

와류발생기를 사용한 직교류 열교환기의 열전달 촉진

유성연[†]·권화길^{*}·이상섭^{**}·김병채^{*}·박동성^{*}

Heat Transfer Enhancement in Cross-flow Heat Exchanger Using Vortex Generator

Seong-Yeon Yoo, Hwa-Kil Kwon, Sang-Sub Lee
Byeong-Chae Kim and Dong-Seong Park

Key Words: Naphthalene sublimation technique(나프탈렌승화법), Vortex generator(와류발생기), Heat transfer enhancement(열전달 촉진)

Abstract

Fouling is very serious problem in heat exchanger because it rapidly deteriorates the performance of heat exchanger. Cross-flow heat exchanger with vortex generators is developed, which enhance heat transfer and reduce fouling. In the present heat exchanger, shell and baffle are removed from the conventional shell-and-tube heat exchanger. The naphthalene sublimation technique is employed to measure the local heat transfer coefficients. The experiments are performed for single circular tube, staggered array tube bank and in-line array tube bank with and without vortex generators. Local and average Nusselt numbers of single tube and tube bank with vortex generator are investigated and compared to those of without vortex generator.

1. 서 론

현재까지 열펌프에 대한 연구는 주로 공기 중의 열을 이용하는 것이 주류를 이루고 있으며, 하천수, 해수 및 하수 등의 자연열원을 이용한 열펌프에 대한 연구는 미미하다. 현재 온도는 낮지만 막대한 양의 에너지가 저장된 하천수, 해수 및 하수를 이용한 열펌프 보급의 가장 큰 문제점은 가격 경쟁력과 열교환기의 파울링 문제이다. 이 파울링으로 인해 열교환기의 성능이 시간이 지남에 따라 심각하게 저하되기 때문에 열교환기의 설계와 선택시 반드시 고려되어야 한다.

종래의 열펌프용 열교환기로는 주로 각-관 열교환기나 관형 열교환기가 사용되었다. 관형 열교환기의 경우 전열효율이 우수한 반면 가격이 각-관 열교환기에 비해서 비싸고 고압에 견디기 어려운 단점이 있다. 각-관 열교환기의 경우 전열관 사이의 간격을 일정하게 유지하기 위한 격벽이 설치되는데, 전열관이 통과할 수 있도록 수백 개의 구멍을 뚫어서 조립해야하므로 많은 제작비용이 소요되고, 다양한 형태의 전열관을 사용할 수 없어서 전열효율의 증대를 꾀할 수 없다. 또한 전열관이 각 내부에 설치되어 있으므로 스케일이 생성되거나 기타 이물질이 붙게 될 경우 이를 제거할 수 없으므로 전열관의 심각한 파울링 문제가 야기된다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 기존의 열교환기에 비해 다음과 같은 장점을 갖는 열교환기를 설계하였다. 전열관의 내부에는 냉매가 흐르게 하고 자연열원(해수, 하천수 또는

[†] 충남대학교 기계설계공학과

E-mail : syyoo@cnu.ac.kr

TEL : (042)821-6646 FAX : (042)822-7366

^{*} 충남대학교 기계설계공학과 대학원

^{**} 한국전력기술(주) 원자로설계개발단

하수 등)은 전열관 외부에 설치된 개수로를 통해 흐르도록 유도함으로써 열교환기에 각과 격벽을 사용하지 않아 제작비용을 절감할 수 있고, 전열관이 외부로 노출되어 전열관에 부착된 스케일이나 이물질을 간단하게 제거하여 자연열원을 이용한 열교환기의 가장 심각한 문제점인 파울링 문제를 해결할 수 있다. 그리고 비틀림관이나 주름관 등 다양한 형태의 전열관을 사용할 수 있어 전열관 내·외부의 전열효율을 향상시킬 수 있으며, 전열관 외부의 개수로에 와류발생기를 설치하여 열전달 촉진을 통해 전열효율을 향상시킬 수 있다.

열전달을 촉진시키기 위한 방법으로는 여러 가지가 있는데 와류발생기를 이용하는 것도 그 중의 한 방법이다. 이러한 와류발생기에 의한 유동현상이나 열전달 특성에 대한 연구들을 살펴보면 다음과 같다. Torii⁽¹⁾ 등은 핀-관 열교환기에서 winglet형 와류발생기에 의해 Re 수가 350~2100 범위에서 압력손실은 55~34% 감소하고, 열전달은 30~10% 증가함을 보였다. Tiggelbeck⁽²⁾ 등은 4가지 형태의 와류발생기를 유동에 30~90°로 채널 내에 설치하여 liquid crystal thermography로 측정된 열전달량과 마찰계수를 실험적으로 연구하였다. 열전달량이 최대가 되는 각도가 항상마다 각각 따로 존재하는데 비해 마찰계수는 Re 수에 따라 일정하다는 사실을 밝혔다. Pauley와 Eaton⁽³⁾은 와류발생기를 채널 내에 설치하고 그 뒤에 일정한 열유속을 주는 실험을 하였다. 여기서 와류들 사이의 상호작용과 경계층 사이의 상호작용이 열전달을 촉진시킨다고 보고하였다. 송시영⁽⁴⁾ 등은 평판에 rectangular형과 delta형의 와류발생기를 설치하고, 와류발생기의 입사각에 따라 와류가 열전달 촉진에 미치는 영향을 고찰하였다.

본 연구에서는 열교환기에 와류발생기를 설치하여 단일 원관과 원관군에서 와류에 의한 열전달 촉진 메카니즘을 실험적으로 규명하고자 하며, 이를 위해 나프탈렌승화법을 도입하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

본 연구에서 사용된 실험장치들은 크게 풍동, 자동이송 승화깊이 측정장치, Data Acquisition

System, 실험시편 및 주조설비, 피도튜브와 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 z축에 고정하고, θ 축이 일정 각도만큼 회전한 다음 센서가 z축으로 이동하여 원관 표면에서의 승화깊이를 측정할 수 있도록 설계되어 있다. 본 연구에 사용된 스텝모터의 기본분해능은 펄스당 0.72°이며 이때의 이송거리는 0.01 mm이다. 승화깊이 측정을 위한 LVDT(Linear Variable Differential Transformer : Schaevitz Eng. LBB-375-TA-020)센서는 센서팁의 직선변위에 따라 전기적인 신호(전류)를 내보내는 장치로 측정 가능 범위는 ± 0.02 inch이고, 측정분해능은 센서에 연결된 Data Acquisition System의 분해능에 달려 있다.

LVDT에서 나오는 신호는 매우 미약하고 또한 LVDT가 전기적인 신호를 발생하기 위해서는 전원을 공급하여 주어야 하기 때문에 LVDT를 Signal Conditioner(DTR-451:Schaevitz Eng.)에 연결한다. Signal Conditioner는 LVDT에서 나오는 전류신호를 전압신호를 변환하여 증폭하고 LVDT에 전원을 공급하는 역할을 하며, 센서팁의 변위가 0.01 inch에 대해 1 Volt의 신호를 발생하도록 교정하였다. Signal Conditioner에서 나온 전압신호는 다시 Data Acquisition System에 의해 읽혀진다. 본 연구에서 사용된 Data Acquisition System은 HP 3852A Data Acquisition/Control Unit으로, 두 가지 기능을 수행한다. 하나는 Signal Conditioner에서 나오는 아날로그(Analog) 신호를 디지털(Digital) 신호로 변환하는 A/D 변환기능이고, 다른 하나는 시편과 센서를 이동시키는데 사용되는 스텝모터를 제어하는 스텝모터 콘트롤러기능이다.

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 흡집이 생기지 않도록 하였다.

2.2 실험방법 및 후처리과정

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 피토티브와 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 물질전달을 \dot{m} 은 식 (1)과 같이 표현된다.

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

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.

$$\rho_{v,w} = \frac{P_v}{RT} \tag{2}$$

식 (3)의 T는 유동장 내의 온도로서 실험 중에 백금저항온도계로 측정한 값을 평균한 것이다. P_v 는 나프탈렌 증기압으로 Ambrose⁽⁵⁾의 실험식으로부터 구하였다.

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

$$\dot{m}/A = \rho_s \Delta t / \Delta \tau \tag{3}$$

여기서 ρ_s 는 고체 나프탈렌의 밀도이다. 물질전달 실험에서는 승화깊이를 측정하는데 상당한 시

간(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)으로부터 다음과 같이 표현된다.

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

식 (4)의 물질전달계수를 무차원 물질전달계수인 Sh 수로 표현하면 다음과 같다.

$$Sh = h_m L / D_{iff} \tag{5}$$

여기서 L은 특성길이로 본 연구에서는 원관시편의 직경으로 하였다. D_{iff} 는 공기 중에서 나프탈렌 물질의 확산계수로서 식 (6)과 같은 Goldstein⁽⁶⁾ 등에 의해 제시된 상관식을 이용하였다.

$$D_{iff} = 0.0681 \times 10^{-4} \left(\frac{T}{298.16} \right)^{1.93} \left(\frac{1.013 \times 10^5}{P_{atm}} \right) \tag{6}$$

3. 실험결과 및 고찰

3.1 단일 원관에서 와류발생기에 의한 열전달

와류에 의한 열전달 촉진 메카니즘을 규명하기 위해서 풍동에 직교류로 설치된 단일 원관에 대해서 Fig. 1(a)와 같이 와류발생기가 없는 경우와 Fig. 1(b)와 같이 와류발생기가 설치된 경우의 원관 표면에서의 3차원 국소열전달계수를 나프탈렌 승화법을 사용하여 측정하고 비교하였다. Fig. 2는 와류발생기가 없는 경우 측방향으로 평균한 원주방향의 Nu 수 분포를 나타내고 있다. Nu 수는 전면 정체점에서 최대값을 갖고 경계층의 두께가 증가하면서 점진적으로 감소한다. 최소값을 갖는 $\theta = 90^\circ$ 부근이 박리점이며, 박리 이후에는 난류 eddy들의 활발한 운동에 의해서 열전달계수가 후면 정체점까지 상승한다. Nu 수가 약간 감



(a) Single circular tube without vortex generator



(b) Single circular tube with vortex generator

Fig. 1 Photograph of single circular tube installed in wind tunnel

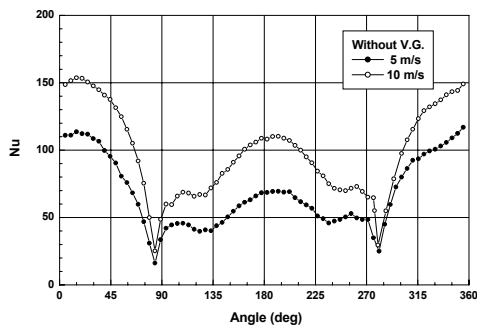


Fig. 2 Variation of local Nusselt number for single circular tube in cross flow

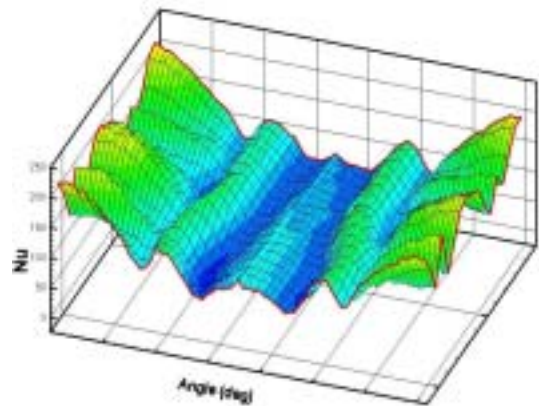
소하는 $\theta=120^\circ$ 부근이 원관 후면에서 주기적으로 생성되어 주기적으로 방출되는 와류의 중심으로 생각된다.

Fig. 3은 사각날개형 와류발생기가 설치된 경우 유동속도가 5 m/s일 때 Nu 수 분포를 보인 것으로, 이때 원관 시편과 와류발생기의 이격거리는 20 mm이다. Fig. 3(a)와 같이 와류발생기가 영향을 미치는 전면에서는 산 능성의 계곡같이 산과

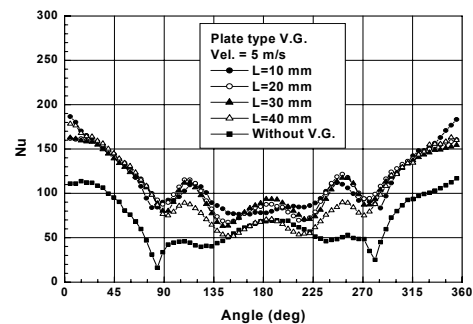
골이 생기나, 원관 후면에서는 와류발생기가 없는 경우와 비슷하다. Fig. 3(b)는 와류발생기와 원관 시편과의 이격거리를 변화시키면서 축방향으로 평균한 Nu 수의 분포를 나타낸 것으로, 평균값의 분포 형태는 와류발생기가 없는 경우와 유사하다. 그러나 평균값의 크기는 $\theta < 90^\circ$ 인 전면에서는 와류발생기가 없는 경우에 비해서 매우 크며, $\theta > 90^\circ$ 인 후면에서도 와류에 의해 열전달이 촉진되는 것을 알 수 있다. 또한 전면에서는 이격거리에 따라 평균 Nu 수의 차이가 거의 없으나, 후면에서는 와류발생기가 원관에 접근할수록 열전달계수가 약간 증가하는 것을 알 수 있다.

3.2 원관군에서 와류발생기에 의한 열전달

본 연구에서는 직교류 열교환기에서 와류발생기와 원관군의 배열이 열전달 특성에 미치는 영향을 고찰하였다. 지름 30 mm인 원관을 종방향, 횡방향으로 각각 5열씩 배치하여 각 열에서 국소



(a) 3-dimensional Nusselt number

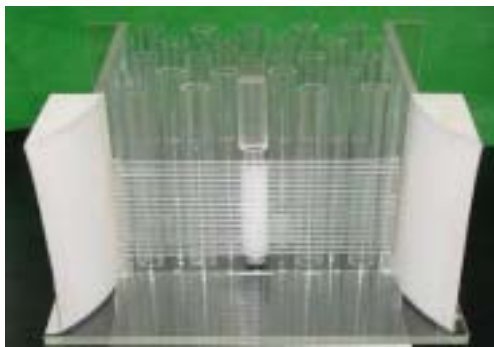


(b) 2-dimensional Nusslet number

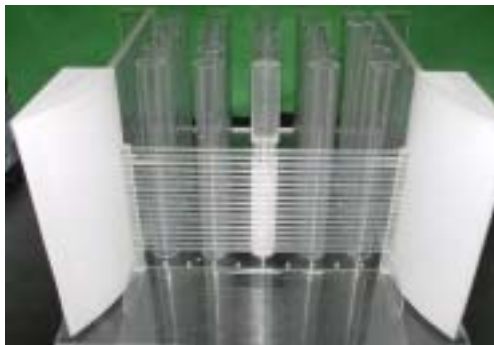
Fig. 3 Distribution of Nusselt number on circular tube with vortex generator

열전달계수를 측정하였다. 이때 원관군을 Fig. 4(a)와 같이 교차로 배열한 경우와 Fig. 4(b)와 같이 정렬로 배열한 경우를 비교하였으며, 원관군 전단 20 mm 지점에 직경 5 mm의 원형 와류발생기를 설치하여 와류발생기가 없을 때와 비교하였다.

Fig. 5는 교차배열 원관군에 대해 축방향으로 평균한 Nu 수의 분포를 나타낸 것으로 유동속도는 5 m/s이다. Fig. 5(a)에 보인 와류발생기가 없는 경우 1열 전면에서의 열전달계수는 단일 원관의 경우와 비슷하지만 후면에서는 다음 열로 가면서 유동 속도가 빨라지기 때문에 $\theta=150^\circ$ 이후에서 열전달계수가 상당히 증가하는 것을 알 수 있다. 2열에서는 1열에 비해 평균유속이 빨라지기 때문에 열전달계수가 증가하며, 특히 $\theta > 90^\circ$ 인 후면에서 열전달계수의 상승이 뚜렷하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 3열 이후는 앞 열의 원관에서 와류 유출이 일어나며 유출된 와류가 유체의 혼합을 촉진하기 때문에 전면에서 열전달계수의 상승이 매우 크며, θ 가 증가할수록 상승폭이 줄어들어 후면 정체점에서는 2열과 비슷한 값을

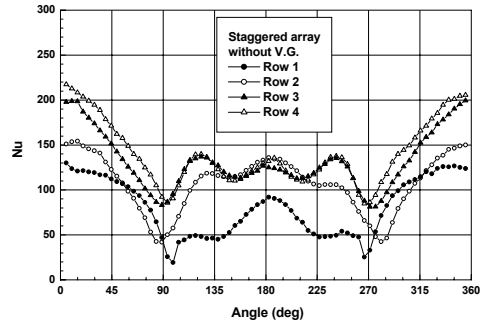


(a) Staggered arrangement

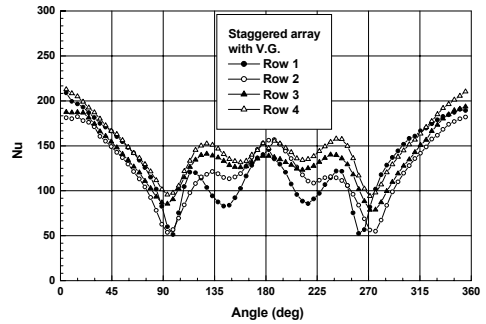


(b) In-line arrangement

Fig. 4 Photograph of circular tube banks



(a) Without vortex generator

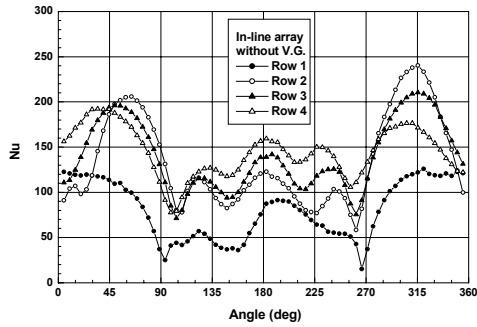


(b) With vortex generator

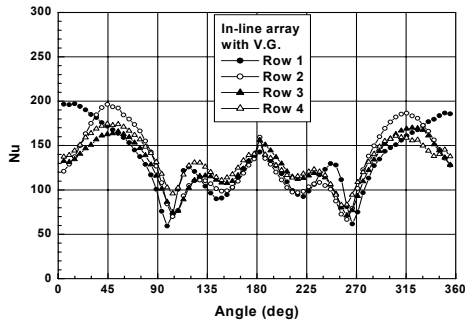
Fig. 5 Distribution of Nusselt number on circular tube for staggered arrangement

갖는 것을 알 수 있다. Fig. 5(b)에 보인 와류발생기가 있는 경우는 1열에서 와류에 의한 열전달계수의 증가는 단일 원관의 경우와 비슷하며, 2열에서도 $\theta < 90^\circ$ 인 전면에서는 열전달계수의 상승이 이루어지고, 3열과 4열은 와류발생기의 영향을 거의 받지 않는 것을 알 수 있다. 1열과 2열에서의 와류발생기에 의한 열전달 촉진 때문에 모든 열에서의 열전달계수가 평준화되는 것을 볼 수 있다.

Fig. 6은 정렬배열 원관군에 대해 축방향으로 평균한 Nu 수의 분포를 나타낸 것으로 유동속도는 5 m/s이다. Fig. 6(a)에 보인 와류발생기가 없는 경우 1열은 교차배열과 매우 유사하나, 2열 이후는 매우 다른 양상을 보이고 있다. 2열 이후는 전면 정체점에서의 열전달계수가 교차배치의 경우에 비해서 매우 낮으며, $\theta=60^\circ$ 부근에서 상대적으로 높은 열전달계수를 갖는다. 그 이유는 앞 원관 후면에서 유출된 와류가 뒤 원관에 직접 부딪히지 않고 약간 비스듬하게 빠져나가면서 $\theta=60^\circ$ 부근에서 열전달을 촉진시키는 것으로 생각



(a) Without vortex generator



(b) With vortex generator

Fig. 6 Distribution of Nusselt number on circular tube for in-line arrangement

된다. Fig. 6(b)의 와류발생기가 있는 경우는 1열에서 와류발생기에 의한 열전달계수의 증가는 교차배열과 비슷하고, 2열 이후에는 와류발생기의 영향이 미미한 것으로 판단된다. 이 경우도 교차배열에서와 같이 모든 열에서의 열전달계수가 평균화되는 것을 알 수 있다.

4. 결론

단일 원관과 원관군에 와류발생기를 설치하여 열전달 특성을 실험적으로 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 단일 원관에서 와류발생기를 설치하였을 때 평균 Nu 수의 분포 형태는 와류발생기가 설치되지 않았을 때와 유사하지만, 와류에 의한 열전달 촉진으로 평균 Nu 수 값이 높게 나타났다.

2) 단일 원관에서 와류발생기의 이격거리에 따른 평균 Nu 수의 차이는 크지 않았다.

3) 원관군에서 교차배열과 정렬배열의 평균 Nu 수 분포 형태가 약간 다르게 나타났지만, 두 경우 모두 와류발생기의 영향으로 열전달이 향상되었다. 교차배열의 경우는 1열과 2열에서, 정렬배열의 경우는 1열에서 평균 Nu 수가 증가하여 전체적으로 평균화가 되었다.

후 기

본 연구는 과학기술부 지원으로 수행하는 21세기 프론티어사업(이산화탄소 저감 및 처리기술 개발)의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (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 ~ 879.
- (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) Ambrose, D., Lawrenson, I. J. and Sparke, C. H. S., 1975, "The Vapor Pressure of Naphthalene," *J. Chem. Thermodynam.*, Vol. 7, pp. 1173 ~ 1176.
- (6) 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.