

## 표면거칠기와 액막 증발에 관한 상관 관계 고찰

김근석\* · 김익생\*\* · 유병훈\*\*\*\* · 김도형\*\*\* · 김춘동\*\*\* · 최고원\*\*\*\*

### Investigation on the Relationships between the Surface Roughness and Film Evaporation

Kyunseok Kim, Igsaeng Kim, Byounghoon Yoo, Dohyung Kim, Chundong Kim and Kowon Choi

**Key Words:** surface roughness(표면거칠기), surface free energy(표면자유에너지), surface tension(표면장력), contact angle(접촉각), film evaporation(액막증발), evaporator(증발기), absorptive refrigerator(흡수식 냉동기)

#### Abstract

The objective of this paper is the investigation of the relationships between the surface roughness and film evaporative characteristics of the surface. For example, when the droplet of liquid is in contact with the solid surface, its behavior strongly depends on the surface characteristics. The material properties and geometry - profile shape, waviness, roughness - of the surfaces have strongly influenced on the wettability of the droplet.

To investigate the effect of the surface roughness on the film evaporation, firstly, the characteristics of wettabilities were studied according to contact angle and surface free energy of specimens with various roughness heights. Secondly, the experimental test were carried out on capacities of the tubes diversly roughened by using different kinds of emery papers.

Finally, the relationships between the film evaporation characteristics and surface roughness were explained by means of the correlation of contact angle and surface free energy with surface roughness and the influences of surface free energy on the heat transfer performance.

#### 기호설명

$C_p$  : 비열,  $J/(kgK)$

$h$  : 열전달 계수,  $W/(m^2K)$

$k$  : 열전도 계수,  $W/(mK)$

$\dot{m}$  : 질량 유량,  $kg/s$

$\dot{Q}$  : 열전달량,  $W$

$R_a$  : 평균 표면거칠기,  $\mu m$

$U$  : 총괄 열전달 계수,  $W/(m^2K)$

#### 그리스문자

$\gamma$  : 표면자유에너지,  $mN/m$

$\theta$  : 표면접촉각,  $^\circ$

#### 상첨자

$d$  : 확산 (dispersive)

$p$  : 극성 (polar)

#### 하첨자

$S$  : 고체 (solid)

\* LG전선(주) 기계연구소  
ilas@ofmail.mach.lg.co.kr

\*\* LG전선(주) 기계연구소  
isk@ofmail.mach.lg.co.kr

\*\*\* LG전선(주) 기계연구소

\*\*\*\* LG전선(주) 공조사업부

- L : 액체 (liquid)
- i : 내측 (inner)
- o : 외측 (outer)

## 1. 서 론

본 논문에서는 흡수식 냉동기의 증발기(이하 흡수식 증발기)에 사용되는 전열관(이하 흡수식용 증발전열관)의 성능 향상을 위한 연구의 일환으로, 증발전열관에서의 표면 거칠기와 열전달과의 상관관계를 알아보았다.

증발기의 냉매는 용액분배기(distributor)에서 수평 증발전열관 위로 액적의 형태로 떨어져서, 액막을 형성한 후 일부는 증발하게 되고 나머지는 아래의 전열관으로 떨어지는 과정을 반복하게 된다.

이와 관련된 연구는 크게 두가지로 진행되어왔는데, 전열관 형상에 따른 열전달 특성의 분석과 액적 거동과 증발과의 상관관계에 대한 고찰로 나눌 수 있다. Chun<sup>1)</sup>, Liu<sup>2)</sup> 등은 나관에 대한 평균 효과를 고려한 증발관계식을 제안하였으며, Khurstalev<sup>3)</sup> 등은 그루브된(grooved) 전열관에서의 액막유동에 대하여 연구를 하였다. 또한, Tio<sup>4)</sup>, Min<sup>5)</sup> 등은 표면에서 정지되어 있는 액적에 대한 증발을 연구하였으며, Yong<sup>6)</sup> 등은 증발전열관 관군에서 액적이 떨어질 때, 수증기에 의한 외관과의 상호작용을 연구하였다. 그 외에, Schmbey<sup>7)</sup> 등은 표면 가공(diamond laminated)된 전열관에서 분무증발에 대한 현상을 발표하였으며 Leipertz<sup>8)</sup>, Oh<sup>9)</sup> 등은 각각 표면처리(coating)된 전열관과 미세핀관(micro-fin)에서의 증발 전열 특성을 연구하였다.

하지만 흡수식 냉동기 사용되는 증발전열관은 상대적으로 미세핀관이나 그루브관보다는 나관이나 코로게이트 전열관이 많이 사용되는데, 이러한 전열관은 상대적으로 얇은 두께를 갖고 있어, 표면가공으로 전열 성능의 향상시키기에는 많은 문제점을 갖고 있다. 특히, 흡수식 냉동기에 적용되는 증발전열관은 상단의 전열관에서 떨어지는 냉매가 얼마나 고르게 빨리 하단의 전열관으로 잘 퍼지는가에 따라서 그 성능이 크게 영향을 받는데, 이러한 젖음성은 액체와 고체의 표면자유에너지로부터 그 특성이 결정되어 지므로 전열관의 성능향상을 위해서는 이에 대한 연구가 선행

되어야 한다.

표면자유에너지는 액체가 접촉하는 고체의 성분이나 표면거칠기에 영향을 받으며, 그 접촉각으로서 그 특성을 알아낼 수 있다. 이와 관련하여, Wenzel<sup>10)</sup>은 표면의 실제 면적과 투영 면적의 비를 표면거칠기 인자(surface roughness factor)로 정의하여 접촉각과 표면거칠기 사이의 상관 관계를 제안하였으나, Kawai, Nakae<sup>11)</sup> 등의 논문에서는 이에 대한 오류를 지적하였다. 특히 Nakae 등은 같은 표면거칠기 인자를 갖지만, 서로 다른 표면거칠기를 갖는 고체 표면에서 서로 다른 접촉각을 갖음을 발표하였다. Lampin<sup>12)</sup> 등은 동일 재질(PMMA)의 시편을 모래 분사(sand blasting) 및 열처리한 후, 표면거칠기에 따른 표면자유에너지를 측정하였는데, 모래 분사 과정을 거치지 않은 시편만 상대적으로 그 크기가 작다는 것 외에는 일정한 경향을 나타내지 않았다. 이는 표면의 열처리 과정에서 원자 구조 및 배열의 변화에 기인한 것으로 추측된다. 반면에 Matsumae<sup>13)</sup> 등은 사포(emery paper)를 이용하여 증발전열관에 사포수를 달리하면서 거칠기를 만든 후, 접촉각을 측정한 후, 이것이 전열성능의 향상을 기여한다고 보고하였고, Kim<sup>14)</sup> 등은 표면거칠기에 대한 전열성능 변화를 실제 증발전열관의 주어진 조건 하에서 상관식으로 제안하였다. Nakae 등은 방향성을 갖는 표면거칠기에 대하여 수평, 수직 방향으로 접촉각을 측정하여 서로 다른 접촉각을 가짐을 보고하였고, Miller<sup>15)</sup> 등은 전진접촉각(advancing contact angle)과 후진접촉각(receding contact angle)을 각각 측정하여 그 차이가 표면거칠기의 평균각도임을 주장하였다.

본 연구에서는 증발전열관에서의 열전달에 영향을 주는 주요 인자를 낙하하는 냉매의 젖음성으로 판단하고, 그 젖음성을 향상시킬 수 있는 방법으로 표면거칠기를 변화시켜서, 냉매와 증발전열관 표면사이의 표면자유에너지를 증가시키고자 하였다. 또한, 이 과정에서 표면에서의 접촉각의 변화를 관측하여, 거칠기와 접촉각의 관계, 거칠기와 표면에너지관계 그리고 거칠기와 증발열전달과의 관계를 설명하고자 하였다.

따라서, 비교적 균일한 형태의 거칠기를 갖는 시편을 제작하여 거칠기의 크기와 접촉각을 측정한 후, 이를 이용하여 확산 표면자유에너지와 극성 자유에너지를 구한 후, 표면자유에너지와의

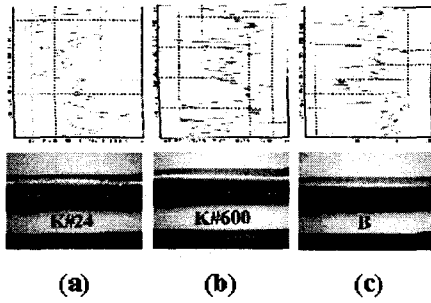


Fig. 1 Roughened Tubes and Profile

거칠기와의 관계를 살펴보았으며, 이를 바탕으로 다양한 표면거칠기를 갖는 증발전열관을 제작하여 실제 조건에서의 증발 성능 실험을 통하여 최종적으로 표면거칠기와 증발 열전달과의 관계를 분석하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

본 연구에서의 실험장치는 크게 세 가지로 나누어 생각할 수 있다. 첫째, 표면거칠기 측정 장비로 보다 정밀한 측정을 위하여 비접촉식을 이용하였다. (Accura 1500F, INTEK PLUS.) 이는, 백색 단색광을 투영하여 빛의 굴절을 이용하는 원리로 WSI는 1 nm, PSI는 1 Å 까지 측정이 되며, 3차원 그래픽과 필터링 기능이 포함되어 있다.

표면거칠기를 나타내는 방법은 그 용도와 정의에 따라서 여러 가지가 있는데, 본 논문에서는 가장 널리 이용되는 평균 거칠기로 나타내었다(16).

$$R_a = \frac{1}{L} \int_L |z| dx \quad (1)$$

일반적으로 표면거칠기는 거칠기의 평균 높이나 평균 깊이만으로 많이 표현하는데, 좀 더 정확한 표면 특성은 평균 파동 길이(waveness), 돌기 모양(shape profile) 등이 함께 표현되어야 한다고 판단되지만, 본 논문에서는 평균 표면거칠기만 고려하였다. Fig. 1은 각각 사포수 24 전열관(KN024), 사포수 600 전열관(KN600), 나관(B)의 거칠기 형상이며, 이에 대한 평균거칠기는 각각 0.17, 0.38, 6.97  $\mu\text{m}$ 으로 측정되었다.

둘째, 표면자유에너지를 구하기 위해서 접촉각 측정 장비(G40, KREUSS)를 사용하였다. 표면접촉각으로부터 표면자유에너지를 환산하는 방법은 여러 가지가 제안되어 있는데, 그 중 2가지 용액으로 계산하는 Owens-Wendt-geometric mean 방식을 사용하였다. 이는 소수성(hydrophobic)의 경향이 아주 센 경우를 제외하고는 잘 맞다고 알려져 있다.

$$\gamma_{SL} = \gamma_S + \gamma_L$$

$$-2\sqrt{\gamma^d_S + \gamma^d_L} \quad (2)$$

$$-2\sqrt{\gamma^p_S + \gamma^p_L}$$

$$\gamma_L (1 + \cos \theta) =$$

$$-2\sqrt{\gamma^d_S + \gamma^d_L} \quad (3)$$

$$-2\sqrt{\gamma^p_S + \gamma^p_L}$$

식 (2)는 본 측정방법에서 표면자유에너지를 확산 표면자유에너지와 극성 자유에너지로 나타낸 것이고 식 (3)은 Young의 방정식을 이용하여 접촉각과의 관계를 나타낸 식이다. 본 장치에서는 상대적으로 큰 거칠기를 갖는 시편(사포수 100 이하)에 대해서는 고체 표면의 기본선(base line)을 일괄되게 감지하지 못하여 이에 대한 정확한 측정값을 얻을 수 없었다. 따라서, 일정 표면거칠기 이상의 시편은 분석에서 제외하였다.

셋째, 전열관의 증발 성능 실험장치로 Fig. 2와 같이 강제 순환 폐쇄 회로로 제작되었으며, Fig. 3은 실험장치 전경이다. 주요 구성 기기로는 냉

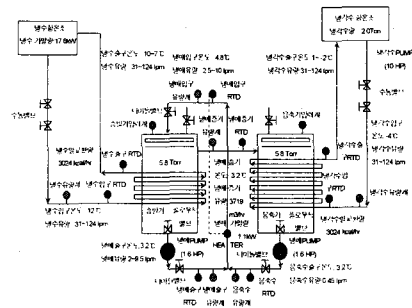


Fig. 2 Experimental Apparatus on heat transfer performance

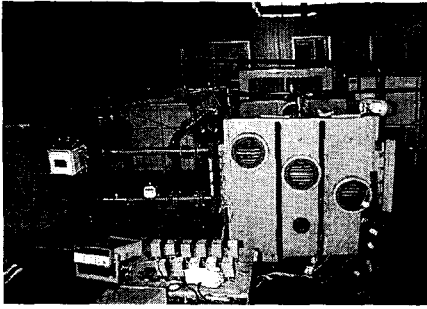


Fig. 3 Photo of Equipment on heat transfer performance

매 순환 펌프, 냉수와 냉각수 유량 측정 터빈 유량계, 증발기 절대 압력계, 응축기 절대 압력계, 냉수 순환 펌프, 냉각수 라인, 냉수 온도 조절을 위한 라인 히터(line heater)와 판형 열교환기, 냉각수 발생을 위한 축열 시스템, 열교환 성능 시험기 본체, 냉매 유량 측정을 위한 질량 유량계와 유량 변동을 위한 인버터 등으로 이루어져 있다. 질량 유량계는 코리올리(coriolis)식 질량 유량계(CX0010C-SS322K, Oval)를 부착하였으며, 냉매의 유량은 3~10 kg/min에서 조절되도록 설계하였다. 열교환기로 유입되는 냉수 및 냉각수의 온도는 50 kw 라인 히터로 제어하였으며, 냉각수 회로에는 7 usRT 축열 시스템을 설치하였다. 증발기 내부의 증발전열관은 총 32개의 전열관이 2열 16줄로 구성되었으며, 한 개의 유로는 4개의 전열관을 이루어져 총 8개의 유로를 이루게 설계하였다. 유효 전열 길이는 증발기, 응축기 모두 1 m이며, 응축기로 유입된 냉매 증기는 응축전열관의 내부로 흐르는 냉각수로 인하여 응축된 후 중력으로 인하여 다시 증발기로 유입되어 냉매 순환이 이루어지도록 하였다.

증발기에서의 열교환량은 식 (4)와 같이 계산될 수 있으며, 총괄 열전달 계수는 식 (5)에서와 같이 전열관의 열전도도에 의한 저항과 나관에서의 내측 열전달 계수를 이용하여 구하였다.

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= C_p \dot{m} \Delta T \\ &= UA_o \Delta T_{LMTD} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{UA_o} &= \frac{1}{h_i A_i} + \frac{1}{h_o A_o} \\ &+ \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi kL} \end{aligned} \quad (5)$$

데이터는 주어진 열유속에서 냉수의 입, 출구 온도 및 온도차, 냉각수의 입, 출구 온도 및 온도차, 냉매 온도, 냉수, 냉각수의 유량을 데이터 수집 장치(HP34970A, HP)로 측정하였다. 냉매 유량 변화는 본 실험에서 중요한 변수 중의 하나로 액막 레이놀즈수가 30~130 정도가 되도록 실험하였다. 실험 시 부하(방열량)는 약 8,000~16,000 W 정도였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 표면거칠기와 표면접촉각

Fig. 4는 사포수(No. of emery paper)에 따라서 표면접촉각의 변화를 물에 대하여 나타낸 그래프이다. 이 때, 시편은 다양한 거칠기를 갖는 사포로 표면거칠기를 만들어서, 사포수가 작을수록 거칠기는 큰 시편에 대하여 표면접촉각을 측정된 결과이다. 이 때 사포수가 증가할수록 접촉각이 증가하는 경향을 보였는데, 이는 Matsumae et al 등의 보고와 일치함을 알 수 있다. Fig. 5는 표면거칠기를 Fig. 6과 같이 일정한 방향성을 가지도록 가공하여 수평방향과 수직방향으로 각각 그 접촉각을 측정된 결과이다. 방향성에 따른 접촉각의 크기를 비교해 볼 것 같으면, 방향성이 있는 앞에서 본(parallel, 수평방향) 접촉각이 옆에서 본(perpendicular, 수직방향) 접촉각보다 더 작음을 보이고 있다.

이상적인 평판과 한 줄의 거칠기를 갖는 평판

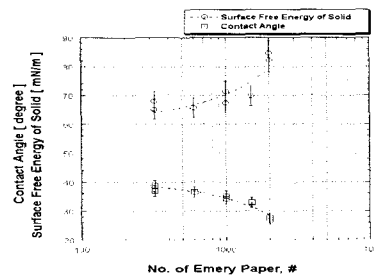
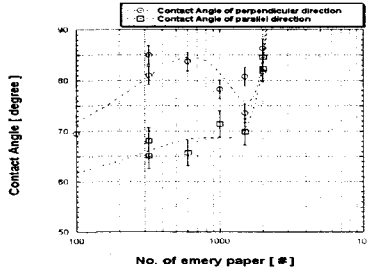
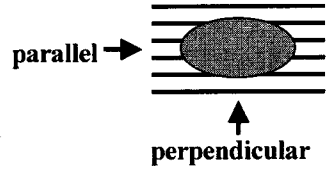


Fig. 4 Variation of Contact Angle with Surface Roughness(No. of Emery Paper)



**Fig. 5** Variation of Parallel and Perpendicular Contact Angle with Surface Roughness(No. of Emery Paper)

을 생각해보자 Fig. 7은 이를 가장 간단하게 그린 그림이다. 표면자유에너지는 분자(molecule)들간의 상호작용의 결과이다. Fig. 7에서 (a)의 액적과 (b)의 액적의 x-방향 경계면에 있는 미소부분을 비교할 것 같으면, (b)에서 표면 경계면에 있는 액적의 분자에 미치는 고체 분자(molecule)가 더 밀집되어 있음을 알 수 있다. 즉, (a)의 액적 1지점의 분자들과 (b)의 액적 1지점의 분자들의 고체 분자와의 상호작용을 비교해 볼 것 같으면, 강도가 (a)의 액적 1지점에서 더 클 것임을 예측할 수 있다. 따라서, 표면거칠기에 의한 분자간의 상호 결합력의 증가로 거칠기가 커질수록 액적이 더 고체표면에 달라붙게 되고, 이에 따라 접촉각이 작아진다고 설명할 수 있다. 또한 거칠기의 방향성은 (a)의 액적 1지점 분자들과 (a)의 액적 2지점의 분자에 대하여 위와 같은 이유로 수평방향으로 더 퍼짐을 설명할 수 있다. Fig. 5는 각각 수평방향과 수직방향의 접촉각을 나타내므로 그 사이의 기울기의 방향성을 갖는 고체 표면에서의 접촉각은 그 사이에 위치할 것임을 예측할 수 있다. 이는 표면자유에너지에서도 그대로 적용될 수 있다. 실제 적용되는 흡수식증발전열관의 제작과정에서는 나관을 회전하면서 잡아당기므로 0~90도 사이의 임의의 각도로만 제작할 수 있기에 이것도 전열성능을 결정짓는 중요 인자중의 하나가 된다. 본 논문에서는 구체적으로 언급하지는 않겠지만, 약 60~70도 정도의 각도를 갖는 전열관이 약간이나마 우수한 성능을 보이는 것이 실험으로 확인되었다. 수평-수직 방향으로의 접촉각의 경향을 비교해 볼 것 같으면, 수직방향에서의 접촉각은 심한 교란(fluctuation)이 발생하는 것



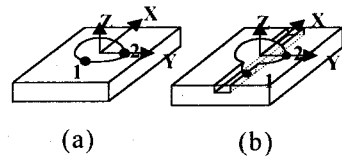
**Fig. 6** View Direction

이 보이는 데, 이는 수직 방향으로의 표면거칠기의 파동 길이의 주기적인 곁에 따라 나타나는 특성이거나 일종의 히스테리시스(hysteresis)로 보여지나, 정확한 이유는 본 논문에서는 밝혀내지 못하였다.

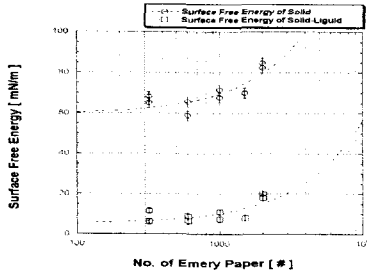
### 3.2 표면거칠기와 표면자유에너지

Fig. 8의 위 그래프는 표면의 표면자유에너지를 Fig. 4에서 측정된 접촉각으로부터 구하여 거칠기에 대하여 나타낸 그래프이다. 실제로 액적의 젖음성은 고체의 표면자유에너지와 고체-액체 상호간의 표면자유에너지로부터 결정된다. 또한, Fig. 8의 아래 그래프는 이 때의 고체-액체 표면간의 표면자유에너지를 나타낸다. 고체 표면자유에너지와 고체-액체 표면자유에너지 모두 증가하는 경향을 보이지만, 상대적으로 고체 표면자유에너지의 증가량이 더 커서 젖음성을 결정하는 표면자유에너지의 차이는 증가하게 된다. 따라서, 액적이 고체 표면에 달라붙는 경향이 커져서 이에 따라, 젖음성은 증가하게 되는 것이라 판단할 수 있다.

Fig. 9는 Owens-Wendt-geometric mean 방식을 이용하여 순수 물에 대하여 접촉각의 변화를 확산 표면자유에너지(dispersive surface free energy)와 극성 표면자유에너지(polar surface free energy)로 나누어서 접촉각과 비교해 본 것이다. 좌상에서 우하로의 대각선은 확산-극성 표면자유에너지의 합인 표면자유에너지를 나타낸 등표면자유에



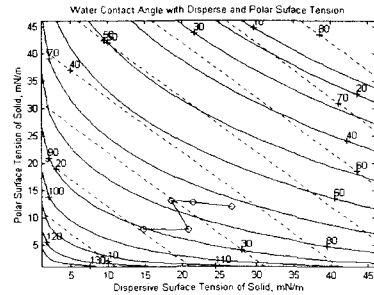
**Fig. 7** Ideal and Real Surface Roughness Structure



**Fig. 8** Variation of Surface Free Energy with Surface Roughness(No. of Emery Paper)

너지선도이다. 액체의 친수성은 앞서 언급한 바와 같이 고체의 표면자유에너지뿐만 아니라 고체-액체의 표면자유에너지에도 영향을 받는다. 따라서 고체의 표면자유에너지가 증가했다고 젖음성이 향상되었다고 단정할 수는 없다. Fig. 9에서의 등접촉각선과 등표면자유에너지선을 살펴보면 표면자유에너지가 증가할 때, 접촉각도 같이 증가하는 행로(path)가 존재함을 알 수 있다. 실제 측정된 시편의 표면거칠기의 변화에 대하여 확산-극성 표면자유에너지를 각각 구하여, Fig. 9에 그 경향을 나타내보면, 표면자유에너지가 증가하면 접촉각이 감소하는 방향으로 진행함을 대략적으로 볼 수 있다. 하지만, 확산 표면자유에너지와 극성 표면자유에너지는 교란이 심하여 그 경향을 쉽게 예측하기가 불가능하다. 이러한 교란은 실제 접촉각의 측정에서의 작은 오차가 확산-극성 표면자유에너지상호간에 큰 영향을 주기 때문에 판단된다. 하지만, 그 합인 표면자유에너지에서는 상대적으로 이 오차에 대한 영향이 줄어들 수 있다.

확산-극성 표면자유에너지의 상대적인 변화량을 살펴볼 것 같으며, 극성 자유에너지에 비하여 확산 표면자유에너지는 변화가 급격하다는 것을 알 수 있는데, 본 연구에서와 같이 시편의 재질에는 영향을 주지 않고, 다만, 그 표면거칠기에만 변화를 준 경우에는, 시편 성분 재질의 극성에 영향을 많이 받을 것 같은 극성 표면자유에너지보다는 표면의 형상에 의하여 결정될 것 같은 확산 표면자유에너지의 변화가 더 크다는 결론을 내릴 수 있다. 결국, 표면거칠기에 따라서 접촉각이 이동하고 이에 따른 표면자유에너지의 변화가

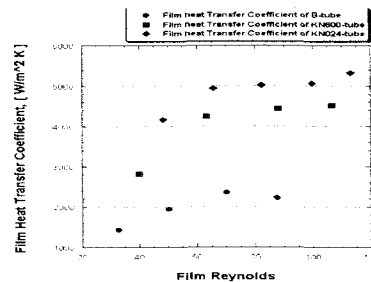


**Fig. 9** Contour of Contact Angle with Polar and Dispersive Free Energy

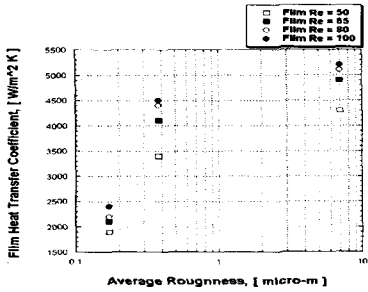
일정한 방향으로 증가하고 있다고 그래프 상에서 설명할 수 있다.

### 3.3 표면거칠기와 증발 열전달

Fig. 10은 지금까지의 연구 결과를 이용하여, 표면거칠기의 변화에 따라 액막증발 열전달 계수를 나타낸 그래프이다. 상대적으로 적은 액막유량에서는 약간의 거칠기의 증가가 상대적으로 큰 열전달 계수의 증가를 야기했다. 이는 증발전열관의 일부만 젖는 냉매가 표면자유에너지의 증가로 전열관에서 잘 퍼지게 되어 젖은 면적이 크게 증가하기 때문으로 판단된다. 또한, 상대적으로 많은 액막유량에서는 이미 충분한 젖은 면적을 갖고 있기 때문에 표면자유에너지의 증가가 더 이상의 젖은 면적의 증가에 기여할 수 없기 때문에 판단된다. 이 때의 열전달 계수의 차는 각각의 전열관 고유의 한계값으로 전열관의 전열면



**Fig. 10** Variation of Heat Transfer Coefficient with Film Reynolds



**Fig. 11** Variation of Heat Transfer Coefficient with Average Roughness

적에 의한 것으로 생각할 수 있다. Fig. 11는 표면거칠기에 대한 액막증발 열전달 계수를 나타낸 그림이다. 다양한 표면거칠기에 대한 데이터가 부족하여, 어떤 결론을 유추하기에는 다소 무리가 있지만, 나관에 표면거칠기를 임의로 주었을 때, 약간의 표면거칠기에도 전열성능은 크게 향상이 된다는 것을 알 수 있다. 이를 Fig. 5의 수평방향의 그래프와 연관지어서 생각해보면, 나관에 비하여 상대적으로 작은 표면거칠기에도 접촉각의 급격한 감소가 발생하고 그 이후에는 비교적 완만한 감소가 발생하는 것과 완전히 동일한 경향을 보인다. 급격한 접촉각의 변화를 야기하는 표면거칠기에서, 열전달계수도 급격한 증가가 발생할 것이라는 것을 알 수 있다. 이에 대한 이유는 명확히 밝혀지지는 않았지만, 접촉각의 변화가 그대로 전열성능에 반영됨을 단정할 수 있다.

표면거칠기가 증가할수록 액막 증발 열전달이 향상되는 것은 다음과 같이 두 가지로 설명되어질 수 있다. 첫째, 표면거칠기가 증가할수록 고체 표면의 에너지가 증가하여 접촉각이 작아져서 액막의 젖음성을 향상시키는 것이다. 이는 실험 결과에서도 나타나듯이, 액막유량이 충분히 많으면, 증발전열관을 충분히 뒤덮어서 더 이상의 젖음면적의 증가가 없으리라는 예측과 일치한다. 둘째, 표면거칠기를 줌으로써 전열면적의 증가에 기인한 그것이다. 그러나, 낮은 액막유량에서의 전열성능의 나관에 비하여 상대적으로 아주 작은 표면거칠기와 상대적으로 아주 큰 표면거칠기를 만들었을 때, 열전달량이 증가량을 살펴보면, 표면적의 증가만큼의 영향으로만 설명하기에는 부족한 점이 관측된다. 따라서, 표면거칠기의 영향

은 이에 의한 표면자유에너지의 증가에 의한 영향과 전열면적의 증가에 의한 영향을 모두 포함한다고 생각할 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서 고체 표면의 표면거칠기와 액적과의 접촉각 관계로부터 표면자유에너지 변화 현상을 관찰하여 액막 증발 현상에서의 그 영향을 예측하고자 하였다. 또한, 이러한 물리적 현상을 흡수식 냉동기에 사용되는 증발전열관에 적용하기 위하여, 나관에 다종의 표면거칠기를 준 후, 액막 증발 전열 성능 실험을 통하여 결과를 확인할 수 있었다.

아직도 계속 규명해야 할 현상이 남아있지만, 지금까지의 연구를 통하여 다음과 같은 몇 가지 결론을 생각해 볼 수 있었다.

(1) 표면거칠기의 증가는 고체 표면의 표면자유에너지와 고체-액체간의 표면자유에너지의 증가를 발생시켜 그 차이에 의하여 결정되는 접촉각을 줄임으로써 젖음성의 향상을 이룰 수 있었다.

(2) 표면처리 없이 표면가공만 한 고체 표면은 재질 성분의 변화보다는 형상의 변화가 주를 이루는데, 표면거칠기의 증가에 따라서 극성 표면자유에너지보다는 확산표면자유에너지가 상대적으로 많이 변하는 현상이 이로부터 설명될 수 있으리라 생각된다.

(3) 표면거칠기에 따라서 액막 증발 열전달 계수가 증가하는 이유는 액적이 전열관 표면에서 표면자유에너지의 증가로 인하여 더 잘 퍼지는 현상으로 설명될 수 있으리라 생각된다. 또한 큰 액막 레이놀즈수에서는 열전달 계수가 거의 정체하는 현상은, 충분히 많은 유량에 흐를 때는 전열면적이 대부분 덮힌 상태이기 때문에 표면자유에너지가 더 이상 전열면적을 증가시키지 못할 것이라는 추론으로부터 설명되어질 수 있으리라 생각된다.

(4) 표면거칠기의 증가는 표면자유에너지의 증가 뿐만 아니라, 전열관의 열전달 면적도 증가시키기 때문에 전체적인 열전달 능력의 증가는 이 두가지 효과가 복합적으로 나타난 것이라 결론지을 수 있었다. KN600 전열관과 KN024 전열관 면적증가비가 나관과 KN600 전열관의 면적 증가

비보다도 훨씬 큼에도 불구하고 그 만큼의 전열 성능비는 증가하지 않는 현상으로부터 결론 지어 질 수 있다.

(5) 결국, 액막 증발을 이용한 전열관에서의 전열 특성은 표면자유에너지와 관계에서 유도되는 젖음성에 의하여 가장 크게 영향을 받을 것이라는 내용을 확인할 수 있었다.

## 후기

본 연구는 산업자원부에서 시행한 공업기반기술개발 산업(과제명 : 흡수식 냉온수기용 고성능 전열관 개발)으로 추진되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

- 1) K. P. Chun, R. A. Seban, 1971, "Heat Transfer to Evaporating Liquid Films", J. Heat Transfer, pp. 391
- 2) P. J. P. Liu, 1975, "The Evaporating Falling Film on Horizontal Tubes", Ph. D. Thesis, Univ. of Wisconsin
- 3) D. Khrustalev, A. Faghri, 1995, "Heat Transfer During Evaporation on Capillary-Grooved Structures of Heat Pipes", J. Heat Transfer
- 4) K. K. Tio, S. S. Sadhal, 1992, Dropwise evaporation : thermal analysis of multidrop systems", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 35, No. 8, pp. 1987-2004
- 5) J. Min, M. Sako, Y. Kikuchi, 1991, "The Effect of Coating on the Process of Evaporation of a Droplet", Transactions of the JSME, Vol. 57, No. 539, pp. 2323-2328
- 6) D. Yong, J. J. Lorenz, E. N. Ganic, 1980, "Vapor/Liquid Interaction and Entrainment in Falling Film Evaporators", Transactions of the ASME, Vol. 102, pp. 20-25
- 7) M. S. Sehmbe, M. R. Pais, L. C. Chow, 1992, "A study of diamond laminated surfaced in evaporative spray cooling", Thin Solid Films, No 212, pp. 25-29
- 8) A. Leipertz, G. Koch, 1998, "Dropwise Condensation of Steam on Hard Coated Surfaces", Proceedings of 11th IHTC, Vol. 6, pp. 379-384
- 9) S. Y. Oh, E. Bergles, 1998, "Experimental Study of the effects of the Spiral Angle on Evaporative Heat Transfer Enhancement in Microfin Tubes", ASHRAE Transactions: Symposia, pp. 1137-1142
- 10) R. N. 1936, Wenzel, Ind. Eng. Chem., Vol. 28, pp. 988
- 11) H. Nakae, R. Inui, Y. Hirata, H. Saito, 1998, "Effects of Surface Roughness on Wettability", Acta mater., Vol. 46, No. 7, pp. 2313-2318
- 12) M. Lampin, R. Warocquier-Clerout, C. Legris, M. Degrange, M. F. Sigot-Luizard, 1997, "Correlation between substratum roughness and wettability, cell adhesion and cell migration", J. Biomed Mater Res. pp. 99-108
- 13) K. Matsumae, T. Omori, 1996, "Improvement and evaporation heat transfer in an evaporator for absorption chiller-heaters", Annual Technical Report Digest of Tokyo Gas, Vol. 6
- 14) 박지훈, 김균석, 김춘동, 김익생, 2000, "흡수식 냉동기의 증발관에서 표면거칠기 변화에 따른 증발전열특성에 관한 실험적 고찰", 대학기계학회 2000년도 열공학부문 추계학술대회 논문집, pp. 15-21
- 15) J. D. Miller, S. Veeramansuneni, J. Drelich, M. R. Y. Amanchili, 1996, "Effect of roughness as Determined by Atomic Force Microscopy on the Wetting Properties of TFE Thin Films", Polymer Engineering and Science. Vol. 36, No. 14, pp. 1849-1855
- 16) T. R. Thomas et al, 1982, "Rough Surface", Longman Inc., New York