

미소해칭 전열관의 젖음률에 대한 실험적 상관식

김진경, 박찬우*, 이경엽**, 강용태**†

경희대학교 대학원, *LG 전선(주) 기계연구소, **경희대학교 기계산업시스템공학부

Experimental Correlation of Wettability for Micro-scale Hatched Tubes

Jin-Kyeong Kim, Chan Woo Park*, K. Y. Rhee**, Yong Tae Kang**†

Graduate School, Kyung Hee University, Kyunggi 449-701, Korea

*Machinery Research Lab., LG Cable Ltd., Kyunggi 431-080, Korea

**School of Mechanical and Industrial System Engineering, Kyung Hee University, Kyunggi 449-701, Korea

(Received March 24, 2002; revision received November 4, 2002)

ABSTRACT: The objectives of this paper are to develop a new method of wettability measurement and to study the effect of surface roughness on the wettability in a H₂O/LiBr falling film absorber. Two absorber tubes with micro-scale roughness and a bare tube are tested in a falling film absorber installed in a test rig. Inlet solution temperature, concentration and mass flow rate are considered as key parameters. A new method is proposed to estimate the wettability of a tube by measuring a minimum mass flow rate to wet the tube completely. The wettability for the structured surfaces was higher than that for the bare tube. The wettability decreased linearly along the vertical location. The wettability increased with increasing the solution temperature and the solution mass flow rate. The experimental correlations of the wettability for the bare and the micro-hatched tubes were developed with error bands of $\pm 20\%$ and $\pm 10\%$, respectively. This work can be used in the design of absorbers with micro-scale roughness.

Key words: Wettability(젖음률), Micro-scale hatched tube(미소해칭 전열관), Roughness(거칠기), Patternator(패터네이터), LiBr(리튬브로마이드), Absorber(흡수기)

기 호 설 명

d : 관 지름 [m]
 H : 최상단과 최하단 전열관 간 수직거리 [m]
 K : 패터네이터의 분지 수
 L : 관 길이 [m]
 \dot{m} : 질량유량 [kg/s or kg/min]
 Re_Γ : 액막 Reynolds 수, $4\Gamma/\mu$

V : 용액 유입속도 [m/s]
 W : 젖음률 [%]
 We_m : 수정된 Weber 수, $(\rho V^2 d)/\sigma$
 x : 농도 [weight %]

그리스 문자

Γ : 단위길이당 액막유량, $\dot{m}/2L$ [kg/ms]
 μ : 점성계수 [kg/ms]
 ϵ : 표면 거칠기 [μm]

† Corresponding author

Tel.: +82-31-201-2990; fax: +82-31-202-8106

E-mail address: ytkang@khu.ac.kr

하첨자

in : inlet

min : minimum

1. 서 론

압축기가 전체 시스템의 성능을 좌우하는 압축식에 비해 흡수식은 대부분의 구성부품이 열교환기로 이루어져 있으므로 열교환기의 성능향상이 흡수성능촉진을 위한 핵심요소이다. 특히 흡수기는 흡수용액을 전열관의 표면에 적셔 열/물질 전달이 이루어지는 장치로서, 전열관에서 용액의 젖음률은 흡수식 시스템 성능에 영향을 주는 중요한 인자이다.

고체와 액체의 젖음 특성을 결정하는 것은 고체 위에 있는 액체 방울의 접촉각과 관계가 깊다고 알려져 있다. 특히 표면 거칠기가 젖음률에 미치는 영향에 대한 연구로서 Nicholas⁽¹⁾는 몇 가지의 고체 평판과 유체와의 조합을 통한 실험을 통해서 접촉각과 거칠기와의 관계를 연구하였다. Katoh et al.⁽²⁾은 금속 표면의 거칠기의 기울기 각도를 변해 가면서 접촉각을 측정하였다. 그리고 수평전열관의 유하 액막유동과 같이 유체가 동적인 경우에 대하여 Jacobi⁽³⁾는 유량, 관경, 튜브 간격에 따른 파장을 측정하여 관계식을 유도하였다. Shoji and Zhang⁽⁴⁾은 핵비등 시스템에서의 물의 접촉각도를 측정함으로써 젖음률에 대한 표면 거칠기와 온도의 효과를 고려하였다.

그러나 지금까지의 연구경향을 살펴보면 흡수식 냉동기에서의 실제적인 적용을 위하여 필요한 H₂O/LiBr 용액의 미소해칭 전열관에서의 젖음률 특성에 관한 문헌은 전무한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 젖음률 측정시 젖음 여부를 판단하기 위한 기준을 새롭게 설정하고, 그 기준에 의거하여 H₂O/LiBr 용액의 미소해칭 전열관들에 대한 젖음률을 측정함으로써 H₂O/LiBr 흡수기에서 표면 거칠기에 따른 젖음률에 대한 실험적 상관식을 제시하려 한다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1에 실험장치에 대한 개략도가 나타나 있다. 실험장치는 28개의 동관으로 이루어진 하나

의 열로 구성되어 있다. 시험부의 상부에는 액류의 균일한 분배를 위하여 액류분류기가 설치되었다. 시험부는 28개의 동관, 액류분류기, 액류저장소 및 유동 패턴네이터(flow patternator)로 구성되어 있다. 패턴네이터는 시험부의 하부에서 수평 전열관을 20등분으로 나누어 각 구간에서 단위시간당 흘러내린 용액의 국소 유량을 측정하여 젖음률을 측정하는 장치이다. 유하 박막형 수평관에서는 상부에서의 유동변화가 하부에 직접적인 영향을 미치지 때문에, 본 실험에서 패턴네이터를 이용한 국소 유량 측정은 장치의 가장 하부 전열관부터 상부로 올라가며 각 열에 대하여 측정을 하였다. LiBr 수용액은 시험부의 상부로 유입되어 액류분류기를 통하여 수평관군에 균일하게 분포된다. 시험부의 첫 열에서 균일하게 분포된 용액은 박막 열전달 모드를 이루며 하부로 흘러내린다. 하부로 흘러내린 용액은 액류받이에 모아져서 시험부의 하부에 설치된 액류저장소로 유입된다. 액류저장소로 유입된 용액은 용액펌프에 의하여 질량유량계를 지나 시험부의 상류에 있는 액류분류기로 다시 유입된다.

이때 각각의 표면 거칠기를 갖는 전열관에 대하여 유동특성을 가시화하기 위하여 초고속 카메라가 이용된다. 용액 유입온도는 시험부 하부에 설치된 항온조에서 조절되고 액류분류기 입구에 설치된 열전대에 의해서 측정된다. 용액의 유량

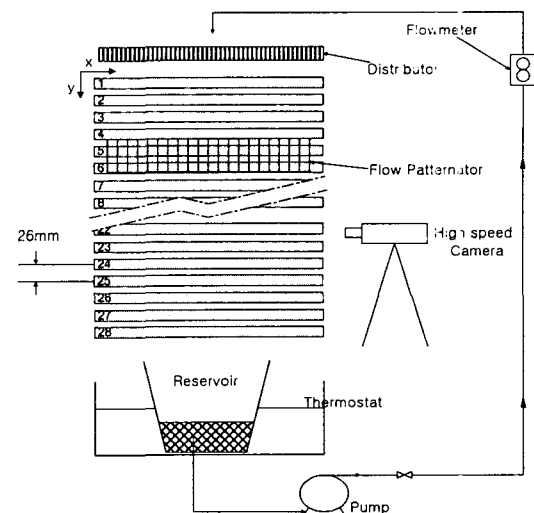


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus.

Table 1 Geometric and experimental conditions

Geometric conditions	
Tube diameter, d	16.0 mm
Distance between adjacent tubes, h	26.0 mm
Tube length, L	205.0 mm
Number of rows, n	28
Scratch helix angle	60°
Roughness, ϵ	#600 : 0.384 μm
	#24 : 6.986 μm
Experimental conditions	
Mass flow rate, \dot{m}	0.74~2.71 kg/min
Inlet temperature, T	30.0~50.0°C
Inlet concentration, x	55.0~62.1%

은 인버터가 달린 마그네틱 기어펌프에 의해서 조절되고 로타미터형 유량계에 의해서 측정된다. 액류의 농도는 굴절률계를 이용한 광학적 방법에 의해서 측정되는데 용액온도와 굴절률에 의해 용액의 농도가 얻어진다. 실험에 앞서 굴절률계로 각기 다른 55~65% H₂O/LiBr 용액 20개를 측정하여 오차범위가 0.02% 이내임을 확인했고, 농도 측정의 일관성을 위하여 측정시 굴절률계의 온도를 25°C로 유지시켰으며 동일인이 처음부터 끝까지 모두 측정했다. 시험부에 대한 기하학적 조건

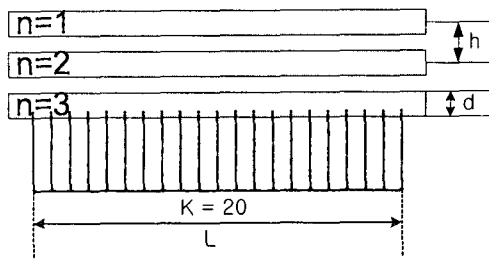


Fig. 2 Test section.



Fig. 3 Micro-scale hatched tube #24.

및 실험조건들이 Table 1에 나타나 있다. 본 실험에서 사용된 미소해칭 전열관은 산업계에서 가장 일반적으로 사용되는 것들로 #24, #600 샌드페이퍼에 의해 가공된 것을 사용하였다. 본 실험에서 유량 및 온도측정시의 실험오차는 각각 ± 0.01 kg/min, $\pm 0.25^\circ\text{C}$ 이다. Fig. 2는 시험부의 개략도를 나타내고 있다. Fig. 3은 미소해칭 전열관 #24의 사진이다.

3. 젖음률 측정법 및 실험결과 분석

젖음률을 측정할 때 실험자의 관찰에 의해서 판단하는 것은 개인의 주관적 판단이 개입되므로 객관적인 결과를 주지 못한다. 따라서 본 연구에서는 젖음률을 정량적으로 평가할 수 있는 객관적인 방법으로 최소유량법을 개발하였다. 젖음률 측정을 위한 패터네이터는 전열관의 축방향에 대하여 20개로 균일하게 분할되어 각각의 위치에서 주어진 시간에 흘러내린 유량을 모은다. 일반적으로 액막유량은 표면에서 균일하게 분포하지 못하고 한쪽은 두껍게 다른 한쪽은 얇게 분포한다. 따라서 가장 균일하게 분포되는 액류분류기의 바로 하단에서 전열관의 축방향으로 국소액막유량을 패터네이터로 측정한다. 국소질량유량은 각 20개의 위치에서 주어진 시간 동안(본 실험에서는 60초 간격을 유지) 받은 유량으로부터 측정한다. 이때 용액의 유입유량을 조절하며 초고속 카메라를 이용한 가시화를 통하여 액류분류기 바로 하단의 전열관이 모두 젖도록 하는 최소의 유입유량을 결정하고 그 상태에서 패터네이터로 국소질량유량을 측정하였다. 여기서 20개의 분지 중 가장 작은 질량유량을 나타내는 값을 최소질량유량으로 취하여 젖음률의 판단기준으로 결정한다. 이때 최소질량유량은 표면을 완전히 적시기 위해 국소적으로 필요한 최소의 질량유량을 의미한다. 그후 각각의 전열관에 대하여 20개의 축방향 위치에서 국소질량유량을 측정하고 첫 열에서 얻은 최소유량보다 클 경우 $f=1$ 이라 하고 최소질량유량보다 작은 경우 $f=0$ 으로 하여 전체 전열관의 젖음률을 계산한다. 정리하면 유하박막형 용액의 흐름에 의한 각 전열관에서 축방향으로 전열관에 접하는 용액의 면적과 전체 전열관 면적의 비로 표현된 젖음률은 다음의 과정을 통하여 정량적으로 계산될 수 있다.

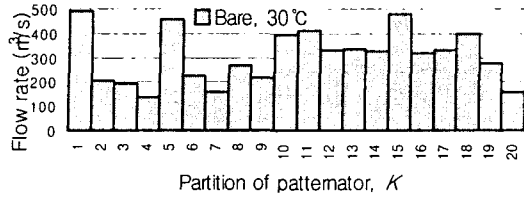


Fig. 4 Patterator reading on the first row for wettability criterion.

$$f_i = 1 \text{ if } \dot{m}_{local} > \dot{m}_{min} \quad (1)$$

$$f_i = 0 \text{ if } \dot{m}_{local} < \dot{m}_{min}$$

이에 의해 n 번째 열에서의 젖음률은 다음으로 주어진다.

$$W_n = \frac{\sum_{i=1}^K f_i}{K} \times 100 \quad (2)$$

여기서 본 실험의 경우 패터네이터가 20개의 분지로 이루어져 있으므로 $K=20$ 의 값을 갖는다. 최종적으로 평균 젖음률은 다음의 식(3)에서 구할 수 있다.

$$W = \frac{\sum_{j=1}^n W_j}{n} \times 100 \quad (3)$$

Fig. 4에 액류 입구농도 55.0%, 용액입구온도 30°C의 경우 나관에 첫 열에 대한 패터네이터 유량분급이 나타나 있다. 이 경우에는 $i=4$ 에서 최소유량점이 나타나 있다. 최소유량점의 위치는 유동특성에 따라 다르게 나타난다.

4. 실험결과 및 토의

Fig. 5는 용액입구온도 30°C, 용액입구농도 55%에서 각각의 표면 거칠기에 대하여 수직위치에 따른 젖음률의 변화를 보여주고 있다. 젖음률은 식(2)로 정의된 국소 젖음률이다. 미소해칭 표면에서의 젖음률이 나관에서의 젖음률보다 더 높은 것을 나타낸다. 또한 나관에 대해서 65%, 미소크기로 스크래칭된 튜브에 대해서는 75%의 낮은 수준까지 수직위치를 따라 거의 선형적으로 젖음률이 감소했다.

Fig. 6은 농도 55%의 나관에 대한 용액온도의 상관관계로서의 평균 젖음률 변화를 보여주고 있다. 젖음률은 식(3)에 정의된 평균 젖음률이다. 액체 온도가 증가함에 따라 표면장력이 감소하고 이로 인해 젖음률이 증가함을 알 수 있다.

Fig. 7은 $T_{in}=50^\circ\text{C}$ 에서 미소 크기의 해칭 튜브

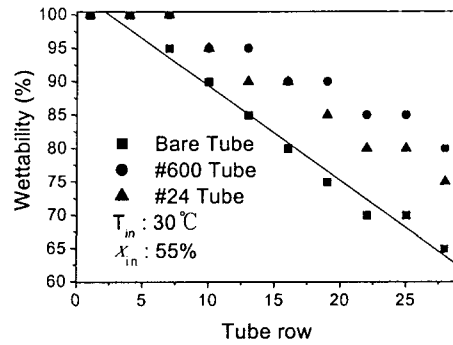


Fig. 5 Wettability as a function of vertical location for each roughness.

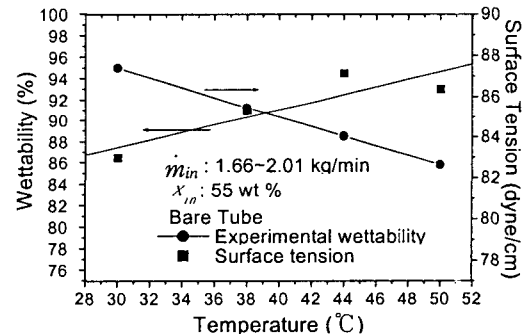


Fig. 6 Mean wettability as a function of solution temperature.

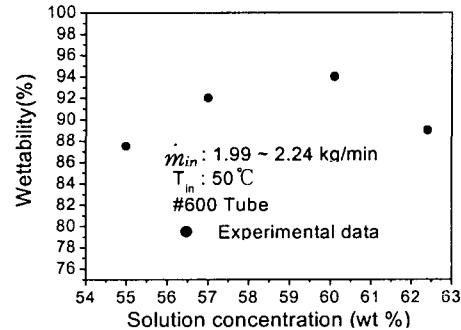


Fig. 7 Mean wettability as a function of solution concentration.

(#600)에서 용액 농도에 따른 젖음률의 변화를 보여준다. 이때 용액농도에 따른 젖음률의 영향을 판단하기 위해서 일정한 Reynolds 수를 고려하였으므로 농도의 변화에 따른 용액 물성치의 변화에 의해 유입 질량유량에는 차이가 발생하였다. 용액의 농도가 증가함에 따라 젖음률은 농도가 60%가 될 때까지 증가하고 그 이후에 감소했다. 젖음률에 있어서 용액농도의 영향은 현재의 실험적 연구에서는 명백하지는 않다. 젖음률에 대한 용액의 온도와 농도 등 열 물성치의 효과는 나관에 대해서는 다소 중요성을 가지는 반면 스크래칭 튜브에 대해서는 그렇지 않은 것으로 판단된다. 이는 미소해칭 전열관의 경우 표면 거칠기에 의한 효과가 온도 및 농도의 영향보다 크기 때문이다.

Fig. 8은 $T_{in}=30^{\circ}\text{C}$ 와 $x_{in}=55\%$ 에서 나관에 대한 용액의 질량유량의 관계로서 젖음률 변화를 보이고 있다. 예상되는 바와 같이 질량유량이 증가함에 따라 젖음률이 거의 선형적으로 증가했다.

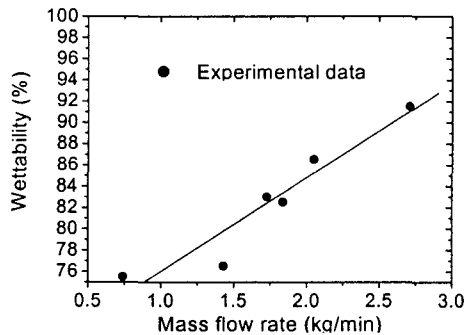


Fig. 8 Mean wettability as a function of solution mass flow rate.

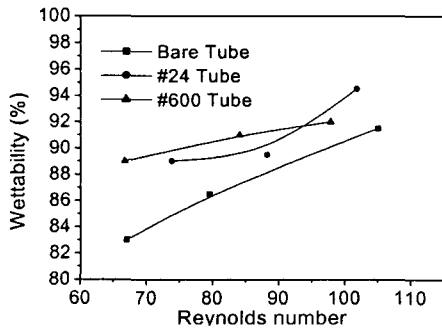


Fig. 9 Mean wettability versus liquid film Reynolds number for each tube.

Fig. 9에서는 액막 Reynolds 수에 대한 젖음률의 변화를 보여준다. 주어진 Re 범위 내에서 나관의 경우 젖음률이 83~90%까지 변화했으나 미소해칭 전열관의 경우 88~94%까지 변화했다. 결국 나관의 경우 액막 Reynolds 수의 젖음률에 대한 영향은 미소 크기로 해칭된 튜브에서의 젖음률에 대한 영향보다 중요하게 나타났다. 이는 미소해칭 전열관에서 표면 거칠기의 영향으로 인하여 나관에서 Re의 영향이 미소해칭 전열관에서의 Re의 영향보다 크기 때문으로 판단된다. 본 실험에서 젖음률의 변화를 살펴보기 위하여 적용한 변수들은 용액의 유입유량, 온도, 농도, 관의 거칠기, 전열관의 수직위치 등을 들 수 있다. 이러한 변수들을 표현하기 위한 무차원 변수로 Re_L , We_m , ϵ/d , y/H 를 선정하였다. 이들 무차원 변수를 이용한 실험적 상관식의 기본형식을 식(4)와 같이 제시하였다. 나관 및 미소해칭 전열관에 대한 젖음률 상관식은 차례로 식(5), (6)과 같이 나타낼 수 있다.

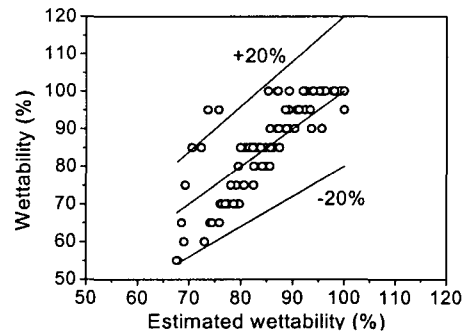


Fig. 10 Experimental correlation of wettability (For bare tube).

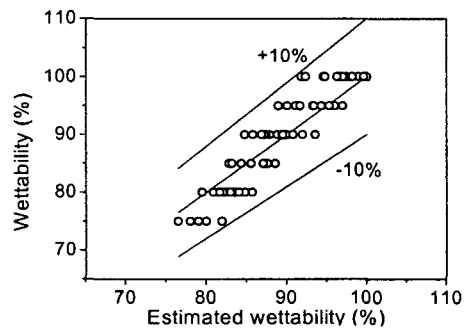


Fig. 11 Experimental correlation of wettability (For micro-scale hatched tubes).

$$W = f\left(\text{Re}_r, \text{We}_m, \frac{\epsilon}{d}, \frac{y}{H}\right) \quad (4)$$

여기서 ϵ/d 는 전열관의 직경으로 무차원화된 표면 거칠기를 나타내고 y/H 는 시스템 최상단의 전열관부터의 수직거리인 y 를 시스템 최상단의 전열관부터의 최하단의 전열관까지의 수직거리인 H 로 무차원화시킨 상대적인 수직위치를 나타낸다.

$$W = 30.009 \text{Re}_r^{0.2317} \text{We}_m^{0.001} \left(\frac{y}{H}\right)^{-6.106 \times 10^{-2}} \quad (5)$$

$$W = 209.93 \text{Re}_r^{0.047} \text{We}_m^{0.159} \left(\frac{\epsilon \times 10^6}{d}\right)^{0.005} \times \left(\frac{y}{H}\right)^{-0.282} \quad (6)$$

본 논문에서 실험한 액막 Reynolds 수의 범위는 30~120이므로 위에 제안한 상관식은 이 범위에서 적용을 할 수 있다. 실험결과에서 알 수 있었던 것과 마찬가지로 젖음률은 액막 Reynolds 수, 수정된 Weber 수 및 표면 거칠기의 증가에 비례하며 증가하는 경향을 가지는 반면 시험부의 상부로부터 수직거리가 증가함에 따라 감소하는 것을 알 수 있다.

Fig. 10과 Fig. 11에서는 실험적 상관식이 나관에 대하여 $\pm 20\%$, 미소해칭 전열관에 대하여 $\pm 10\%$ 의 오차범위 내에서 실험값들을 만족함을 보여주고 있다.

5. 결 론

$\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$ 용 유하 박막형 흡수기의 젖음률을 연구하기 위해 서로 다른 표면 거칠기를 가지는 세 가지의 흡수기용 미소해칭 전열관을 시험하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 최소유량법에 의한 젖음률 판단기준을 성공적으로 개발하였다.

(2) 가공 표면에 대한 젖음률은 나관에 대한

젖음률보다 훨씬 높았으며, 나관에 대해서 65% 정도, 미소 크기로 해칭된 튜브에 대해서는 75%의 낮은 수준까지 수직위치를 따라 선형적으로 젖음률이 감소했다.

(3) 용액의 온도 및 질량유량이 증가함에 따라 젖음률은 증가했다.

(4) 젖음률에 대한 액막 Reynolds 수의 영향은 미소해칭 전열관에서보다 나관에서 더 중요하게 나타났다.

(5) 본 연구에서는 미소해칭 전열관 및 나관에 대하여 각각 $\pm 10\%$ 및 $\pm 20\%$ 오차범위 내에서 만족하는 젖음률에 대한 실험적 상관식을 제시하였다.

참고문헌

- Nicholas, M.G. and Crispin, R.M., 1986, Some effect of anisotropic roughening on wettability, J. of Materials Sci. 21, pp.522-528.
- Katoh, K., Fujita, H. and Yamamoto, M., 1991, Effect of surface roughness on contact angle hysteresis, J. of JSME, Series B, Vol. 57 (544), pp. 4124-4196.
- Hu, X. and Jacobi, A.M., 1998, Departure-site spacing for liquid droplets and jets falling between horizontal circular tubes, Experimental Thermal and Fluid Science 16, pp. 322-331.
- Shoji, M. and Zhang, X.Y., 1994, Study of contact angle hysteresis, JSME International Journal, Series B, Vol. 37, No. 3, pp. 560-567.
- Kang, Y.T., Akisawa, A. and Kashiwagi, T., 2000, Analytical investigation of two different absorption modes: Falling film and bubble types, International Journal of Refrigeration, Vol. 23, No. 6, pp. 430-443.