

# 전열면 자세가 응축 열전달에 미치는 영향에 관한 연구

조 시 기†

한라대학교 기계공학부

## A Study on the Effect of the Heat Transfer Surface Position to the Condensation Heat Transfer

Shi-Gie Jho†

Department of Mechanical Engineering, Halla University, Won-Ju 220-712, Korea

(Received September 8, 2000; revision received October 24, 2000)

**ABSTRACT:** A study has been conducted to investigate the effect of the heat transfer surface position in the range of dropwise condensation, filmwise condensation, and glacial condensation. For dropwise condensation promoter, the heat transfer surface was evaporated by gold. As a result, heat transfer rate is almost same where the position of heat transfer surface is between 45 and 135 degree. It is found that heat transfer rate was reduced as subcooled degree was increased. And it is also found that if the subcooled degree becomes lower, the position of heat transfer surface is more effective. Adversely, if the subcooled degree becomes higher, the effectiveness of surface position is getting relatively lower. Regardless of the position, the transition temperature from dropwise condensation to filmwise condensation is in the vicinity of 80 K.

**Key words:** Condensation heat transfer(응축열전달), Dropwise condensation(액적응축), Filmwise condensation(막응축), Glacial condensation(빙상응축)

### 기 호 설 명

- $d$  : 전열면 직경 [mm]
- $h$  : 열전달계수 [ $W/m^2 \cdot K$ ]
- $q$  : 열유속 [ $W/m^2$ ]
- $\Delta T_{sub}$  : 전열면 과냉도 [K]

### 그 리 스 문 자

- $\theta$  : 전열면 경사각도, [ $^\circ$ ]

### 1. 서 론

증기가 저온의 전열면에 접촉하여 포화온도 이하로 냉각되면 잠열을 방출하면서 상(相)변화를 하는 열전달현상을 응축열전달이라고 한다. 이때 전열면의 냉각정도(과냉도)에 따라 액상(液相)또는 고상(固相)에 이른다.

액상은 액적(液滴)응축과 막(膜)응축의 2가지 형태가 있고 고상은 빙상(氷狀)응축이라고 한다.

전열면이 발수성(撥水性)이 뛰어나면 증기는 물방울 형태로 응축한다. 이때 전열면위에서 물방울은 점점 커지거나 또는 근방의 물방울과 합하여져서, 체적이 증가하면 중력작용에 의해 전열면에서 흘러내린다. 이러한 응축형태를 액적응축이라고 하고 열전달률이 다른 응축열전달보다 매우

† Corresponding author

Tel.: +82-33-760-1223; fax: +82-33-760-1221

E-mail address: sgjho@hit.halla.ac.kr

높아서 공업적으로 매우 유용하여 이에 대한 많은 연구가 있다.

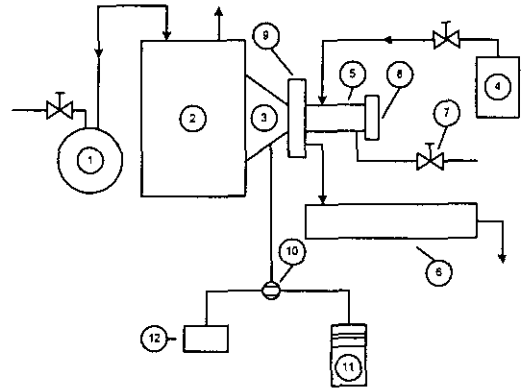
근래에 Izumi et al.<sup>(1)</sup>은 표면이 거칠은 전열면에 나타난 액적응축현상을 고찰하여 낙하하는 액적의 마찰계수를 측정하여 계산식을 제안하였고, Utaka et al.<sup>(2)</sup>은 납으로 도금한 전열면에서 액적응축의 액적거동에 대해서 연구하였다. 이 외에도 막응축을 포함한 응축 열전달에 관한 많은 연구가 있으나, 비교적 과냉도가 낮은 영역에서의 연구를 하였다. 그러나 과냉도를 높여가면 액적-천이-막-빙상의 응축 영역으로 구별되고, 열유속값이 극대치와 극소치를 갖는 응축곡선이 1974년 Takeyama and Shimizu<sup>(3)</sup>에 의해 전모가 발표되었다.

Takeyama에 의하면 빙상응축열전달도 막응축에 비해 높은 열유속값을 얻을 수 있기 때문에 과냉도가 낮은 영역에서 만의 연구뿐만 아니라 과냉도가 100 K 이상의 높은 영역에서도 연구가 필요하다. 따라서 저자도 액적응축 촉진제로서 4가지 금속을 진공증착시킨 전열면을 이용하여 폭넓은 과냉도의 범위에 걸쳐 실험 결과를 보고한 바<sup>(4)</sup> 있다. 지금까지 많은 연구는 과냉도가 낮은 영역에서 응축 전열관의 형태로서 그 성능에 대한 연구<sup>(5-8)</sup>가 많으나 본 연구는 평면의 전열면을 이용하여 광범위한 과냉도에 걸쳐서 보다 기초적인 응축에 대한 연구를 목적으로 하고 있다.

따라서 본 연구는 동(銅)블럭을 가공한 평면의 전열면에 금을 진공증착시켜 발수성을 가진 시험 전열면으로 하였다. 이 전열면을 수평선을 기준으로 하였을 때 각도 15°에서 180°까지 6단계로 자세를 변화시켜 폭넓은 과냉도에 걸친 응축곡선을 구하여, 전열면의 자세가 응축의 양상과 응축 열전달에 미치는 영향을 고찰하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

실험장치는 Fig. 1과 같이 구성되어 있다. 전열블럭냉각용 액체질소 ①을 압축공기로 불어서 냉각상자 ②에 넣는다. ②에 들어온 액체질소는 전열블럭 ③을 냉각시키고, 이 전열블럭과 하나로 되어 있는 전열시험면의 과냉도를 조절한다. 액체질소는 비등점이 대단히 낮기 때문에 높은 과냉도를 발생시키는데 그 양을 조절하여 사용하였고, 과냉도가 낮은 영역에서는 액체질소 대신 냉



- ① Liquid N<sub>2</sub>
- ② Coolant casing
- ③ Heat transfer block
- ④ Boiler
- ⑤ Steam chamber
- ⑥ Condenser
- ⑦ Drain valve
- ⑧ Sight window
- ⑨ Illuminating window
- ⑩ Select switch
- ⑪ Pen recorder
- ⑫ Digital voltmeter

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

수를 사용하였다.

증기는 보일러 ④에서 발생시켜 증기실 ⑤를 거쳐 전열블럭 ③과 한몸체인 전열면에 직각으로 부딪히게 되어 있다. 순수한 증기를 얻기 위해 물은 증류수를 사용하였고, 보일러는 Stainless로 특별히 제작하였다. 전열면에서 응축되지않은 증기는 응축기 ⑥에서 응축시키고, 전열면에서 응축된 응축액과 합하여 그 무게를 측정하여 증기 유속을 구하였다. 응축양상은 관찰창 ⑧을 통하여 관찰 및 사진 촬영을 하였다.

전열블럭은 Fig. 2와 같이 직경 15 mm의 전열면을 갖는 원추형이다. 전열 표면으로부터 1 mm, 2.5 mm, 4.5 mm 그리고 7.5 mm의 4곳에 직경 0.6 mm 구멍을 중심축선까지 뚫어 직경 0.5 mm 시즈형 K type 열전대를 삽입하여, 전열블럭 내의 온도를 측정하여 열유속 및 전열면 표면 온도를 구하였다.

전열블럭 외부의 단열재로서는 테프론블럭을 가공하여 사용하였으며, 전열면과 전열블럭 단열재 사이의 경계에는 알루미늄박을 붙여 전열면에서 생성된 증기의 액적 또는 응축된 수막이 지속적으로 흘러내리도록 하였다.

실험은 전열면을 전열블럭에 장착한 뒤 전열면의 자세(경사각)를 정한 뒤 증기를 발생시켜 약

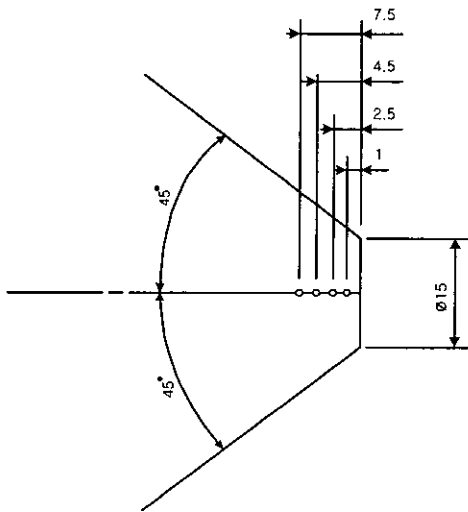


Fig. 2 Size of heat transfer block.

90분 정도의 예비운전을 거친 후 실시하였다. 전열면의 자세는 Fig. 1에서 ②, ③, ⑨, ⑤ 그리고 ⑧이 하나로 고정되어 있기 때문에 이들의 각도를 변화시킨 뒤에 고정하는 방법으로 하였다. 먼저 과냉도가 10 K 정도로 낮은 영역에서는 물을 ②에 주입하여 실험하고, 과냉도가 높은 영역에서는 액체질소를 압축공기로 불어 넣어 가면서 병상응축이 끝날 때까지 지속하였다. 준정상상태로 측정하였으며 시간은 약 1시간 정도 걸렸다. 전열블럭 ③에 삽입된 4개의 열전대 기전력은 Pen Recorder ⑪에 기록하였다.

시험 전열 면에 액상응축을 발생시키기 위해 금을 이용한 진공증착방법과 열유속 및 표면온도를 결정하는 방법은 전보<sup>(4)</sup>와 같다.

### 3. 실험결과 및 고찰

본 실험에서 증기 유속은 4.4 m/s(일정)으로 하였는데, 일반적으로 증기유속을 높이면 증기 전단력이 전열면상에 생성된 액적에 작용하여 액적이 불안정한 상태 또는 액적이 날아가는 효과가 지배적으로 되기 때문에 전열면 경사 각도의 차이에 오는 영향이 나타나기 어렵다.

전열면의 직경  $d=15\text{ mm}$ 로 이미 전보<sup>(4)</sup>에서 Takeyama의 실험 결과 그리고 Nusselt 이론치 등에 대한 비교에서 그 타당성을 검토하였다.

전열면의 경사 각도는 15°, 45°, 90°, 135°, 165° 그리고 180°의 6종류에 대해 열유속을 구하였다. 결과는 Fig. 3에 전열면 과냉도와 열유속의 관계 즉 응축곡선으로 나타내었다.

Fig. 3에서 알 수 있는 바와 같이 수직면(90°)과 45°, 135°에서의 응축곡선은 액적응축의 전체 범위에 있어서 거의 차이가 나타나지 않는다. 이것에 대해 15°, 165°, 180°에서는 상당히 낮은 열유속값을 나타내고 있다. 이것은 전열면의 경사 각도가 작기 때문에, 전열면상에서 성장, 낙하하는 액적의 주기가 활발하지 못하기 때문이다.

즉, 액적이 커지면 전열면 상에는 열전도가 작은 물이 차지하는 비율이 많아져서 열저항의 증

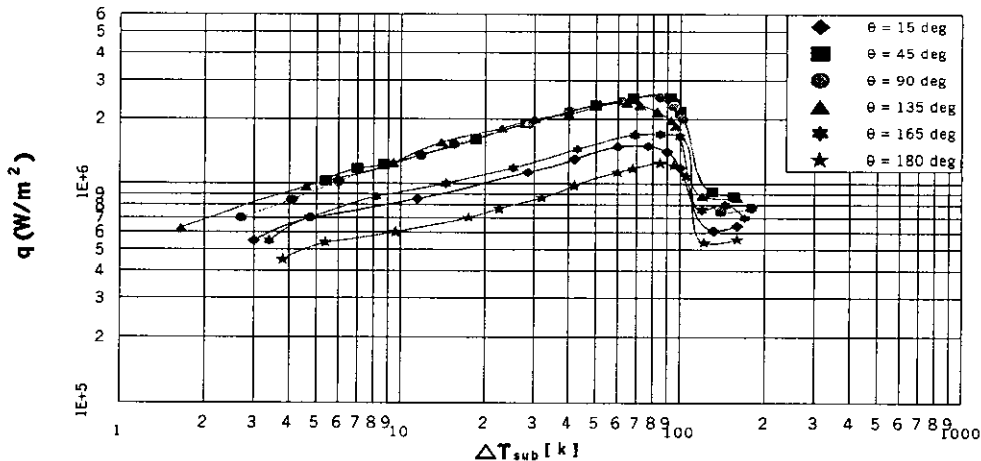


Fig. 3 Condensation curves according to heat transfer surface position.

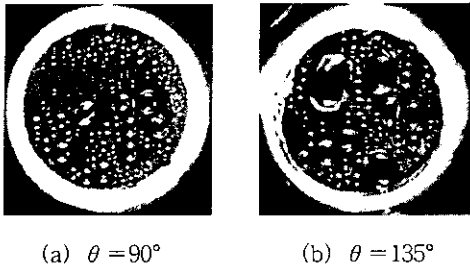


Fig. 4 Comparison of droptsize influenced by heat transfer surface position.

가를 가져오는 것으로 생각한다. Fig. 4 는 수직면(90°)의 경우와 이보다도 전열면 경사각이 크거나 또는 작아질수록 낙하한계액적의 직경이 커지는 것을 보여주고 있는 한 예이다. 또한 액적의 두께도 커짐과 동시에 액적의 성장, 낙하의 주기도 길어지는 것이 관측되었다. 이러한 액적양상의 변화는 액적에 작용하는 중력의 영향이라고 생각한다. 즉, 전열면 경사각이 수직면(90°)보다 커지거나 작아지면, 중력이 전열면에 대한 전단방향의 성분이 작아지고, 수직성분은 커지기 때문에, 전열면상에 존재하는 액적이 어느 이상으로 크지 않으면 낙하하지 않게 된다.

Fig. 5에 과냉도 6 K, 20 K 그리고 70 K에 대한 전열면 경사각과 열전달계수의 관계를 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 과냉도가 커질수록 열전달계수는 감소하는 것을 알 수 있다.

즉, 전열면 경사각이 수직(90°)일 때의 예를 보면, 과냉도  $\Delta T_{sub}=6$ K일 때 열전달계수는  $0.17 \times 10^6 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ 인데 비해 과냉도  $\Delta T_{sub}=70$  K가 되면 열전달계수는  $0.04 \times 10^6 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ 으로 약 4배의 차이를 보이고 있다. 이러한 경향은 전열면

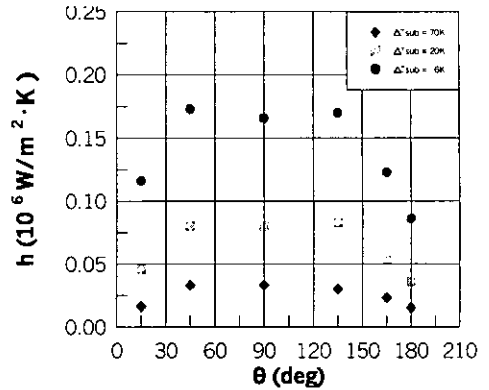


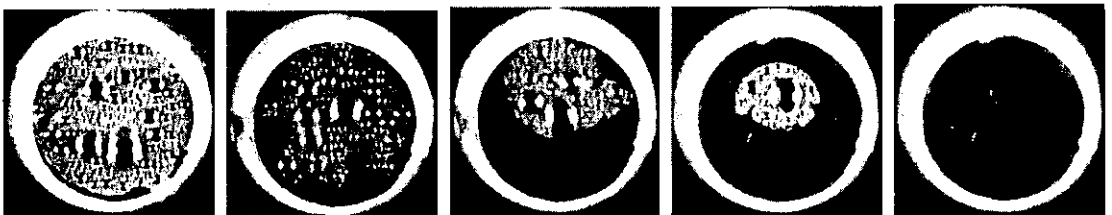
Fig. 5 Heat transfer coefficient and subcooled degree.

경사각도에 따라 정도의 차이는 보이고 있으나 비슷하다.

그리고 전열면 경사각도(자세)에 대한 영향은 과냉도가 일정하다면 경사각도 45°, 90°, 135°에서의 열전달계수는 서로 비슷하나, 15°, 165°, 180°의 경우는 45°, 90°, 135°에 비해 상당히 낮은 값을 나타내고 있다.

또한 과냉도가 6 K에서 70 K로 갈수록 같은 과냉도에서의 최대 열전달계수와 최소 열전달계수의 차이가 크지 않다. 이것은 과냉도가 낮으면 전열면의 자세(경사각)의 영향이 많다는 것을 알 수 있고 과냉도가 커갈수록 전열면 자세의 영향이 작아지는 것을 의미한다.

그리고 본 실험에서 액적응축에서 막응축으로 천이하는 모습도 관찰하였다. Fig. 6이 이때의 사진으로 액적의 두께가 두꺼워지면서(1), 전열면 가장자리(2), (3)에서부터 막 응축이 시작하여, 중심부(4)로 향한다.



(1) Dropwise condensation (2) Commencement of filmwise condensation (3) Advanced partial filmwise condensation (4) Considerably advanced filmwise condensation (5) Fully developed filmwise condensation

Fig. 6 Photographs of transition condensation from dropwise to filmwise condensation.

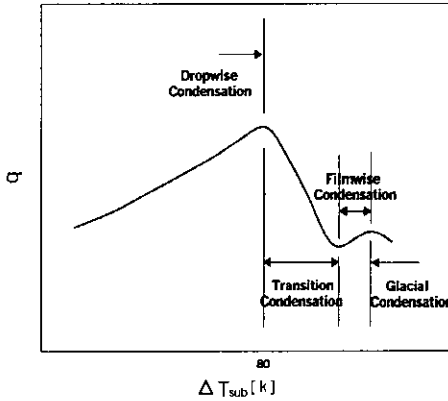


Fig. 7 Mechanism of transition condensation.

액적응축에서 막응축으로의 천이 현상은 짧은 시간내에 이루어지기 때문에 관찰 창을 통한 관찰과 Pen Recorder에 의한 감시를 게을리 하면 놓치기 쉬운 현상이다. Fig. 3에서 전열면 경사각을 바꿔도 거의 같은 과냉도 80 K 부근에서 천이하는 것을 알 수 있다. 천이 현상을 중심으로 한 응축현상은 Fig. 7과 같다. 즉, 과냉도  $\Delta T_{sub} = 80$  K에서 천이하여 막응축으로 되고, 막응축은 두꺼운 액막으로 형성되었기 때문에 열저항층의 증대로 열유속값은 적상응축에 비해 낮은 값을 가진다. 그리고 전열면의 과냉도가 120 K 정도로 크기 때문에 막응축은 곧 빙상응축으로 바뀐다.

4. 결 론

응축열전달에 미치는 전열면 자세의 영향을 고찰하기 위해 폭넓은 과냉도에 걸쳐 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 액적응축 범위 전체에 걸쳐서 전열면 경사각 45°, 90°, 135°에서의 열전달계수의 차이는 크게 없으나, 그 이상 또는 그 이하의 경사각에서는 낮은 값을 갖는다.
- (2) 전열면의 어떠한 자세에 있어서도 과냉도가 증가할수록 열전달계수는 감소한다.
- (3) 과냉도가 낮으면 전열면 자세의 영향이 크고 과냉도가 크면 전열면 자세의 영향이 작다.

(4) 전열면 자세와 관계없이 액적응축에서 막응축으로 천이하는 온도는 과냉도 80 K 근방이다.

참고문헌

1. Izumi, M., et al. 1995, Dropwise condensation and friction factor of condensate drop on rough surface, 32nd National Heat Transfer Symposium of Japan, p. 715.
2. Utaka, Y., et al. 1996, Investigate of heat transfer by condensation of mixture of water and ethanol vapors, 33rd National Heat Transfer Symposium of Japan, p. 689.
3. Takeyama, T. and Shimizu, S., 1974, On the transition of dropwise-film condensation, 5th International Heat Transfer conference, p. 274.
4. Jho, S. G., et al. 1986, A study on condensation heat transfer to some evaporated metal surface, Journal of Air-Conditioning and Refrigeration, Vol. 15, No.2, pp. 188-198.
5. Hosokawa, T., et al. 2000, Heat transfer characteristic on a vertical tube under dropwise condensation, 37th National Heat Transfer Symposium of Japan, p. 645.
6. Teranishi, T., et al. 1995, Condensation heat transfer of binary mixture of immiscible liquids. 32nd National Heat Transfer Symposium of Japan, p. 721.
7. Cho, S. J., et al. 1998, Condensation heat transfer characteristics of alternative refrigerants for CFC-11, CFC-12 for enhance tubes, Journal of Air-conditioning and Refrigeration, Vol. 10, No. 2, pp. 569-580.
8. Hwang, S. M., et al. 1999 condensation heat transfer coefficients of R22 alternative on enhanced tubes, KSME, B., Vol. 23, No. 4, pp. 459-469.