고 있으며, 6 m/s에서의 평균 물질전달계수는 층류에서 난류로 천이하는 영역에 놓여 있다. 그러나 트리핑 와이어가 설치된 경우는 트리핑 와이어에 의해 경계층이 박리되어 원래 층류경계층이었던 저속에서부터 난류경계층의 상관식을 따라가고 있으며, 원래 난류경계층에 트리핑 와이어가 설치된 경우는 평균물질전달계수의 뚜렷한 변화가 없다. Fig. 7(b)에 보인 발달하는 유동에서의 평균 Sherwood 수는 모든 속도에서 층류에서의 상관식 값보다 훨씬 크다. 그 이유는 앞서 국소물질전달계수 분포에서 고찰한 바와 같이 평판의 선단에서 유동이 박리되어 재부착되면서 재순환영역이 형성되고, 재순환영역에서 난류 에디(turbulent eddy)들의

활발한 운동으로 물질전달이 촉진되기 때문이다. 트리핑 와이어가 설치된 경우는 와이어에 의해 재순환영역이 더 넓어 저서 평균물질전달계수가 더욱 커지며 유속이 증가할수록 그 차이는 커짐을 알 수 있다.

#### 4. 결론

발달된 유동과 발달하는 유동에서 트리핑 와이어가 설치된 평판에서의 국소 및 평균 물질전달 특성을 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 발달된 유동에서 트리핑 와이어가 없는 경우의 국소물질전달계수 분포는 전형적인 경계층 유동의 양상을 보이고 있으나, 트리핑 와이어가 설치된 경우는 유동의 박리로 와이어 바로 뒤에서는 매우 낮은 물질전달계수를 가지며 유동의 재부착점에서 최대가 되고 그 이후로 감소한다. 재부착점의 위치는 저속에서는 속도가 증가함에 따라 평판의 선단으로 이동하다가 5 m/s 이상에서는 하류로 이동한다.

(2) 발달하는 유동에서는 트리핑 와이어가 없는 경우의 국소물질전달계수 분포는 전형적인 박리 유동의 양상을 보이고 있으며, 트리핑 와이어가 설치된 경우도 비슷한 분포를 보이지만 박리에 의한 재순환 영역이 커지면서 재부착에 의한 최대점이 하류로 이동한다.

(3) 발달된 유동에서 트리핑 와이어가 없을 때 평균물질전달계수의 변화는 유속이 증가함에 따라 층류경계층에서 난류경계층으로 바뀌는 것이 뚜렷하게 나타나고 있으나, 트리핑 와이어가 설치된 경우는 트리핑 와이어에 의해 경계층이 박리되어 원래 층류경계층이었던 저속에서부터 난류경계층의 상관식을 따라가고 있다.

(4) 발달하는 유동에서의 평균물질전달계수는 선단에서 유동이 박리되어 재부착되면서 재순환영역을 형성되어 모든 속도에서 트리핑 와이어 유무에 상관없이 난류경계층에서의 상관식 값보다 훨씬 크다. 트리핑 와이어가 설치된 경우는 와이어에 의해 재순환영역이 더 넓어져서 평균물질전달계수가 더욱 커지며 유속이 증가할수록 그 차이는 커진다.

#### 참고문헌

(1) Park, J. H. and Yoo, S. Y., 2004, "A

- Naphthalene Sublimation Study on Heat/Mass Transfer for Flow over a Flat Plate," *KSME International Journal*, Vol. 18, pp. 1447~1452.
- (2) Ramaprian, B. R., Patel, V. C. and Sastry, M. S., 1981, "Turbulent Wake Development Behind Streamlined Bodies," Institute of Hydraulic Research, University of Iowa, Iowa City, IHR Rept. 231.
- (3) Andreopoulos, J. and Bradshaw, P., 1980, "Measurement of Interacting Turbulent Shear Layers in the Near-Wake of a Flat Plate," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 100, pp. 639~668.
- (4) Kim, D. H., Chang, J. W., Kim, H. B. and Sohn, M. H., 2010, "Upstream Condition Effects on the Evolution of Symmetric and Asymmetric Near-Wakes of a Flat Plate," *Aerospace Science and Technology*, Vol. 14, pp. 49~55.
- (5) Abu-Mulaweh, H. I., 2003, "Experimental Investigation of the Influence of Buoyancy on Turbulent Flow Adjacent to a Horizontal Plate
- (6) Ambrose, D., Lawrenson, I. J. and Sparke, C. H., 1975, "The Vapor Pressure of Naphthalene," *J. Chem. Thermodynam.*, Vol. 7, pp. 1173~1176.
- (7) Goldstein, R. J. and Cho, H. H., 1995, "A Review of Mass Transfer Measurements Using Naphthalene Sublimation," *Experimental Thermal & Fluid Science*, Vol. 10, pp. 416~434.
- (8) Yoo, S. Y., Jo, W. S. and Cho, W. S., 2011, "An Experimental Study of Local Mass Transfer Characteristics on Inclined Flat Plate," Vol. 35, pp. 1335~1341.
- (9) Cengel, Y. A., Ghajar, A. J. and Kanoglu, H., 2011, *Heat and Mass Transfer*, McGraw-Hill, New York, pp. 421~426.