

복수 트리핑 와이어를 사용한 평판에서의 열전달 촉진에 관한 연구

유 성 연, 조 응 선^{**}, 안 종 규^{*}
충남대학교 기계설계공학과, *충남대학교 대학원

A Study on Heat Transfer Enhancement from Flat Plate Using Multiple Tripping Wires

Seong-Yeon Yoo, Woong-Sun Cho^{**}, Jong-Kyu Ahn^{*}

Department of Mechanical Design Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea
^{*}Graduate School of Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

(Received September 6, 2012; revision received October 21, 2012)

ABSTRACT: The purpose of this research is to investigate the heat transfer enhancement by the multiple tripping wires installed on a flat plate. Naphthalene sublimation technique is used to measure the local mass transfer coefficients, and then heat transfer coefficients are calculated using heat/mass transfer analogy. Experiments are performed for the developed and developing flow conditions. Local and average heat transfer coefficients from the flat plate with three tripping wires are compared with those of no and one tripping wire. Remarkable heat transfer enhancements are found resulting from the boundary layer separation by the tripping wires, especially in the laminar boundary layer.

Key words: Flat plate(평판), Heat transfer enhancement(열전달 촉진), Tripping wire(트리핑 와이어), Naphthalene sublimation technique(나프탈렌승화법)

기 호 설 명

A	: 열전달(물질전달) 면적	Pr	: Prandtl 수
D_{iff}	: 공기 중에서 나프탈렌의 물질확산계수	P_v	: 나프탈렌 증기압
h	: 평균열전달계수	Re_L	: 평균 Reynolds 수
h_x	: 국소열전달계수	Re_x	: 국소 Reynolds 수
h_m	: 평균물질전달계수	Sc	: Schmidt 수
$h_{m,x}$: 국소물질전달계수	Sh_L	: 평균 Sherwood 수
L	: 평판의 길이	Sh_x	: 국소 Sherwood 수
\dot{m}	: 물질전달율	T	: 공기 온도
		U_∞	: 자유유동 속도

그리스 문자

† Corresponding author

Tel.: +82-42-821-8901; fax: +82-42-821-8894

E-mail address: cho7934@naver.com

Δt : 나프탈렌의 승화깊이

$\Delta \tau$: 유동장에서의 노출시간

ν	: 공기의 동점성계수
ρ_s	: 고체 나프탈렌의 밀도
$\rho_{v,w}$: 시편 표면에서의 나프탈렌 증기밀도
ρ_∞	: 자유유동영역에서의 나프탈렌 증기밀도

1. 서 론

열교환기는 대형건물의 공조 설비, 화학플랜트, 원자로, 우주항공 분야에 이르기까지 에너지를 사용하는 대부분의 장치에 사용된다. 에너지 문제와 환경 문제가 심각해지면서 열교환기의 용도와 전열매체의 종류에 따라서 열전달 촉진에 대한 연구와 기술 개발이 활발하게 수행되고 있다. 이러한 열교환기들은 특수한 경우를 제외하고는 전도나 대류에 의한 열전달 원리와 기술을 이용한 장치로 구성된다. 전도열전달의 경우는 재료의 고유한 물성치인 열전도계수가 높은 재료를 선정함으로써 열전달 문제를 어느 정도 해결할 수 있다. 이에 비해 대류열전달은 두 물질의 온도차, 유체의 속도, 유체의 상태량, 층류나 난류와 같은 유체의 유동형태에 의해서 큰 영향을 받는 복잡한 메커니즘을 가지기 때문에 이들 변수에 대한 다양한 연구가 수행되었다. 그러한 연구의 사례로는 전열면적을 증가시키는 동시에 유동 특성의 변화를 주기 위해 핀을 장착하는 방법, 물결형태나 덩플 형상의 열전달표면을 성형하는 방법, 열전달 표면에 트리핑 와이어를 포함한 여러 형태의 요철을 부착하는 방법 등이 있다.

Park and Yoo⁽¹⁾는 발달하는 유동(developing flow)과 완전히 발달된 유동(fully developed flow)에서 물결형 표면을 가지는 평판에서 국소적인 열전달 특성을 분석하였으며, Kwon and Yoo⁽²⁾는 열교환기 입구에 와류발생기를 설치하여 단일 원관과 다수의 원관으로 구성된 열교환기의 표면에서 열전달을 촉진시키기 위한 실험을 수행하였다. Chung et al.⁽³⁾은 독립적인 사각날개를 가진 와류발생기에서 루버 각과 층돌각의 변화가 열전달에 미치는 영향을 수치해석으로 연구하였으며, Kim et al.⁽⁴⁾은 트리핑 와이어를 여러 위치에 부착하여 발생하는 근접후류가 상류경계층에 미치는 영향을 실험적으로 연구하였다. Abu-Mulawah⁽⁵⁾는 트리핑 와이어를 평판에 설치하여 속도경계층이 발달하는 과정에서 Blasius의 해법으로 계산된 속도경계층 두께와 비교를 통해 트리핑 와이어의 영향으로 층류에서 난류로의 전환이 가속화되는 것을 확인하였다. Nakamura et al.⁽⁶⁾

은 정육면체 상류에 트리핑 와이어를 설치하여 트리핑 와이어에 의한 유동박리가 정육면체 표면에서의 열전달과 물질전달에 미치는 영향을 연구하였다. Park et al.⁽⁷⁾은 평면 덕트의 표면에 요철을 설치하여 유동의 박리와 재부착에 의한 열전달 향상에 대한 연구결과를 보고하였으며, Choi et al.⁽⁸⁾은 내부유동 덕트의 표면에 썩기형의 요철을 설치하여 유동의 박리와 후류생성 촉진을 통해 물질전달이 향상됨을 나프탈렌승화법으로 연구하였다.

요철이나 트리핑 와이어를 사용하여 열전달을 촉진시키는 기존의 연구들은 측정상의 어려움 때문에 경계층에서의 박리, 재부착, 재순환 와류 등의 국소적인 열유동 현상이나 특성을 명확하게 규명하지 못하였다. 이러한 어려움을 해결하기 위해서 본 연구에서는 나프탈렌승화법을 이용한 물질전달 측정기술로 국소물질전달계수를 측정하고, 열전달과 물질전달의 유사성을 이용하여 열전달계수를 구하였다. 평판에 3개의 트리핑 와이어를 설치하여 국소열전달계수를 측정하고, 트리핑 와이어가 없는 경우 및 한 개의 트리핑 와이어가 설치된 경우와 비교하여 트리핑 와이어에 의한 경계층 교란이 열전달에 미치는 영향을 고찰하였다. 유속의 변화 및 유동의 형태가 열전달에 미치는 영향을 알아보기 위해 속도 경계층이 물질농도경계층이 형성되기 훨씬 이전에 만들어지는 발달된 유동과 속도경계층과 물질농도 경계층이 동시에 형성되는 발달하는 유동인 경우에 대해 유속을 2 m/s에서 15 m/s까지 변화시켜가면서 실험을 수행하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

기존의 열전달 실험으로는 복잡한 3차원 유동장에서 세밀한 국소열전달계수를 측정하기 어렵다. 이러한 측정상의 어려움을 해결하기 위해 개발된 방법이 나프탈렌승화법이며, 본 연구에 사용한 실험장치는 풍동, 자동이송 승화깊이 측정장치, 자료획득장치, 실험시편 및 구조설비, 트리핑 와이어, 백금저항온도계, 피토투브와 마이크로 마노미터 등으로 구성되어 있다. 본 연구에 사용된 풍동은 개방 흡입형으로 유속은 직류모터에 연결된 인버터에 의해 조절되고 최대 유속은 약 25 m/s이며 자유흐름의 난류강도는 0.5% 미만이다. 풍동의 시험구간은 폭 400

mm, 높이 300 mm이며 투명 아크릴판으로 제작되었다.

승화깊이 측정장치는 x, y 두 개의 볼 스크류축에 연결된 테이블, 승화깊이 측정센서, 시편 고정 장치로 구성되어 있다. 각각의 축은 스텝모터에 의해 구동되며, 스텝모터의 분해능은 펄스당 0.72°이고, 이때의 이송거리는 0.01 mm이다. 나프탈렌의 승화깊이를 측정하기 위한 센서는 LVDT(Linear Variable Differential Transformer : Schaevitz Eng. LBB-e75-TA-100)로 측정가능 범위는 ±0.1 inch(± 2.54 mm)이고, 측정분해능은 센서에 연결된 자료획득장치(Data Acquisition System)의 분해능에 달려있다. 자료획득장치는 LVDT로부터 들어오는 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환하며, 시편과 센서를 이동시키는 데 사용되는 스텝모터를 컨트롤한다.

실험에 사용된 평판은 Fig. 1과 같이 길이 310 mm, 폭 120 mm이며, 시편 중앙의 폭 60 mm, 깊이 2 mm의 홈은 나프탈렌이 주조되는 부분이다. 선단에서의 유동박리나 경계층의 급격한 변화를 방지하기 위해 선단을 30°의 각도로 뾰족하게 가공하였다. 트리핑 와이어는 스테인리스 재질로 표면이 매끈하게 처리된 곧은 직선 형태이다. 직경은 4 mm이며, 길이는 나프탈렌이 주조되는 실험평판의 폭과 같은 120 mm의 길이로 잘라서 만들었다. 트리핑 와이어는 실험평판의 나프탈렌 주조 표면이 시작되는 점으로부터 유동방향으로 0 mm, 70 mm, 140 mm가 되는 지점에 각각 설치하였다. 트리핑 와이어를 고정시키기 위해 실험평판의 폭이 끝나는 부분에서 트리핑 와이어의 양쪽 끝 부분을 테이프로 부착시키며, 나프탈렌 승화표면과 트리핑 와이어의 밑 부분에 틈새 발생을 방지하기 위해 트리핑 와이어의 위부분을 눌러서 실험평판에 고정시키는 방법으로 테이핑을 하였다.

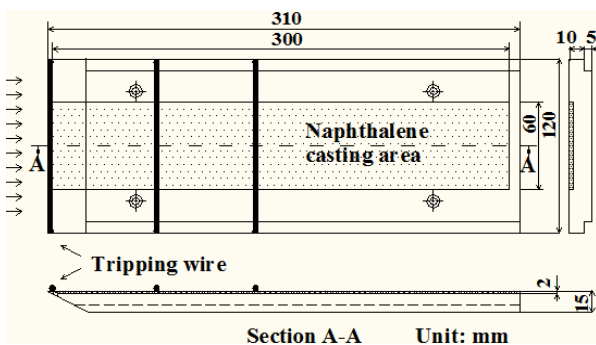


Fig. 1 Schematic of test plate with tripping wire.

2.2 실험방법 및 열전달계수 계산

평화도가 좋은 나프탈렌의 승화표면을 얻기 위해 표면이 거울과 같이 매끈한 몰드(mold)를 사용하여 주조한 뒤, 시편의 온도가 실험온도와 같아질 때까지 밀폐용기에 넣어 보관한다. 그 다음에 나프탈렌 주조시편을 꺼내어 자동이송 승화깊이 측정장치로 나프탈렌 승화표면의 높이를 유동방향으로 5 mm, 유동과 직각방향으로 6.4 mm의 간격으로 측정한다. 측정이 끝나면 시편의 선단 나프탈렌 주조면의 시작점으로부터 0 mm, 70 mm, 140 mm 위치에 트리핑 와이어를 각각 설치한 후, 풍동 내의 유동장에 90분 노출시킨다. 풍동 내의 유동속도는 피토투브와 마노미터로, 유동장의 온도는 백금저항온도계로 일정시간 간격으로 측정한다. 측정은 발달된 유동과 발달하는 유동의 두 가지 조건에서 각각 2, 4, 6, 8, 10, 15 m/s의 유동속도로 측정하였다. 풍동에서의 노출이 끝나면 시편에 설치한 트리핑 와이어를 제거한 뒤, 노출시키기 전과 같은 방법으로 나프탈렌의 승화깊이를 측정한다. 노출 전과 노출 후의 승화표면의 깊이 변화로부터 국소물질전달계수를 계산한다.

나프탈렌의 강제대류에 의한 물질전달율은 Newton의 냉각법칙과 유사하게 식(1)과 같이 계산한다.

$$\dot{m}/A = h_{m,x}(\rho_{v,w} - \rho_{\infty}) \quad (1)$$

여기서 \dot{m} 은 물질전달율이고, A는 나프탈렌 승화면적이며, $h_{m,x}$ 는 국소물질전달계수이다. ρ_{∞} 은 경계층 밖의 자유유동영역에서의 나프탈렌 농도로 본 실험에서는 무시하였다. 시편 표면에서의 나프탈렌 증기밀도 $\rho_{v,w}$ 는 이상기체로 가정하여 식(2)로부터 구한다.

$$\rho_{v,w} = \frac{P_v}{RT} \quad (2)$$

식(2)의 T는 채널 내의 공기온도로 실험 중에 백금저항온도계로 측정된 값을 평균한 것이다. P_v 는 나프탈렌 증기압으로 Ambrose⁽⁹⁾의 실험식으로부터 구하였다.

물질전달율은 나프탈렌으로 주조된 시편을 풍동의 유동장 내에 일정시간($\Delta\tau$) 노출하였을 때 단위시간당 나프탈렌승화량을 나타낸 것으로, 물질전달 실험에서는 풍동에서 노출 전·후의 똑같은 측정점에서 측정한 승화깊이로부터 다음과 같이 구한다.

$$\dot{m}/A = \rho_s \Delta t / \Delta \tau \quad (3)$$

여기서 ρ_s 는 고체 나프탈렌 밀도이다. Δt 는 측정된 승화깊이로, 측정하는 과정에서 자연대류에 의해 발생한 승화깊이를 뺀 값이다.

국소물질전달계수는 식(1)과 식(3)으로부터 다음과 같이 구한다.

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

식(4)로부터 구한 국소물질전달계수 $h_{m,x}$ 를 승화 표면 전체에서 평균하여 평균물질전달계수 h_m 을 얻고, 평균물질전달계수를 식(5)와 같이 무차원화 하여 Sherwood 수를 얻는다.

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

여기서 L 은 유동방향으로의 측정 길이이며, D_{iff} 는 공기 중에서 나프탈렌의 물질확산계수로서 Goldstein and Cho⁽¹⁰⁾에 의해 제시된 상관식을 이용하였다.

물질전달과 열전달의 유사성을 이용하여 국소물질전달계수 $h_{m,x}$ 와 Sherwood 수 Sh_L 을 국소열전달계수 h_x 와 Nusselt 수 Nu_L 로 다음과 같이 변환하였다.

$$\frac{Nu_x}{Sh_x} = \frac{(h_x x / k)}{(h_{m,x} x / D_{iff})} = \left(\frac{Pr}{Sc}\right)^n \quad (6)$$

$$\frac{Nu_L}{Sh_L} = \frac{(h L / k)}{(h_m L / D_{iff})} = \left(\frac{Pr}{Sc}\right)^n \quad (7)$$

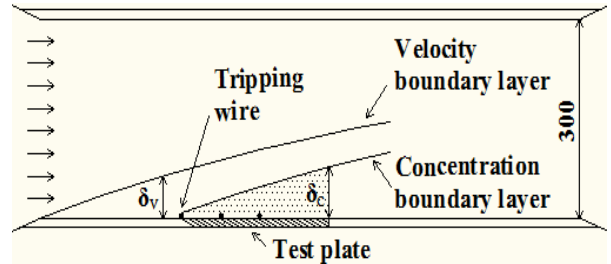
여기서 k 는 공기의 열전도도이고 Pr 은 공기의 Prandtl 수이며, Sc 는 나프탈렌의 Schmidt 수이다.

지수 n 은 외부유동에 통상적으로 적용하는 $\frac{1}{3}$ 을 사용하였다.

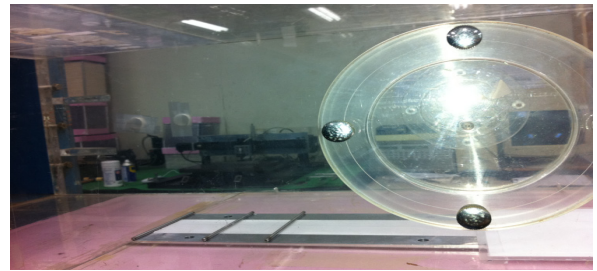
3. 실험결과 및 고찰

3.1 발달된 유동에서의 열전달측진

발달된 유동을 모사하기 위해서 Fig. 2와 같이 나



(a) Schematic



(b) Photo

Fig. 2 Installation of test plate for the developed flow conditions.

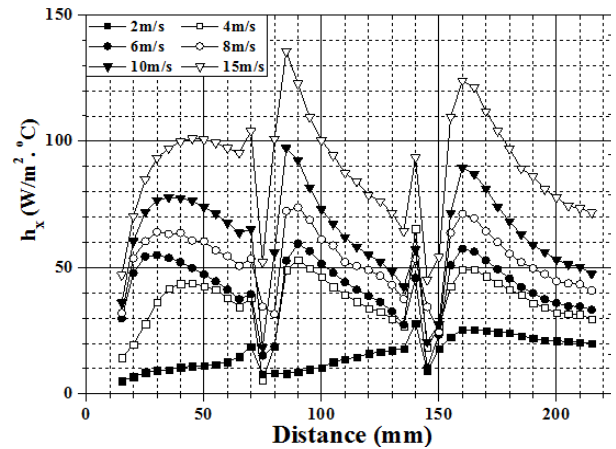


Fig. 3 Variation of local heat transfer coefficients on the flat plate with three tripping wires in the developed flow.

프탈렌이 주조된 실험평판을 풍동 시험부의 시작점으로부터 490 mm 하류에 풍동의 바닥면과 나프탈렌 승화면이 일치하도록 설치하였다. 풍동 시험부의 입구에서 속도경계층이 시작되어 발달한 상태가 되며, 이렇게 발달된 속도경계층의 아래에 놓인 나프탈렌 주조표면에서 나프탈렌의 확산에 의한 농도경계층이 시작되어 성장하는 유동특성을 가지게 된다.

Fig. 3은 발달된 유동조건에서 3개의 트리핑 와이어를 설치한 경우에 공기의 속도에 따른 국소열전

달계수의 변화를 나타낸 것이다. 국소열전달계수의 분포를 보면 트리핑 와이어에 의한 경계층의 박리로 와이어 바로 뒤에서는 매우 낮은 열전달계수를 가지며, 박리된 경계층에서의 난류 에디(eddy)들의 활발한 운동으로 이후 급격하게 증가하다가 최대점을 지나 다시 감소하는 경향을 보이고 있다. 최대값을 갖는 지점이 와이어에 의해 박리된 유동의 재부착점으로 여겨지며, 재부착점 이후는 경계층이 두꺼워지면서 열전달계수가 감소한다. 첫 번째 트리핑 와이어에 의한 유동의 박리로 나타난 최대점은 저속에서는 속도가 빨라질수록 평판의 상류로 이동하지만 6 m/s 이상에서는 최대점이 하류로 이동하는 특징을 보이고 있다. 그러나 두 번째와 세 번째 트리핑 와이어에 의한 최대점은 거의 일정한 위치에 나타나며, 와이어 설치 위치에서 매우 가까운 5~10 mm 하류에 나타난다. 또한 두 번째와 세 번째 트리핑 와이어에 의한 국소열전달계수의 변화는 매우 흡사하며, 와이어 바로 전에서 유동의 정체(stagnation)에 의해 또 다른 극대값을 갖는다. 2 m/s의 저속에서는 다른 속도에서와 다르게 첫 번째 트리핑 와이어에 의해 박리된 경계층의 재부착 이전에 두 번째 트리핑 와이어가 설치되어 전체적으로 열전달계수가 증가하는 구간만 보이고 있다.

트리핑 와이어에 의한 국소열전달계수의 변화를 관찰하기 위해서 트리핑 와이어가 설치되지 않은 경우, 1개의 트리핑 와이어가 설치된 경우, 3개의 트리핑 와이어가 설치된 경우의 국소열전달계수를 Fig. 4에 나타내었으며, 이때의 유속은 4 m/s이다. 트리핑 와이어가 없는 평판의 경우 선단으로부터 열전달

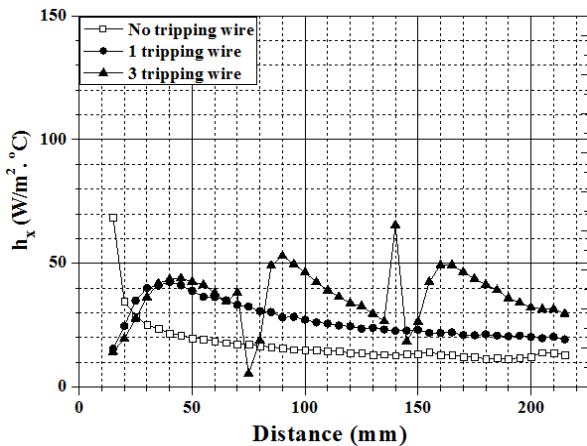


Fig. 4 Comparison of local heat transfer coefficients on the flat plate with and without tripping wire for the developed flow.

계수가 점차 감소하여 일정한 값에 도달하는 전형적인 경계층 유동에서의 변화를 보이고 있다. 이에 비해 1개의 트리핑 와이어가 설치된 평판의 경우엔 트리핑 와이어 바로 뒤에서는 매우 낮은 물질전달계수를 가지며, 이후 급격하게 증가하다가 최대점을 지나 다시 감소하는 경향을 보이고 있고, 최대점 이후부터는 트리핑 와이어가 없는 경우에 비해서 훨씬 높은 열전달계수를 갖는 것을 알 수 있다. 트리핑 와이어 바로 하류에서 나타나는 극소점은 나프탈렌 승화깊이 측정 시작점인 $x = 15 \text{ mm}$ 이전에 존재하기 때문에 그림에는 보이지 않는다. 3개의 트리핑 와이어가 설치된 경우엔 첫 번째 트리핑 와이어에 의한 영향은 트리핑 와이어가 1개 설치된 경우와 비슷하지만 두 번째와 세 번째 트리핑 와이어에 의한 경계층의 박리로 추가적으로 열전달이 촉진되는 것을 볼 수 있으며, 트리핑 와이어 전후의 극대점과 극소점이 뚜렷하게 나타나고 있다.

Fig. 5는 트리핑 와이어에 의한 경계층 박리가 열전달 촉진에 미치는 영향을 알아보기 위해 트리핑 와이어가 있는 경우와 없는 경우의 평균 Nusselt 수를 비교한 것이다. 평균 Nusselt 수는 국소열전달계수를 전체 측정면에 대하여 평균하여 구했으며, 특성길이 L 은 평판의 측정구간 길이이다. 또한, 평판에서의 층류열전달 상관식(8)에 속도경계층과 농도경계층의 시작길이의 차이를 고려한 식과 난류열전달 상관식(9)에 시작길이의 차를 고려한 식을 함께 표시하였다.

$$\text{Laminar: } Nu_L = 0.664Re_L^{0.5} Pr^{1/3} \quad (8)$$

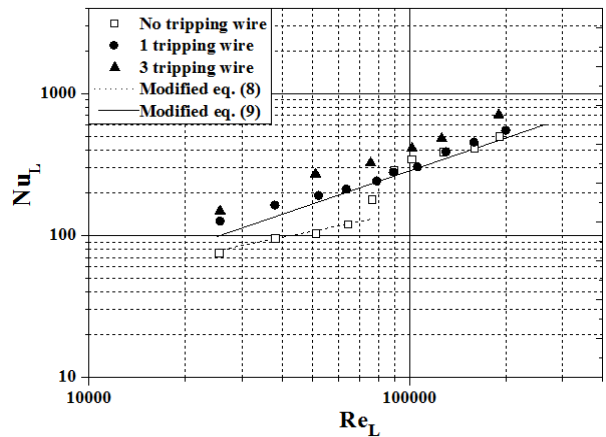


Fig. 5 Comparison of average Nusselt numbers on the flat plate with and without tripping wire in the developed flow.

$$Turbulent : Nu_L = 0.037 Re_L^{0.8} Pr^{1/3} \quad (9)$$

트리핑 와이어가 없을 때의 Reynolds 수에 따른 평균 Nusselt 수의 변화를 보면 유속이 증가함에 따라 층류경계층에서 난류경계층으로 바뀌는 것이 뚜렷하게 나타나고 있다. 2, 3, 4, 5 m/s에서의 평균열전달계수는 수정된 층류경계층에서의 열전달 상관식과 잘 일치하고 있고, 7 m/s 이상에서는 수정된 난류경계층에서의 상관식을 잘 추종하고 있으며, 6 m/s에서의 열전달계수는 층류에서 난류로 천이하는 영역에 놓여 있다. 트리핑 와이어가 1개 설치된 경우는 트리핑 와이어에 의해 경계층이 박리되어 원래 층류경계층이었던 저속에서부터 난류경계층의 상관식을 따라가고 있으며, 원래 난류경계층에 트리핑 와이어가 설치된 경우는 평균열전달계수의 뚜렷한 변화가 없다. 트리핑 와이어가 3개 설치된 경우는 두 번째와 세 번째 트리핑 와이어에 의해 추가적으로 경계층이 박리되어 열전달 촉진이 일어나며, 전 유속에서 난류경계층에서의 상관식 보다 훨씬 높은 Nusselt 수를 보이고 있다.

Table 1은 Fig. 5의 Nusselt 수를 수치로 나타낸 것으로, 트리핑 와이어에 의한 열전달 촉진 비율을 함께 표시하였다. 트리핑 와이어를 3개 설치한 경우와 트리핑 와이어를 1개 설치한 경우에는 트리핑 와이어가 없을 때와 비교해서 측정 속도 영역에서 평균열전달계수가 각각 약 12%와 47% 증가하였다. 결론적으로, 층류경계층에서는 트리핑 와이어에 의한 경계층 교란이 매우 큰 열전달촉진 효과를 나타내지만 난류경계층에서는 경계층 교란효과가 미미하다. 그러나 난류경계층에서도 여러 개의 트리핑 와이어를 사용한 추가적인 경계층 교란은 열전달 촉진에 상당한 효과가 있다.

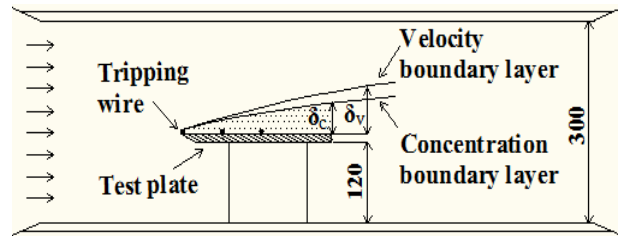
Table 1 Enhancement of heat transfer by tripping wire for the developed flow.

U_∞ (m/s)	Re_L	Nu_0	Nu_1	$\frac{Nu_1}{Nu_0}$	Nu_3	$\frac{Nu_3}{Nu_0}$
2	25600	76	126	1.66	149	1.96
4	50900	104	191	1.84	271	2.61
6	75700	180	242	1.34	324	1.80
8	101900	346	304	0.88	411	1.18
10	126100	389	370	0.95	481	1.24
15	190000	498	549	1.10	706	1.42
Average enhancement				12%	47%	

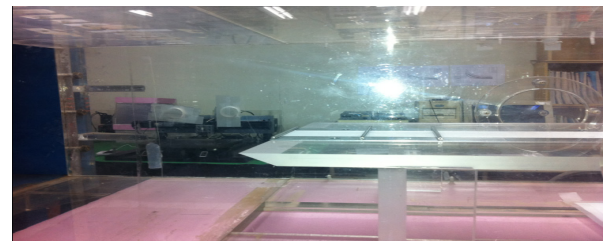
3.2 발달하는 유동에서의 열전달 촉진

발달하는 유동을 모사하기 위해서 Fig. 6과 같이 나프탈렌이 주조된 실험평판을 풍동의 바닥에서 120 mm 떨어진 상부의 높이에 설치하였다. 이 유동 조건에서는 평판의 선단에서 속도경계층이 시작되고 평판의 선단에서 3mm 떨어진 나프탈렌 주조표면에서 농도경계층이 동시에 형성된다.

Fig. 7은 발달하는 유동조건에서 3개의 트리핑 와이어를 설치한 경우에 유속에 따른 국소열전달계



(a) Schematic



(b) Photo

Fig. 6 Installation of test plate for the developing flow conditions.

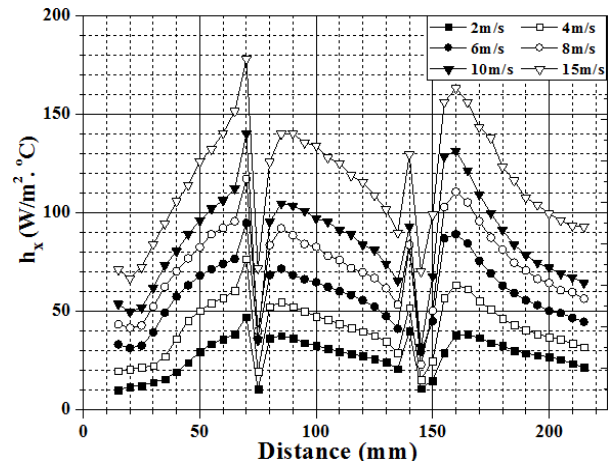


Fig. 7 Variation of local heat transfer coefficients on the flat plate with three tripping wires in the developing flow.

수의 변화를 나타낸 것이다. 첫 번째 트리핑 와이어에 의한 국소열전달계수의 변화를 살펴보면 와이어 바로 뒤에서는 유동의 박리로 열전달계수가 감소하다가 유동의 박리로 생긴 재순환영역에서 난류 에디들의 활발한 운동으로 열전달계수가 급격하게 증가한다. 그 이후에 최대점을 지나 경계층이 다시 발달하면서 감소할 것으로 예상되지만, 최대점 이전에 두 번째 트리핑 와이어가 놓이게 되어 다시 경계층이 박리되어 열전달계수가 낮은 영역이 다시 나타난다. 두 번째와 세 번째 트리핑 와이어에 의한 국소열전달계수의 변화는 Fig. 3에 보인 발달된 유동에서의 국소열전달계수 변화 경향과 대체적으로 비슷하다. 그러나 발달된 유동에 비해 훨씬 큰 열전달계수 값을 보이고 있으며, 그 이유는 속도경계층의 두께와 관련이 있는 것으로 판단된다. 발달된 유동에서는 Fig. 2에 보인 바와 같이 속도경계층이 상당히 두꺼워진 상태에서 나프탈렌의 농도경계층이 시작되고, 발달하는 유동 조건에서는 Fig. 6에 보인 바와 같이 속도경계층과 농도경계층이 동시에 발달하기 때문이다.

Fig. 8은 발달하는 유동에서 트리핑 와이어의 영향을 좀 더 자세히 고찰하기 위해 트리핑 와이어가 없는 경우, 1개의 트리핑 와이어가 설치된 경우, 3개의 트리핑 와이어가 설치된 경우에 유속 4 m/s에서의 국소열전달계수를 비교한 것이다. 트리핑 와이어가 없는 평판의 경우는 물질전달계수가 선단에서부터 감소하다가 극소점을 지나 급격하게 증가하고 최대점 이후 점차적으로 감소하는 경향을 보이

고 있다. Fig. 8에서 극소점이 보이지 않는 이유는 나프탈렌 승화깊이 측정 시작점인 $x = 15 \text{ mm}$ 이전에 극소점이 존재하기 때문이며, 공기의 유속이 빠른 경우는 극소점이 측정영역에서 뚜렷하게 나타난다. 경계층이 발달하면서 열전달계수가 선단에서부터 점진적으로 감소하는 전형적인 경계층 유동에서와 다른 국소열전달계수의 변화를 보이는 것은 평판의 선단에서 유동의 박리가 일어나기 때문으로 판단된다.⁽¹¹⁾ 평판의 선단에서 유동의 박리가 일어나지 않도록 Fig. 1에 보인 바와 같이 선단을 30° 각도로 뾰족하게 만들었으나 박리를 피할 수는 없었다. 1개의 트리핑 와이어가 설치된 경우는 선단에서의 박리와 트리핑와이어에 의한 박리가 중첩되어 최대점이 하류로 이동하고 열전달계수 값도 훨씬 커지며, 그 영향이 평판 끝까지 지속되는 것을 알 수 있다. 3개의 트리핑 와이어가 설치된 경우는 첫 번째 트리핑 와이어에 의한 영향은 비슷하고, 두 번째 와이어에 의한 영향은 와이어 전후에 극대점과 극소점이 나타나는 것 이외에는 비슷하며, 세 번째 와이어는 경계층이 두꺼워져 열전달계수가 낮아진 영역에 설치되어 상당한 열전달 촉진효과를 보이고 있다.

Fig. 9는 발달하는 유동에서 트리핑 와이어에 의한 경계층 교란이 열전달 촉진에 미치는 영향을 알아보기 위해 트리핑 와이어가 있는 경우와 없는 경우의 평균 Nusselt 수를 비교한 것으로 식(9)의 난류열전달 상관식도 함께 표시하였다. 트리핑 와이어가 없는 경우에도 난류상관식보다 큰 열전달계수

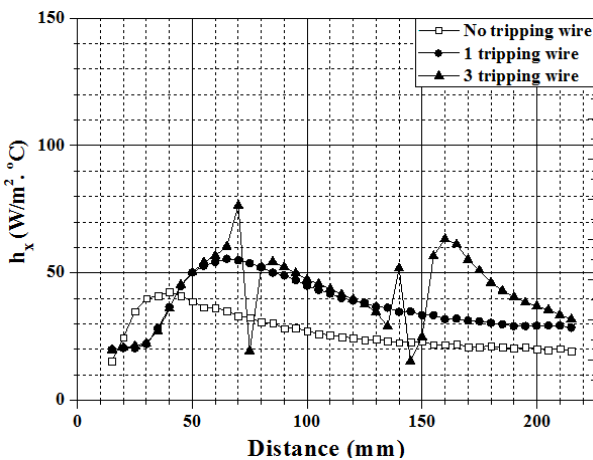


Fig. 8 Comparison of local heat transfer coefficients on the flat plate with and without tripping wire for the developing flow.

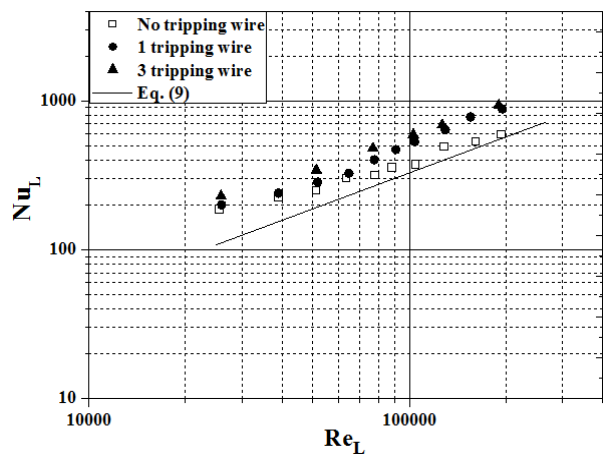


Fig. 9 Comparison of average Nusselt numbers on the flat plate with and without tripping wire in the developing flow.

Table 2 Enhancement of heat transfer by tripping wire for the developing flow

U_∞ (m/s)	Re_L	Nu_0	Nu_1	$\frac{Nu_1}{Nu_0}$	Nu_3	$\frac{Nu_3}{Nu_0}$
2	25800	188	200	1.07	229	1.22
4	51200	252	284	1.13	342	1.36
6	76900	319	401	1.26	480	1.50
8	102900	379	531	1.40	593	1.56
10	126600	498	638	1.28	688	1.38
15	190000	601	882	1.37	936	1.56
Average enhancement				31%	46%	

값을 보이고 있으며, 그 이유는 앞서 고찰한 바와 같이 평판의 선단에서 유동의 박리가 일어나 경계층 교란이 생기기 때문이다. 트리핑 와이어가 1개 설치된 경우에는 트리핑 와이어가 없는 경우에 비해서 저속에서는 열전달계수가 약간 크지만 유속이 빨라질수록 값의 차이가 커지는 것을 알 수 있다. 저속에서는 평판의 선단에서의 박리와 트리핑 와이어에 의한 박리가 중첩되어 트리핑 와이어의 효과가 미미하지만, 유속이 증가할수록 트리핑 와이어에 의한 열전달 촉진효과가 커지는 것으로 판단된다. 트리핑 와이어가 3개 설치된 경우는 경계층 두께가 두꺼워진 영역에서 추가적인 경계층 교란으로 1개 설치된 경우에 비해서 값이 훨씬 커진다.

Table 2는 Fig. 9의 발달하는 유동에서의 평균 Nusselt 수를 수치로 나타낸 것으로, 트리핑 와이어에 의한 열전달 촉진 비율을 함께 표시하였다. 트리핑 와이어를 3개 설치한 경우와 트리핑 와이어를 1개 설치한 경우에 트리핑 와이어가 없을 때와 비교해서 측정영역에서 각각 31%와 46%의 열전달촉진 효과가 나타났다.

4. 결 론

복수 트리핑 와이어가 설치된 평판에서 발달된 유동과 발달하는 유동조건을 모사하여 와이어에 의한 경계층 교란이 국소 및 평균열전달계수의 분포와 열전달 촉진에 미치는 영향을 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 발달된 유동에서 국소열전달계수의 분포는 첫 번째 트리핑 와이어 바로 뒤에서는 매우 낮은 열전달계수를 가지며 이후 급격하게 증가하다가 최대점을 지나 다시 감소하는 경향을 보이고 있으며,

최대점은 저속에서는 속도가 빨라질수록 평판의 상류로 이동하지만 일정 속도 이후에는 최대점이 하류로 이동한다. 두 번째와 세 번째 트리핑 와이어에 의한 국소열전달계수의 변화는 첫 번째와 매우 흡사하지만 와이어 바로 전에서 극대값을 갖고, 최대점은 거의 일정한 위치에 나타난다.

(2) 발달된 유동 조건의 층류경계층에서는 트리핑 와이어에 의한 경계층 교란이 매우 큰 열전달 촉진 효과를 나타내지만 난류경계층에서는 열전달 촉진 효과가 미미하다. 그러나 난류경계층에서도 여러 개의 트리핑 와이어를 사용한 추가적인 경계층 교란은 열전달 촉진에 상당한 효과가 있다.

(3) 발달하는 유동에서 국소열전달계수의 분포는 첫 번째 트리핑 와이어 바로 뒤에서는 열전달계수가 감소하다가 유동의 박리로 생긴 재순환영역에서 급격하게 증가하며, 두 번째와 세 번째 트리핑 와이어에 의한 국소열전달계수의 변화는 발달된 유동과 대체적으로 비슷하지만 발달된 유동에 비해 훨씬 큰 열전달계수 값을 갖는다.

(4) 발달하는 유동에서 평균열전달계수는 트리핑 와이어가 1개 설치된 경우는 트리핑 와이어가 없는 경우에 비해서 저속에서는 열전달계수가 약간 크지만 유속이 빨라질수록 값의 차이가 커지며, 트리핑 와이어가 3개 설치된 경우는 경계층이 두꺼워진 영역에서 추가적인 경계층 교란으로 1개 설치된 경우에 비해서 값이 훨씬 커진다.

후 기

본 연구는 지역혁신인력양성사업의 일부로 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

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. Kwon, H. G. and Yoo, S. Y., 2006, A study on the local heat transfer characteristics for circular tubes using heat transfer promoter, 2006, Transactions of the KSME B, Vol. 30, pp. 389-396.
3. Chung, J. D. and Park, B. K., 2002, Heat tran-

- sfer enhancement by the combined angle of attack of vertex generator, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 14, No. 6, pp. 477-484.
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 induced by a trip wire, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 42, pp. 1013-1020.
 6. Hajime, N., Tamotsu, I., and Takayuki, T., 2003, Local heat transfer around a wall-mounted cube at 45° to flow in a turbulent boundary layer, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 24, pp. 807-815.
 7. Park, S. H., Kim, K. M., and L. D. H., Effect of channel rotation and bleed flow on heat/mass transfer characteristics in a 90° ribbed square channel, 2007, *Transactions of the KSME, B*, Vol. 31, No. 1, pp. 83-90.
 8. Choi, J., Rhee, D. H. and Cho, H. H., 2002, Heat/Mass transfer and pressure drop in a square duct with v-shaped ribs, *Transactions of the KSME, B*, Vol. 26, No. 11, pp. 1542-1551.
 9. Ambrose, D., Lawrenson, I. J., and Sparke, C. H., 1975, The vapor pressure of naphthalene, *J. of Chemical Thermodynamics*, Vol. 7, pp. 1173-1176.
 10. 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.
 11. Yoo, S. Y. and Cho, W. S., 2012, An experimental study on local mass transfer characteristics from flat plate using tripping wire, *Transaction of the KSME B*, Submitted.