

스크린을 이용한 직교류 열교환기의 열전달 촉진에 관한 연구

유 성 연, 장 광 일[†], 권 화 길^{*}

충남대학교 기계설계공학과, [†]충남대학교 대학원, ^{*}한국과학기술원 기계공학과

An Experimental Study on Heat Transfer Enhancement of Cross Flow Heat Exchanger Using Screen

Seong-Yeon Yoo, Kwang-Il Jang[†], Hwa-Kil Kwon^{*}

Department of Mechanical Design Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

[†] Graduate School, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

^{*}Mechanical Engineering Research Institute,

Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon, Korea

ABSTRACT: For the successful design of heat exchangers, it is very important to understand local heat transfer characteristics on the circular cylinder of the cross flow heat exchangers. In this study, the heat exchanger using screen is developed to enhance heat transfer. The naphthalene sublimation technique is employed to measure the local heat transfer coefficients in the heat exchanger. The experiments are performed for single circular tube, in-line array tube bank with and without heat transfer promoter. Local Nusselt numbers of single circular tube and tube bank with heat transfer promoter are investigated and compared to those of without heat transfer promoter.

Key words: Heat exchanger(열교환기), Screen(스크린), Heat transfer enhancement(열전달촉진), Naphthalene sublimation technique(나프탈렌승화법)

1. 서 론

우리 일상생활과 산업분야에서는 증발기, 응축기를 비롯한 다양한 종류의 열교환기가 광범위하게 사용되고 있다. 열교환기는 다수의 원관으로 구성되어 있는 원관군의 형태를 이루고 있으며 관 내측에 물이나 냉매와 같은 유체가 흐르고 관 외측에는 관 내측과 온도가 다른 유체가 흘러 열교환을 하게 된다. 이러한 열교환기의 성능과 효율을 향상시키는 것은 에너지절약 측면에서 매우 중요하다.

열교환기의 효율은 유동조건, 관의 표면 형상과 표면 거칠기 등에 의해 큰 영향을 받는다. 열전달 성능을 열저항 측면에서 보면 관내 열저항, 전도 열저항, 관외 열저항에 의해 복합적인 영향을 받게 되는데 대부분을 관외 열저항이 차지하고 있다. 따라서 이 열저항을 줄이고 열전달을 촉진시킨다면 열교환기의 효율이 향상될 것이다. 열전달을 촉진시키는 방법에는 대표적으로 흰(fin)⁽¹⁾ 등을 사용하여 열전달 면적을 증가시키는 방법, 열전달 표면을 다양하게 가공하여 대류열전달계수를 증가시키는 방법, 와류발생기(vortex generator)와 같은 열전달촉진체를 설치하여 유동장을 교란시키는 방법⁽²⁻⁴⁾ 등이 있다. 이러한 방법들은 생성된 경계층을 파괴하여 열저항을 감소시키고, 난류를 증가시켜 열전달을 촉진시킨다.

[†] Corresponding author

Tel.: +82-42-821-7622; fax: +82-42-822-7366

E-mail address: rgbflux@naver.com

원관군 주위의 국소유동과 국소열전달 현상에 대한 이해는 열교환기 관 외측의 형상 개선 및 열교환기의 설계와 응용에 중요한 정보를 제공할 수 있다. 그러나 기존의 연구들은 여러 가지 측정상의 어려움과 데이터의 미흡함으로 인해 국소적인 현상이나 특성을 명확하게 규명하지 못하였고 2차원 영역에서 얻은 데이터로 열교환기의 설계에 이용하는 경우가 많았다. 따라서 열교환기의 성공적인 설계와 정확한 해석을 위해서는 3차원 유동에서의 국소열전달 특성에 관한 정보가 필요하다. 지금까지는 원관군 주위의 열전달 특성을 조사하기 위한 연구들이 대부분 열전대를 이용한 열전달 실험에 의존해 왔으나 열전대 설치와 단열의 어려움 때문에 기존의 열전달 실험 방법으로는 3차원 유동이나 복잡한 형상에 대해서 정확하고 세밀한 국소열전달계수의 측정이 어렵다. 이러한 측정상의 어려움을 해결하기 위해 개발된 방법이 나프탈렌승화법을 이용한 물질전달 실험⁽⁵⁾이다. 본 연구에서는 나프탈렌승화법을 이용하여 직교류 유동장에 놓여있는 단일 원관과 원관군에서의 스크린 설치 여부에 따른 국소열전달 현상을 실험적으로 규명하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에서 사용된 실험장치들은 크게 풍동, 자동이송 승화깊이 측정장치, Data Acquisition System, 실험시편 및 구조설비, 피토투브와 마노미터, 백금저항온도계 등이 있다.

풍동은 개방흡입형으로 유속은 직류모터에 연결된 Inverter에 의해 조절되고, 최대유속은 약 25 m/s이며, 풍동의 시험부는 폭 400 mm, 높이 300 mm이다.

자동이송 승화깊이 측정장치는 컴퓨터로 제어되는 스텝모터를 이용하여 시편과 측정센서를 자동으로 이동시키면서 승화깊이를 측정한다. 시편은 θ 축에 센서는 z 축에 고정하고, θ 축이 일정 각도만큼 회전한 다음 센서가 z 축으로 이동하여 원관 표면에서의 승화깊이를 측정할 수 있도록 설계되어 있다. 승화깊이는 LVDT 센서를 이용하여 측정하였다.

LVDT에서 나오는 신호는 매우 미약하고 또한

LVDT가 전기적인 신호를 발생하기 위해서는 전원을 공급해 주어야 한다. 그래서, LVDT를 Signal Conditioner에 연결한다. Signal Conditioner는 LVDT에서 나오는 전류신호를 전압신호로 변환하여 증폭하고 LVDT에 전원을 공급하는 역할을 한다. Signal Conditioner에서 나온 전압신호는 다시 Data Acquisition System에 의해 읽혀진다.

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

2.2 데이터 처리 방법

실험을 수행하기 위해서 먼저 시편 표면에 나프탈렌을 주조하고, 자동이송 승화깊이 측정장치로 주조된 나프탈렌의 높이를 측정한다. 측정이 끝나면 시편을 풍동 내의 유동장에 1시간 정도 노출시킨다. 이때 풍동 내의 유동속도를 피토투브와 마노미터로 측정하고, 백금저항온도계로 유동장의 온도를 일정간격으로 측정한다. 풍동에서의 노출이 끝나면, 노출시키기 전과 같은 방법으로 나프탈렌의 승화깊이를 측정한다.

나프탈렌의 승화량은 1차 측정과 2차 측정사이의 깊이 변화로부터 계산된다. 나프탈렌의 물질전달율 \dot{m} 은 식(1)과 같이 표현된다.

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

여기서 h_m 은 물질전달계수이고, ρ_∞ 은 경계층 밖의 자유유동영역에서의 나프탈렌 농도로 본 실험에서는 무시하였다. $\rho_{v,w}$ 는 시편 표면에서의 나프탈렌 증기밀도로서 이상기체로 가정하여 다음 식으로부터 구하였다.

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

식(2)의 T는 유동장 내의 온도로서 실험 중에 백금저항온도계로 측정된 값을 평균한 것이다. P_v 는 나프탈렌 증기압으로 Ambrose⁽⁶⁾의 실험식으로부터 구하였다.

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

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

여기서 ρ_s 는 고체 나프탈렌의 밀도이다. 물질전달 실험에서는 승화깊이를 측정하는데 상당한 시간(약 1시간)이 소요되므로 측정하는 동안 자연대류에 의한 물질전달이 일어나기 때문에 식(3)의 승화깊이 Δt 는 자연대류에 의해 발생한 승화깊이를 뺀 값이다. 자연대류에 의한 승화깊이는 측정실 내에서 나프탈렌이 주조된 시편을 일정시간 노출시킨 후 처음과 나중의 승화깊이를 측정하여 미리 구한다.

물질전달계수는 식(1)과 (3)의 조합으로 다음과 같이 표현된다.

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

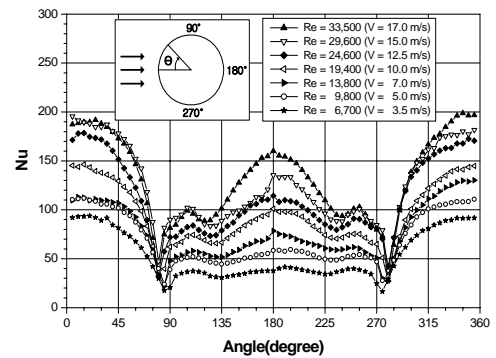
3. 실험결과 및 고찰

3.1 단일 원관에서의 국소열전달 및 열전달 촉진

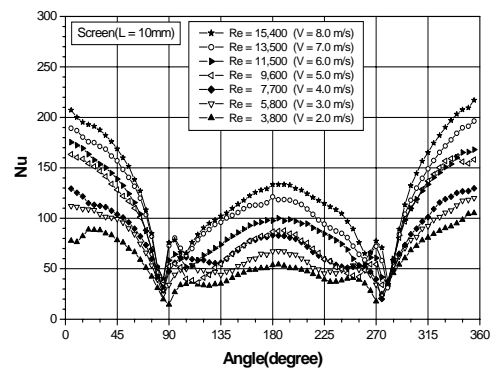
본 연구에서는 나프탈렌 승화법을 사용한 3차원 국소열전달 측정방법을 이용하여 열전달촉진체가 단일 원관의 열전달 특성에 미치는 영향을 고찰하였다. Fig. 1은 직경이 30 mm인 단일 원관 전면에 스크린 열전달촉진체를 설치한 그림이다.



Fig. 1 Photo of heat transfer promoter



(a) Without heat transfer promoter



(b) With heat transfer promoter

Fig. 2 Distribution of Nusselt number on single circular tube

Fig. 2는 단일 원관에 대한 Reynolds 수 변화에 따라 축방향으로 평균한 2차원 Nusselt 수의 분포를 보인 것이다. 이때 열전달촉진체는 단일 원관의 전단 10 mm 지점에 설치되며 Fig. 2(a)는 스크린이 설치되지 않은 경우이고, Fig. 2(b)는 스크린 열전달촉진체가 설치된 경우이다. 전체적으로 열전달촉진체에 의한 난류와 와류의 영향으로 열전달촉진체가 설치되지 않았을 때보다 열전달계수가 증가하였다.

Fig. 3은 열전달 촉진체가 설치되었을 때의 3차원 국소 Nusselt 수를 나타낸 것이다. 원관 전면은 스크린의 형상 때문에 축방향으로 산과 골이 생성되며, 열전달촉진체가 없을 때보다 열전달계수의 상승이 매우 크며, 후면에서도 열전달계수가 상승하는 것을 알 수 있다. Fig. 4는 단일 원관에 스크린의 설치 여부에 따른 평균열전달계수를 비교하기 위해서 Reynolds 수의 함수로 나타낸 것이다. Nusselt 수가 전면 정체점에서 최대값을 갖고 경계층의 두께가 증가하면서 점진적으로 감소한다. 최소값을 갖는 $\theta=90^\circ$ 부근이 박리점

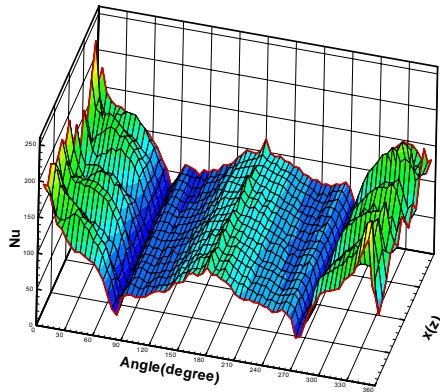


Fig. 3 Distribution of local Nusselt number on single circular tube with heat transfer promoter

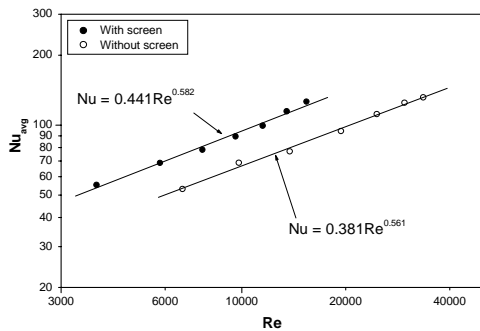


Fig. 4 Comparison of average Nusselt number versus Reynolds number for single circular tube with and without screen

이며, 박리 이후에는 난류 eddy들의 활발한 운동에 의해 열전달계수가 다시 상승한다. Reynolds 수가 공통으로 포함된 범위에서 평균열전달계수를 비교하면 스크린이 설치된 경우가 설치되지 않은 경우보다 45% 정도 높게 나타났다. 그리고 Reynolds 수에 따른 평균열전달계수의 기울기는 스크린이 설치된 경우가 더 크지만 그 차이가 뚜렷하지는 않다.

3.2 원관군에서의 국소열전달 및 열전달 촉진

열전달촉진체의 위치에 따른 영향을 분석하기 위해 직경 30 mm인 원관을 피치가 직경의 2.5배가 되도록 종방향, 횡방향으로 각각 5열씩 배치하여 1열 또는 3열 전면에 스크린을 설치한 후

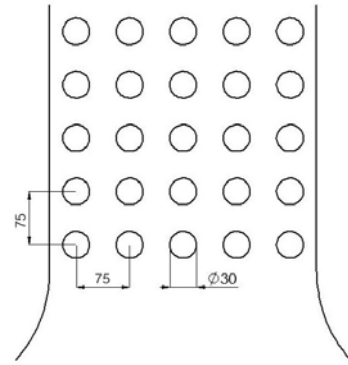
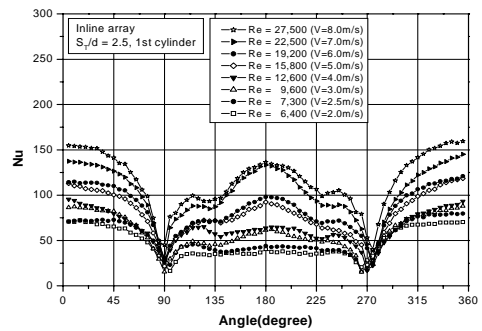


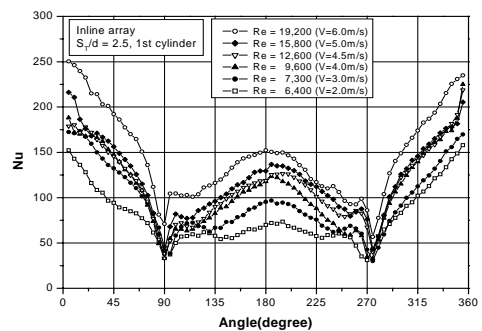
Fig. 5 Schematic of circular tube banks

열전달계수를 측정하였다. 이때 원관군은 Fig. 5와 같이 정렬로 배열하고 원관군 전단 10 mm 지점에 열전달촉진체를 설치하여 열전달촉진체가 없을 때와 비교하였다.

정렬배열 원관군의 1열 원관군에서 Reynolds 수 변화에 따른 국소 Nusselt 수의 분포를 Fig. 6에 나타내었다.



(a) without heat transfer promoter



(b) with heat transfer promoter

Fig. 6 Distribution of Nusselt number with Reynolds number on 1st cylinder for in-line arrangement($S_T/d=2.5$)

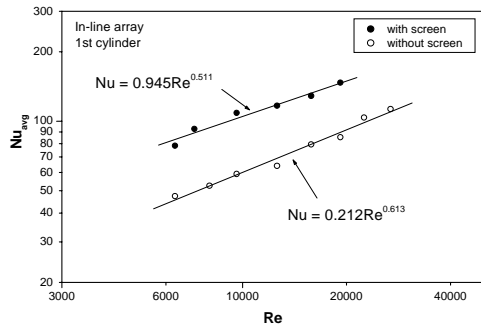
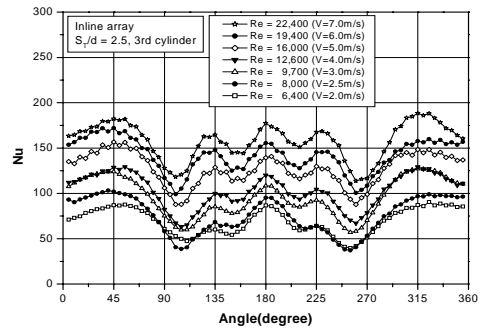


Fig. 7 Comparison of average Nusselt number versus Reynolds number on 1st cylinder for in-line arrangement with and without screen($S_T/d=2.5$)

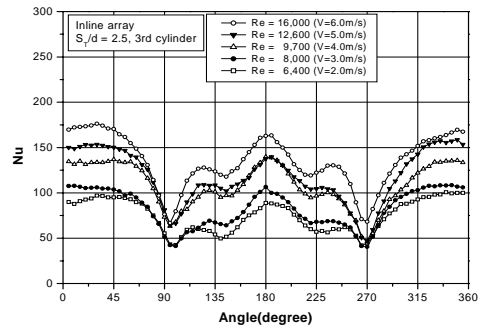
Fig. 6(a)는 열전달촉진체가 설치되지 않은 경우이며 열전달계수는 원관의 전면 정체점에서 최대값을 나타내고 경계층의 발달로 전면 감소하여 90° 와 100° 사이의 박리되는 부분에서 최소값을 보인다. Fig. 6(b)의 열전달촉진체가 설치된 1열 원관의 열전달계수는 설치전과 비교했을 때 열전달 증가가 뚜렷하게 나타났다. 열전달계수는 90° 까지 원주방향을 따라 급격하게 감소하고 재순환 영역에서 후면 정체점까지 다시 증가한다.

Fig. 7은 Fig. 6의 국소 Nusselt 수에 대한 결과를 원주 방향으로 평균하여 Reynolds 수 변화에 따라 비교한 것이다. Reynolds 수가 증가함에 따라 평균열전달계수는 지속적으로 증가하고 있으며 원관군에 열전달촉진체가 없을 때를 기준으로 평균열전달계수는 66% 증가하였다.

Fig. 8은 정렬배열 원관군의 3열 원관군에서 Reynolds 수 변화에 따른 국소 Nusselt 수의 분포를 나타낸 것이다. Reynolds 수가 증가함에 따라 전체적으로 국소 열전달계수의 변화율이 커지는 것을 알 수가 있다. Fig. 8(a)는 3열 원관군에 스크린이 설치되지 않은 경우이며 Fig. 8(b)는 스크린이 설치된 경우이다. 스크린이 설치된 경우 전면 정체점에서의 Nusselt 수 분포는 설치 전과 비교했을 때 1열의 경우와 유사했다. 전면정체점에서 박리되는 지점까지 평균 Nusselt 수가 급격히 감소하여 재부착되는 지점에서 증가하지만 열전달촉진체가 설치되기 전보다 낮은 값을 보였다. 또한 박리점의 위치는 전면으로 약간 이동하였다.



(a) without heat transfer promoter



(b) with heat transfer promoter

Fig. 8 Distribution of Nusselt number with Reynolds number on 3rd cylinder for in-line arrangement($S_T/d=2.5$)

Fig. 9는 1열에서와 마찬가지로 Fig. 8의 국소 Nusselt 수에 대한 결과를 원주 방향으로 평균하여 Reynolds 수 변화에 따라 비교한 것이다. Reynolds 수가 증가함에 따라 평균열전달계수는 지속적으로 증가하고 있으며 원관군에 열전

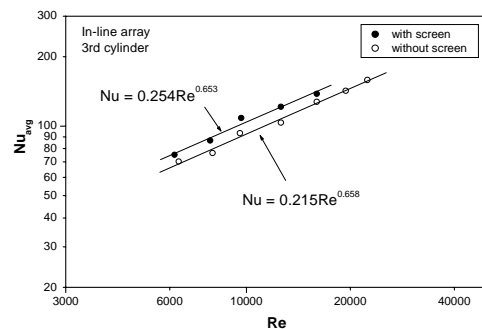


Fig. 9 Comparison of average Nusselt number versus Reynolds number on 3rd cylinder for in-line arrangement with and without screen($S_T/d=2.5$)

달촉진체가 없을 때를 기준으로 평균열전달계수는 7%의 미미한 증가를 보였다.

4. 결 론

스크린을 사용한 직교류 열교환기의 열전달 특성을 실험적으로 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 단일원관에 열전달촉진체가 설치되었을 경우가 설치되지 않았을 때보다 평균 열전달계수가 증가하였고 재부착 구간이 매우 짧아져 후면에서도 열전달이 증가하였다.

(2) 정렬배열 원관군 1열에 열전달촉진체가 설치된 경우 전면 정체점에서 뚜렷한 증가를 나타내었으며 Reynolds 수의 증가에 따라 평균 열전달계수가 증가하였다.

(3) 3열 원관 전면에 열전달촉진체가 설치된 경우에는 전면 정체점에서의 Nusselt 수 분포가 열전달촉진체가 설치되지 않은 1열 원관의 형태와 유사하였고 Reynolds 수 변화에 따른 평균 Nusselt 수는 미미한 증가를 보였다.

후 기

본 연구는 산업자원부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Torri, K., Kwak, K. M. and Nishino, K., 2002, Heat transfer enhancement accompanying pressure-loss reduction with winglet-type vortex generators for fin-tube heat exchanger, *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 45, No. 18, pp. 3795-3801.
2. Tiggelbeck, St., Mitra, N. K. and Fiebig, M., 1994, Comparison of wing-type vortex generator for heat transfer enhancement in channel flows, *J. of Heat Transfer*, Vol. 116, pp. 880-885.
3. Pauley, W. R. and Eaton, J. K., 1994, The effect of embedded longitudinal vortex arrays on turbulent boundary layer heat transfer, *J. of Heat Transfer*, Vol. 116, pp. 871-979.
4. Song, S. Y., Yoo, S. Y. and Park J. H., 2002, "An Experimental Study on the Heat Transfer Enhancement of Vortex," *Proc. of KSME Fall Annual Meeting*, pp. 1751~1756.
5. Goldstein, R. J. and Cho, H. H., 1995, "A Review of Mass Transfer Measurements Using Naphthalene Sublimation," *Experimental Thermal & Fluid Science*, Vol 10, No. 4, pp. 416~434.
6. Ambrose, D., Lawrenson, I. J. and Sparke, C. H. S., 1975, The vapor pressure of naphthalene, *J. Chem. Thermodynam.*, Vol. 7, pp. 1173-1176.