

경사진 가열 평판을 흐르는 리블릿 유동의 열전달 특성에 관한 실험적 연구

강 치 석, 강 병 하*†
국민대학교 대학원, *국민대학교 기계·자동차공학부,

An experimental Study of Heat Transfer of Rivulet Flow over an Inclined, Heated Surface

Chi Suk Kang and Byung Ha Kang*†

ABSTRACT: The rivulet is a narrow stream of liquid flowing down a solid surface. Heat transfer of rivulet flow over on inclined heated surface has been investigated experimentally. This problem is of particular interest in the understanding of fundamental mechanism on rivulet heat transfer as well as in the design of a regenerative evaporative cooler. The rivulet is seem to be meandering flow, single wide flat flow, and film flow as rivulet flow rate is increased. Even though the wetted surface area is increased with an increase in the rivulet flow rate, the absorbed heat transfer of rivulet flow from a heated surface strongly depends on the flow pattern of rivulet.

Key words: Rivulet flow(리블릿 유동), Wttted Area ratio of Rivulet(리블릿의 젖음도), Heat Transfer(열전달)

기 호 설 명

- A : 판의 면적(wetted area) [m²]
- C_p : 물의 비열(W/kg °C)
- hc : 리블릿의 열전달 계수 [W/m²K]
- m : 리블릿의 질량 유량 [g/s]
- Q : 열전달량 [W/m²K]
- T_p : 평판의 평균 온도 [°C]
- T_{w, in} : 리블릿의 입구 온도 [°C]
- T_{w, out} : 리블릿의 출구 온도 [°C]
- T_w : 리블릿의 평균 온도 [°C]
- ΔT : 평판과 리블릿의 온도차 [°C]

그리스 문자

- σ : 리블릿의 젖음도 [%]

1. 서론

리블릿(rivulet)이란 고체 표면을 흘러내리는 액체의 가느다란 유동을 뜻하며, 이러한 리블릿은 자연계 및 공업현장에서 흔히 발견되는 현상이다. 특히, 창문에 부딪히는 빗물, 지하수의 침출, 원유채굴, 코팅 과정, 증발 열교환기, 냉각탑의 충전재 및 흡수기 등에서 쉽게 관찰될 수 있다.

액체가 고체 표면 위에서 운동할 경우, 표면의 젖음성(wettability)에 따라 그 형태가 결정된다. 친수성이 강한 표면 위에서는 필름유동이 관찰되

†Corresponding author

Tel.: +82-2-910-4681; fax: +82-2-910-4839

E-mail address: bhkang@kookmin.ac.kr

는 반면에, 그 외의 표면 위에서는 리블릿이나 액적유동이 관찰된다.

Schmuki and Laso⁽¹⁾은 소수성 표면을 이용한 실험을 통하여 리블릿을 유동의 형태에 따라 네 영역으로 구분하였으며, 는 기울어진 표면에서 리블릿 유동을 실험적으로 연구하여, 리블릿의 형태를 동일한 기울기에서 유량의 증가에 따라, 액적유동(droplet flow), 선형 리블릿(linear rivulet), 만곡 리블릿(meandering rivulet) 및 왕복 리블릿(oscillating rivulet)의 네 영역으로 구분하였다.

Culkin and Davis⁽²⁾는 리블릿의 만곡 특성이 표면 장력과 접촉각 히스테리시스에 의해 결정되는 것을 규명하였고, Nakagawa⁽³⁾은 반복되는 리블릿의 메카니즘은 사각형 노즐에서 반복적으로 분사되는 물과 관련이 있음을 규명했다.

Stefano and Sonin⁽⁴⁾은 실험적으로 작은 크기의 액적이 고체 표면을 흐를 때의 위치와 유동성을 확인하고, 무점성의 작은 크기의 액적이 파장이 액적의 불안정성을 최대화하는 인자임을 실험적으로 규명하였다.

Kim⁽⁵⁾ 등은 경사면 위의 리블릿 유동에서 액적 유동으로의 천이, 액적의 미끌림 운동⁽⁶⁾ 및 리블릿의 만곡 운동⁽⁷⁾을 지배하는 메커니즘이 접촉각과 접촉각 히스테리시스라 착안하고 만곡 리블릿의 불안정성에 미치는 변수들의 영향을 섭동법과 스케일링 해석 방법을 사용하여 이론적으로 분석하였다.

리블릿의 유동 특성 뿐 아니라 열전달 특성도 자연계 및 공업현장에서 관찰되는데, Sultanovic⁽⁸⁾ 등은 예열된 기울어진 알루미늄 평판에서 리블릿의 유량에 따른 리블릿의 열흡수율을 실험적으로 연구하여 유량에 따른 열전달 특성은 리블릿의 유량 범위에 따라 열전달률이 증가함을 고찰하였다.

Kabov⁽⁹⁾ 등은 국부적인 가열을 받으며 수직 평판을 흐르는 액막 유동에서 리블릿의 구조, 형상 그리고 열전달을 분석하고, 노즐에서 나오는 액체의 레이놀스수가 증가하면 리블릿의 열전달 계수는 감소함을 규명하였다.

본 연구에서는 리블릿 유동의 열전달 특성이 유량 범위에 따라 정해지는 것에 착안하여, 유량 범위에 따른 유동형상의 특징을 가시화를 통하여 규명하고, 일정한 열유속을 받는 평판에서 열전

달 특성을 고찰 하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

Fig. 1 은 리블릿 유동의 열전달 특성 실험 장치를 개략적으로 나타낸 것이다. 실험 장치는 크게 시험부와 유량 공급부로 구성되어 있다.

리블릿은 수평과 15° 경사진 3 mm두께의 동판(0.294 m × 0.477 m)의 표면을 흐르며, 테스트 표면을 지난 리블릿을 하부 수조(gutter)에 모으고 정밀저울을 이용하여 그 양을 측정한다. 평판 하부에 실리콘 히터를 부착하여 일정 열 유속을 가하였고, 평판 뒷면에 열전대(T Type)를 9곳에 부착하고 하부 수조, 항온조에 각각 1개씩 설치하고, 온도 측정은 데이터 취득기(Yokogawa Co. Darwin 230)를 사용하였다. 평판 표면과 평판 뒷면과의 평균온도의 차이는 0.5°C이하로 나타나, 표면온도와 뒷면과의 온도는 같다고 가정하였다. 측정하였다. 공급수는 DC펌프를 사용하였고, 유량은 코리올리스 질량 유량계(Oval Co. CN003C-SS-200R)를 이용하여 측정, 나사 조임식 밸브를 사용하여 조절하였다, 정확한 유량의 측정을 위해 리블릿의 흐름이 정상상태가 되었을 때 1분 동안 물을 받아 정밀저울(AND Co. HP-30K)로 질량을 측정하여 물의 질량유속을 계산하여 부피유속으로 환산하였다. 유량계의 측정 범위는 0~2 l/min 오차범위는 ±0.1%FS이다. 그리고, 디지털 카메라를 이용하여 리블릿의 유동 특성과 젖음도를 관찰하였다.

실험의 변수로서 유량은 3 ml/s ~ 21 ml/s의

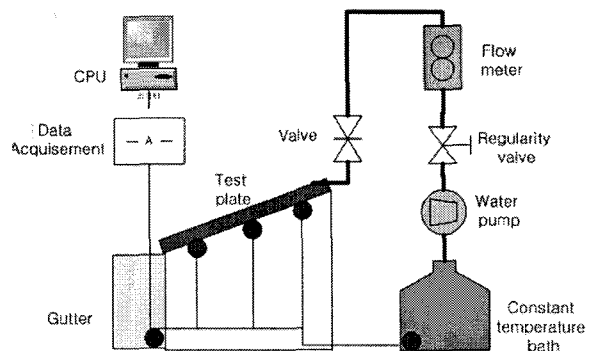


Fig. 1 Experimental apparatus.

범위에서 1 ml/s 간격으로 변화시키면서 실험을 수행하였고, 평판에 투입되는 열량은 교류변압기에서 전력을 받아 히터에 1386 W로 일정하게 가해진다.

실험 방법은 먼저 평판을 60°C까지 예열시킨 후 공급수를 일정 유량으로 예열된 평판에 흘려준다. 이때 판의 온도는 변하게 되고, 항온조로부터 사용되는 물의 온도($T_{w, in}$)는 20°C로 유지되고 일정 유량으로 내경 4 mm인 고무관을 지나 평판을 흐른다. 고무관은 평판의 끝 부분의 중심에 설치되며 물은 평판을 지나 하부 수조에 모아지고 온도($T_{w, out}$)를 측정하였다. 이때 측정되는 온도는 임의의 시간까지 물의 평균온도이다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 2는 준 정상 상태까지 시간이 가장 오래 걸리는 유량이 3 ml/s 일 때의 온도 변화를 나타낸 것이다. 평판의 온도는 평판 밀의 9개 온도의 평균값으로 정하였다. 평판온도(T_p), 출구온도($T_{w, out}$)는 유량에 따라 변하게 되고 시간에 따라서 변한다. 하지만 200초 이후부터는 준 정상상태에 이르게 되고, 정상상태에 도달하면 온도를 측정하였다.

평판에서 물로 흡수된 열량은 식 (1)에 의해 계산된다. 여기서, m 는 물의 질량 유량이고 C_p 는 물의 비열이다. 열전달 특성 계산시에 사용되는 ΔT 는 평판온도 T_s 와 물의 평균온도 $T_w = (T_{w, in} + T_{w, out})$ 와의 차로 계산 된다.

$$Q_{absorbed} = m c_p (T_{w, out} - T_{w, in}) \quad (1)$$

Fig. 3은 60°C로 예열된 평판에 리블릿을 흘리고 난 후 정상상태에 도달 하였을 때 유량에 따른 평판의 온도, 리블릿의 온도, 평판과 리블릿의 온도차를 나타낸 것이다. 리블릿 유량이 증가할수록 평판온도, 리블릿 온도, 온도차는 감소하는 경향을 나타낸다. 이는 리블릿 유량이 커짐으로써 평판으로부터 리블릿으로 흡수되는 열량이 증가함을 보여준다.

Fig. 4는 리블릿의 유량에 따라 리블릿 유동의

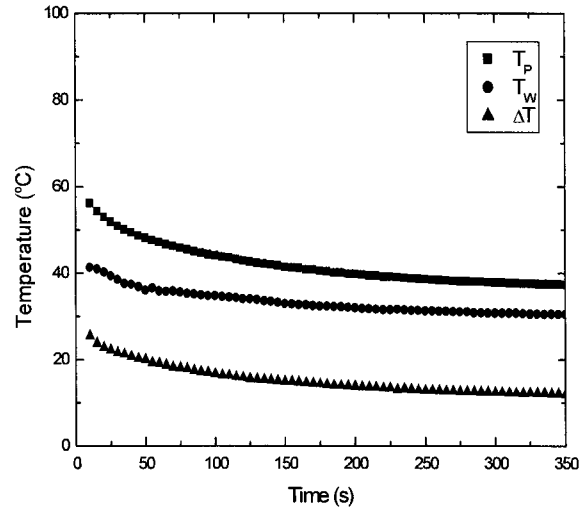


Fig. 2 Transient variation of a plate temperature T_P , plate temperature T_W , temperature difference between plate and rivulet ΔT .

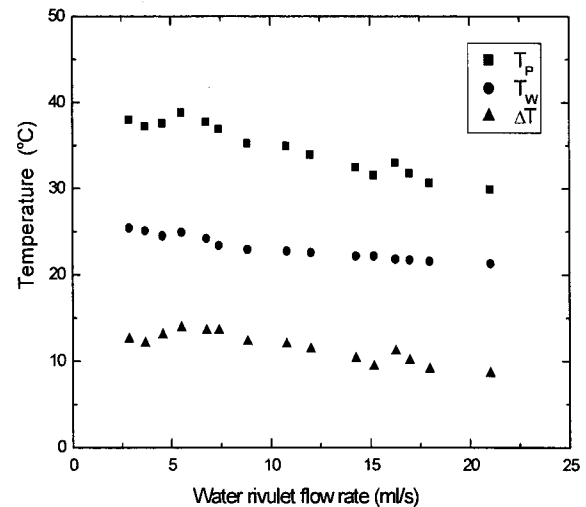


Fig. 3 The temperature of a plate T_P , rivulet T_W , temperature difference ΔT as a function of rivulet flow.

형상이 만곡 리블릿(meandering rivulet)에서 단순 퍼짐 리블릿(single wide flat rivulet), 필름 유동(film flow)으로 변하는 것을 유동 가시화를 통하여 보여 준다. Fig. 5는 리블릿 유량이 증가함에 따라 평판으로부터 리블릿으로 흡수되는 열량에 미치는 영향을 나타낸다. 흡수된 열량의 특성은 3개 구간으로 나눌 수 있는데, 이런 특성

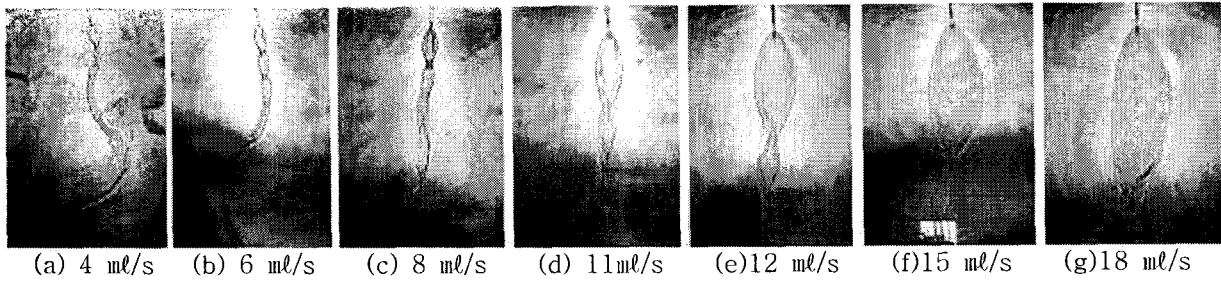


Fig. 4 Flow patterns of rivulet flow.

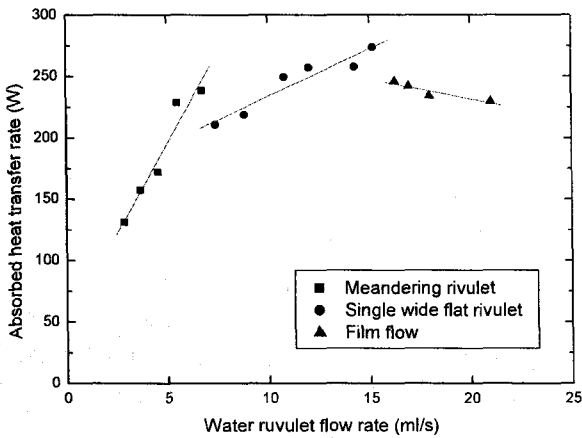


Fig. 5 Effect of rivulet flow rate on the absorbed heat transfer.

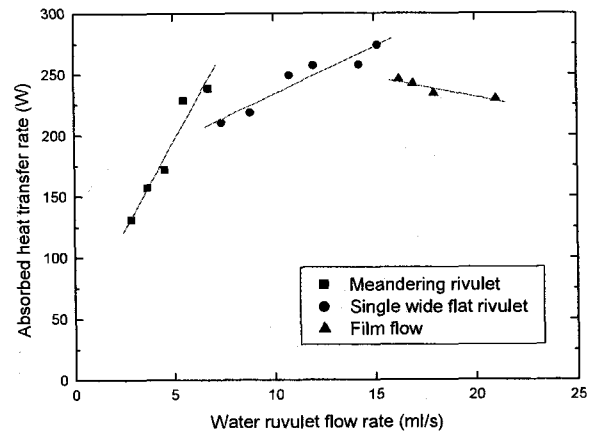


Fig. 7 Effect of rivulet flow rate on heat transfer coefficient.

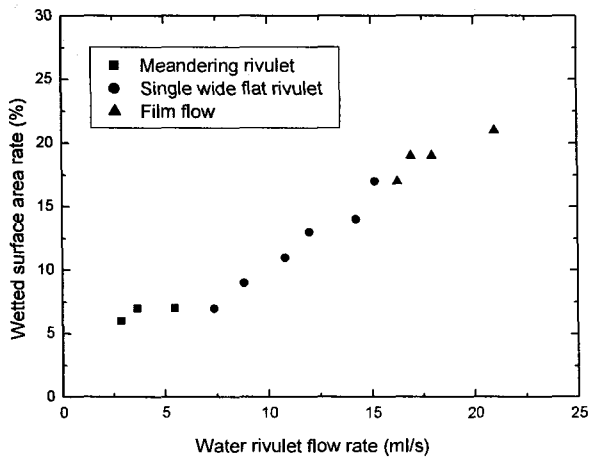


Fig. 6 Effect of rivulet flow rate on wetted surface area.

은 Fig 4 나타나듯이 유량에 따라 리블릿의 유동 형상이 만곡 리블릿(meandering rivulet)에서 단순.퍼짐 리블릿(single wide flat rivulet), 필름 유동(film flow)로 나누었다.

리블릿 유량이 3~7 ml/s 구간에서는 만곡 리블릿 유동이 형성되고 유량 증가에 따라, 리블릿 유동의 곡률이 커지고 따라서 열전달 면적도 증가하여 흡수된 열전달량은 급격하게 증가한다.

7~15 ml/s 구간에서는 단순 퍼짐 리블릿 유동이 형성되고 유량이 증가함에 따라, 리블릿의 폭이 커지고, 따라서 열전달 면적이 커짐을 알 수 있다. 그러나 곡률은 만곡 리블릿 경우 보다 변화가 없어 열전달률의 증가율은 만곡 리블릿보다 감소한다. 15~21 ml/s 구간에서는 단순 퍼짐 유동에서 필름 유동으로 변하고, 이에 따라 면적은 증가 하게 되지만 그 증가율이 유량증가 비율보다 크게 되어 필름의 두께가 두꺼워져 열전달률이 감소하는 경향을 보이게 된다. 그러나 일반적으로 필름 유동 형태에서는 유량이 증가하면 열전달률이 증가하는데, 본 실험에서는 단순 퍼짐 유동에서 필름 유동으로의 천이 영역으로 규명되고, 유량이 증가함에 따라 열전달률이 약간 감소하는 것으로 나타난다.

식 (2)는 평판에서 리블릿으로 흡수된 열전달률을 평판과 리블릿의 대류열전달에 대한 식으로 나타낸 것이다. 흡수된 열전달률은 열전달 계수 (h_c), 리블릿으로 흡수된 열전달률을 평판 전체

$$Q_{absorbed} = h_c A \sigma \Delta T \quad (2)$$

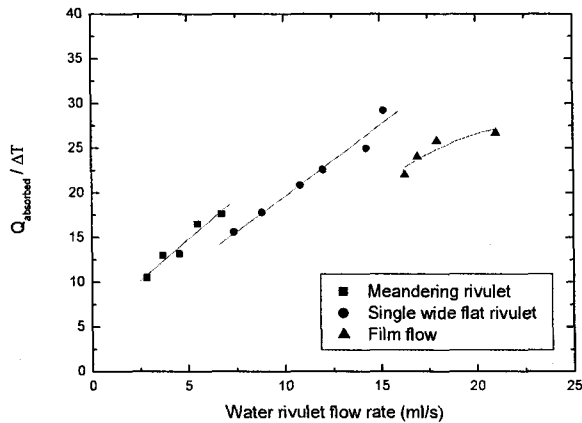


Fig. 8 The ratio absorbed heat transfer of temperature difference.

면적(A)과 젖음도(σ)를 고려한 리블릿의 열전달 면적 그리고, 평판과 리블릿의 온도차(ΔT)의 곱이다.

Fig. 7은 유량이 열전달 계수에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 유량이 증가함에 따라 만곡 리블릿 영역에서는 열전달 계수가 증가하고, 단순 퍼짐 리블릿은 감소하고, 필름 유동에서는 미세하게 감소함을 보인다. 이는 만곡 리블릿 유동은 유량의 증가에 유동 특성에 따라 열전달계수의 증가가 열전달률의 증가에 미치는 영향이 젖음도 증가의 영향보다 크고, 단순 퍼짐 리블릿과 필름 유동에서는 열전달계수의 특징보다 젖음도의 증가가 열전달률에 미치는 영향이 크기 때문이다.

실제 자연계 및 공업현장에서 리블릿의 면적을 측정하기는 어려운 상태이다. 따라서 Fig. 8처럼 리블릿의 유량이 증가함에 따라 열전달특성을 열전달계수와 면적의 곱으로 나타내면 열전달률과 평판과 리블릿의 온도차에 대한비로 나타내는 것이 실용적이다. Fig. 8은 유량이 증가함에 따라 열전달률과 온도차에 대한 비를 나타낸 것이다.

4. 결론

본 연구는 가열된 기울어진 동판위를 흐르는 리블릿 유동의 열전달 특성을 관찰 하였다. 경사진 평판위를 흐르는 리블릿 유동은 유동 형태에 따라서 만곡 리블릿, 단순 퍼짐 리블릿, 필름 유동으로 나누어 지고 유동 형태에 따라 열전달 특

성이 달라짐을 확인했다. 열전달 특성이 달라지는 원인은 리블릿의 유량과, 유동형태에 따른 젖음도와 열전달 계수의 차이임을 규명했다.

리블릿 유량이 3~7 ml/s인 구간에서는 만곡 리블릿 형태가 나타나고 열전달률은 급격히 증가하는데 이는 유량이 커짐에 따라 곡률 증가와, 열전달계수의 증가의 영향이 유량 증가의 영향보다 크기 때문이다.

7~15 ml/s인 구간에서는 단순 퍼짐 리블릿 형태가 나타나고 유량 증가와 열전달 면적이 증가하는 영향이 열전달계수가 감소하는 영향보다 크기 때문에 열전달률이 증가함을 규명하였다.

15~21 ml/s 구간에서는 단순 퍼짐 리블릿에서 필름 유동으로의 전이 구간으로 규명되고 열전달률이 약간 감소한다. 이는 유량 증가에 따른 면적 증가보다 액막이 두꺼워지는 영향으로 인한 열전달계수 감소의 영향이 크기 때문이다.

본 연구에서는 리블릿 유동에서 그 형태에 따라 곡률과, 열전달 면적 변화를 가시화를 통해 규명하였고, 열전달률이 변하는 특성과 열전달면적과 열전달계수의 특성을 규명하였다.

후 기

본 연구는 과학재단의 특정기초연구(과제번호 R01-2003-000-10132-0)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- Schmuki, P. and Laso, M., 1990, On the Stability of Rivulet Flow, J. Fluid Mechanics, Vol. 215, pp. 125 - 143.
- Culkin, J. B. and DAVIS S. H., 1984, Meandering of Water Rivulets, J. AICHE, Vol. 30, No. 2, pp. 263 - 267.
- Nakagawa T., 1992, Rivulet Meanders on a Smooth Hydrophobic Surface, Int. J. Multiphase Flow, Vol. 18 No. 3, pp. 455 - 463.
- Stefano S. and Sonin A. A., 1997, Formation and Stability of Liquid and

- Molten Beads on a Solid Surface, *J. Fluid Mechanics*. Vol. 343, pp. 95 - 110.
5. Kim, H. -Y., and Chun, J. H., 2001, The Recoiling of Liquid Droplets upon Collision with Solid Surfaces, *Physics of Fluids*, Vol. 13, No. 3, pp. 643 - 659.
 6. Kim, H. -Y., Lee, H. J. and Kang B. H., 2002, Sliding of Liquid Drops down an Inclined Solid Surface, *J. Colloid Interface Science*, Vol. 247, pp. 372 - 380.
 7. Kim, J. H., Kim, H. -Y. and Lee, J. H., 2001, Instability of Rivulet Flow on Inclined Solid Surface, *Proceedings of ICMF*, New Orleans, Louisiana, U.S.A. Paper No. 822.
 8. Sultanovic D. Bjerke B. and Villalonga K. A., 1997, Heat transfer and rivulet structures formation in a falling thin liquid film locally heated, *Solar Energy*, Vol. 60, Nos. 3/4 pp. 221 - 227.
 9. Kabov O. A., Scheid B., Sharina I. A. and Legros J. -C., 2002, Heat Transfer and Rivulet Structures Formation in a Falling Thin Film Locally Heated, *Int. J. Thermal Science*, Vol. 41, pp. 664 - 672.