

불응축가스가 평판위 응축열전달에 미치는 영향에 관한 연구

양 대 일* · 정 형 호**

A study on effect of heat transfer of condensation including noncondensable gas over a flat plate

D. I. Yang · H. H. Jung

Key words : Similarity solution(상사해), Film condensation(막응축), Noncondensable gas(불응축가스)

Abstract

In present paper, mass transfer over a flat plate with film condensation including noncondensable gas is analyzed with the help of similarity methods. Couette flow was assumed in liquid film and boundary-layer approximation was used in the ambient flow. Governing equations were transformed into the ordinary differential equations by the similarity methods. Runge-Kutta and shooting method were used in order to find the effect of mass transfer on the velocity and concentrations at the liquid-vapor interface.

1. 서 론

발전소의 응축기, 냉동시스템의 응축기 등에서는 응축성가스가 시스템 압력에 해당하는 포화온도 이하가 되면 열전달면에 응축이 된다. 이 응축 열전달은 열교환기의 설계(사이징) 또는 열전달량(레이팅)계산에 중요한 열전달메카니즘이 된다. 또한 응축기는 잘못 설계가 되면 전체시스템이 제대로 작동하지 않는 경우가 많다.⁽¹⁾

응축열전달은 응축표면의 증기유동양식과 증기속에 포함된 불응축가스의 양에 크게 영향을 받는다.

다. 응축이 일어나는 동안 액-혼합증기 계면에서 불응축성 가스는 응축되지 않고 계면에 축적된다. 계면에서 열역학적 평형상태를 유지되므로 확산과정에서 불응축가스의 분압은 증가하고 반대로 증기의 분압은 점차로 감소하여 포화압력에 해당하는 포화온도를 감소시킨다. 또한 응축되는 증기는 우선 불응축가스의 경계층을 통과하여 확산되므로 계면에서의 열저항으로 작용하게 된다. 그러므로 응축하는 동안 물질전달을 해석하기 위해서는 응축수에서의 열저항과 계면근처에 축적된 불응축가스의 열저항을 해석하여야 한다.^{(2)~(4)}

* 한국해양대학교(원고접수일 : 99년 6월)

** 한국해양대학교 기계공학부

$$\theta \equiv \frac{W - W_\infty}{W_i - W_\infty} \quad (8)$$

지배방정식을 상사변환에 의해 상미분방정식으로 변환시키고 상사식을 계산하기 위한 경계조건은 다음과 같다.

- 액막

$$f'' = 0, \theta' = 0 \quad (9)$$

$$f(0) = f'(0) = 0, \theta(0) = 0, \theta(\eta_\delta) = 1 \quad (10)$$

- 혼합증기

$$2F'' + F' F = 0 \quad (11)$$

$$\phi'' + \frac{1}{2} Sc F \phi' = 0 \quad (12)$$

$$F'(0) = 0, F'(\infty) = 1, \phi(0) = 1, \phi(\infty) = 0 \quad (13)$$

액막의 두께를 예측하기 위해 운동량 및 에너지 방정식에 대한 상미분방정식 (9)를 경계조건과 함께 적분하면, 액막에서의 무차원 유량함수와 무차원온도는 식(14)로 나타낼 수 있다.

$$f = \frac{1}{2} f'' \eta^2, \theta = \frac{\eta}{\eta_\delta} \quad (14)$$

식(14)에 의해 무차원 파라미터 RJa_i / Pr_i 과 액막 두께 η_δ 는 계면에서의 유동함수에 관계되는 $F(0)$ 와 계면에서 전단응력에 관계하는 $F''(0)$ 로 표시되는데, 식(15)와 식(16)과 같다.

$$\frac{RJa_i}{Pr_i} = \sqrt{\frac{[F(0)]^3}{2F''(0)}} \quad (15)$$

$$\eta_\delta = \sqrt{\frac{2F(0)}{F''(0)}} \quad (16)$$

2. 3 계면조건

기체상태에 있는 응축성 증기가 응축하면 액막으로 모인다. 액막과 혼합증기의 계면에서 질량보존이 성립하며 이 관계를 상사변환시키면 식(17)이 되고, 계면에서의 상사변수는 식(18)이 된다.

$$F(0) = Rf(\eta_\delta) \quad (17)$$

$$\eta_\delta = \delta \sqrt{\frac{U_\infty}{\nu x}} \quad (18)$$

여기에서, $R = \sqrt{\rho_l \mu_l / \rho_m \mu_m}$ 이다.

계면에서의 전단응력을 상사변환시키면 식(19)가 되고 계면에서 액막과 혼합증기에서의 전단응력은 같으므로 식(20)이 된다.

$$\tau_i = \mu_l U_\infty f''(\eta_\delta) \sqrt{U_\infty / \nu x} \quad (19)$$

$$F''(0) = Rf''(\eta_\delta) \quad (20)$$

계면에서의 에너지 평형을 고려하면 혼합증기에서 전달되는 에너지는 액막에서 받는 에너지와 같다. 여기에서 혼합증기에서의 현열전달량은 응축잠열량보다 매우 작기 때문에 무시할 수 있다. 그러므로 이 관계에 의해 무차원 프란틀수와 제이콥수로 나타내면 식(21)이 된다.

$$\frac{f(\eta_\delta)}{2\theta'(\eta_\delta)} = \frac{Ja_i}{Pr_i} \quad (21)$$

Ficks의 법칙으로 표시되는 불용축 가스의 확산질량 유속은 질량평형의 조건에서 유도된 질량유속과 같으므로 Leibniz의 정리를 적용하여 지배방정식을 적분하면 식(22)가 된다. 그리고 계면에서의 불용축성 가스의 농도 W_g 는 W_i 이다.

$$\begin{aligned} j_g &= -\rho_m D_m \frac{\partial W}{\partial y} \\ &= \rho_g (u_m \frac{\partial \delta}{\partial x} - v_m) = -\rho_g v_m \end{aligned} \quad (22)$$

식(22)에서 불용축가스의 무차원 농도에 의해 불용축성 가스의 농도 W 를 미분하고 속도 v_m 을 상사변환하면 슈미트수에 대한 계면에서의 불용축 가스의 농도식은 식(23)으로 유도된다.

$$-\frac{ScF(0)}{2\phi'(0)} = 1 - \frac{W_\infty}{W_i} \quad (23)$$

2. 4 응축열전달계수

혼합증기에서의 물질전달은 대류와 확산에 의해서 일어난다. 혼합증기를 이상기체로 가정하여 계면에서의 증기의 분압 $P_{v,i}$ 에 대한 관계식을 유도하면 식(24)와 같이 된다.

$$\frac{P_{v,i}}{P_\infty} = \frac{1 - W_i}{1 - W_i \left(1 - \frac{M_v}{M_g}\right)} \quad (24)$$

계면에서의 증기의 분압은 계면에서의 불응축 가스의 농도와 두 물질의 분자량비에 의해 크게 영향을 받음을 알 수 있다. 계면에서는 열역학적 평형상태에 있으므로 증기는 포화상태에 있다. 그러므로 계면의 온도 T_i 는 포화온도와 압력과의 관계와 식(24)의 분압을 이용하여 구할 수 있다.

액막두께를 특성 길이로 한 레이놀즈수는 식(25)로 정의되고, 응축과정에서의 넛셀수는 무차원 온도차와 액막의 두께 η_δ , 그리고 레이놀즈수 Re_x 의 관계로 식(26)이 된다.

$$Re_\delta = \frac{4\rho_l u_m \delta}{\mu} \quad (25)$$

$$Nu_x = \frac{hx}{k_l} = \left(\frac{T_i - T_w}{T_\infty - T_w}\right) \frac{\sqrt{Re_x}}{\eta_\delta} \quad (26)$$

여기에서,

$$Re_x = \frac{U_\infty x}{\nu_l}, h = \frac{q''}{T_\infty - T_w}$$

$$q'' = k_l \frac{T_i - T_\infty}{\eta_\delta} \sqrt{\frac{U_\infty}{\nu_l x}}$$

이다.

3. 계산결과 및 검토

Fig. 2에서는 계면에서의 상사종속변수 $F(0)$ 이 0.0인 경우, 자유유동 경계층에서의 속도분포를 나타내었다.

Fig. 3에서는 슈미트수가 0.3, 0.55, 0.7, 0.8, 1.0 일 때 경계층내에서의 불응축가스의 농도분포를 나타내었다. 질량확산계수와 운동량확산계수의 비로 정의되는 슈미트수가 클수록 농도경계층 두께가 작아짐을 알 수 있다.

3. 1 액막의 두께

Fig. 4는 계면에서의 상사종속변수값 $F(0)$ 에 따라 식(18)과 식(20)의 계면에서의 전단응력에 해당하는 $F''(0)$ 와 액막의 두께를 나타낸 것이다. 계면

에서의 유량함수 $F(0)$ 가 증가할수록 계면에서의 전단응력에 비례하는 $F''(0)$ 가 직선적으로 증가하고 있음을 알 수 있다. 그리고 액막두께는 응축초기에는 $F(0)$ 가 증가할수록 상당히 증가하지만 어느 일정한 값에 도달하면 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 즉 응축량이 많은 경우에는 $F''(0)$ 와 $F(0)$ 에 관계없이 무차원 액막두께는 대략 2이다. 액막의 두께는 식(15)와 식(16)에서와 같이 계면에서의 상사종속변수 $F(0)$ 와 전단응력에 비례하는 $F''(0)$ 에 의해 결정되며, 이 값들은 $RJa_l/P\eta_l$ 로 표시할 수 있다.

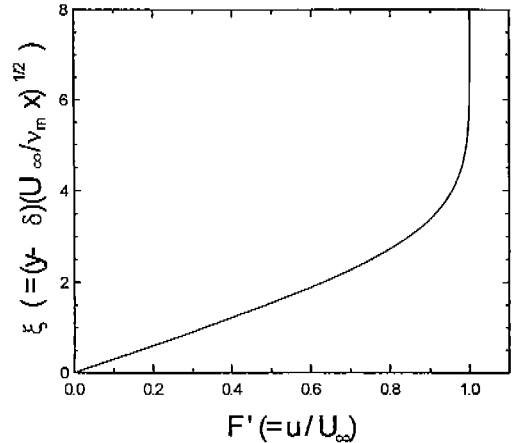


Fig. 2 Variation of the velocity with the similarity variable

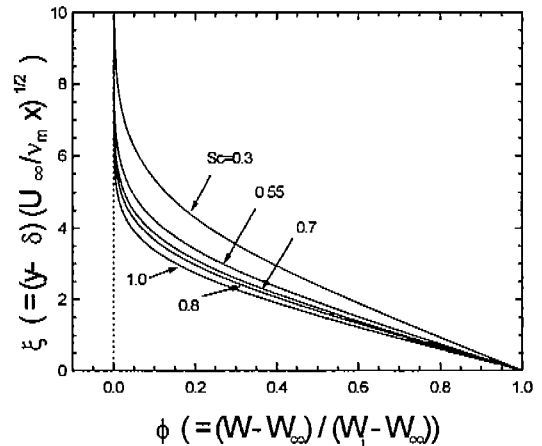


Fig. 3 Variation of the concentration with similarity variable for the Schmidt number

Fig. 5는 무차원 파라미터 RJa_1/Pr_1 과 무차원 액막두께 $\eta\delta$ 의 관계를 나타낸 것이다. 액막두께는 상변화 동안에 액막에서 흡수된 현열에너지와 두 상간의 물성치비 R 에 크게 의존한다. Fig. 5에 나타난 것과 같이 무차원 파라미터 RJa_1/Pr_1 이 증가할수록 액막의 두께가 증가한다.

3. 2 불응축가스의 농도

Fig. 6에서는 슈미트수가 0.3, 0.55, 0.7, 1.0 일 때 무차원 파라미터 RJa_1/Pr_1 과 계면에서의 농도비 W_∞/W_i 의 관계를 나타낸 것이다. 무차원 파라미터

RJa_1/Pr_1 이 증가할수록 그리고 슈미트수가 클수록 불응축성가스의 농도는 계면에 축적되므로 계면에서의 농도가 증가한다는 것을 알 수 있다. 또한 슈미트수에 따라서 불응축가스 농도의 감소폭은 점차로 커지다가 적어지는 형태를 보이고 있다.

3. 3 응축열전달계수

액막의 두께가 두꺼워질수록 응축액막은 층류에서 난류로 천이된다. 수평평판 위 순수한 증기가 응축될 때 액막두께를 특성길이로 한 레이놀즈수, $Re_\delta=30$ 이 임계 레이놀즈수가 된다. Fig. 7에는

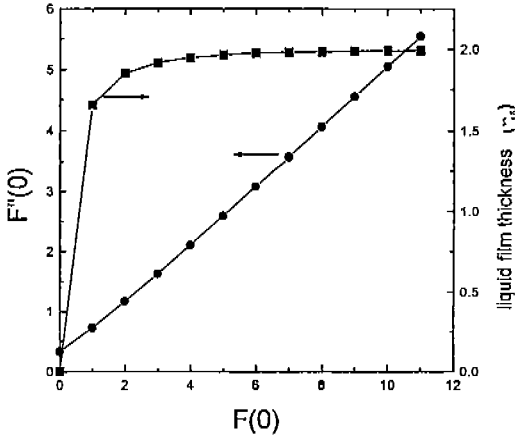


Fig. 4 Variation of $F''(0)$ with $F(0)$ and prediction of the $\eta\delta$

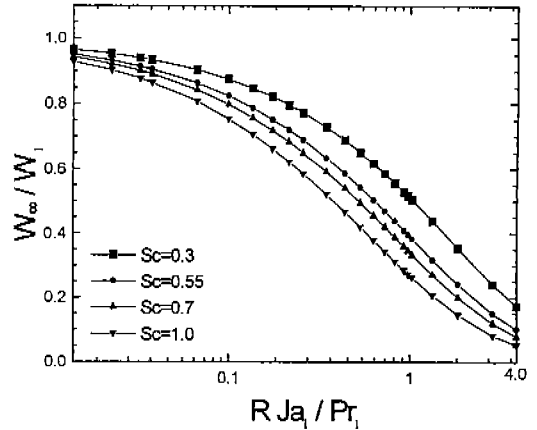


Fig. 6 Variation of W_∞/W_i with RJa_1/Pr_1 for the Schmidt number

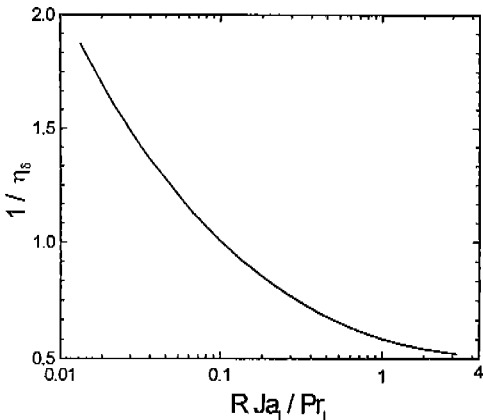


Fig. 5 Variation of $1/\eta_\delta$ with nondimensional parameter RJa_1/Pr_1

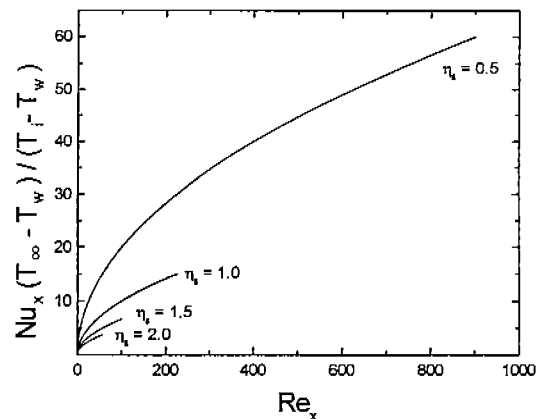


Fig. 7 Variation of Nu_x with Re_x as Re_δ is 30 (steam-air)

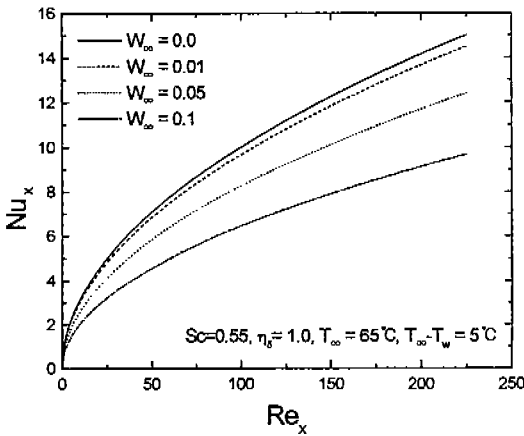


Fig. 8 Variation of Nu_x with Re_x as concentration of the noncondensable gas varied (steam-air)

$Re_\delta = 30$ 이 될 때까지 액막두께에 따른 국소 넷셀수를 나타낸 것이다. x 를 특성길이로 한 레이놀즈수 Re_x 는 무차원 액막두께 η_0^* 에 비례하고 넷셀수는 무차원 액막두께 η_0^* 에 비례한다.

Fig. 8에서는 슈미트수가 0.55, 무차원액막두께가 1.0, 그리고 일반적으로 응축기 설계시 사용되는 자유유동온도와 평판면과의 온도차를 각각 65°C , 5°C 로 하였을 때 공기의 농도가 0.0, 0.01, 0.05, 0.1로 혼입할 경우, 레이놀즈수에 대한 국소 넷셀수의 변화를 나타낸 것이다. 보는 바와 같이 순수한 증기만 응축하는 경우와 달리 불응축가스의 농도가 증가할수록 국소 넷셀수는 현저하게 감소하고, 레이놀즈수가 증가할수록 국소 넷셀수의 감소폭은 증가한다.

4. 결 론

본 연구에서는 수평평판 위 자유유동에서 층류막응축이 일어나는 경우, 불응축가스가 응축열전달계수에 미치는 영향을 경계층 이론을 적용하여 상사해를 구하였다. 계면에서 불응축성 가스의 농도, 무차원 액막 두께, 슈미트수, 그리고 무차원 물성치비가 열전달량에 어떠한 영향이 미치는가 검토하였다.

그 결과 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

- (1) 무차원 액막두께는 무차원 파라미터 RJa_1/Pr_1 이 증가할수록 증가하고 응축량이 많은 경우에는 $F(0)$ 와 $F''(0)$ 에 관계없이 대략 2이다.
- (2) 계면에서의 불응축가스의 농도는 무차원 파라미터 RJa_1/Pr_1 에 영향을 받고 값이 증가할수록 슈미트수가 증가할수록 증가한다.
- (3) 응축열전달계수는 불응축가스의 유무에 따라 크게 영향을 받으며, 불응축가스의 농도가 증가할수록 현저하게 감소한다.

참고문헌

1. Rohsenow, W. M. "Film Condensation" in W. M. Rohsenow and J. P. Hartnett, Eds., Handbook of Heat Transfer, McGraw-Hill, New York, Chapter 12A, 1973.
2. Carey, V. P., Liquid-Vapor Phase-Change Phenomena, Hemisphere Publishing Corporation, pp.378~398, 1992.
3. 김무환, 김병우, 이상용 공저, Two Phase Flow Heat Transfer, 대영사, pp.471~500, 1993.
4. 이승훈, 김의광, 이역수, "평판에서 비응축성 가스를 포함한 증기의 층류 막응축의 유사해", 대한기계학회논문지, 1993년도 춘계학술대회 논문집 (II), pp.89~101, 1993.
5. Sparrow, E. M., Minkowycz, W. J. and Saddy, M., "Forced convection condensation in the presence of noncondensables and interfacial resistance", Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol.10, pp.1829~1845, 1967.
6. Koh, J. C. Y., Sparrow, E. M. and Hartnett, J. P., "The two phase boundary layer in laminar film condensation", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.2, pp.69~82, 1961.
7. Mincowycz, W. J., Sparrow, E. M., "Condensation heat transfer in the presence of noncondensables, interfacial resistance, superheating, variable properties, and diffusion", Int. J. Mass Transfer, Vol.9, pp. 1125~1144, 1966.
8. 이택식, 이재현, 이준식공역, 열전달, 제2판, 회중당, pp.309~318, 1996.