

■ 論 文 ■

管表面에서의 曲面凝縮膜의 熱傳達

裴 洵 勳* · 崔 英 惇

Condensation Heat Transfer to Rivulets of
Condensate on Horizontal tubes

Soonhoon Bae and Young Don Choe

Abstract

A simple analysis has been made of the condensation of vapor onto rivulets of condensate which are formed by non-wetting narrow Teflon strips circumferentially located in a certain interval on horizontal tubes. Heat transfer to the rivulets increased over 50% above that to the Nusselt uniform thickness film. Results are directly applicable to condenser tubes in large steam condensers.

序 論

凝縮이 방울모양(dropwise)으로 일어날 때 높은 熱傳達係數를 얻을 수 있다는 것은 잘 알려진 事實이다. 그 理由는 液體방울의 두께가 얇아서

熱傳達에 抵抗을 주지 않기 때문이다^{1) **}. 이러한 形態의 凝縮이 일어나기 위하여는 表面의 non-wetting 性質이 있어야 한다. 一般的으로 大部分의 金屬表面은 酸化나 다른 物質의 汚染으로 물에 의하여 wetting 되는 性質이 있다. 水蒸氣

<記 號 說 明>

c Teflon strips 간격의 절반, m	t rivulet의 두께, m
g 重力 加速度, m/sec ²	ΔT 管内壁과 蒸氣와의 溫度差, °C
h_i 境界面凝縮熱傳達係數, kcal/m ² hr°C	x 管軸方向 座標, m
h_m 圓周方向의 平均熱傳達係數, kcal/m ² hr°C	z 管直徑方向 座標, m
h_N Nusselt 膜의 熱傳達係數, kcal/m ² hr°C	Γ_ϕ 圓周角中에서의 單位管길이당 流量, kg/hr. m
h_s 局所熱傳達係數, kcal/m ² hr°C	δ 相當 Nusselt 膜의 두께, m
h_ϕ 軸方向의 平均熱傳達係數, kcal/m ² hr°C	θ 相當接觸角(그림 3)
k_l 凝縮液體의 熱傳導度, kcal/m hr°C	τ 蒸氣의 잠열, kcal/kg
k_m 管壁의 熱傳導度, kcal/m hr°C	μ 粘性, kg/hr m
M 式(6)에서 定意된 無次元數	ρ 比重, kg/m ³
R_1 管의 內徑, m	ϕ 圓周角
R_2 管의 外徑, m	

* 韓國科學院

** 괄호안의 숫자는 參考文獻의 번호임

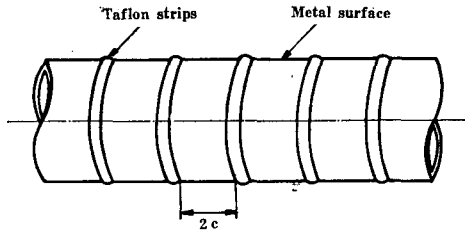


Fig. 1 Condensation on a horizontal tube with Taflon strips

를 凝縮시킬때 보통 膜凝縮이 일어난다. 따라서 이때의 熱傳達을 促進하기 위하여 여러가지 方法이 講求되고 있는데 그 中 하나는 Taflon 띠 (strips)로 管壁의 一部를 둘러 싸는 것이다. 平板에 이런 形態를 使用하여 desalination에서 vertical evaporator 表面으로 쓰는 경우는 보코가 되어 있으나²⁾ 管壁에 處理하여 發電所 水蒸氣 凝縮器 같은 곳에 使用된 例는 없는것 같다. 本論文에서는 水平管 周圍를 Taflon strips 으로 둘러쌌을 때(그림 1)의 熱傳達 現象을 解析하고자 한다.

Brown 과 Matin³⁾은 垂直平板에서 液體가 rivulets 로 흐를때 流體力學과 熱傳達을 解析하였는데 이에 따르면 凝縮膜의 두께가 얇을 때는 一次元的인 解析도 매우 正確하므로 여기서는 一次元的인 解析만 하였다.

理論的인 解析

그림 1에서와 같이 Taflon strip이 2c의 간격을 두고 설치되어 있을때 管 内部에 찬 流體가 흐르고 管 外部에 飽和蒸氣가 存在하면 管 表面에는 그림 2와 같은 曲面凝縮膜이 rivulet 모양으로 생기는데 이는 金屬表面은 液體에 의하여 wetting 되고 Taflon 表面은 non-wetting 되기 때문에 表面張力에 依하여 생기는 現象이다. 그림 3에서는 靜止狀態에 있는 물 방울이 Taflon 表面에서 non-wetting 되는 것을 보여주는 사진인데 流體가 流動한다고 하여도 이 角度는 별로 變하지 않는다. 그러나 Taflon strips와 金屬表面이 一定한 角度를 維持하고 있기 때문에 凝縮液의

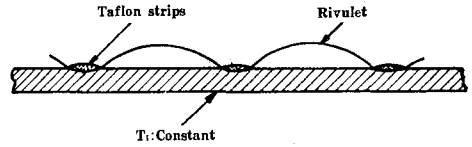


Fig. 2 Cross Section of rivulet flow

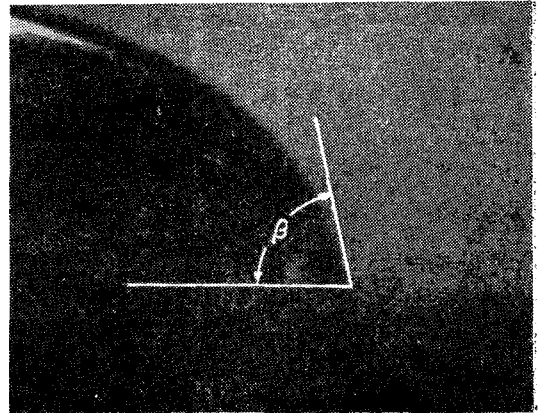


Fig. 3. Photograph of contact angle between water and Taflon

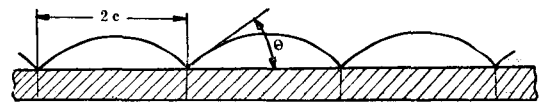


Fig. 4 Idealized model for heat transfer analysis.

流量에 따라서 rivulet의 相當接觸角 θ 는 變한다고 생각할 수 있다. 그림 4와 같은 모델을 고려하고 rivulet의 表面은 圓弧에 해당한다고 理想化할 수 있다. 單純히 表面張力만 作用하면 圓弧가 된다. 實際로는 蒸氣의 剪斷力과 凝縮液의 流動으로 圓弧와 다른 曲面이 되나 θ 가 작은 경우에는 理想的인 모델에 가깝고 특히 水平管에서 凝縮이 일어난다는 경우는 圓周의 둘레가 비교적 짧으므로 凝縮液의 流量이 적고 위에 모델과 잘 附合된다.

rivulet의 圓弧는

$$x^2 + \left(z + \frac{c}{\tan \theta}\right)^2 = \frac{c^2}{\sin^2 \theta} \quad (1)$$

로 表示할 수 있고 rivulet의 두께 t는

$$t = \frac{c}{\sin \theta} \sqrt{1 - \left(\frac{x \sin \theta}{c}\right)^2} - \frac{c}{\tan \theta} \quad (2)$$

로 나타나는데 式(7)에서 θ 가 작은 경우 $\sin \theta \cong \theta$

를 利用하여 簡單히 표시하면

$$t \cong \frac{\theta c}{2} \left[1 - \left(\frac{x}{c} \right)^2 \right] \quad (3)$$

또 이 曲面膜을 통한 局所熱傳達係數는 一次元的인 熱傳導단을 考慮하여

$$h_x = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{t}{k_i} + \frac{R_1}{R_m} \ln \frac{R_2}{R_1}} \quad (4)$$

로 표시되는데 여기서 熱傳達係數 h_x 는 蒸氣에서 부터 管內壁까지의 總熱傳達係數이다. 이 두점의 溫度는 比較的 均一하다고 볼 수가 있으므로 一次元 解析이 適合하다. 式(4)로부터 x 方向의 平均熱傳達係數 h_ϕ 는

$$h_\phi = \frac{1}{c} \int_0^c h_x dx = \frac{k_i}{\theta c \sqrt{1+M}} \ln \frac{\sqrt{1+M}+1}{\sqrt{1+M}-1} \quad (5)$$

가 된다. 여기서

$$M = \frac{2k_i}{\theta c} \left(\frac{1}{h_i} + \frac{R_1}{R_m} \ln \frac{R_2}{R_1} \right) \quad (6)$$

으로 液體表面에서의 質量傳達抵抗 때문에 생기는 境界面凝縮抵抗과 金屬의 熱傳導抵抗의 합과 凝縮膜을 통한 傳導抵抗의 比이다. rivulet 單位幅에 대한 流量은 Nusselt⁴⁾의 解析으로 부터

$$\Gamma_\phi = \frac{\rho^2 g}{3\mu c} \int_0^c t^3 dx \quad (7)$$

式(3)을 代入하면

$$\Gamma_\phi = \frac{2\rho^2 g \theta^3 c^3}{105\mu} \quad (8)$$

勿論 이때 Navier-Stokes 方程式으로 부터 速度分布를 求하고 이 速度를 積分하면 좀더 正確한 解를 求할 수 있으나 θ 가 30° 以下인 경우에는 그 誤差가 1%도 못된다³⁾.

圓周方向의 平均熱傳達係數 h_m 은 위의 h_ϕ 로 부터는 求할 수 있다. 먼저 管의 最上部($\phi=0$)에서 始作하여 流量은

$$\Gamma_i = \left(\frac{h_\phi \Delta T}{\lambda} \right)_{i-1} R_2 \Delta \phi + \Gamma_{i-1} \quad (9)$$

相當接觸角 θ 는

$$\theta_i = \left[\frac{\Gamma_i}{\sin \phi_i} - \frac{105\nu}{2\rho g c^3} \right]^{1/3} \quad (10)$$

式(5), (9), (10)을 反復하여 計算한 다음 일정한 $\Delta \phi$ 를 가지고 step-by-step으로 計算하면 된다.

또 어느 위치 i 까지의 平均熱傳達係數 h_{mi} 은

$$h_{mi} = \frac{\Gamma_i \lambda}{R \phi_i \Delta T} \quad (11)$$

이다. 이것을 Tafel strips이 없는 경우와 비교하기 위하여 같은 流量의 軸方向으로 直線的인 液體膜을 考慮하면

$$\frac{2\rho^2 g \theta^3 c^3}{105\mu} = \frac{\rho^2 g \delta^3}{3\mu} \quad (12)$$

이고 여기서 부터

$$\delta = 0.77 \left(\frac{\theta c}{2} \right) \quad (13)$$

이에 해당하는 熱傳達係數는

$$h_N = \frac{2k_i}{\theta c (0.77 + M)} \quad (14)$$

이고 먼저 h_ϕ 와의 比는

$$\frac{h_\phi}{h_N} = \frac{(0.77 + M)}{2\sqrt{1+M}} \ln \frac{\sqrt{1+M}+1}{\sqrt{1+M}-1} \quad (15)$$

이 된다.

結果와 檢討

위式들을 外徑이 1.67 cm인 銅管에 水蒸氣가 凝縮할 때 適用하여 溫度差 ΔT 와 管壁 두께의 變化가 熱傳達係數와 凝縮液 流量에 어떤 影響을 주는가를 檢討하였다. 表 1에는 管壁 두께의 影響을 計算하여 整理하였는데 一次元모델에서 오는 誤差가 있으리라 짐작된다. 正確한 解는 三次元 Fourier 方程式을 有限差分法으로 풀 수 있으나 境界條件 自體가 理想的이므로 管의 材質이 銅인 경우는 本 一次元 解析이 만족할 만큼 正確할 것이다. 正確한 解와 本 論文의 結果 比較는 추후 研究를 繼續하려고 한다. 그림 5, 6, 7에는 圓周方向의 位置 ϕ 에 따른 rivulet 接觸角 θ 의 變化와 熱傳達係數 및 流量을 나타내었다. 여기서 實際의 接觸角은 物質의 性質에 따라 定해지는 數이나 Tafel의 表面 傾斜로 因하여 그림 4과 같은 現象이 일어날 때 液體表面의 접선과 金屬表面이 이루는 角을 接觸角으로 나타내었다. 그림 5에서 볼 수 있는 바와 같이 管의 上方에서 接觸角이 커졌다가 90° 에서 감소하고 그 以後에 다시 增加하는 것은 매우 興味있는 일이다. 이는 重力의 영향이 적은 데서 큰 데로 變化고 流量은

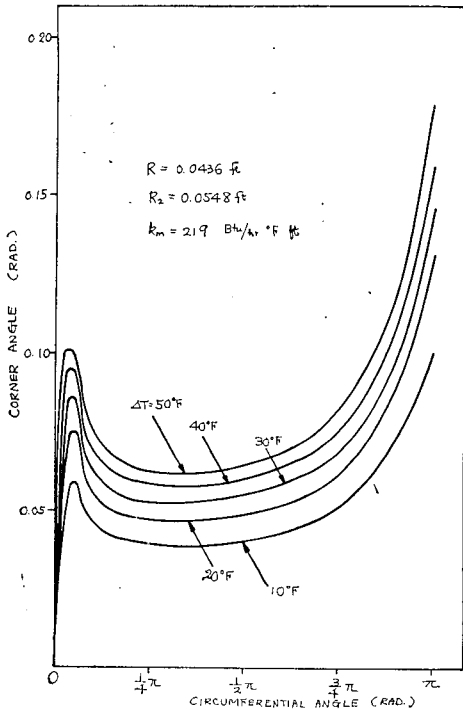


Fig. 5 상당접촉각 θ 의 변화

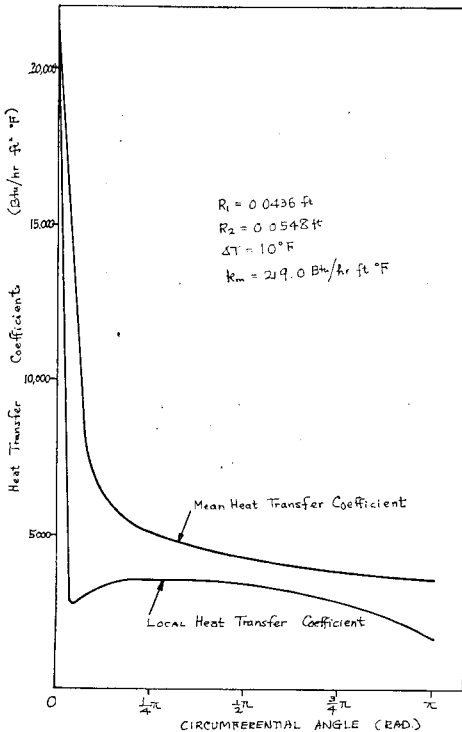


Fig. 6 열전달 계수의 변화

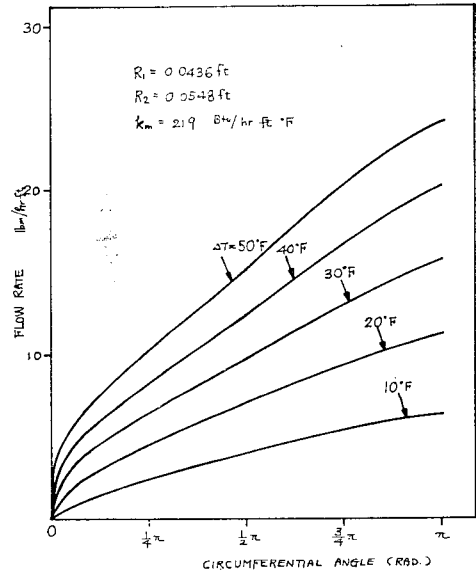


Fig. 7 응축액 유량의 변화

繼續 增加함으로 發生하는 것 같다. 最少接觸角은 圓周角이 약 45°인 곳에서 일어난다.

이에 따라서 熱傳達係數도 감소 증가 다시 감소하는 傾向을 보여주고 있다.

Taflon strips 이 있을 경우와 없을 경우를 比較하여 그림 8과 9에 표시하였는데 열전달계수는 Taflon 이 있는 경우 약 두배임을 알 수 있다. 管壁의 두께가 두꺼우면 두꺼울수록 Taflon 에 의한 영향이 적어지는데 이는 rivulet 의 가장자리에서 金屬熱傳導抵抗이 커지기 때문이다.

Taflon strip 의 位置 變化는 一次元 解析으로는 그 影響을 알 수가 없을 정도로 작다. 그러나 正確한 解에서는 θ 가 30°보다 클때는 상당한 影響을 미친다. 水平管인 경우 θ 가 30° 以下인 경우가 많고 특히 管의 材質이 구리인 경우에는 strip 의 位置에 따른 熱傳達係數의 變化는 무시할 수 있을 정도로 작으므로 管의 外徑에 比較해서 膜의 最大 두께가 무시될 수 있을 정도로 strips 를 배치하면 된다. strips 가 많으면 有效熱傳達面積이 減少하므로 最少限으로 하는 것이 經濟的 이다.

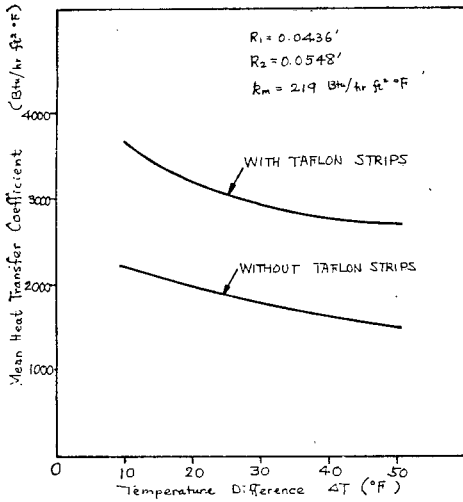


Fig. 8. 온도차 ΔT 의 영향

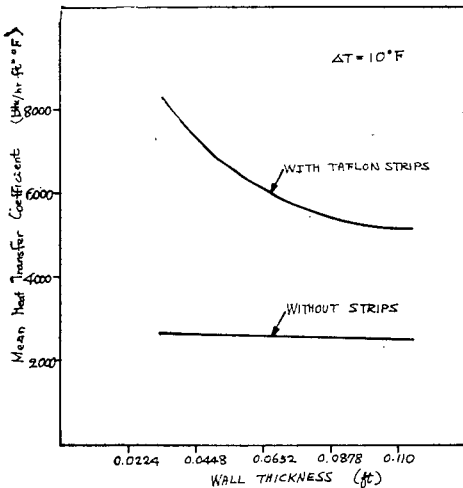


Fig. 9. 관벽두께의 영향

結 論

本 論 文 에 서 는 簡 單 한 解 析 으 로 Taflon strips 을 利 用 한 熱 傳 達 表 面 이 얼 마 나 效 果 의 인 가 를 證 明 하 였 다. 水 蒸 기 가 銅 管 表 面 에 凝 縮 할 때 熱 傳

達 係 數 50% 以 上 增 加 되 었 다. 위 의 解 析 에 서 무 시 한 境 界 面 의 抵 抗 과 rivulet 內 의 溫 度 不 均 一 로 因 한 thermo-capillary flow 에 依 한 影 響 은 실 제 로 매 우 적 다 고 알 려 져 있 으 므 로^{3) 4)} 金 屬 의 熱 傳 導 가 높 고 凝 縮 이 Taflon 을 wetting 하 지 않 는 경 우 (refrigerants 중 에 서 Freon 은 Taflon 에 wetting 된 다) 에 는 위 의 結 果 가 正 確 하 다. 그 러 나 液 體 가 불 소 의 化 合 物 이 고 金 屬 이 titanium 의 경 우 처 럼 熱 傳 導 가 낮 은 경 우 와 液 體 金 屬 에 를 들 면 카 리 음 (potassium) 이 나 소 디 음 (sodium) 이 凝 縮 할 때 는 境 界 面 抵 抗 의 影 響 이 크 므 로 위 의 方 法 으 로 熱 傳 達 을 促 進 시 킬 수 없 다. 그 러 나 Taflon 을 쓰 지 않 고 凝 縮 膜 表 面 을 曲 面 으 로 만 들 면 Freon 같 은 流 體 에 도 有 効 한 表 面 을 만 들 수 있 으 므 로 이 分 野 의 研 究 는 繼 續 되 어 야 한 다

參 考 文 獻

1. Umur, A., and P. Griffith, "Mechanism of Dropwise Condensation" Jr. of Heat Transfer, Trans. ASME, Series C, Vol. 87, No. 2, May 1965, pp. 275-282
2. Brown, C. E., U. S. Patent 3,613,779, filed on October 6, 1969
3. Brown, C. E., and S. A. Matin, "The Effect of Finite Metal Conductivity on the Condensation Heat Transfer to Falling Water Rivulets on Vertical Heat Transfer Surfaces," Jr. of Heat Transfer, Trans. ASME, Series C, Vol. 39, No. 1, February 1971, pp. 69-76
4. Nusselt, W. Z., ver. deut. Ing., 60, 541-569 (1916)
5. Lorenz, J. J., and B. B. Mikic, "The Effect of Thermocapillary Flow on Heat Transfer in Dropwise Condensation," Jr. of Heat Transfer, Trans. ASME, Series C, (1970) pp. 46-442