다공물질 표면처리가 경사판의 증발냉각에 미치는 영향에 관한 실험적 연구

이 대 영, 이 재 완*, 강 병 하**†
한국과학기술연구원 열유동제어연구센터, *국민대학교 대학원, **국민대학교 기계·자동차공학부

An Experimental Study on the Effects of Porous Layer Treatment on Evaporative Cooling of an Inclined Surface

Dae Young Lee, Jae Wan Lee*, Byung Ha Kang†**
Thermal/Flow Control Research Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 136-791, Korea
**Graduate School of Mechanical Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea*
***School of Mechanical and automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea*

(Received January 30, 2004; revision received November 3, 2004)

ABSTRACT: Falling film heat transfer has been widely used in many applications in which heat and mass transfer occur simultaneously, such as evaporative coolers, cooling towers, absorption chillers, etc. In such cases, it is desirable that the falling film spreads widely on the surface forming thin liquid film to enlarge contact surface and to reduce the thermal resistance across the film and/or the flow resistance to the vapor stream over the film. In this work, the surface is treated to have thin porous layer on the surface. With this treatment, the liquid can be spread widely on the surface by the capillary force resulting from the porous structure. In addition to this, the liquid can be held within the porous structure to improve surface wettedness regardless of the surface inclination. The experiment on the evaporative cooling of an inclined surface has been conducted to verify the effectiveness of the surface treatment. It is measured that the evaporative heat transfer increases about 50% by the porous layer treatment as compared with that from orignal bare surfaces.

Key words: Evaporation heat transfer(증발 열전달), Surface Characteristics(표면특성), Wettedness(젖음도), Porous layer(다공물질층), Inclined surface(경사표면)

기 호 설 명

A : 면적 [㎡]
c : 수증기의 질량분율 [kg/kg]
Cp : 비열 [J/kgK]
h : 열전달계수 [W/㎡K]
h_m : 물질전달계수 [kg/㎡s]
i_{fg} : 물의 잠열 [J/kg]
$\dot{m}$: 질량유량 [kg/s]
q : 열 유속 [W/㎡]
Re : 막 Reynolds 수, $4\Gamma/\mu_l$

† Corresponding author
Tel.: +82-2-910-4681 ; fax: +82-2-910-4839
E-mail address: bhkang@kookmin.ac.kr

T : 온도 [℃]

그리스 문자

Γ : 단위 길이당 질량 유량 [kg/ms]
Δ : 오차량
μ_l : 액체의 점성계수 [kg/ms]
σ : 젖음도 (wettedness)

하첨자

a : 공기
h : 고온
i : 입구 (inlet)
o : 출구 (outlet)
s : 표면 (dry surface)
w : 습표면 (wet surface)

1. 서 론

유하액막으로부터의 열 및 물질전달 과정은 냉각탑, 증발식 냉각기, 흡수식 냉동기, 증류공정 등 여러 가지 기술 분야에서 찾아볼 수 있다. 이러한 대부분의 경우에 있어서 고체 표면의 젖음성이 열 및 물질전달의 향상에 중요한 인자로 작용한다.

Kim[1]은 실험을 통해 평평한(plain) 튜브에 비해 낮은 핀(low-fin) 튜브 표면에서 증발열전달량이 최대 100% 증가함을 보였고, Wang et al.[2]은 간접 증발식 냉각기에서 냉각기 표면의 젖음성이 성능에 미치는 영향을 연구하였다. 한편 표면의 친수성이 증가할수록 액적에 의해 젖는 면적이 증가하는 특성을 이용하고자 하는 노력이 활발하게 이루어지고 있다. Kim et al.[3]은 흡수식 냉동기의 증발기를 모사한 다양한 형태의 수평 튜브에서 친수성 표면처리를 하였을 때 증발열전달 성능이 향상됨을 보였다.

본 연구에서는 다공물질을 코팅한 표면에서의 증발열전달에 대하여 연구한다. 다공물질이 코팅된 표면의 개략도는 Fig. 1과 같다. 표면에 공급된 액체는 모세관 현상에 의하여 다공층 내부로 확산되기 때문에 표면을 얇은 액막으로 덮어 젖

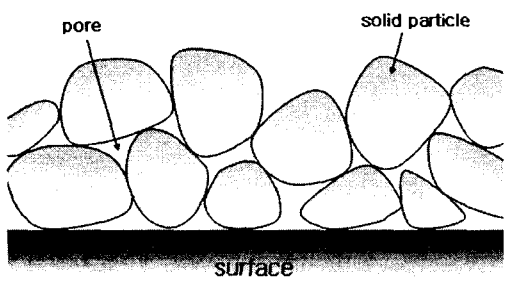
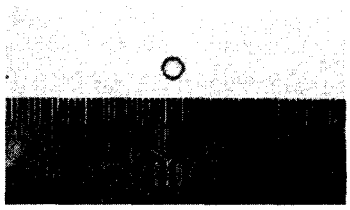
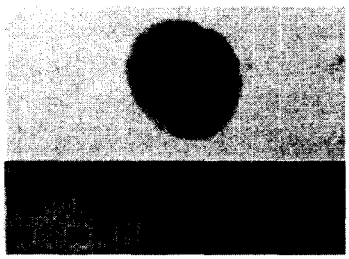


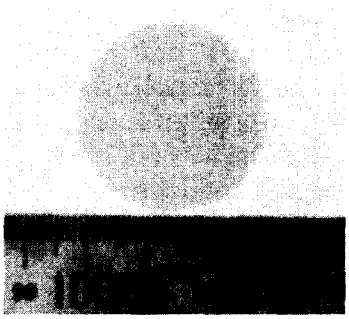
Fig. 1 Schematic of porous layer coating.



a) bare surface, d=4 mm

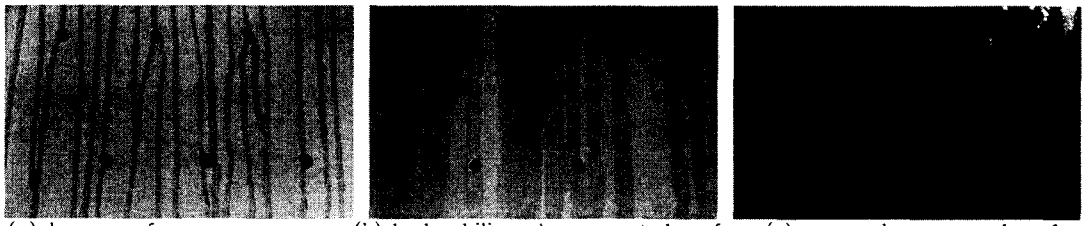


b) hydrophilic polymer coated surface, d = 15 mm



c) porous coated surface, d=30 mm

Fig. 2 Spreading of a droplet on the horizontal surfaces.(Vdroplet=0.013 cc)



(a) bare surface (b) hydrophilic polymer coated surface (c) porous layer coated surface

Fig. 3 Flow patterns on inclined surfaces with different surface characteristics(inclination: 70°).

음도를 획기적으로 향상시킬 수 있다.

표면처리하지 않은 알루미늄 표면과 친수성 폴리머로 코팅된 표면에 비하여 다공물질로 코팅처리 된 표면의 젖음성이 크게 향상됨을 보이며, 각 표면으로부터의 증발열전달을 실험하여 젖음도와 증발열전달의 관계를 분석한다.

2. 표면 특성에 따른 평판의 젖음도 비교

알루미늄 평판을 각기 다른 특성을 갖도록 표면 처리하여 표면 특성에 따른 평판의 젖음도를 Fig. 2에 나타내었다.

다공물질 코팅은 고체입자를 용사(thermal spray)공정을 이용하여 표면에 코팅하거나, 적절한 반응성 접착제(reactive adhesive)를 이용하여 고체입자를 표면에 접착함으로써 얻을 수 있다. 본 연구에서 적용한 고체입자의 크기는 10~30 μm이며, 코팅두께는 50 μm이다. 동일한 액적에 의한 젖음 면적이 다공물질로 코팅한 표면에서, 처리하지 않은 표면에 비해, 수십 배까지 증가함을 알 수 있다.

한편, 경사진 평판에서 물줄기의 흐름은 물의 유량, 고체 표면과의 접촉각, 경사도 등의 영향으로 다양한 형태를 갖는다.[4~5] 젖음도를 향상시키기 위해 물의 유량을 증가시키는 방법은 불필요한 순환유량의 증가를 야기하며 액막의 두께가 두꺼워져서 열저항이 커지고, 구동에너지 소모가 증가된다.[6]

Fig. 3에는 각기 다른 표면 특성을 가진 경사판을 흘러내리는 물 유동의 형태를 나타내었다. 경사판의 각도는 70°이며, 물은 15 mm 간격의 직경 1 mm 구멍으로부터 경사판 상부로 공급된다. 경사판의 폭은 300 mm이며, 물유량은 0.1 lpm이다. 친수성 폴리머로 코팅을 하면 일반 표면에 비해 젖음 면적이 증가되지만, 경사진 표면에서는 역시 줄기 형태의 흐름을 가지며, 아래로 내려올수록 가속되면서 물줄기의 폭이 좁아져 젖음도가 감소하므로 친수성 표면처리에 의한 젖음도 향상 정도가 제한적이다. 한편 다공물질로 코팅한 경우에는, 물분배기에서 리블렛(rivulet) 형태로 물을 공급하더라도 모세관력에 의해 주위로 물이 퍼져나가기 때문에, 경사판을 완전히 덮는 액막유동을 형성하게 된다. 따라서 다공물질로 표면처리를 하면 물분배기의 특성에 관계없이 작은 유량만으로도 경사판을 완전히 얇은 액막으로 덮을 수 있다.

물유량이 0.2, 0.3 lpm인 경우에 대하여도 동일한 실험을 실시하였으며, Fig. 3에 나타낸 것과 같은 물 유동 이미지를 영상 처리한 후 젖음도를 계산하여 Table 1에 나타내었다. 젖음도 σ는 총 표면적에 대한 젖은 면적의 비로 정의되며, 막 레이놀즈 수 Re는 다음과 같이 정의된다.

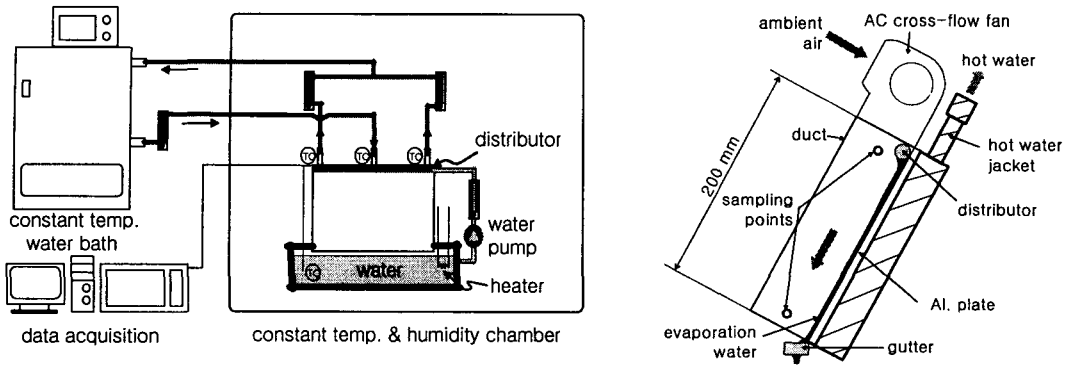
$$\mathrm{Re} = \frac{4\Gamma}{\mu_l} \tag{1}$$

Γ는 단위 길이당 물의 질량 유량으로 물유량을 경사판의 폭으로 나눈 값이다.

처리하지 않은 알루미늄 평판과 친수성 폴리머로 코팅한 평판의 경우 실험 영역에서 Re가 감소함에 따라 작기는 하지만 젖음도가 조금씩 감소

Table 1 Wettedness of various surfaces

	film Re	σ(%)
bare surface	31.8	29.5
	63.5	30.5
	95.3	31.0
polymer coated surface	31.8	65.3
	63.5	73.6
	95.3	77.0
porous layer coated surface	31.8	100
	63.5	
	95.3	



(a) schematic of experimental setup (b) detail of the test-section

Fig. 4 Experimental setup.

하였다. 이는 물 유량이 감소할수록 물 분배기의 각 구멍을 통한 유량의 균일한 공급이 어려워지기 때문이다. 그러나 다공물질로 코팅한 경우에는 물의 유량이나 분배 불균일 정도에 관계없이 전체면적을 완전히 적실 수 있음을 알 수 있다.

3. 증발열전달 실험방법

각각 표면처리하지 않은 알루미늄 표면, 친수성 폴리머로 코팅한 표면, 다공성 물질로 코팅한 표면을 갖는 기울어진 평판(경사각: 70°)으로부터의 증발열전달을 실험하였다. 실험장치의 개략도를 Fig. 4에 나타내었다.

알루미늄 평판(200 mm×300 mm)과 덕트로 구성된 실험부를 항온항습 챔버에 넣어 유동공기의 온습도 조건을 변화시킬 수 있도록 하였다. 평판 후면에는 평판의 온도를 일정하게 유지하기 위한 온수 재킷을 구리로 제작하여 밀착 고정하였다.

Table 2 Experimental conditions

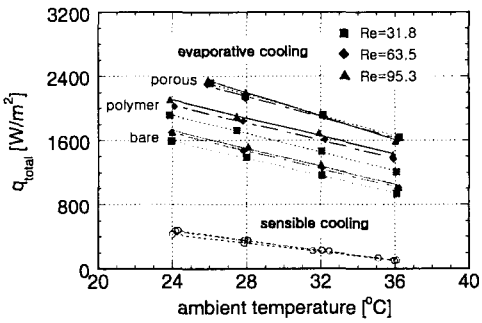
	unit	condition	accuracy
ambient condition	temperature [℃]	24, 28, 32, 36	± 0.1 ℃
	RH [%]	30, 50, 70	± 0.5 %
	air velocity [m/s]	1.5	± 3 %
hot water	temperature [℃]	40	± 0.1 ℃
	flow rate [lpm]	1.0	± 3 %
evaporation water	flow rate [lpm]	0.1, 0.2, 0.3	± 3 %

경사판을 증발 냉각하는 증발수는 경사판 상부에 설치된 증발수 분배기로부터 공급되어 경사판을 흘러내린 뒤, 경사판 하부에 설치된 증발수 수조에 모여 순환펌프로 다시 증발수 분배기로 순환되도록 하였다.

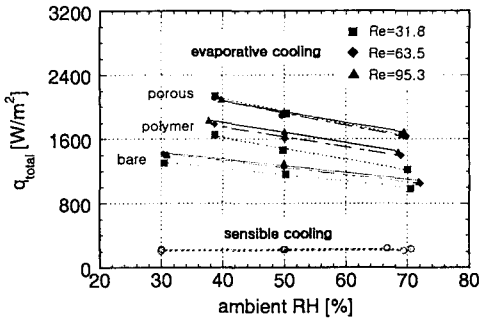
온수 재킷과 알루미늄 평판 사이의 중앙과 모서리에 5개의 열전대를 부착하여 평판의 온도분포를 측정하였다. 온수 재킷의 중앙 입구로 공급되는 온수는 항온조를 이용하여 40℃를 유지하였으며, 로타메타로 유량을 조절하였다. 온수 재킷를 통과한 온수는 두 개의 출구를 통해 열교환기를 빠져나와 항온조로 재순환하도록 하였다.

평판표면에 Fig. 4 (b)와 같이 유동단면(320 mm×80 mm)이 일정한 덕트를 설치하였다. 덕트 아랫부분에 열선유속계를 설치하여 평균유속을 측정하였으며, 윗부분에는 횡류팬을 두어 공기유속을 조절하였다. 공기의 온도는 덕트 상류와 하류의 각각 2곳에 열전대를 설치하여 취득하였고, 온도를 측정한 네 부분에서 각각 동일한 양의 공기를 샘플링하여 이슬점온도를 측정하였다.

평판 표면에 증발수를 뿌려주는 증발수 분배기는 동판에 15 mm 간격으로 직경 1 mm의 구멍을 내어 제작하였으며, 경사판의 윗부분에 접촉시켜 물이 흘러내리도록 하였다. 증발수의 순환유량은 로타메타를 이용하여 조절하였다. 증발수 분배기 양쪽에 열전대를 설치하여 증발수 공급온도를 측정하고, 경사판 하부에 물받이를 설치하여 증발과정 후의 증발수 회수 온도를 측정하였다. 증발과정 전후의 증발수의 온도 차이에 따른 수냉 효과를 제거하기 위하여 증발수 수조 내



ambient RH : 50%



ambient temperature : 32℃

Fig. 5 Effects of ambient conditions on the total heat flux.

에 전기히터를 설치하여 증발수 공급 온도를 증발과정 후의 증발수 회수 온도와 같도록 제어하였다. 또한, 열손실을 막기 위해 증발 냉각 면적을 제외한 열교환기와 수조를 20 mm 두께의 스티로폼으로 단열하였다.

유동 공기의 온습도와 증발수의 유량을 변화시키며 실험하였으며, 실험조건을 Table 2에 정리하였다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 열유속

주어진 실험조건에서 경사판으로부터의 증발열전달 열유속은 다음과 같이 온수측 열량으로부터 구하였다.

$$q_{total} = \dot{m}_h C_{p,h}(T_{h,i} - T_{h,o})/A \qquad (2)$$

Fig. 5는 표면처리하지 않은 알루미늄 평판과 친수성 폴리머로 코팅한 평판, 그리고 다공물질로 코팅한 평판에서 각각 주위 유동 공기의 온습도와 증발수의 유량이 변화할 때 총열유속을 나타낸 것이다. 다공물질로 코팅한 표면의 총열유속이 가장 크게 나타났고, 처리하지 않은 알루미늄 표면의 총열유속이 가장 작게 측정되었다. 총열전달량은 처리하지 않은 표면에 비해 친수성 폴리머로 코팅한 평판이 시험 범위에서 평균 28% 향상되었고, 다공물질 코팅 평판이 평균 54% 향상되었다. 각 표면별로 열유속이 크게 차이 나는 이유는 표면 조건에 따라 젖음도의 차이가 크기 때문이다.

한편 증발수를 공급하지 않을 때의 열전달량도 Fig. 5에 함께 나타내었는데, 표면의 특성에 관계없이 거의 동일함을 알 수 있다. 이는 코팅의 두께가 매우 얇아 그에 따른 열저항의 증가가 매우 작음을 의미한다.

4.2 열 및 물질전달계수

젖음도의 차이는 표면으로부터의 증발량의 차이와 직접적으로 관련되며, 결과적으로 표면으로부터의 열전달량에 큰 영향을 미치게 된다. 습표면을 포함하는 경사진 평판에서의 열전달은 건표면에서의 열전달과 습표면에서의 열 및 물질전달의 합으로 이루어지며 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

Table 3 Heat and mass transfer coefficients at various surfaces (Re=31.8~95.3)

	sensible heat transfer		evaporation heat transfer				$\frac{h_m C_{p,c}}{h}$
	h	uncertainty	h	uncertainty	h_m	uncertainty	
bare surface	30	12.4%	36	22.1%	0.053	5.2%	1.49
polymer coated surface	27	12.1%	31	33.7%	0.031	4.7%	1.02
porous layer coated surface	30	12.6%	30	35.9%	0.030	3.6%	1.01

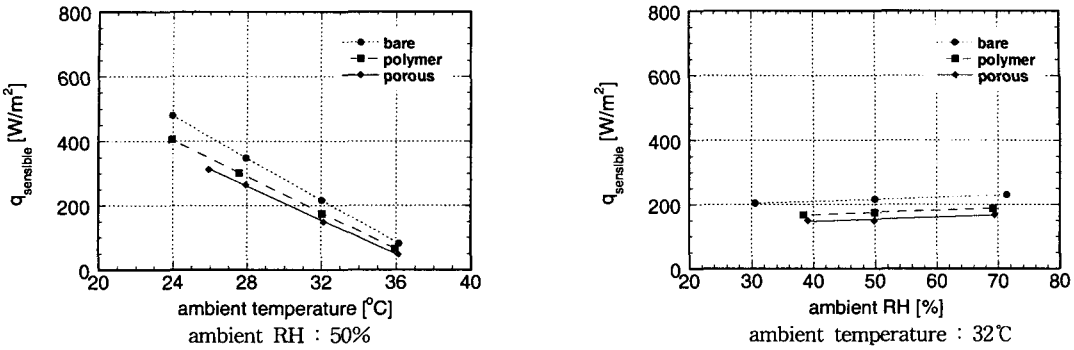


Fig. 6 Variation of the sensible heat flux with respect to the ambient condition.

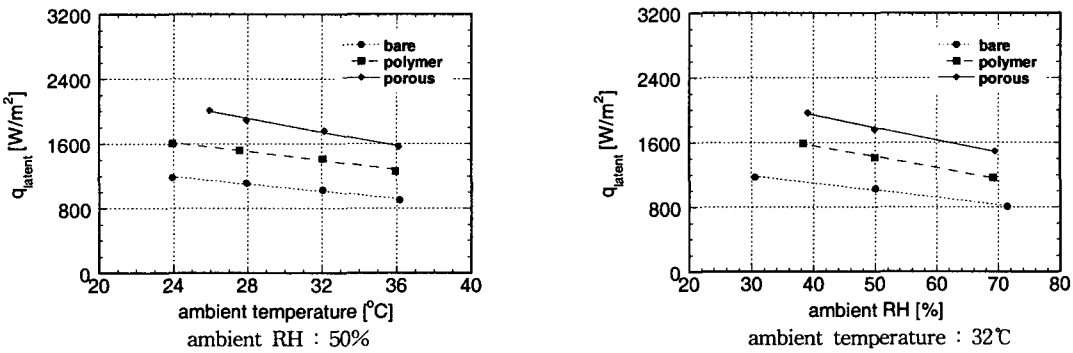


Fig. 7 Variation of the latent heat flux with respect to the ambient condition.

$$q_{total} = q_{sensible} + q_{latent}$$
$$= h\,\sigma(T_w - T_a) + h(1-\sigma)(T_s - T_a) \quad (3)$$
$$+ h_m \sigma(c_w - c_a) i_{fg}$$

건표면의 온도 T_s는 열교환기와 평판 사이에 설치한 5개의 열전대로 측정한 온도의 평균값으로 하였다. 측정 온도 사이의 차이는 온수 재킷의 온수 입출구 온도에 따라 다르지만 최대 평균값으로부터 ±0.7℃이었으며, 평판 중앙에 대하여 대칭적으로 분포되었다. 실제 표면온도와 측정평균 온도의 차이는 접촉 열저항과 평판 자체의 열저항을 고려할 때 0.1℃ 이하로 추정되었다. 습표면의 온도 T_w는 증발수 분배기와 물받이에서 측정한 증발수 온도의 평균값으로 하였다. 습표면에서의 수증기 질량분율 c_w는 습표면 온도에서의 포화 수증기압으로부터, 공기의 수증기 질량분율 c_a는 공기 온도와 상대습도로부터 구하였다.

증발열전달과정의 h와 h_m은 각각의 평판별로 측정된 총열유속과 T_w, T_s, σ 등을 식 (3)에 대입하여 최소오차자승법으로 구하였으며 결과를 Table 3에 나타내었다.

식 (3)으로부터 최소오차자승법으로 구한 h_m의 불확실도는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{\Delta h_m}{h_m} = \frac{1}{h_m}\sqrt{\sum_i^n \left(\frac{\partial h_m}{\partial x_i}\Delta x_i\right)^2 + \left(\frac{\partial h_m}{\partial y_i}\Delta y_i\right)^2} \quad (4)$$

여기서 i는 각 데이터를 의미하고, n은 데이터의 총개수이다. x_i와 y_i는 식(3)을 기울기 h_m과 y 절편 h를 갖는 일차 선형식의 형태로 정리하였을 때의 변수에 해당하는 것으로 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$x_i = \frac{\sigma(c_w - c_a) i_{fg}}{\sigma(T_w - T_a) + (1-\sigma)(T_s - T_a)} \quad (5)$$

$$y_i = \frac{q_{total}}{\sigma(T_w - T_a) + (1-\sigma)(T_s - T_a)} \quad (6)$$

한편 h의 불확실도는 식(4)에서 구한 h_m의 불확실도를 이용하여 식(3)으로부터 직접 구할 수 있으며, 그 결과를 Table 3에 같이 나타내었다.
열전달계수의 불확실도는 현열열전달만 있는 경우 12%정도이며, 증발열전달의 경우에는 더욱 커서 22~35%로 분석되었다. 이 값은 물질전달계수의 불확실도에 비교하여 매우 큰 것을 알 수 있는데, 이는 증발열전달의 경우 잠열 열전달량에 비해 현열 열전달량이 매우 작기 때문이다. 젖음도가 증가할수록 잠열 열전달량이 증가하기 때문에 젖음도가 가장 큰 다공물질 표면에서 열전달계수의 불확실도가 가장 크게 나타났다.

다공물질로 코팅한 평판에서는 현열열전달의 경우와 증발열전달의 경우에서 열전달계수가 거의 같았으며, 물질전달과 열전달의 비를 나타내는 $h_m C_{p,a}/h$가 1.0 이었다. 한편 표면처리하지 않은 평판에서는 증발열전달의 경우 열전달계수가 다공물질로 코팅한 표면에 비해 약 20% 크며, 물질전달계수는 약 80% 증가하여, 열전달에 대한 물질전달의 비가 1보다 매우 크게 나타났다.
증발열전달과정에서 표면처리하지 않은 평판의 열전달계수와 물질전달계수가 큰 이유는 증발수의 유동이 리블렛 형태가 되어 물줄기 자체가 공기유동을 교란할 뿐만 아니라 습표면이 반타원형 모양으로 되어 실질적인 열 및 물질전달 면적이 증가하기 때문이다.[7] 더욱이 물질전달에 있어서는 물줄기 상부의 물질전달 경계층이 주위 건표면의 영향으로 얇아지기 때문에 습표면에서의 국부 물질전달계수가 크게 증가하게 된다.

한편 친수성 폴리머로 코팅한 평판의 경우에는 물줄기가 평탄해 지고, 습표면의 폭이 건표면의 폭보다 매우 넓기 때문에 물질전달 경계층의 변화도 미약하여 열 및 물질전달계수는 다공물질로 코팅한 경우와 거의 유사하게 된다.

Fig. 6은 Table 3의 h값과 식(3)을 이용하여 증발열전달인 경우의 현열 열유속을 계산하여 나타낸 것이며, Fig. 7은 총열유속에서 계산된 현열 열유속을 빼서 잠열 열유속만의 크기를 나타낸 것이다. 이 그림에서 증발수 유량에 따른 차이는 고려하지 않고, 평균값만을 나타내었다.

Fig. 6과 7의 비교로부터 잠열 열유속이 현열 열유속에 비하여 4배 이상 큰 것을 알 수 있다. Fig. 6에서 표면 특성에 따라 현열 열유속의 크기에 차이가 있는 것은 열전달계수가 표면 특성에 따라 서로 다르기 때문이다. 잠열 열유속은 젖음도와 직접적으로 관련되므로 다공물질로 코팅한 평판에서 가장 크게 나타났다. 한편 처리하지 않은 평판에서는 물질전달계수의 증가로 인하여 젖음도가 작은 만큼 잠열 열유속이 감소하지는 않았다. 결과적으로 처리하지 않은 평판에 비하여 잠열 열전달량이 친수성 폴리머로 코팅한 평판에서는 평균 38% 증가하였으며, 다공물질로 코팅한 표면에서는 평균 73% 증가하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 증발열전달의 주요 인자인 표면의 젖음도 차이로 인한 증발 열전달량의 향상 정도를 규명하기 위하여 기울어진 평판에서 순환유량과 주위 온습도를 변화시키며 실험하였다. 결론은 다음과 같다.

1) 처리하지 않은 표면에 비하여 젖음도가 친수성 폴리머로 코팅하였을 때 140%, 다공 물질로 코팅하였을 때 230% 향상되었다.

2) 물질전달계수는 증발수의 유동형태에 따라 크게 달라지며 젖음도가 감소할수록 증가하였다.

3) 잠열 열전달량은 처리하지 않은 표면에 비하여 친수성 폴리머로 코팅하였을 때 38%, 다공물질로 코팅하였을 때 73% 증가하였다.

이상에서 정리한 바와 같이 다공물질 코팅이 기존의 친수성 폴리머 코팅보다 젖음도와 증발열전달 향상에 효과적이며, 코팅 두께가 수십 μm 정도이면 되므로 복잡한 형상의 표면에서도 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 국민대학교 2004년도 교내연구비의 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. Kim, N. H., 1998, Enhancement of thin film evaporation on low-fin tubes, Korean J. Air-Conditioning Refrig. Engineering. Vol. 10,

No. 6, pp. 674-682.
2. Wang, T. A. and Reid, R. L., 1996, Surface wettability effect on an indirect evaporative cooling system, ASHRAE Transactions, Vol. 102, No. 1, pp. 427-433.
3. Kim, H .Y. and Kang, B. H., 2003, Effects of hydrophilic surface treatment on eva- poration heat transfer at the outside wall of horizontal tubes, Applied Thermal Eng- ineering, Vol. 23, pp. 449-458.
4. Schmuki, P. and Laso, M., 1990, On stability of rivulet flow, J. Fluid Mech., Vol. 215, pp. 125-143.
5. Yan, W. M. and Soong, C. Y., 1995, Con- vective heat and mass transfer along an inclined heated plate with film evaporation, Int. J. of Heat Mass Transfer, Vol. 38, No. 7, pp. 1261-1269.
6. Karapantsios, T. D. and Karabelas, A. J., 1995, Longitudinal characteristics of wavy falling films, Int. J. Multiphase Flow, Vol. 21, No. 1, pp. 119-127.
7. Zheng, G. S. and Worek, W. M., 1996, Method of heat and mass transfer enhance- ment in film evaporation, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 39, No. 1, pp. 97-108.