Chap. 10 응축 및 비등

증기가 그 증기의 포화 온도 보다 낮은 온도의 고체 표면과 접하고 있을 때는 응축이 일어나고, 액체가 액체의 포화 온도 보다 높은 온도의 고체 표면과 접하고 있을 때는 비등이 일어난다. 응축과 비등 두 경우에서 잠열이 중요한 변수로 작용한다.

응축

응축에는 막상 응축과 물방울 응축이 있다.

막상 응축 : 응축이 일어나는 고체 표면을 얇은 액체 막이 덮고 있는 경우로 이 때는 응축 액체가 새로운 열전달 저항으로 작용한다.

물방울 응축 : 응축이 일어나는 고체 표면에 물방울 형태로 응축된다. 이 때는 막상 응축 보다 증기와 직접 접하는 면적이 커서 응축액에 의한 열전달 저항이 막상 응축에서 보다 작게 되어 **열전달 계수가 막상 응축에서 보다 크다**.

10-1 층류 막상 응축

다음과 같이 정의되는 Reynolds 수가 1800이하인 층류 영역에서는 다음과 같은 상관식이 제안되었다.

$$\mathrm{Re} = \frac{4\dot{m}}{\mu_l P}$$

여기서

$$Q = Ah_m \Delta T = h_{fg}\dot{m}$$

따라서

$$\mathrm{Re} = \frac{4\dot{m}}{\mu_l P} = \frac{4Ah_m \Delta T}{h_{fg}\mu_l P}$$

$$h_m = 1.13\left[\frac{g\rho_l(\rho_l - \rho_g)h_{fg}k_l^3}{\mu_l(T_v - T_w)P}\right]^{1/4}$$

위의 Renolds 수의 정의를 사용하면, 이 열전달 상관식은 다음과 같이 된다.

$$h_m\left(\frac{\mu_l^2}{k_l^3\rho_l^2 g}\right)^{1/3} = 1.76\,\mathrm{Re}^{-1/3}$$

여러 기하학적 형태에 대한 해석은 기본적으로

$$h_m = C\left[\frac{g\rho_l(\rho_l-\rho_g)h_{fg}k_l^3}{\mu_l(T_v-T_w)P}\right]^{1/4}$$

에 근거한다. 상수 C와 젖음 길이 P는 계의 기하학적 형태에 의존한다.

10-2 난류 막상 응축
응축액의 흐름이 난류인 경우에는 다음과 같은 상관식이 적용된다.

$$h_m\left(\frac{\mu_l^2}{k_l^3\rho_l^2 g}\right)^{1/3} = 0.0077\,\mathrm{Re}^{0.4}$$

Reynolds 수의 지수가 층류인 경우에는 음에서 난류에서는 양으로 바뀌었음에 주목하라. 따라서 그림 10-4에 보이는 바와 같이 Reynolds 수의 증가에 따라 열전달 계수가 감소하다가 증가한다.

10-3 물방울 응축
물방울 응축이 막상 응축 보다 열전달 계수를 증가시키므로 물방울 응축을 오래 유지시키기 위한 연구가 진행되어 왔다. 물방울 응축을 유지하기 위해서는 (1) oleic acid, stearic acid등 촉진제를 표면에 사용하거나 (2) 산화에 의한 물방울 응축이 일어나지 않는 것을 방지하기 위하여 표면을 도금한다.

10-4 불응축 기체가 있을 때의 응축
불응축 기체가 존재하는 경우(예를 들어 수증기중에 공기가 포함되어 있는 경우) 불응축 기체는 응축 표면에 축적되게 되어 응축하려는 증기가 표면에 도달하는 것을 방해하여 열전달을 방해한다.

10-5 풀 비등
비등은 앞의 응축과 비슷하게 크게 핵 비등과 막 비등으로 나뉜다. 핵 비등은 물방울 응축에 해당하고 막 비등은 막상 응축에 해당한다. 열전달 계수는 핵 비등의 경우가 막 비등의 경우 보다 크다.
전기 저항선을 물에 담그고 전류를 흘려 열선의 온도와 열전달 계수와의 관계를 나타낸 것이 그림 10-6이다.
저항선의 온도가 올라가면 처음에는 자연대류가 존재하여 열전달 계수가 증가하게 된다. 그러다가 저항선의 온도가 물의 끓는점 보다 높아지게 되면 핵

비등이 일어나게 되고 이때는 온도에 따른 열전달 계수의 구배(dh/dT)가 자연대류 영역보다 커진다. 핵 비등 영역에서는 열전달 계수는 온도의 증가에 따라 계속 증가한다.
핵 비등 영역에서 막 비등 영역으로 전이되는 점에서 열전달 계수는 최대가 된다. 이 점에서는 열전달 속도를 증가시키기 위하여 온도를 증가 시키면 열전달 속도가 더 감소하는 현상이 일어난다. 만약 계속하여 저항선에 전류를 흐르게 하면 저항선에 가해지는 열량이 저항선에서 물로 전달되어지는 열량보다 커지게 되어 열은 계속하여 저항선에 축적되고 최종적으로는 저항선이 녹게된다. 따라서 이점을 burnout point라고 부른다.

핵 비등 영역

핵 비등은 물을 끓일 때 가열면의 표면에서 작은 기포가 발생하는 경우이다. 핵 비등은 고체 표면의 활성점(active point)에서 일어난다. 이 활성점은 대개 표면에 패인 아주 미세한 홈인 경우가 대부분이다. 아주 매끄러운 유리에서는 물의 끓는점 이상에서도 잘 끓지 않는 것은 이 활성점이 적기 때문이다. 이 활성점에서는 외부에서 주어진 열량에 의하여 생성된 증기가 모여있다가 이 증기의 부력이 표면장력을 이길 때 비등이 일어난다. 따라서 핵 비등 영역에서는 표면 장력과 부력의 비가 중요한 역할을 한다고 유추할 수 있다. 핵 비등 영역에서의 열전달 상관식 식 (10-20)에 이 비가 포함되어 있음에 주목하라.

최대 열속

최대 열속은 핵 비등에서 막 비등으로 전이되는 burnout point에서 나타난다.

막 비등 영역

막 비등 영역의 초기 단계인 불안정한 막 비등 영역에 대한 열전달 상관식은 없다. 안정한 막 비등 영역에서의 열전달 상관식은 식 (10-23)에 주어져 있다. 안정한 막 비등 영역에서 온도를 더 높이게 되면, 다음 장에서 다루게 될 복사에 의한 열전달이 더해지게 되에 열전달 계수는 다시 증가한다.