

< 논문 >

# 열전달촉진체를 사용한 원관에서의 국소열전달 특성에 관한 연구

권 화 길\* · 유 성 연†

(2005년 8월 8일 접수, 2006년 3월 9일 심사완료)

## A Study on the Local Heat Transfer Characteristics for Circular Tubes Using Heat Transfer Promoter

Hwa-Kil Kwon and Seong-Yeon Yoo

**Key Words:** Heat Transfer Promoter(열전달촉진체), Circular Tube(원관), Local Heat Transfer Characteristics(국소열전달특성), Heat Exchanger(열교환기), Naphthalene Sublimation Technique(나프탈렌승화법)

### Abstract

For the successful design of heat exchangers, it is very important to understand local heat transfer phenomena on the circular tube of heat exchangers. In the present study, experiments are performed for single circular tube and tube banks with and without heat transfer promoters. The naphthalene sublimation technique is employed to measure the local mass transfer coefficients, and the measured local mass transfer data are converted to the local heat transfer data using heat and mass transfer analogy. The distribution pattern of local Nusselt numbers on single circular tube with heat transfer promoters is similar to that without the heat transfer promoter, but average Nusselt numbers are greatly increased. In case of tube banks without the heat transfer promoter, the Nusselt numbers are much lower in the first row than those of other rows, but the local heat transfer coefficients on all rows are equalized when the heat transfer promoter is installed.

———— 기호설명 ————

- $A$  : 물질전달 면적
- $D$  : 원관의 직경
- $D_{iff}$  : 공기 중에서 나프탈렌의 물질확산계수
- $h$  : 열전달계수
- $h_m$  : 물질전달계수
- $k$  : 공기의 열전도계수
- $\dot{m}$  : 물질전달율

- $Nu$  : 국소 Nusselt 수 ( $= hD/k$ )
- $\overline{Nu}$  : 평균 Nusselt 수 ( $= \int_0^L Nu dL/L$ )
- $Pr$  : Prandtl 수 ( $= \nu/\alpha$ )
- $Re$  : Reynolds 수 ( $= U_\infty D/\nu$ )
- $Sc$  : Schmidt 수 ( $= \nu/D_{iff}$ )
- $Sh$  : Sherwood 수 ( $= h_m D/D_{iff}$ )
- $U_\infty$  : 자유유동 속도

† 책임저자, 회원, 충남대학교 기계설계공학과  
 E-mail : syyooh@cnu.ac.kr  
 TEL : (042)821-6646 FAX : (042)821-8894  
 \* 회원, 충남대학교 대학원 기계설계공학과

그리스문자  
 $\alpha$  : 공기의 열확산계수  
 $\Delta t$  : 나프탈렌의 승화깊이  
 $\Delta \tau$  : 유동장에서의 노출시간

- $\theta$  : 원관의 전면 정체점으로부터 원주방향 각도
- $\nu$  : 공기의 동점성계수
- $\rho_s$  : 고체 나프탈렌의 밀도(= 1162 kg/m<sup>3</sup>)
- $\rho_{v,w}$  : 시편 표면에서의 나프탈렌 증기밀도
- $\rho_\infty$  : 자유유동영역에서의 나프탈렌 증기밀도

### 1. 서 론

우리 일상생활과 산업분야에는 공기조화기, 보일러, 에어컨 등의 구성요소인 증발기, 응축기를 비롯한 다양한 종류의 열교환기가 광범위하게 사용되고 있다. 대부분의 열교환기는 다수의 원관으로 구성되어 있기 때문에 원관 주위에서의 열유동 현상에 대한 이해는 열교환기의 설계와 응용에 매우 중요하다. 에너지 절약 측면에서 에너지를 효율적으로 이용하기 위해서는 열교환기의 성능과 효율을 향상시키는 것이 중요하다. 그래서 오래 전부터 열전달을 촉진시키는 방법에 대한 연구를 꾸준히 진행시켜 왔다. 대표적으로 환등을 사용하여 열전달 면적을 증가시키는 방법과 열전달 표면을 다양하게 가공하여 대류열전달계수를 증가시키는 방법 등이 있다. 이러한 방법들은 생성된 경계층을 파괴하여 열저항을 감소시키고, 난류를 증가시켜 열전달을 촉진시킨다.

열교환기에서 원관 주위의 열유동 특성을 규명하는 기존의 연구들은 여러 가지 측정상의 어려움과 데이터의 미흡함으로 인해 국소적인 현상이나 특성을 명확하게 규명하지 못하였다. 또한 열전달촉진체가 설치된 원관 주위에서 일어나는 열유동 현상은 박리, 재부착, 재순환, 와류 등을 수반하는 매우 복잡한 3차원 유동이므로 기존의 열전달 측정방법으로는 국소열전달계수의 측정이 매우 어렵다. 본 연구에서는 나프탈렌승화법을 이용한 3차원 열전달 측정기술을 이용하여 원관 표면에서 국소열전달계수를 측정하였다.<sup>(1-3)</sup>

Zukauskas<sup>(4)</sup>는 단일 원관과 관군에 대한 일반적인 유동양식, 열전달계수, 수력저항 등을 문헌의 데이터를 이용하여 폭넓게 다루었다. 김경환과 윤영환<sup>(5)</sup>은 사각덕트 내에서 원형실린더를 지나가는 3차원 정상상태에서 난류유동을 레이저 도플러 유속계로 측정하고, 수치해석을 수행하여 유속분포와 난류운동에너지를 서로 비교하였다. 김

경천 등<sup>(6)</sup>은 엇갈림 관군 배열에서 유로 내의 높은 난류강도로 인한 기존의 유동장 측정방법이 신뢰성이 떨어진다고 보고, 신뢰도가 높은 데이터를 얻고자 PIV기법을 사용하여 1열에서 5열까지의 관군 주위를 통과하는 유체의 유동특성을 연구하였다. Aiba 등<sup>(7,8)</sup>은 피치가 1.2×1.2와 1.6×1.6인 정렬배열과 엇갈림배열 관군에 대해 압력계수와 일정 열유속조건에서 열전달계수를 구하였다. 유성연 등<sup>(9,10)</sup>은 납작관형 핀-관 열교환기에서 와류발생기(vortex generator)가 설치된 경우와 설치되는 않은 경우를 비교하여 열전달 촉진효과를 분석하였다.

본 연구에서는 단일 원관과 원관군에 여러 가지 형태의 열전달촉진체를 설치하고, 열전달촉진체가 없을 때와 비교하여 국소열전달 특성을 고찰하였다.

### 2. 실험장치 및 방법

#### 2.1 실험장치 및 실험방법

본 연구에 사용된 실험장치는 크게 풍동, 자동이송 승화깊이 측정장치, 자료획득장치, 실험시편 및 구조설비, 열전달촉진체, 원관군, 피토투브와 마노미터, 백금저항온도계 등이 있다.

풍동은 개방흡입형으로 유속은 직류모터에 연결된 인버터에 의해 조절되고, 최대유속은 약 25 m/s이며 자유흐름의 난류강도는 0.5% 미만이다. 풍동의 시험부는 폭 400mm, 높이 300mm이다.

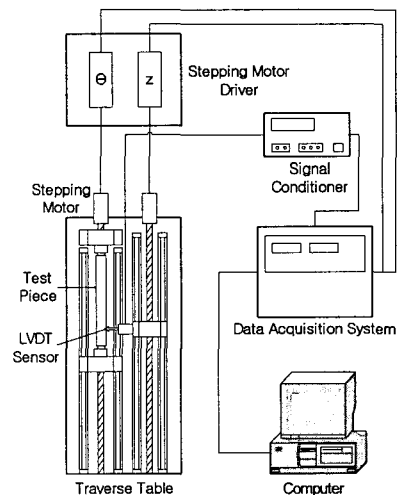


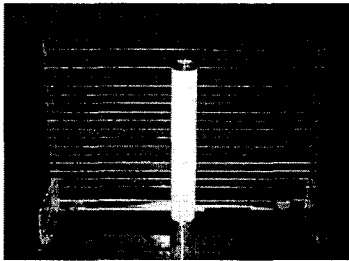
Fig. 1 Schematic of automated sublimation depth measurement system

자동이송 승화깊이 측정장치는 컴퓨터로 제어되는 스텝모터를 이용하여 시편과 측정센서를 자동으로 이동시키면서 승화깊이를 측정한다. 시편은  $\theta$ 축, 센서는  $z$ 축에 고정하고,  $\theta$ 축이 일정각도만큼 회전한 다음 센서가  $z$ 축으로 이동하여 원판 표면에서의 승화깊이를 측정할 수 있도록 설계되어 있다. 승화깊이는 LVDT 센서를 이용하여 측정하였고 이에 대한 데이터는 자료획득장치를

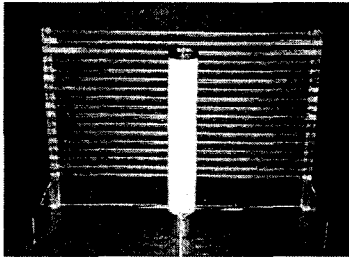
통하여 얻었다. Fig. 1이 자동이송 승화깊이 측정장치의 개략도를 나타낸 것이다.

실험시편의 크기는 길이 192mm, 지름 30mm이며, 원판에 나프탈렌을 주조하기 위한 홈(길이 162mm, 깊이 1.5mm)을 가공하였다. 주조용 몰드는 2개로 나누어 제작하였으며 원판 안쪽에 액체 나프탈렌 주입용 구멍을 만들어 주조된 원판 표면에 홈집이 생기지 않도록 하였다.

단일 원판에 대해 열전달촉진체(H.T.P. : Heat Transfer Promoter)에 의한 국소열전달 특성을 조사하기 위해 Fig. 2(a)와 같이 판형 열전달촉진체, Fig. 2(b)와 같이 원형 열전달촉진체가 사용되었다. 판형 열전달촉진체의 경우 판의 높이, 판과 판사이의 간격은 각각 10mm이고, 원형 열전달촉진체의 경우에는 촉진체의 직경과 촉진체사이의 간격이 각각 5mm이다. 그리고 열전달촉진체 형상의 영향을 살펴보기 위해서 스크린, 수평 열전달촉진체, 수평과 수직 열전달촉진체, 복합스크린을 사용하였으며 이러한 열전달촉진체들의 사진을 Fig. 3에서 보여주고 있다. 스크린은 Fig. 4(a)에 나타낸 것처럼 그물모양의 형태로 와이어(wire)의 굵기는 0.03mm이고 와이어사이의 간격은 1mm이다. 수평 열전달촉진체는 원형봉을 수평으로 배치한 것으로 봉의 직경과 봉사이의 간

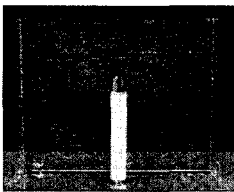


(a) Plate type

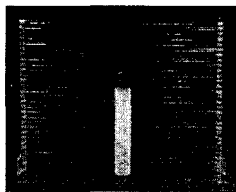


(b) Circular type

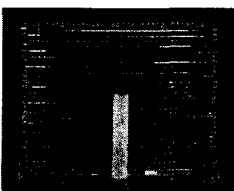
Fig. 2 Photo of plate and circular type H.T.P.



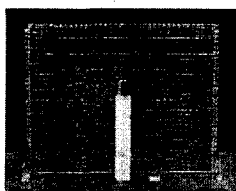
(a) Screen



(b) Horizontal

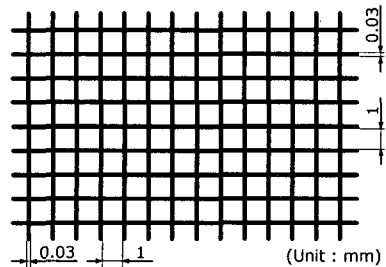


(c) Horizontal & vertical

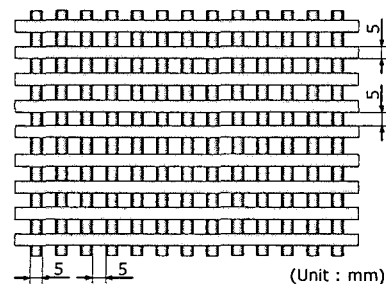


(d) Complex screen

Fig. 3 Photo of various heat transfer promoters



(a) Screen



(b) Horizontal & vertical

Fig. 4 Schematic of heat transfer promoter

격은 각각 5mm이다. 수평과 수직 열전달촉진체는 Fig. 4(b)에 나타난 것처럼 원형봉을 수평과 수직의 격자형태로 배치한 것으로 봉의 직경과 봉사이의 간격은 수평 열전달촉진체의 경우와 동일하게 5mm로 하였다. 복합스크린은 수평과 수직 열전달촉진체에 스크린을 부착한 형태이다.

원관군에서 원관 주위의 국소열전달 특성을 조사하기 위해 일반적인 열교환기 형태로 사용되는 엇갈림배열 원관군이 제작되었다. Fig. 5가 원관군의 개략도를 나타낸 것으로 직경이 30mm인 원관을 유동방향과 유동의 수직방향으로 각각 5열씩 배치하였으며 원관의 피치는 모두 60mm가 되도록 하였다. 원관에 표시한 숫자 1, 2, 3, 4는 유동방향으로 1열, 2열, 3열, 4열 원관을 의미한다. Fig. 6은 원관군과 열전달촉진체의 사진을 나타낸 것이다.

실험을 수행하기 위해서 먼저 시편 표면에 나프탈렌을 주조하고, 자동이송 승화깊이 측정장치로 주조된 나프탈렌의 높이를 측정한다. 이때 국소물질전달계수를 구하기 위해 원관의 원주방향으로는 5° 간격, 축방향으로는 20mm에 대해 17개의 데이터를 얻었다. 측정이 끝나면 시편을 풍동 내의 유동장에 1시간 정도 노출시킨다. 이때 풍동 내의 유동속도를 피토투브와 마노미터로 측정하고, 백금저항온도계로 유동장의 온도를 일정 시간 간격으로 측정한다. 유동속도는 5m/s(Re = 9,800)와 10m/s(Re = 19,400) 두 가지 경우에 대해 실험을 수행하였다. 풍동에서의 노출이 끝나면 노출시키기 전과 같은 방법으로 나프탈렌의 승화깊이를 측정한다.

2.2 데이터 처리 방법

나프탈렌의 승화량은 1차 측정과 2차 측정사이의 깊이 변화로부터 계산된다. 나프탈렌의 물질전달을  $m$ 은 식 (1)과 같이 표현된다.

$$m/A = h_m(\rho_{v,w} - \rho_\infty) \tag{1}$$

여기서,  $h_m$ 은 물질전달계수이고,  $\rho_\infty$ 은 경계층 밖의 자유유동영역에서의 나프탈렌 농도로 본 실험에서는 무시하였다.  $\rho_{v,w}$ 는 시편 표면에서의 나프탈렌 증기밀도로서 Ambrose<sup>(11)</sup>의 실험식으로부터

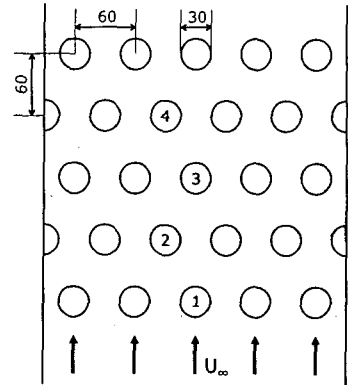


Fig. 5 Schematic of circular tube bank

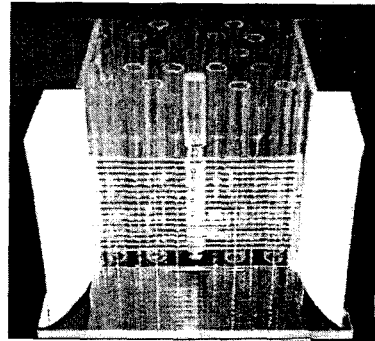


Fig. 6 Photo of circular tube bank and H.T.P.

구하였다.

물질전달율은 나프탈렌이 주조된 시편을 풍동의 유동장 내에 일정시간( $\Delta\tau$ ) 노출시켰을 때 단위시간당 나프탈렌 승화량을 나타낸 것으로 물질전달계수 실험에서는 노출 전·후의 각 측정점에서 승화깊이를 측정하여 다음과 같은 식으로 구한다.

$$m/A = \rho_s \Delta t / \Delta\tau \tag{2}$$

여기서,  $\rho_s$ 는 고체 나프탈렌의 밀도이다. 물질전달 실험에서는 승화깊이를 측정하는데 상당한 시간(약 1시간)이 소요되므로 측정하는 동안 자연대류에 의한 물질전달이 일어나기 때문에 식 (2)의 승화깊이  $\Delta t$ 는 측정된 승화깊이에서 자연대류에 의해 발생한 승화깊이를 뺀 값이다.

물질전달계수는 식 (1)과 (2)를 조합하여 다음

과 같이 구할 수 있다.

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

식 (3)으로부터 구한 물질전달계수를 무차원 수인 Sherwood 수로 표시하면 다음과 같다.

$$Sh = \frac{h_m D}{D_{iff}} \quad (4)$$

여기서, D는 특성길이로 본 연구에서는 원관의 직경으로 하였고,  $D_{iff}$ 는 공기 중에서 나프탈렌의 물질확산계수로서 Goldstein과 Cho<sup>(12)</sup>에 의해 제시된 상관식을 이용하였다.

식 (4)의 무차원 물질전달계수 Sherwood 수로부터 식 (5)와 같은 열전달과 물질전달의 유사성 관계식을 이용하여 무차원 열전달계수 Nusselt 수를 구할 수 있다.

$$Nu = (Pr/Sc)^n Sh \quad (5)$$

여기서, 지수 n은 유동조건과 형상에 따라 달라지는 값으로 본 연구에서는 1/3의 값을 사용하였고, Schmidt 수의 정의는 식 (6)과 같다.

$$Sc = \frac{\nu}{D_{iff}} \quad (6)$$

여기서,  $\nu$ 는 공기의 동점성계수이다.

실험결과에 대한 오차해석은 Kline과 McClintock<sup>(13)</sup>이 제시한 방법을 이용하여 95%의 신뢰도로 불확실도 해석을 수행하였으며, 전체적으로 5.1% 이내의 불확실도를 갖는 것으로 나타났다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 단일 원관에서의 국소열전달 특성

본 연구에서는 직교류로 설치된 단일 원관에 대해 열전달촉진체가 설치되지 않은 경우와 여러 가지 형상의 열전달촉진체가 설치된 경우의 국소 열전달 특성을 조사하였다.

Fig. 7은 열전달촉진체가 없는 경우 단일 원관에 대한 원주방향의 국소 Nusselt 수 분포를 나타낸 것으로 각도가 0과 360°인 지점이 원관의 전면 정체점, 180°인 지점이 후면 정체점을 나타낸다. Nusselt 수는 전면 정체점에서 최대값을 갖고 경계층이 발달함에 따라 점진적으로 감소한다. 최소값을 갖는 85°~90° 부근이 박리점이며, 박리 이후에는 박리된 유동 영역 내에서 재순환하는 후류의 영향으로 열전달계수가 후면 정체점까지 상승한다. Reynolds 수가 증가함에 따라 열전달계수는 증가하지만 원주방향으로의 국소열전달계수의 분포 양상은 변화가 없다.

Fig. 8은 판형 열전달촉진체가 원관 시편 전단의 20mm의 위치에 설치되고 Reynolds 수가 9,800 일 때 3차원 국소 Nusselt 수의 분포를 나타낸 것이다. 원관의 전면에서는 열전달촉진체로 인해 유동이 불안정해지고 가속되어 축방향으로 약간의 불규칙적인 산 능성의 계곡같이 산과 골

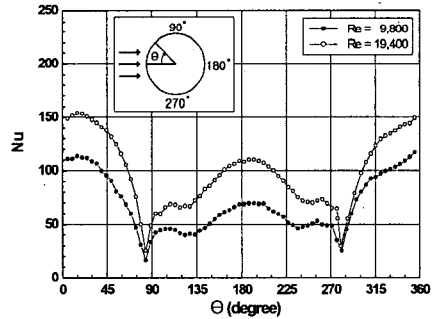


Fig. 7 Distribution of local Nusselt number for single circular tube without H.T.P.

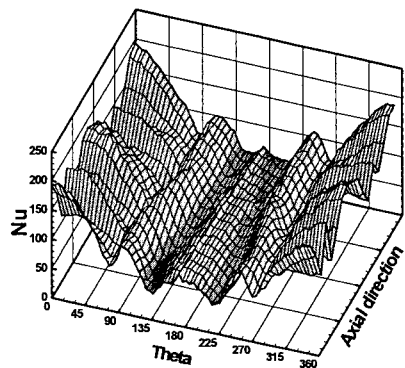


Fig. 8 Distribution of local Nusselt number for single circular tube with plate type H.T.P.

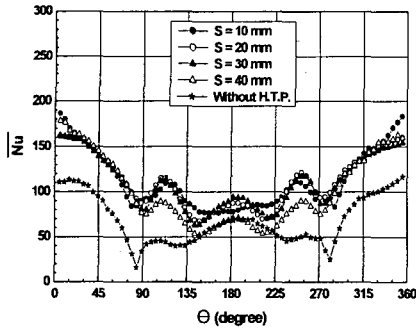


Fig. 9 Distribution of average Nusselt number for single circular tube with plate type H.T.P.

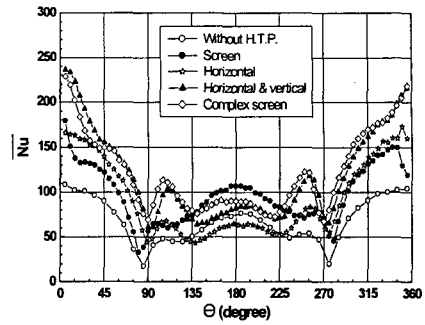


Fig. 11 Distribution of average Nusselt number for single circular tube with H.T.P.

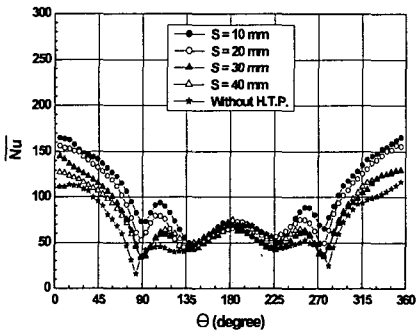


Fig. 10 Distribution of average Nusselt number for single circular tube with circular type H.T.P.

이 형성되고, 후면에서는 열전달촉진체가 없는 경우와 유사한 형태를 보이고 있다. Fig. 9는 열전달촉진체와 원관 시편과의 이격거리를 변화시켜 Fig. 8과 같은 3차원 국소 Nusselt 수의 결과에 대해 원관의 축방향으로 평균한 Nusselt 수의 분포를 나타낸 것으로 평균값의 분포형태는 열전달촉진체가 없는 경우와 유사하다. 그러나 평균값의 크기는 135°보다 작은 전면과 박리 재순환영역에서는 열전달촉진체가 없는 경우에 비해서 매우 크며, 135°보다 큰 Wake 영역에서는 열전달촉진의 정도가 크지 않다. 원관 시편과 열전달촉진체사이의 이격거리가 20mm일 때를 기준으로 열전달촉진체가 없을 때보다 평균열전달계수(원주방향으로 평균한 값)가 대략 65% 정도 증가하였다. 또한 이격거리에 따른 국소열전달계수의 변화를 살펴보면 전면에서는 전면 정체점 부근을 제외하고는 이격거리에 따른 열전달계수의 차이

가 거의 없으나, 후면에서는 약간의 차이를 보이고 있다.

원형 열전달촉진체가 원관 시편 전단에 설치되고 Reynolds 수가 9,800일 때 열전달촉진체와 원관 시편과의 이격거리에 따른 평균 Nusselt 수의 분포를 Fig. 10에서 보여주고 있다. 전체적인 분포형태는 열전달촉진체가 없을 때와 유사하며, 열전달촉진체가 설치된 모든 경우가 열전달촉진체가 없는 경우보다 후면 정체점 부근을 제외하고는 열전달계수가 높게 나타났다. 이격거리가 20 mm일 때를 기준으로 열전달촉진체가 없을 때보다 평균열전달계수가 34% 가량 증가하였고, 판형 열전달촉진체의 경우보다는 유동의 변화가 작기 때문에 열전달계수의 증가량이 낮게 나타났다. 그리고 열전달촉진체와 원관 시편과의 이격거리가 가까울수록 열전달촉진체에 의한 영향이 커져서 열전달계수가 약간씩 증가하는 것을 알 수 있다.

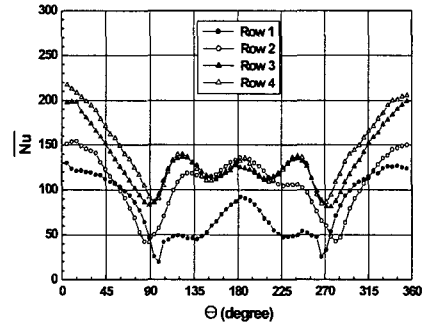
Fig. 11은 열전달촉진체 형상의 영향을 살펴보기 위해 단일 원관에 스크린, 수평 열전달촉진체, 수평과 수직 열전달촉진체, 복합스크린을 설치한 경우 축방향으로 평균한 Nusselt 수 분포를 나타낸 것으로 이때, Reynolds 수는 9,800이다. 전체적으로 유체가 열전달촉진체를 통과하면서 유동이 교란되고 와류가 형성되어 열전달을 촉진시키므로 열전달촉진체가 설치되지 않았을 때보다 열전달계수의 증가가 뚜렷하게 나타났다. 스크린이 설치된 경우는 원관의 전면과 후면 모두 열전달계수가 크게 증가하였다. 이는 스크린으로 인해 유동이 교란되고 난류강도가 높아지기 때문이다. 수평 열전달촉진체의 경우도 열전달촉진체가 설

치되지 않았을 때보다 전면에서는 열전달계수가 증가하지만 후면에서는 오히려 약간 감소한다. 그리고 수평과 수직 열전달촉진체가 함께 사용되었을 경우가 스크린이나 수평 열전달촉진체만 사용되었을 때보다 열전달계수가 더 증가하였다. 특히, 이 경우에는  $90^\circ$ 와  $135^\circ$  사이에서 다른 경우보다 열전달계수가 높고 열전달계수의 변화가 크게 나타나는데 이는 유동이 층류에서 난류로 천이되기 때문으로 사료된다. 또한, 스크린이 단독으로 설치되었을 경우는 스크린이 열전달 촉진에 크게 영향을 미치지만, 수평과 수직 열전달촉진체와 함께 설치되었을 경우는 스크린의 영향이 미미한 것을 알 수 있다. 전체적으로 열전달촉진체가 없을 때와 평균열전달계수를 비교하면 스크린의 경우 42%, 수평 열전달촉진체의 경우 36%, 수평과 수직 열전달촉진체의 경우 74%, 복합스크린의 경우 79% 가량 증가하였다.

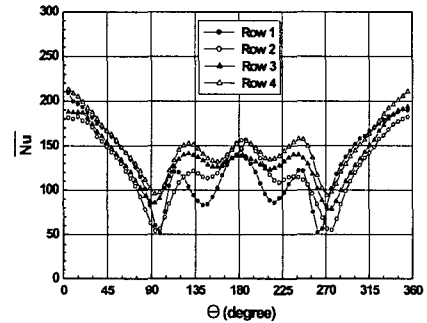
### 3.2 원관군에서의 국소열전달 특성

본 연구에서는 원관 직경(30mm)에 대한 원관 피치(60mm)의 비가 2.0인 엇갈림배열 원관군에 대해 Reynolds 수가 9,800일 때 열전달촉진체가 설치되지 않은 경우와 설치된 경우의 국소열전달 특성을 고찰하였다.

Fig. 12는 유동방향으로 각 원관의 위치에서 축방향으로 평균한 원주방향의 Nusselt 수 분포를 나타낸 것이다. Fig. 12(a)와 같이 열전달촉진체가 없는 경우 모든 열에서의 분포형태가 열전달촉진체가 없는 단일 원관의 경우와 유사하다. 1열에서는 전면과 후면 모두 다른 열들에 비해 열전달계수가 낮고, 2열에서는 1열에 비해 평균유속이 빨라지기 때문에 열전달계수가 증가하였으며, 특히  $90^\circ$ 보다 큰 후면에서 열전달계수의 상승이 뚜렷하게 나타나는 것을 알 수 있다. 3열 이후는 앞 열의 원관에서 와류 유출이 일어나며 유출된 와류가 유체의 혼합을 촉진시키고, 앞 열에서보다 난류강도가 높아졌기 때문에<sup>(7,8)</sup> 앞 열에 비해 열전달계수가 증가하였으며, 후면 정체점에서는 2열과 비슷한 값을 갖는다. 또한, 3열 이후에는 열전달계수의 변화가 거의 없다는 결과로부터 3열 이후 유동 형태가 거의 비슷한 것으로 판단된다.<sup>(4,6,8)</sup> Fig. 12(b)는 열전달촉진체가 설치된 경우를 나타낸 것이다. 1열에서는 열전달촉진체가 없는 경우에 비해 난류와 와류의 영향으로 전면과



(a) Without heat transfer promoter



(b) With heat transfer promoter

Fig. 12 Distribution of average Nusselt number on circular tube for tube bank

후면 모두 열전달계수가 뚜렷하게 증가하였다. 2열에서도  $90^\circ$ 보다 작은 전면에서는 열전달계수의 상승이 크지만, 3열과 4열에서는 열전달촉진체가 없는 경우와 비교할 때 열전달계수의 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 따라서, 3열과 4열에서는 열전달촉진체의 영향을 거의 받지 않는다는 것을 알 수 있다. 열전달촉진체에 의한 1열과 2열에서의 열전달 촉진 때문에 모든 열에서의 열전달계수가 평균화되는 것을 알 수 있으며, 이것은 열전달의 불균형을 해소해주는 매우 바람직한 현상이다.

## 4. 결론

단일 원관과 원관군에 열전달촉진체를 설치하여 원관 주위에서의 국소열전달 특성을 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 단일 원관에 판형과 원형 열전달촉진체를

설치한 경우 Nusselt 수의 분포형태는 열전달촉진체가 없는 경우와 유사하지만, 열전달계수는 큰 폭으로 증가하였다.

(2) 원관과 열전달촉진체사이의 이격거리가 20 mm일 때 열전달촉진체가 없는 경우와 비교하여 Nusselt 수가 관형 열전달촉진체의 경우 대략 65%, 원형 열전달촉진체의 경우 34% 증가하였다.

(3) 단일 원관에 스크린, 수평 열전달촉진체, 수평과 수직 열전달촉진체, 복합스크린을 설치한 경우 열전달촉진체가 설치되지 않은 경우보다 Nusselt 수가 각각 42%, 36%, 74%, 79% 가량 증가하였다.

(4) 원관군에서 열전달촉진체가 설치되지 않은 경우 1열에서는 다른 열에 비해서 열전달계수가 매우 낮지만, 열전달촉진체가 설치된 경우에는 1열과 2열에서 평균 Nusselt 수가 증가하여 각 열에서의 열전달계수가 평균화되었다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부에서 지원하는 이산화탄소 저감 및 처리기술개발사업과 원자력연구기반 확충사업의 일부로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- (1) Goldstein, R. J. and Karni, J., 1984, "The Effect of a Wall Boundary Layer on Local Mass Transfer From a Cylinder Crossflow," *J. of Heat Transfer*, Vol. 106, pp. 260~267.
- (2) Goldstein, R. J., Karni, J. and Zhu, Y., 1990, "Effect of Boundary Conditions on Mass Transfer Near the Base of a Cylinder in Crossflow," *J. of Heat Transfer*, Vol. 112, pp. 501~504.
- (3) Yoo, S. Y., 1989, "A Study on the Mass Transfer from a Square Cylinder and Its Base Plate Using Naphthalene Sublimation Technique," Ph.D. Dissertation, KAIST, Daejeon, Korea.
- (4) Zukauskas, A., 1972, "Heat Transfer from Tubes in Crossflow," Vol. 8, *Academic Press*, New York, pp. 93~160.
- (5) Kim, K. H. and Yoon, Y. H., 2003, "Study on Measurement and Numerical Analysis for Fluid Flow past a Circular Cylinder in Rectangular Duct," *Korean J. of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 15, No. 12, pp. 1095~1102.
- (6) Kim, K. C., Choi, D. G. and Park, J. D., 2001, "Measurement of Flow Field Through a Staggered Tube Bundle Using Particle Image Velocimetry," *Korean J. of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 13, No. 7, pp. 595~601.
- (7) Aiba, S., Tsuchida, H. and Ota, T., 1982, "Heat Transfer Around Tubes in In-line Tube Banks," *Bulletin of JSME*, Vol. 25, No. 204, pp. 919~926.
- (8) Aiba, S., Tsuchida, H. and Ota, T., 1982, "Heat Transfer Around Tubes in Staggered Tube Banks," *Bulletin of JSME*, Vol. 25, No. 204, pp. 927~933.
- (9) Yoo, S. Y., Park, D. S., Chung, M. H. and Lee, S. Y., 2002, "Heat Transfer Enhancement for Fin-Tube Heat Exchanger Using Vortex Generators," *KSME Int. J.*, Vol. 16, No. 1, pp. 109~115.
- (10) Yoo, S. Y., Chung, M. H., Park, D. S. and Lee, S. S., 2002, "An Experimental Study on the Local and Overall Heat Transfer Characteristics of a Fin-Flat Tube Heat Exchanger," *Korean J. of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 14, No. 11, pp. 939~947.
- (11) Ambrose, D., Lawrenson, I. J. and Sprake, C. H. S., 1975, "The Vapor Pressure of Naphthalene," *J. of Chemical Thermodynamics*, Vol. 7, pp. 1173~1176.
- (12) 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.
- (13) Kline, S. J. and McClintock, F. A., 1953, "Describing Uncertainty in Single-sample Experiments," *Mechanical Engineering*, Vol. 75, pp. 3~8.