

## 핀-관 열교환기에서 동적접촉각과 물뿜힘량과의 상관관계에 관한 연구

황 준 현<sup>†</sup>, 고 영 환, 신 종 민  
LG전자 디지털 어플라이언스 사업본부 연구소

### A Study of Correlation between DCA and WHS in Fin-and-Tube Heat Exchanger

Junhyeon Hwang<sup>†</sup>, Younghwan Ko, Jongmin Shin  
Digital Appliance Company Research Lab., LG Electronics, Changwon 641-711, Korea

(Received June 20, 2002; revision received August 22, 2002)

**ABSTRACT:** An experimental study on the behavior of the water hold-up by spraying of a fin-and-tube heat exchanger with regard to the surface characteristics, i.e., contact angles, was conducted. The dynamic contact angles (DCA) were measured, and water hold-up by spraying (WHS) was conducted in the experiment. It is found that heat exchanger surface characteristics, spray pressure, spray water temperature and heat exchanger surface temperature play an important role in WHS. In order to evaluate relationship between WHS and surface characteristics, test conditions are determined through a contour analysis. A correlation was proposed to predict WHS as a function of DCA. With its test efficiency and consuming time, the prediction method can be used to evaluate WHS performance.

**Key words:** DCA(동적접촉각), WHS(Water hold-up by spraying, 분사법에 의한 잔수량)

#### 기 호 설 명

$B_z$  : 부력 [N]  
 $DCA$  : 동적접촉각(dynamic contact angle) [°]  
 $F$  : 시료를 지지하는 힘 [N]  
 $g$  : 중력가속도 [ $m/s^2$ ]  
 $T_s$  : 열교환기 표면온도 [°C]  
 $T_w$  : 분무수 온도 [°C]  
 $p$  : 시편 두레길이 [m]  
 $WHS$  : 분사에 의한 잔수량(water hold-up by spraying) [ $g/m^2$ ]

#### 그리스 문자

$\sigma$  : 물의 표면장력 [mN/m]  
 $\theta$  : 물과 시료가 접촉하는 각도 [°]  
 $\nu$  : 동점성 계수 [ $m^2/s$ ]

#### 1. 서 론

열교환기는 냉동 및 공조분야에서 공기와 냉매 간 열전달을 수행하는 핵심부품이다. 일반적으로 주택용 또는 상업용으로 보급되어 있는 열교환기는 핀(fin)과 관(tube)이 결합한 핀-관 열교환기(finned tube heat exchanger)가 대부분이다. 열교환기가 증발기로 사용될 경우, 열교환기 핀 표면온도가 습공기의 이슬점온도(dew point)보다 낮아지면 공기중의 수분이 핀 표면에 맺히게 되는

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-55-260-3828; fax: +82-55-260-3507

E-mail address: birdchest@lge.com

응축현상이 발생한다. 이러한 응축수의 발생은 열저항의 증가와 공기유로 단면적의 감소로, 열교환기의 냉방능력을 감소시키며, 소음증가의 원인이 된다. 또한, 열교환기 핀 표면의 친수성능이 불량할 경우 물방울이 유출되는 응축수 비산현상(carry-over)이 발생하게 되어 소비자 불만의 원인이 된다. 따라서 친수성능이 우수한 열교환기 개발을 위해 1980년대 초부터 일본을 중심으로 친수 계면활성제가 사용되어 왔으며, 국내에서는 최근에 플라즈마 표면처리를 통해 친수성 열교환기 개발이 진행 중이다. 친수 표면처리에 대하여 Hong<sup>(1)</sup>이 친수 코팅 유무에 따른 특성에 대하여 연구하였으며, 하삼철 등<sup>(2,3)</sup>은 동적접촉각(Dynamic Contact Angle, DCA)이 10~40°인 친수(Hydrophilic) 표면과 90°인 알루미늄 표면의 잔수량을 측정하여 압력강하의 모델을 제시하였고 표면의 친수처리에 의해 잔수량이 감소할 수 있음을 보였다. 신종민 등<sup>(4,5)</sup>은 다른 성질을 가지는 표면에 물입자를 분사할 때 일정 표면에 부착될 수 있는 잔수량에 대해 조사하여 표면을 친수처리할 때 잔수량은 감소함을 보였으며, 친수성능을 정적 물 접촉각과 동적 물 접촉각으로 나누어서 선형비례의 관계가 있음을 보였다.

하지만, 기존연구의 잔수량에 관한 평가는 제상후 열교환기 표면의 물의 양으로 측정되었으며, 이에 관해 더욱 간단한 실험방법으로의 평가방법이 필요했으며, 본 연구에서는 분사법에 의한 잔수량을 측정, WHS(Water hold-up by spraying)이라 지칭한다.

본 연구에서는 여러 가지 다른 표면특성을 갖은 증발기에 대해 일반적으로 표면특성을 논할 때 주로 사용되는 동적접촉각과 분사에 의한 잔수량의 관계를 정량적으로 규명하고, WHS 실험을 위한 최적 실험조건을 파악하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 시료의 준비

Fig. 1은 본 실험에서 사용한 핀-관 증발기를 나타낸 것으로 동관과 알루미늄 핀으로 제작하였다. 핀 피치는 각 열마다 다르게 하였으며, 이는 본 열교환기가 냉장고용 증발기로 사용될 때 가혹조건에서 최하단에서 핀과 핀 사이가 착상에 의해 완전히 막힘을 배제하기 위함이다.

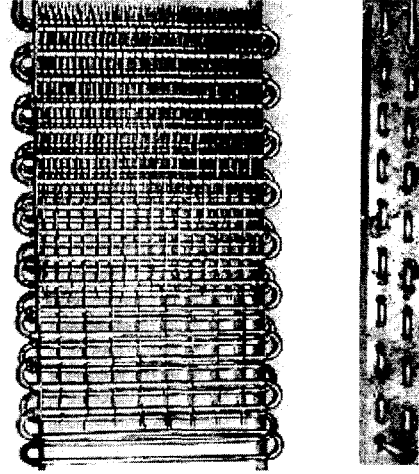


Fig. 1 Photograph of heat exchanger.

증발기는 여러 가지 다른 표면특성을 얻기 위하여 고석근 등<sup>(6)</sup>이 제안한 방법으로 증발기 전체를 진공 챔버에 투입하여 입력, 진공도, 그리고 처리시간을 달리하여 플라즈마 처리하였다. 각기 다른 조건으로 표면처리된 증발기의 분사에 의한 잔수량을 측정한 다음 증발기를 분해, 절단하여 증발기의 각기 다른 위치에서 가로×세로가 20×30 mm인 14개의 시료를 만들었다. 각 경우에 대하여 동적접촉각을 2회 반복하여 측정, 평균하였다. 증발기 위치별 동적접촉각의 표준편차는 최소 1.5°에서 최대 6.5°이었다. 이와 같이 증발기별 위치에 따른 동적접촉각의 차이는 증발기 전체를 일시에 플라즈마 처리함으로써 증발기 안쪽과 바깥쪽의 플라즈마 강도가 달라졌기 때문으로 사료된다.

### 2.2 친수성능 평가방법

#### 2.2.1 동적접촉각 측정

원재료 표면의 친수특성 및 성능을 평가하는 데는 여러 가지 방법이 있으나, 본 연구에서는 Wilhelmy Plate 방법<sup>(7)</sup>을 이용하여 원재료의 동적접촉각을 측정(제작사 : KSV, 모델명 : sigma 70)하여 친수성능을 평가하였다. 측정방법은 Fig. 2(a)에서와 같이 고체와 액체 계면의 힘을 측정편의 침적 깊이와 시간에 따른 함수로 측정할 수 있는 전자센서(electrobalance)를 이용하여 측정하는 방법이다. 그 원리는 Fig. 2(b)에서와 같이 측정 시편이 아래로 증류수에 서서히 침적되어 가

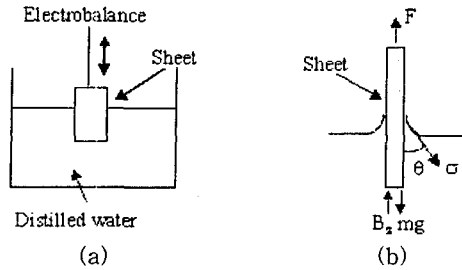


Fig. 2 Measurement method of Wilhelmy Plate  
(a) Schematic diagram (b) Equilibrium of force.

는 상태에서 이루는 힘의 평형상태를 식(1)에서 나타내고 있다.

$$F = p\sigma \cos \theta - B_2 + mg \quad (1)$$

여기서,  $F$ 는 전자센서로 측정되는 힘이고,  $p$ 는 시편이 물에 침적되어 있는 둘레의 길이이며,  $\sigma$ 는 물의 표면장력,  $m$ 은 시편의 질량,  $B_2$ 는 부력,  $g$ 는 중력가속도, 여기서  $F$ 는 기기로부터 측정되어지는 값이기 때문에 위 식으로부터 미지수인 동적접촉각  $\theta$ 을 알 수 있게 된다. 시료를 상승시키거나 하강시킴에 따라  $\theta$ 값은 달라지게 되는데 본 연구에서는 시료의 하강시의  $\theta$ 값만 측정하였다.

2.2.2 WHS 측정

냉장고내 열교환기 크기 및 핀의 친수성능에 따라 WHS량이 결정된다. WHS량의 증가는 착상시 공기측 압력강하의 증가와 열저항의 증가로 열교환기 성능의 저하를 의미한다. 따라서, 열교환기 성능과 친수 성능을 대응 평가하기 위하여, Fig. 3과 같은 실험장치(simple test kit)을 제작하고, 성능평가를 위한 실험조건을 결정하였다.

실험장치는 Fig. 3(a)와 같이 압력조절이 가능한 가압장치와 일정한 용기에 고압의 질소와 증류수가 혼합되어 있는 압력용기(pressure bombe), 그리고 여러 개의 다공분사장치로 열교환기 표면에 직접 고압의 증류수를 분사시킬 수 있는 분사박스(spray box)로 구성되어 있다. 열교환기 표면의 잔수량은 변위를 전기적 신호로 바꾸어 무게를 측정할 수 있는 로드셀(load-cell)을 이용하였다.

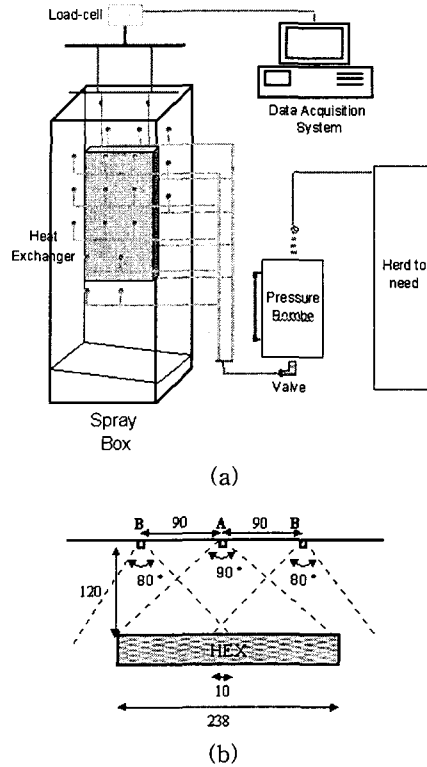


Fig. 3 (a) Schematic diagram of WHS test device (b) Close-up of spraying water parts.

분사장치로는 직경 18mm의 노즐을 이용하여, 전, 후면 13개의 위치에서, 분사각을 Fig. 3(b)에서와 같이 간격 80°, 90°, 80°으로 열교환기 표면에 물의 분사되지 않는 부분이 없도록 각각 10mm의 중첩부를 만들어 주었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 WHS에 대한 실험조건 영향

Table 1에서와 같이 WHS량에 영향을 미칠 것으로 예상되는 분무압력, 분무수 온도, 그리고 열교환기 표면온도를 실험인자로 하여, 3인자 2수준의 2<sup>3</sup> 완전배치하여 실험을 실시하였다. 실험에는 DCA=90°를 가지는 열교환기를 이용하였다. 각기 다른 실험 조건에서도 Fig. 4와 같이 WHS 증가량의 포화, 감소, 그리고 일정시간 후에는 다시 포화상태에 다다른 유사한 경향을 가진다.

Table 1 Test conditions

Run no.	Spray pressure (kg/cm <sup>2</sup> )	Water temp. (°C)	Surface temp. (°C)
1	3	7	14
2	3	7	30
3	3	15	14
4	3	15	30
5	6	7	14
6	6	7	30
7	6	15	14
8	6	15	30

열교환기 표면의 잔수량은 증가하다가 약 6분경이 되면 포화상태에 도달한다. 이때 고압가스의 공급을 멈추면, 중력에 의해 열교환기 표면의 물방울이 낙하하게 되고, 30초의 짧은 시간 동안 중력이 핀의 표면장력보다 더 크게 작용하여 WHS량은 급격히 감소하여, 변곡점 이후 약 7분경 후에는 열교환기 친수성능을 가늠할 수 있는 잔수량만 남게 되는 포화상태에 도달한다.

본 연구에서는 노즐작동 7분 후의 WHS를 측정함으로써, 열교환기의 표면특성에 따른 친수성능을 평가하고자 한다.

열교환기 표면특성에 따른 WHS 실험조건을 결정하기 위하여, 주인자인 분무압력, 분무수온도, 그리고 열교환기 표면온도가 WHS량에 가장 영향을 미치지 않는 범위에서 실험을 수행하여야 한다. 이는 주인자로 인한 실험결과의 가변을 최소화하기 위함이며, 이를 통해 실험의 재현성을 위한 인자의 조건을 결정할 수 있다. Fig. 5는 주

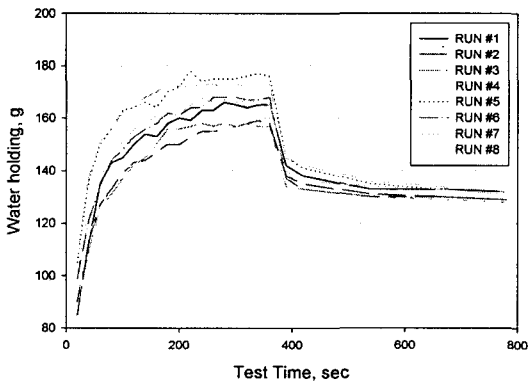
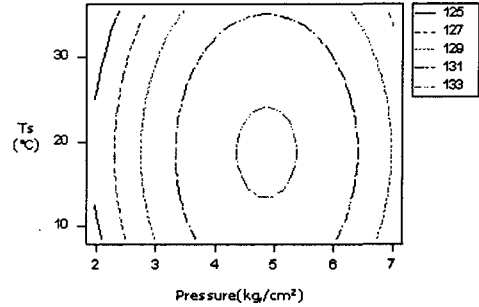
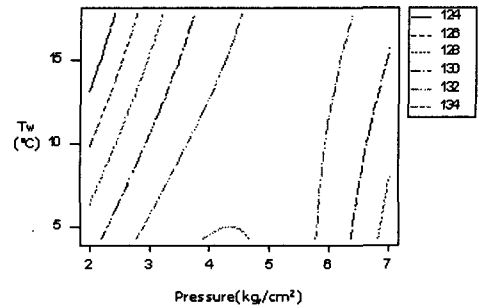


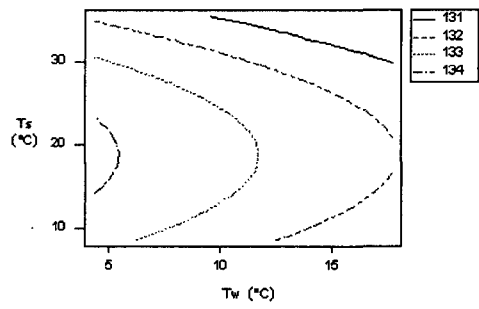
Fig. 4 WHS transition with time.



(a)



(b)



(c)

Fig. 5 Contour plots of WHS for various test conditions: (a) spraying water temperature vs. pressure for  $T_w=15.0^\circ\text{C}$ , (b) heat exchanger surface temperature vs. pressure for  $T_s=30.0^\circ\text{C}$ , and (c) spraying water temperature vs. surface for spray pressure= $3.0\text{ kg/cm}^2$ .

인자의 변화에 따른 WHS의 값의 영향도를 살펴 보기 위한 등고선도이다. 각 그림의 등고선은 분무압력, 분무수온도, 열교환기 표면온도 등에 따라 같은 WHS량을 연결한 선이다. Fig. 5(a)에서와 같이 분무압력은  $5.0\text{ kg/cm}^2$ 에서 최대 WHS량을 가지며, 분사압이 커지거나, 작아질수록 적

은 WHS량을 가진다. 작은 분사압에서는 열교환기 표면에 물의 분사가 고루되지 않아, 더 적은 WHS량의 값을 가지게 되며, 적정압보다 큰 분사압에서는 분사압이 열교환기 표면의 WHS량을 불어내어 노즐이 정지되기 전의 포화량을 작게 하는 역할을 함으로써 적은 WHS량의 값을 가지는 것으로 사려된다. Fig. 5의 (a), (c)와 같이 열교환기 표면온도도 20℃에서 최대의 WHS량을 가진다. 온도가 작은 범위에서는 물의 표면장력이 크기 때문에 WHS량이 적은 값을 가진다. Fig. 5의 (b), (c)에서는 분무수온도가 증가할수록 WHS량은 감소하며, 등고선이 가장 넓어 WHS량에 영향을 가장 적게 미치는 범위는 18℃ 내외임을 알 수 있다. 이와 같이 실험조건의 변화에 따라 WHS량에 가장 영향을 적게 미치는 각 실험인자의 등고선의 간격이 가장 넓은 범위인 분무압력은  $5.0 \pm 0.1 \text{ kg/cm}^2$ , 분무수온도  $18 \pm 0.5^\circ\text{C}$ , 열교환기 표면온도는  $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 로 결정하였다.

### 3.2 DCA와 WHS 관계

3.1절의 실험조건으로 열교환기의 각기 다른 표면이 다른 특성에 따라, 분사에 의한 열교환기 표면의 잔수량, 즉 WHS값을 측정하였다. 동일 시료에 대한 실험은 횟수 5회에 편차는  $0.7 \text{ g/m}^2$ 의 값을 갖는다. Fig. 6에서와 같이 DCA값이 클수록 WHS값은 증가하는 경향을 가지고 있다.

DCA값이 작다는 것은 열교환기 표면이 더욱 친수성(hydrophilic)을 띠고 있음을 나타내며, 이는 열교환기 표면에서 물입자가 막형태로 존재하여, 중력의 영향으로 열교환기에서의 이탈이 용이함을 의미한다. 이 결과는 신종민 등<sup>(5)</sup>과 유사

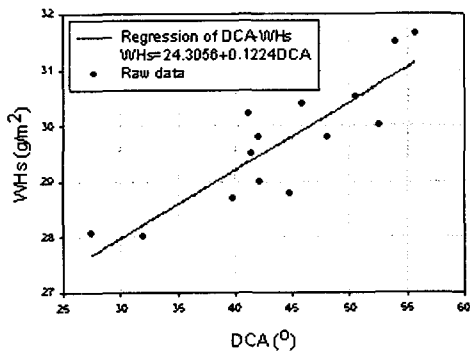


Fig. 6 Regression of DCA with WHS.

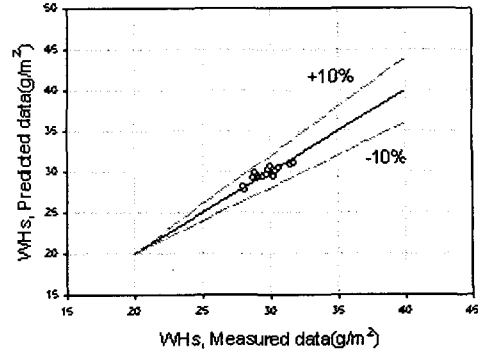


Fig. 7 Limitation between measured data and predicted data.

하다. 또한 열교환기 친수성을 가늠하는 WHS량도 DCA가 감소함에 따라 감소하는 경향을 가진다.

DCA와 WHS는 선형적인 비례관계를 가지며,

$$WHS = 24.3056 + 0.1224DCA \quad (2)$$

상관계수는  $R^2 = 76\%$ 이다.

Fig. 7과 같이 서로 다른 표면에서 WHS는 실측치와 예측값의 오차범위가  $\pm 10\%$  안에 수렴하며, 이는 WHS가 열교환기 표면특성을 대변하는 기준으로 타당함을 알 수 있다. WHS의 간단한 실험수행으로 DCA와 같은 측정하기 어려운 표면특성의 추론이 가능함을 의미한다.

### 4. 결 론

본 연구에서는 서로 다른 표면특성을 갖는 열교환기에 물을 분사하여 잔수량을 측정하는 실험방법을 표면의 동적접촉각(DCA)와 비교 검토함으로써, 그 WHS가 열교환기 표면특성을 대변할 수 있는 타당성을 검증하였다.

(1) 열교환기 친수 성능을 분사에 의한 잔수량 평가법으로 검증하였고, 분무압력, 분무수 온도, 열교환기 표면온도가 WHS에 미치는 영향에 대해 검토하여, 분무압력  $5.0 \pm 0.1 \text{ kg/cm}^2$ , 분무수 온도  $18 \pm 0.5^\circ\text{C}$ , 열교환기 표면온도는  $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 의 적정 실험조건을 결정하였다.

(2) 서로 다른 표면특성을 갖는 열교환기는 서로 다른 WHS의 특성을 가지고 있으며, 열교환기 표면특성을 대변할 수 있는 DCA와 WHS에

대하여  $R^2=76\%$ 의 선형 비례관계를 가지는 실험식을 제안하였다.

(3) 분사에 의한 열교환기의 잔수량 WHS는 열교환기 성능평가를 위한 도구로서, 열교환기 양산시 그 편의성과 소요시간을 감안할 때, 효율적인 방법이라 하겠다.

### 참고문헌

1. Hong, K. T., 1996, Fundamental characteristic of dehumidifying heat exchangers with and without wetting coatings, A thesis of Ph. D. in the Pennsylvania state university.
2. Ha, S. C., Kim, C. H., Ahn, S. P. and Dreitsler, G. A., 1998, Condensate drainage characteristics of plate fin and tube heat exchanger, Proceedings of the international conference on heat exchangers for sustainable development, Lisbon, Portugal, pp. 423-430.
3. Ha, S. C., Kim, C. H., Ahn, S. P. and Dreitsler, G. A., 1999, Hydraulic performance of wet fin and tube heat exchanger for various wettability surfaces, Proceedings of compact heat exchangers and enhancement of technology for the process industries, Baniff, Canada, pp. 463-470.
4. Shin, J. M., Kim, J. B., Kim, C. H. and Ha, S. C., 2000, A Study of water hold-up of two surfaces having different hydro-characteristics, Proceedings of the 9th international symposium on flow visualization, Edinburgh, UK, No. 413, pp. 413.1-413.8.
5. Shin, J. M., Lee, N. G., Han, S. J. and Ha, S. C., 2001, The Effect of water contact angles of the fin surfaces of the fin-an-tube heat exchangers on the water hold-up, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 13, No. 6, pp. 490-496.
6. Koh, S., Han, S., Song, S., Choi, W. and Jung, H., 1995, Improving wettability of polycarbonate (PC) and adhesion with aluminum by  $Ar^+$  Ion irradiation, Journal of material research, Vol. 10, No. 6, p. 2390.
7. Stenius P., 1993, Theory of the Ring and Wilhelmy Plate Method, Laboratory of Forest Products Chemistry, Helsinki University of Technology.