대한설비공학회 2006하계학술발표대회 논문집 pp.150~155

06-S-024

계면활성제의 농도가 유하액막의 열전달 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 Heat Transfer in a Falling Liquid Film with Surfactant

Kyung Hee Kim, Byung Ha Kang*†, Dae-Young Lee**
Graduate school, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea
**School of Mechanical and Automative Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea*
***Thermal/Flow Control Research Center, KIST, Seoul 136-701, Korea*

ABSTRACT: Falling liquid plays a role in a wide variety of naturally occurring phenomena as well as in the operation of industrial process equipment where heat and mass transfer take place. In such cases, it is required that the falling film should spread widely on the surface forming thin liquid film to enlarge contact surface. An addition of surface active agent to a falling liquid film affects the flow characteristics of the falling film. In this study the heat transfer characteristics for a falling liquid film has been investigated by an addition of the surface active agents. The falling liquid film was formed on a vertical flat plate. As the mass flow rate of liquid falling film is increased, the wetted area is a little increased while the heat transfer rate as well as heat transfer coefficient is significantly increased. It is also found that both wetted area and heat transfer rate is substantially increased while heat transfer coefficient is a little increased with an increase in the surfactant concentration at a given mass flow rate.

Key words: Falling liquid film(유하액막), Surfactant(계면활성제), Wetted area(젖음면적), Heat transfer(열전달), Vertical flat plate(수직평판)

기 호 설 명

A : 젖음 면적(wetted area) [m^2]
h : 열전달계수 [W/m^2K]
$\dot{m}$: 질량유량 [kg/s]
m_{bath} : 수조 내 수용액의 질량 [kg]
$\dot{Q}$: 열전달률 [W]
Q_{bath} : 수조가 취득한 열량 [kJ]
$\triangle T_{lm}$: 대수평균온도차 [K]

그리스 문자

C_p : 비열 [kJ/kg·K]

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

하첨자

bath : 수조
in : 입구측
out : 출구측
s : 판의 표면
w : 수용액

1. 서 론

최근에 냉난방 에너지 수요가 급증하고 환경오염문제가 대두되면서, 현재 열교환기를 비롯한 대부분의 열시스템은 열전달 성능의 향상뿐만 아니라 친환경적인 구동과 소비전력의 절감을 함께 요구받고 있다. 이에 에너지 시스템의 고효율화와 청정에너지의 조기 개발과 연구가 활발히 진행되고 있다. 유하액막으로부터의 열 및 물질전달 과정은 물의 잠열을 이용하여 효과적인 냉각성능을 발휘할 수 있기 때문에 냉각탑, 증발식 냉각기, 흡수식 냉동기, 증류공정 등 여러 가지 기술 분야에서 응용되고 있다. 이러한 시스템의 경우, 고체 표면의 젖음성이 중요한 인자로서 작용하며 젖음성의 향상은 증발 냉각 성능의 향상으로 직결된다.[1]

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 순환 유량의 증가를 야기하기 때문에 습표면의 두께가 두꺼워져서 열저항이 커지고, 구동에너지 소모가 증가된다.[2] 따라서 고체 표면과 액체의 표면에너지를 감소시켜 젖음도를 향상시키기는 방법이 연구되어 왔다.

고체의 표면특성에 관한 연구로서는 Drosos et al.[3]이 유하액막의 발달 특성에 관한 연구를 수행, 계면장력이 감소할수록 액막 두께가 감소함을 보였고, Kim and Kang[4]은 흡수식 냉동기의 증발기를 모사한 다양한 형태의 수평 튜브에서 친수성 폴리머로 코팅하였을 때 증발 열전달 성능이 향상됨을 보였다. 계면활성제를 첨가한 연구로서는 Pierson and Whitaker[5]가 이론적인 계산을 통하여 유동 특성을 예측할 수 있는 상관식을 제안하였다. 또한, 계면활성제를 첨가함으로써 유하액막을 안정화 시킬 수 있음을 Nordgren and Setterwall[6]이 실험을 통하여 제시하였고 이때, 계면활성제의 농도가 액막의 형성에 중요한 인자임을 보였다.

유하액막의 열전달에 관한 기존의 연구로서 Zheng and Worek[7]에 의해 열 및 물질전달을 향상시키는 방법이 연구되었으며, Tsay and Lin[8]은 액막의 증발에 관한 실험을 통해 상관식을 제안하였다.

계면활성제의 첨가와 고체 표면의 친수성처리는 막의 물리적 성질을 변화시켜 액체와 고체면 사이의 표면에너지를 감소시킨다. 이에 따라 접촉각이 감소하여 액적에 의해 고체 표면에 접촉되는 면적이 증가하며, 이러한 젖음성의 향상으로 증발 냉각 성능을 향상시키는데 기여할 수 있다. 그러나 기존에 제시된 연구에서는 계면활성제 첨가에 의한 유동특성 분석에 중점을 두었다.[9] 따라서 본 연구는 계면활성제의 농도에 변화를 주어 농도의 변화에 따른 유하액막의 열전달 특성에 미치는 영향을 실험을 통하여 규명하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

유하액막의 열전달 특성 실험장치를 Fig. 1에 개략적으로 나타내었다. 실험장치는 크게 액막 형성부와 유량 공급부로 구성되어 있으며, 액막

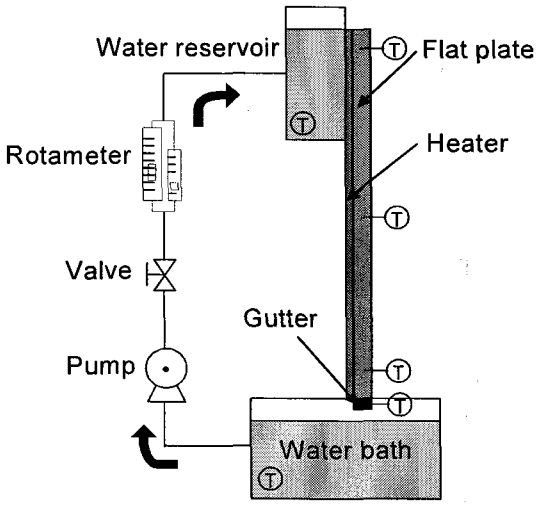


Fig 1. Schematic diagram of experimental setup.

은 3 mm 두께의 알루미늄 수직 평판(220 mm × 270 mm)의 표면에 형성된다. 이 때 평판 뒤에 부착된 가열판(Silicon luver heater)에 일정한 DC전압을 인가함으로써 판을 가열하였다. 평판 표면의 온도를 측정하기 위하여 평판의 후면에 2 mm깊이로 9개의 구멍을 뚫어 각 부분에 T형 열전대를 부착하였으며, 열저항을 최소화하기 위하여 써멀 그리스를 얇게 도포하였다.

공급수의 유량은 로타메타(Blue White Co., F-50376LN)를 이용하여 조절하였으며, 정확한 유량의 측정을 위해 초시계와 비이커, 메스실린더를 이용하여 60초간 측정한 유량의 평균값을 이용하여 유량계를 보정하였다. 이에 따른 유량계의 측정 오차는 ±3% 이내로 나타났다. 또한, 평판 밑에 수조를 두어 흘러내린 액체를 DC펌프를 이용하여 재순환시켰다. 수직 평판 표면에 계면활성제 수용액을 흘려주기 위해 Fig. 1과 같이 알루미늄 판 후면에 작은 수조를 설치하였다. 이는 수용액이 수조를 넘쳐흐르게 함으로써, 평판의 상부로부터 유하액막의 자연스러운 흐름을 유도하기 위함이다.

본 실험에서 모든 온도는 항온조 보정법을 이용하여 ±0.1°C로 보정된 T형 열전대를 이용하여 측정하였고, 열손실을 최소화하기 위하여 액막 형성부를 제외한 모든 부분은 30 mm두께의 단열재를 이용하여 단열하였다. 또한 모든 실험 관찰은 디지털 카메라를 이용하여 이루어졌다.

2.2 실험조건 및 방법

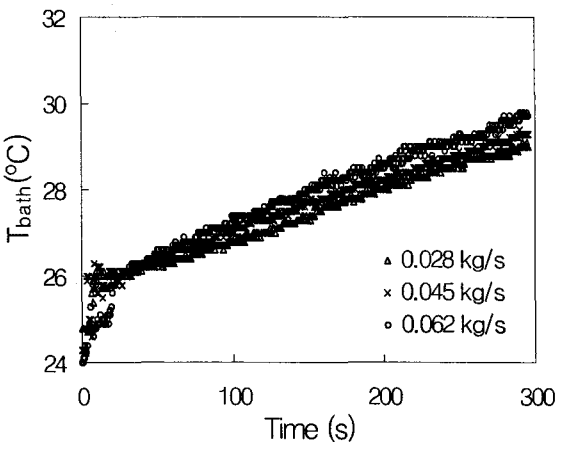
실험의 변수로서 순환 유량은 0.028~0.062 kg/s 의 범위에서 0.008 kg/s 씩 변화시키면서 실험을 수행하였고, 계면활성제는 약 1000 ppm의 포화농도를 가지는 Triton X-100 [$C_8H_{17}C_6H4(OCH_2CH_2)OH$]을 사용하였다. 또한 농도에 따른 영향을 분석하기 위하여 농도를 0~500 ppm으로 변화시켜 연구를 수행하였다. 이 때, 소량의 계면활성제를 첨가하였기 때문에 계면활성제를 첨가한 후의 밀도와 점성계수 등의 물리적 성질은 순수한 물의 경우와 동일한 것으로 간주하였다.

평판 표면의 온도는 평판 후면에 부착된 9개의 T형 열전대의 온도를 측정하여 평균값을 취하였으며, 실제 평판 전면의 온도와 평판의 후면에서 측정된 온도는 2%이하의 온도차를 보였다.

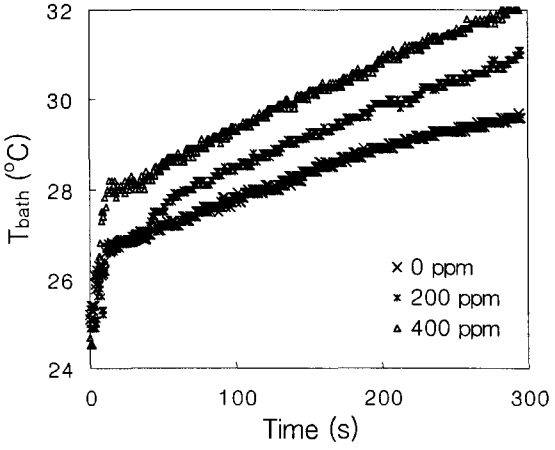
유하액막의 형상은 중력의 영향으로 사다리꼴의 형태를 갖게 되므로 젖은 평판의 면적 A는 사다리꼴의 적분 공식에 의해 구하였다. 실험 데이터는 데이터 취득기(Yokogawa Co. Darwin 230)를 이용하여 0.5초 간격으로 취득하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 2는 각각의 유량과 계면활성제의 농도에 대해 시간에 따른 온도변화를 나타낸 것이다. Fig. 2(a)는 순수한 물을 사용하여 3가지 순환 유



(a) pure water (0 ppm)



(b) mass flow rate $\dot{m}$=0.06 kg/s

Fig. 2 Transient variation of water bath temperature

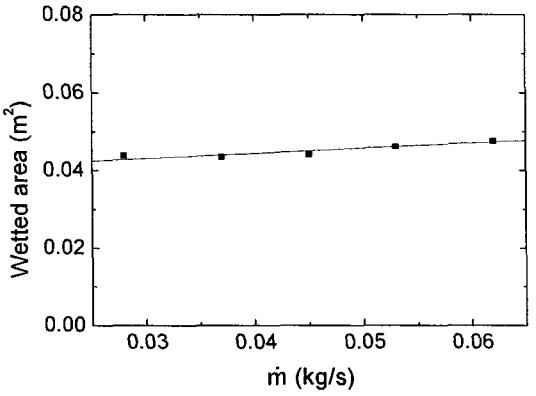


Fig. 3 The change of wetted area for mass flow rate.

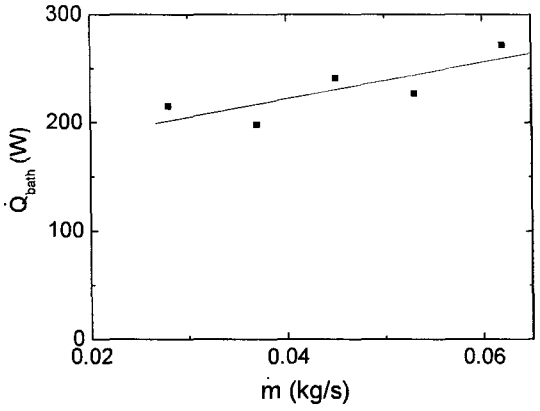


Fig. 4 Effect of mass flow rate on the heat transfer rate.

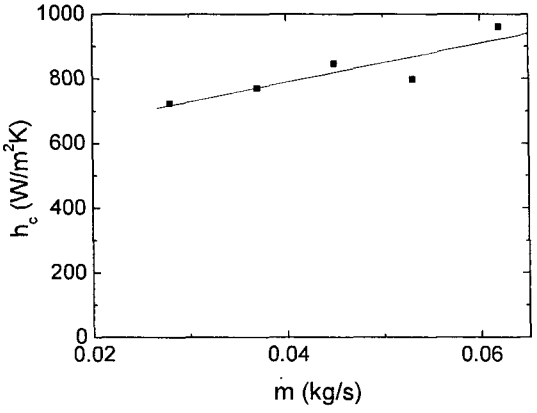


Fig. 5 Effect of mass flow rate on the heat transfer coefficient.

량에 대한 수조의 온도 변화를 나타낸다. 저 유량인 경우에 비하여 고 유량인 경우 기울기가 조금씩 증가함을 알 수 있다. Fig. 2(b)는 일정한 순환 유량에서 3가지 계면활성제 농도에 대한 수조의 온도 변화를 나타낸 것이다. 농도가 높을수록 초기 온도변화가 더 크다는 것을 알 수 있다. 또한, 각각의 경우 시간이 흐름에 따라서 온도는 거의 일정하게 변화하고 있다. 그러므로 수조가 취득한 열량과 열전달률을 식(1)을 이용하여 계산하였다. 여기서 m은 수조 내 수용액의 질량을 의미하며, $\triangle t$는 수조의 온도변화를 측정한 시간이다.

$$Q_{bath} = m C_p \triangle T_{bath} / \triangle t \qquad (1)$$

Fig. 3은 계면활성제를 첨가하지 않은 순수한 물의 경우, 순환 유량의 변화에 따른 젖음 면적(wetted area)의 변화를 나타낸 것이다. 측정된 젖음 면적은 최소값이 0.0438 m^2, 최고값이 0.0475 m^2로서 본 실험의 유량범위에서 10%이내의 변화량을 보인다. 이 때의 유량 증가에 따른 열전달률과 열전달계수의 변화를 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다. 식 (4)는 수직 평판에서 유하액막으로 흡수된 열전달률을 평판과 유하액막의 대류 열전달에 대한 식으로 나타낸 것이다.

$$\triangle T_{lm} = \frac{T_{w,out} - T_{w,in}}{\ln (T_{w,out} - T_{w,in})} \qquad (3)$$

$$Q = h_c A \triangle T_{lm} \qquad (4)$$

여기서 A는 젖음 면적, $\triangle T_{lm}$은 대수평균온도차를 의미하며, 이 때, 평판 전체 표면의 온도는 ±1°C내에서 일정하므로 식 (3)에 정의된다. Q는 앞서 계산된 수조의 열전달률이다. 순환 유량이 증가할수록 열전달량이 증가하고 있으며, 또한 열전달계수도 선형적으로 증가하고 있음을 알 수 있다. 유량의 증가로 인해서 열전달 계수가 증가되고 열전달률이 증가되었음을 알 수 있다. 최저유량 0.028 kg/s일 때에 비하여 최고 유량 0.062 kg/s일 때 열전달률은 26%, 열전달 계수는 33% 증가하였다.

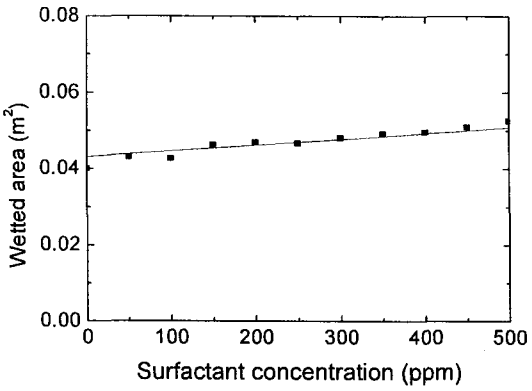


Fig. 6 Effect of the surfactant concentration on the wetted area at $\dot{m}$=0.06 kg/s.

그러나 열전달을 향상시키기 위해서 단순히 물의 유량을 증가시키는 방법은 불필요한 순환 유량의 증가를 야기하기 때문에 습표면의 두께가 두꺼워져서 열저항이 커지고, 구동에너지의 소모가 증가된다. 그러므로 순환 유량의 증가가 아닌 젖음 면적을 증가시키는 방법이 요구되었다. 젖음 면적은 표면의 친수성을 증가시키거나 용액에 계면활성제를 첨가하는 방법이 있다. Fig. 6 ~ Fig. 8은 유량이 0.06 kg/s로 동일한 경우에 대해서 계면활성제의 농도에 변화를 주어 실험을 수행한 결과를 나타낸 것이다.

Fig. 6는 계면활성제를 첨가하여 그 농도의 변화에 따른 젖음 면적의 변화를 보여준다. 계면활성제의 농도가 증가할수록 젖음 면적이 증가하고 있음을 알 수 있다. 계면활성제의 농도가 500 ppm인 경우 젖음 면적은 0.526 m^2로 전체 면적의 88%를 적셨으며, 계면활성제를 첨가하지 않은 경우에 비해서 32%정도 향상되었다. 소량의 계면활성제의 첨가로는 표면에너지를 감소시킴으로써 젖음 면적을 증가시키는 효과를 얻을 수 있다.

계면활성제의 농도변화에 따른 열전달률의 변화를 Fig. 7에 나타냈었다. 계면활성제의 농도가 증가할수록 열전달률이 증가하고 있음을 보인다. 계면활성제를 첨가하지 않은 0 ppm의 경우는 열전달률이 228 W이고, 500 ppm의 경우는 325 W의 결과를 보였으며, 이는 계면활성제를 첨가하지 않은 경우에 비해서 43%정도 증가했음을 나타낸다. 계면활성제의 농도 변화에 따른 열전달

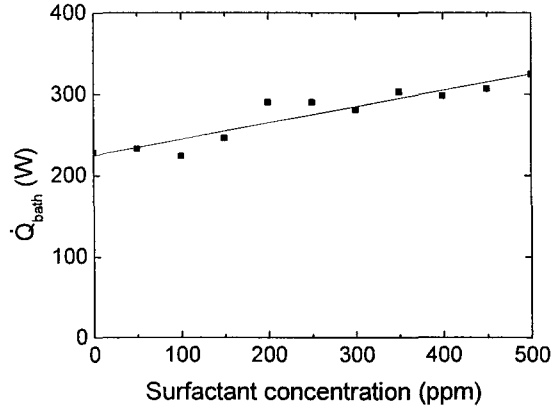


Fig. 7 Effect of the surfactant concentration on the heat transfer rate at $\dot{m}$=0.06 kg/s.

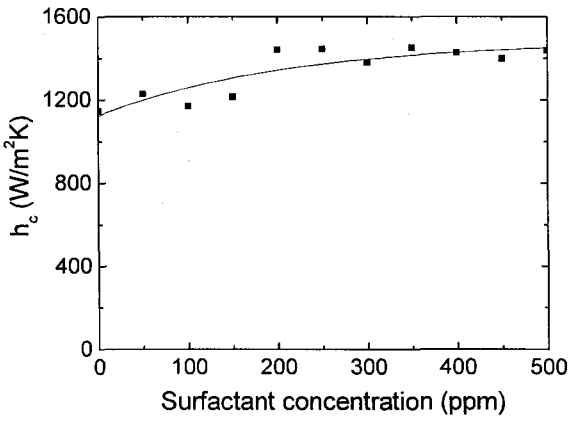


Fig. 8 Effect of the surfactant concentration on the heat transfer coefficient at $\dot{m}$=0.06 kg/s.

계수의 변화는 Fig. 8에서 알 수 있으며, 저농도 영역에서는 조금씩 증가하는 경향을 보였으나, 고농도로 갈수록 그 증가량이 감소하고 300ppm 이상에서는 거의 일정한 값을 보인다.

4.결론

계면활성제가 유하액막의 열전달 특성에 미치는 영향에 관해서 연구하였다. 앞선 연구에서 계면활성제 농도의 증가에 따른 젖음 면적이 증가함[9]에 착안하여 젖음 면적이 유하액막의 열전달에 미치는 영향을 실험을 통해 규명하였다.

순환 유량이 증가함에 따라 젖음 면적은 약간 증가하는 반면에 열전달률과 열전달 계수는 상당히 큰 증가율을 보였다. 이는 유량의 증가로 인하여 열전달계수가 증가하여 열전달률에 영향을 미친 것이다. 주어진 일정한 순환 유량에서 계면활성제의 농도가 증가함에 따라 유하액막의 젖음 면적과 열전달률은 증가한 반면에, 열전달 계수는 계면활성제의 농도가 증가함에 따라 약간의 증가율을 보였다. 열전달 계수는 저농도에서 조금씩 증가하는 경향을 보이나, 고농도에서는 거의 일정한 값을 보였다.

계면활성제의 첨가는 불필요한 순환 유량의 증가를 방지하고, 젖음 면적을 증가시킴으로써 열전달률을 증가시키는 요인이 됨을 규명하였다.

후기

본 연구는 에너지관리공단의 에너지·자원기술개발 사업 중 "재생 증발식 건물 냉방 기술 개발" 과제의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Lee, J. W., Lee, D. Y. and Kang, B. H., 2003, 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.
2. Karapantsios, T. D. and Karabelas, A. J., 1995, Longitudinal characteristics of wavy falling films, International Journal of Heat Mass Transfer, Vol. 38, No. 7, pp. 1261-1269.
3. 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.
4. 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.
5. Plerson, 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.
6. 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.
7. Zheng, G. S. and Worek ,W.,M., 1996, Method of heat and mass transfer enhancement in film evaporation, International Journal of Heat and mass trasnfer, Vol. 39, No. 1, pp. 97-108.
8. Tsay, T. L. and Lin, T. F., 1995, Evaporation of a heated falling liquid film into a laminar gas stream, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 11, pp. 61-71.
9. Kim, K. H., Kang, B. H. and Lee, D.-Y., 2005, An Experimental Study of the Effects of Surfactant Concentration on a Falling Liquid Film, Proceedings of the SAREK 2003 Summer Annual Conference, pp. 481-486.