

## 접촉각이 유하액막 특성에 미치는 영향에 관한 실험적 연구

김 경 희, 강 병 하\*, 이 대 영\*\*

국민대학교 대학원, \*국민대학교 기계·자동차공학부, \*\*한국과학기술연구원 열유동제어연구센터

### An Experimental Study on the Effects of Contact Angle on a Falling Liquid Film

Kyung Hee Kim, Byung Ha Kang\*, Dae-Young Lee\*\*

Graduate School, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

\*School of Mechanical and Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

\*\*Thermal/Flow Control Research Center, KIST, Seoul 136-701, Korea

(Received January 4, 2006; revision received September 19, 2006)

**ABSTRACT:** Vertical falling liquid film is extensively used in heat and mass transfer processes of many applications, such as evaporative coolers, cooling towers, and absorption chillers. In such cases, it is required that the falling film spreads widely in the surface forming thin liquid film to enlarge contact surface. An addition of surface active agent to a falling liquid film or hydrophilic surface treatment affects the fluid physical properties of the film. Surfactant addition not only decreases contact angle between the liquid and solid surface but also changes the surface from hydrophobicity to hydrophilicity. In this study, the effects of contact angle on falling film characteristics over a vertical surface have been investigated experimentally. The contact angle is varied either by an addition of surfactant to the liquid or by hydrophilic surface treatment. It is found that the wetted area is increased and film thickness is decreased by the hydrophilic treatment as compared with those of other surfaces. With this hydrophilic treatment, the falling liquid film spreads out widely in the surface. As surfactant concentration is increased, wetted area is also increased and the film thickness is substantially decreased.

**Key words:** Falling liquid film(유하액막), Contact angle(접촉각) Wettability(젖음성), Vertical flat plate(수직 평판)

#### 기 호 설 명

$A$  : 젖음면적(wetted area) [ $m^2$ ]  
 $h_m$  : 평균 유하액막 두께 [mm]  
 $L$  : 유하액막의 폭 [m]  
 $\dot{m}$  : 질량유량 [kg/s]

$Re_f$  : Film Reynolds 수,  $4\Gamma/\mu$   
 $Q$  : 유량 [L/min]  
 $V_P$  : 평판 위의 수용액의 부피 [ $m^3$ ]

#### 그리스 문자

$\Gamma$  : 단위폭당 질량유량 [kg/m·s]  
 $\mu$  : 점성계수 [ $N\cdot s/m$ ]  
 $\rho$  : 밀도 [ $m^2/s$ ]

† Corresponding author

Tel.: +82-2-910-4681; fax: +82-2-910-4839

E-mail address: bhkang@kookmin.ac.kr

## 1. 서 론

유하액막으로부터의 열 및 물질전달 과정은 물의 잠열을 이용하여 효과적인 냉각성을 발휘할 수 있기 때문에 냉각탑, 증발식 냉각기, 흡수식 냉동기, 증류공정 등 여러 가지 기술 분야에서 찾아볼 수 있다. 현재 이러한 열시스템은 열전달 성능의 향상뿐만 아니라 친환경적인 구동과 소비 전력의 절감을 함께 요구받고 있다. 특히, 재생증발식 냉방시스템은 선풍기 정도의 전력소비로 우리나라와 같이 고온 다습한 기후에서도 25℃ 이하의 공기를 공급할 수 있으며, 프레온과 같이 환경적인 악영향을 끼치는 냉매가 필요 없고 실외기가 필요 없는 등의 장점을 가지고 있다.<sup>(1)</sup>

그러나 이 냉방기의 핵심부분인 증발식 냉각기는 기본적으로 공기와 공기 사이의 열교환기 형태이므로 기존 전기식 에어컨에 적용되는 동일한 냉각용량의 열교환기에 비하여 상대적으로 크기가 2배 가까이 커지는 문제가 있다. 그러므로 이 기기의 실용화를 위해서는 증발 열전달을 촉진시켜 증발식 냉각기를 소형화하는 것이 필요하다. 이러한 시스템의 경우, 고체 표면의 젖음성이 중요한 인자로서 작용하며 젖음성의 향상은 증발냉각 성능의 향상으로 직결된다.<sup>(2)</sup>

수직 평판에서 액체의 흐름은 액체의 유량과 고체 표면 특성에 따른 접촉각 등의 영향으로 다양한 형태의 흐름을 갖는다. 젖음도를 향상시키기 위하여 단순히 물의 유량을 증가시키는 방법은 불필요한 순환유량의 증가를 야기하기 때문에 습 표면의 두께가 두꺼워져서 열저항이 커지고, 구동에너지 소모가 증가된다.<sup>(3)</sup> 따라서 고체 표면과 액체의 접촉각을 감소시켜 젖음도를 향상시키는 방법이 연구되어 왔다. 접촉각을 감소시키는 방법은 크게 나누어 고체의 표면처리와 액체에 계면활성제를 첨가시키는 방법이 있다.

고체의 표면 특성에 관한 연구로서는 Drosos et al.<sup>(4)</sup>이 부드러운 표면조건을 가진 사각채널을 이용하여 유하액막의 발달 특성에 관한 연구를 수행, 계면장력이 감소할수록 액막 두께가 감소함을 보였고, Wang et al.<sup>(5)</sup>은 간접 증발식 냉각기에서 냉각기 표면의 젖음성이 성능에 미치는 영향을 연구하였다. 또한, Kim and Kang<sup>(6)</sup>은 흡수식 냉동기의 증발기를 모사한 다양한 형태의 수평 튜브에서 친수성 폴리머로 코팅하였을 때

증발 열전달 성능이 향상됨을 보였다.

계면활성제를 첨가한 연구로서는 Pierson and Whitaker<sup>(7)</sup>가 실험을 통하여 소량의 계면활성제를 첨가하여 액막의 유동 특성을 제어하는 과정을 보이고, 이론적인 계산을 통하여 유동 특성을 예측할 수 있는 상관식을 제안하였다. 또한, 계면활성제를 첨가함으로써 유하액막을 안정화시킬 수 있음을 Nordgren and Setterwall<sup>(8)</sup>이 실험을 통하여 제시하였고, 이때 계면활성제의 농도가 액막의 형성에 중요한 인자임을 보였다.

계면활성제의 첨가와 고체 표면의 친수성처리는 막의 물리적 성질을 변화시켜 액체와 고체면 사이의 표면에너지를 감소시킨다. 이에 따라 접촉각이 감소하여 액체에 의해 고체 표면에 접촉되는 면적이 증가하며, 이러한 젖음성의 향상으로 증발냉각 성능을 향상시키는 데 기여할 수 있다.

본 연구에서는 표면 특성과 계면활성제의 농도에 변화를 주어 고체 표면과 액체의 접촉각을 변화시키고자 하였다. 수직 평판 위에서 유하액막 유동의 물리적 모델이 Fig. 1에 나타나 있다. 유하액막의 자연스러운 흐름을 유도하였으며, 수직 평판 표면에 얇은 막이 형성되는 경우, 접촉각이 감소할수록 동일 유량에서보다 얇은 액막으로 표면을 덮어 젖음도를 향상시킬 수 있다. 따라서 본 연구에서는 접촉각 변화에 따른 유하액막의 유동 특성뿐만 아니라 증발 성능을 향상시키기 위한 표면의 젖음성 향상을 실험을 통하여 규명하고자 한다.

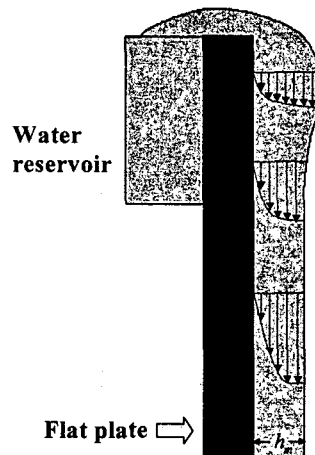


Fig. 1 Physical model of falling film.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 실험장치

Fig. 2는 유하액막 실험장치를 개략적으로 나타낸 그림이다. 실험장치는 크게 액막 형성부와 유량 공급부로 구성되어 있다. 액막은 3 mm 두께의 수직 평판(200 mm × 250 mm) 표면에 형성되며, 액막을 관찰하기 위한 투명 아크릴판(200 mm × 250 mm)을 설치하였다. 이때 수직 평판은 표면을 달리하기 위하여 탈부착이 가능하도록 하였다. 공급수의 유량은 로타미터(Blue White Co., F-50376LN)를 이용하여 조절하였으며, 정확한 유량의 측정을 위해 초시계와 비커, 메스실린더를 이용하여 60초간 측정된 유량의 평균값을 이용하여 유량계를 보정하였다. 이에 따른 유량계의 측정 오차는 ±3% 이내로 나타났다. 또한 평판 밑에 수조를 두어 흘러내린 액체를 DC 펌프를 이용하여 재순환시켰다.

평판의 상부로부터 유하액막의 자연스러운 흐름을 유도하기 위해 Fig. 1과 같이 수직 평판 상부 후면에 작은 수조(200 mm × 100 mm)를 설치하였다. 또한 모든 실험관찰은 고속 카메라(Photon Fastam 1K)를 이용하여 이루어졌다.

### 2.2 실험조건 및 방법

실험은 서로 다른 세 가지 표면조건을 가지는 평판 위에 순수한 물을 흘려주어 액막의 유동 특

성을 분석하였다. 이에 이어서 고정된 하나의 수직 평판에서 계면활성제 농도에 변화를 주어 유하액막에 미치는 영향을 분석하는 과정으로 실험이 수행되었다. 실험의 변수로서 유량은 1.8~4.8 L/min의 범위에서 0.6 L/min 간격으로 변화시키면서 실험을 수행하였고, 표면은 PET(Polyethylene Terephthalate), 알루미늄, 친수성 처리된 PP 필름의 세 가지 평판이 사용되었으며, 계면활성제는 약 1,000 ppm의 포화농도를 가지는 Triton X-100 [C<sub>8</sub>H<sub>17</sub>C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>(OCH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>)OH]을 사용하였다. 또한 농도에 따른 영향을 분석하기 위하여 농도를 0 ppm, 100 ppm, 500 ppm, 1,000 ppm 등으로 변화시켜 연구를 수행하였다. 이때 소량의 계면활성제를 첨가하였기 때문에 계면활성제를 첨가한 후의 밀도와 점성계수는 순수한 물의 경우와 동일한 것으로 간주하였다.

세 가지 평판의 접촉각과 계면활성제의 농도에 따른 접촉각은 각각의 수용액의 동일 부피를 가지는 액적을 평판 위에 떨어뜨려 고속 카메라를 이용하여 촬영한 후 각도기로 측정하였다. 이때 떨어진 물방울이 시간경과에 따른 증발로 접촉각이 줄어드는 것을 방지하기 위해 액적을 떨어뜨린 후 10초 이내로 측정하였다. 사용한 각도기는 0.5° 눈금을 가지고, 측정 횟수별 접촉각의 평균값은 신뢰도 95%에서 표준편차가 1.25° 이내다. 또한 유하액막의 평균 두께  $h_m$ (film thickness)를 측정하기 위한 계산식은 다음과 같이 표현된다.

$$V_P = Q \times t$$

$$h_m = \frac{V_P}{A}$$

유하액막이 수직 평판의 위에서 아래까지 흐를 때 걸리는 시간  $t$ , 평판 위에 존재하는 수용액의 부피  $V_P$ , 젖은 평판의 면적  $A$ , 펌프에 의해 공급되는 유량  $Q$ 에 의해 표현된다. 여기서 유하액막의 두께  $h_m$ 은 수직 평판 전체의 평균 두께를 의미하며, 수직 평판의 위에서 아래까지 흐를 때 걸리는 시간  $t$ 는 작은 크기의 부유물을 액막의 표면에 흘리고, 이에 관한 영상을 고속 카메라로 취득하여 측정하였다. 또한 유하액막의 형상은 중력의 영향으로 사다리꼴의 형태를 갖게 되므로 젖은 평판의 면적  $A$ 는 사다리꼴의 적분공식에 의해 구하였다.

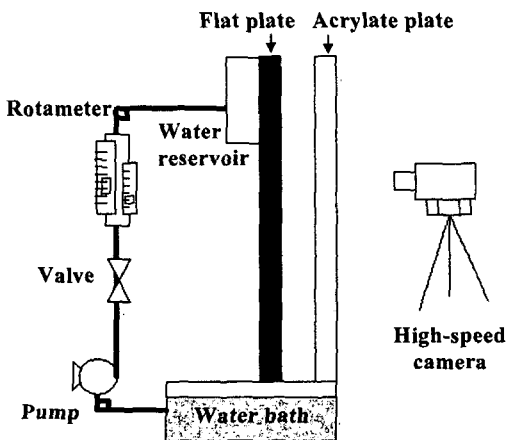
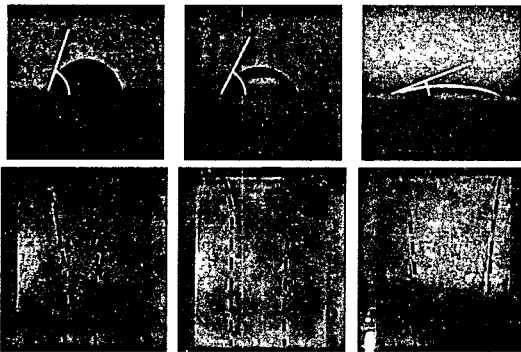


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup.

3. 실험결과 및 검토

Fig. 3은 세 가지의 서로 다른 평판 위에 같은 부피의 액적을 떨어뜨린 접촉각과 물을 흘려 주었을 때의 젖음면적(wetted area)을 나타낸 것이다. 액체방울이 고체 표면과 더불어 형성하는 각이 접촉각이라는 용어로 정의되며, (a), (b), (c)는 각각 PET 필름, 알루미늄 평판, 친수성 처리된 PP 필름으로서 각각의 접촉각은 71°, 67°, 16°으로 나타났다. 그림에서 나타난 바와 같이 접촉각이 감소할수록 젖음면적이 증가하고 있음을 알 수 있다. 동일 유량에서 각각의 젖음면적은 0.020 m<sup>2</sup>,



(a) PET film (b) Aluminum plate (c) Hydrophillic modified PP film

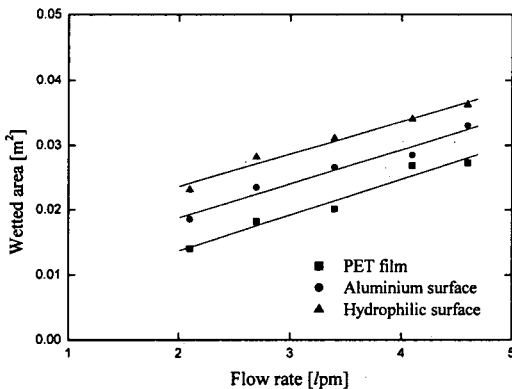
Fig. 3 Photographs of droplet and flow pattern for various surfaces.

0.026 m<sup>2</sup>, 0.034 m<sup>2</sup>의 결과를 보였고, 유하액막의 두께는 0.59 mm, 0.47 mm, 0.42 mm로 친수성 처리된 PP 필름은 PET 필름에 비해서 젖음면적은 56% 증가하였고, 액막의 두께는 29% 감소하는 결과를 보였다. 세 가지 다른 평판에서 유량이 젖음면적과 액막 두께에 미치는 영향을 Fig. 4에 나타내었다. 세 가지 평판 모두 유량이 증가함에 따라 젖음면적과 액막 두께가 증가하고 있다.

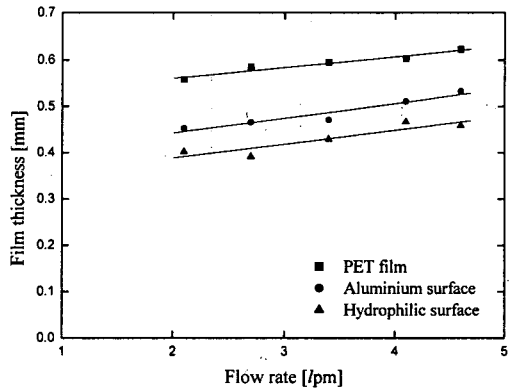
접촉각은 고체 표면의 젖음성을 나타내는 척도로서 이용될 수 있으며, 낮은 접촉각은 좋은 젖음성을 나타내는 반면, 높은 접촉각은 약한 젖음성을 나타낸다. 이러한 접촉각의 감소는 유하액막의 유동에 영향을 미치게 된다. 이러한 결과를 바탕으로 접촉각의 영향을 보다 면밀히 알아보고자 계면활성제의 농도변화에 따른 실험을 수행하였다. 앞선 실험과 동일한 방법으로 각 농도에서의 접촉각이 측정되었다.

Fig. 5는 계면활성제를 첨가한 동일 부피의 액적의 사진을 보여주고 있으며, 계면활성제의 농도가 증가함에 따라 넓게 퍼지고 있음을 알 수 있다. 계면활성제의 농도변화가 접촉각에 미치는 영향을 Fig. 6에 나타내었다. 계면활성제의 농도가 증가함에 따라 접촉각은 작아지는 경향을 보이고 있으며, 700 ppm 이상에서는 접촉각에 대한 계면활성제의 영향이 상대적으로 작아짐을 알 수 있다.

수직 평판에서의 유하액막은 중력의 영향을 받기 때문에 앞서 언급한 바와 같이 평판 하부로 갈수록 그 흐름의 폭이 좁아지면서 사다리꼴의 형상을 보인다. 이 결과를 Fig. 7에 시각화하여



(a) Wetted area



(b) Film thickness

Fig. 4 Effect of flow rate on wetted area and film thickness.

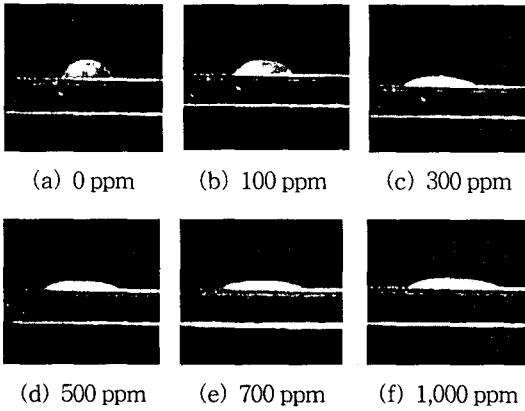


Fig. 5 Photographs of droplet for surfactant solutions.

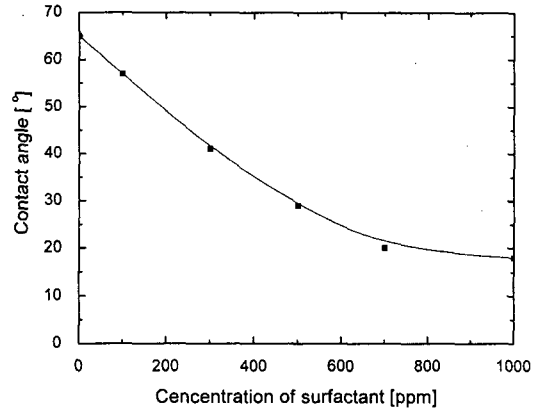


Fig. 6 Effect of surfactant concentration on surface contact angle.

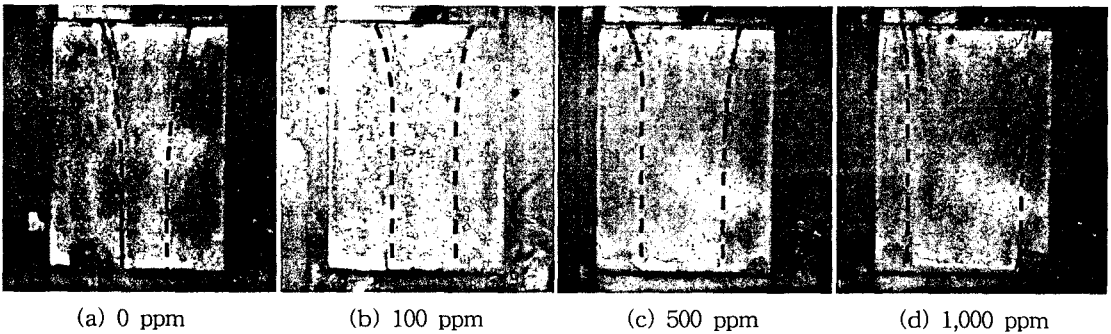


Fig. 7 Photographs of flow pattern by an addition of surfactant.

나타내었으며, 이때 유량은 3 L/min으로 동일하고 계면활성제의 농도가 증가함에 따라 수용액이 평판 위를 적시는 면적이 증가하고 있다. 계면활성제를 첨가하지 않은 경우 젖음면적은 0.022 m<sup>2</sup>로 전체 면적의 50%도 되지 않는 반면에 계면활성제의 농도가 100 ppm, 500 ppm, 1,000 ppm으로 증가함에 따라 젖음 면적도 각각 0.026 m<sup>2</sup>, 0.031 m<sup>2</sup>, 0.038 m<sup>2</sup>로 나타났다. 계면활성제의 농도가 1,000 ppm의 경우는 전체 면적의 약 76%를 덮고 있다. 이는 계면활성제를 첨가하지 않은 경우보다 젖음면적이 약 73% 향상되었음을 알 수 있다.

Fig. 8은 유량의 변화에 따른 젖음 면적의 변화를 나타낸 것이다. 유량이 증가함에 따라서 각 농도에서의 젖음면적은 증가하는 경향을 보이고 있으며 유량이 증가할수록 젖음면적의 증가율은 작아진다. 계면활성제의 농도가 클수록 유량의 증가에 의한 젖음면적의 변화가 작게 나타남을 볼

수 있는데 이로써 고농도일수록 유량의 영향을 적게 받음을 알 수 있다.

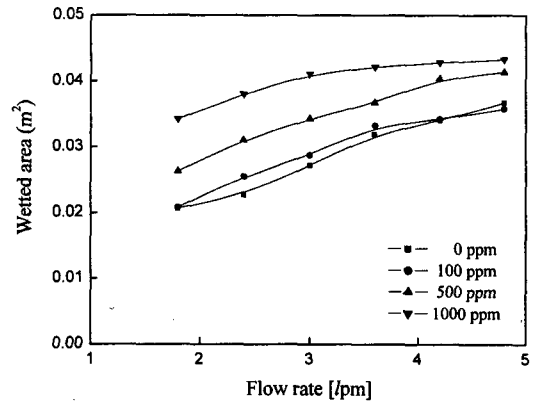


Fig. 8 Effect of flow rate on wetted area for variation surfactant concentrations.

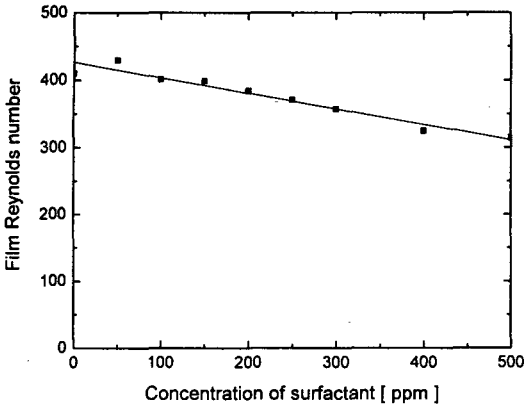


Fig. 9 Effect of surfactant concentration on film Reynolds number.

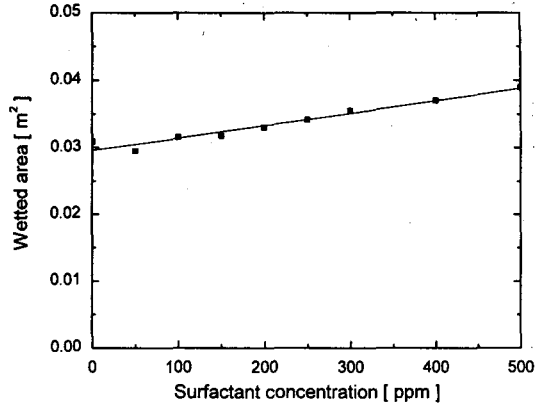
얇은 막의 경우, 단위폭당 질량유량을 이용하여 막 Reynolds 수,  $Re_f$ 를 구할 수 있다. 계면활성제의 농도에 따른 막 Reynolds 수를 펌프에 의해 공급되는 유량  $Q$ , 유하액막의 폭  $L$ , 단위폭당 질량유량  $\Gamma$ 에 의해 다음과 같이 표현되는 식으로 구하여 Fig. 9에 나타내었다.

$$\Gamma = \frac{\rho Q}{L}$$

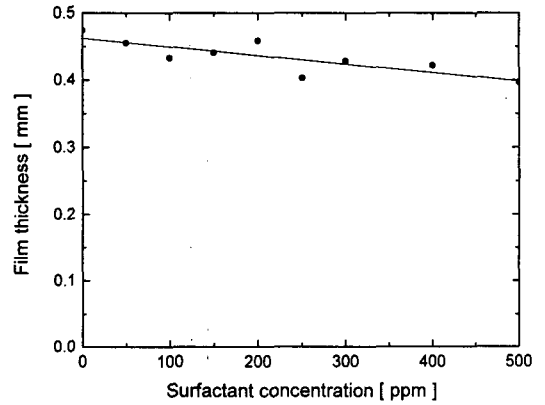
$$Re_f = \frac{4\Gamma}{\mu}$$

유량의 영향을 배제하여 동일 유량인 3.4 L/min에서 농도의 영향을 살펴보았으며, 계면활성제의 농도가 증가할수록 막 Reynolds 수는 감소하는 결과를 얻었다. 본 실험에서 유동 불안정성은 거의 발생하지 않았으며, 액막이 갈라지지 않는 범위를 유량범위로 채택하였기 때문에 젖음면에서 액막은 전체를 덮고 있었다. Fig. 10은 유량이 3.4 L/min일 때 계면활성제의 농도변화에 따른 젖음면적과 유하액막의 두께변화를 나타낸 것이다. 계면활성제의 농도가 증가할수록 젖음면적의 크기가 증가하고 유하액막의 두께는 감소하고 있다. 계면활성제를 첨가하지 않은 경우와 비교하여 액막의 두께는 500 ppm의 농도에서 약 15% 정도 감소하였다.

표면의 특성을 변화시키거나 수용액에 계면활성제를 첨가시킴으로써, 두 가지 방법으로 변화시킨 접촉각을 기준으로 젖음면적과 액막의 두께에 미치는 영향을 Fig. 11에 나타내었다. 이때 유



(a) Wetted area



(b) Film thickness

Fig. 10 Effects of surfactant concentration on wetted area and film thickness.

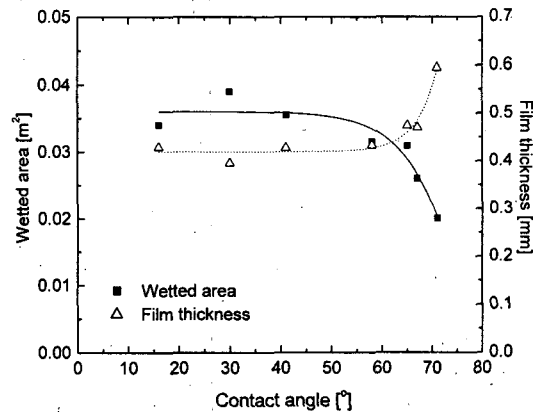


Fig. 11 Effects of contact angle on wetted area and film thickness.

량은 3.4 L/min으로 동일하다. 접촉각이 감소함에 따라서 젖음면적은 증가하고 유하액막의 두께는 감소하는 경향을 보였으며, 접촉각이 60° 이상에서 젖음면적은 급격히 감소하고 유하액막의 두께는 급격하게 증가하고 있다. 따라서 증발식 냉각기의 소형화를 위해서는 표면 접촉각을 60° 이하로 유지하는 것이 요구된다.

#### 4. 결 론

접촉각이 유하액막의 젖음면적과 두께에 미치는 영향을 실험을 통해 규명하였다. 고체 표면의 친수성 처리와 계면활성제의 첨가는 유하액막의 물리적 성질을 변화시킴으로써 수직 평판과 유하액막 사이의 접촉각을 감소시켰다.

표면을 PET 필름, 알루미늄 평판, 친수성 처리된 PP 필름으로 변화시켜 실험을 수행한 결과 세 가지 평판의 접촉각은 71°, 67°, 16°로 나타났다. 친수성 처리된 PP 필름은 PET 필름에 비해서 젖음면적은 56% 증가하였고, 액막의 두께는 29% 감소하였다. 계면활성제를 첨가하여 계면활성제의 농도에 따른 실험을 수행한 결과 계면활성제를 첨가하지 않은 0 ppm과 비교하여 500 ppm의 농도에서 젖음면적은 30% 증가하였고, 액막의 두께는 15% 감소하였다.

접촉각이 감소함에 따라서 유하액막의 젖음면적은 증가하고 액막의 두께는 감소하였으며, 60° 전후로 급격한 변화를 보였다. 따라서 접촉각을 60° 이하로 유지함으로써 불필요한 순환유량의 증가를 방지할 뿐 아니라 증발냉각 성능을 향상시키기 위한 젖음성의 향상을 기대할 수 있다.

#### 후 기

본 연구는 에너지관리공단 에너지·자원기술개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

1. Stoitchkov, N. J. and Dimitrov, G. I., 1998, Effectiveness of crossflow plate heat exchanger for indirect evaporative cooling, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 21, No. 6, pp. 463-471.
2. Lee, J. W., Lee, D. Y. and Kang, B. H., 2005, An experimental study on the effects of porous layer treatment on evaporative cooling of an inclined surface, *Korean Journal of Air-conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 17, No. 1, pp. 25-32.
3. Karapantsios, T. D. and Karabelas, A. J., 1995, Longitudinal characteristics of wavy falling films, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 38, No. 7, pp. 1261-1269.
4. Drosos, E. I. P., Paras, S. V. and Karabelas, A. J., 2004, Characteristics of developing free falling films at intermediate Reynolds and high Kapitza numbers, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 30, No. 7/8, pp. 853-876.
5. Wang, T. A. and Reid, R. L., 1996, Surface wettability effect in an indirect evaporative cooling system, *ASHRAE Transactions*, Vol. 102, No. 1, pp. 427-433.
6. Kim, H. Y. and Kang, B. H., 2003, Effects of hydrophilic surface treatment in evaporation heat transfer at the outside wall of horizontal tubes, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 23, pp. 449-458.
7. Pierson, F. W. and Whitaker, S., 1977, Some theoretical and experimental observations of the wave structure of falling liquid films, *Ind. Eng. Chem., Fundam.*, Vol. 16, No. 4, pp. 401-408.
8. Nordgren, M. and Setterwall, F., 1996, An experimental study of the effects of surfactant on a falling liquid film, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 19, No. 5, pp. 310-316.

1. Stoitchkov, N. J. and Dimitrov, G. I., 1998,