

핵비등 영역의 가열면상 물 액적의 증발에 대한 연구*

안강수** · 원성필*** · 남궁 규완***
기계공학과

<요 약>

본 연구는 동판, 탄소강판, 스테인레스강판의 가열면상 증류수 액적의 증발시간 및 표면의 온도변화에 대한 것으로 가열면의 초기온도는 핵비등이 존재하는 최저 온도로부터 최고 온도 영역의 범위 내에서 논했다.

액적 밑면의 가열면 온도는, Rohsenow가 제시한 푸울 핵비등 열전달 관계식을 사용하여, 2 차원 친이 열전도 해석으로부터 계산했으며, 가열면 재질 및 초기 액적크기 등에 따라 합리적인 변화 결과를 얻었다. 또한 본 연구에서 제시한 액적증발 모델은 액적과 가열면간의 접촉면적 변화를 계산하는데 사용되었다. 시간에 의존하는 접촉면 온도와 액적의 기하학적 형상 변화로부터, 특정 액체/고체조합에서 전 증발시간을, 초기 가열면 온도와 초기 액적 크기와 관련하여, 예측했다.

본 연구에서 제시한 모델은 기포 지연시간, 열전달 관계식과 비등 중의 액적형상 등의 가정들로 구성되었으나, 예측한 값과 측정된 값들은 서로 잘 일치하고 있다.

The Study on Evaporation of a Water Droplet on Heated Surface in Nucleate Boiling Region.

Kang-Su Ahn* · Sung-Pil Won** · Kuy-Won Namkoong**
Dept of Mechanical Engineering

* 이 논문은 1995학년도 울산대학교 학술연구조성비에 의하여 연구되었음.

** 울산공전 기계공학과 교수

*** 울산대학교 기계공학과 교수

<Abstract>

This paper discusses the evaporation time of a pure water droplet on smooth surface of copper, carbon steel and stainless steel. The initial surface temperature ranges from the lowest limit to the highest limit of the nucleate boiling region.

The surface temperature just below the droplet is calculated from the 2 dimensional transient conduction, using the heat transfer correlating equation of nucleate pool boiling proposed by Rohsenow. And the evaporation model proposed in this paper is used to calculate the changes of contact area between liquid droplet and heated surface. With these time dependent values of surface temperature and those of geometrical shape of droplet, the total evaporation time for a specific liquid-solid combination can be predicted as the initial surface temperature and the initial droplet size.

The predicted evaporation times are compared with the experimental data. Though the present model consists of some assumptions which include bubble waiting time, heat transfer coefficient and the shape of liquid droplet on surface, the predictions and measurements are in good agreement.

I. 서 론

가열면 상에 작은 액적(droplet)을 위치시키면 먼저 액체와 가열면과 직접 접촉하여, 액적 내에서 첫번째 기포가 발생될 때까지 가열되며, 이 기간이 끝난 후, 액적 내에서 연속적인 기포의 발생으로 활발한 비등이 일어나 증발을 완료하거나, 또는 면의 온도가 매우 높은 경우, 액적은 가열면 상으로부터 부유된 상태에서 증발이 이루어진다. 이러한 가열면 상의 액적비등 열전달 현상은, 가열면의 초기온도와 전 증발기간 간의 관계를 측정하여 도시한 증발시간 곡선으로부터 그 특징이 설명되어지며, 이 곡선은 근사적으로 푸울 비등 곡선(Pool Boiling Curve)을 역전시킨 형상과 유사하다. 따라서 액적비등도 푸울비등과 같은 방법으로 열전달 영역을 구분할 수 있다. 즉, 기포 발생 온도로부터 증발기간이 제일 짧은 임계 열유속 온도까지를 핵비등영역, 임계 열유속 온도로부터 증발기간이 제일 긴 Leidenfrost 온도 까지를 천이비등영역, 액적이 가열면으로부터 부유된 상태에서 증발이 진행되는 Leidenfrost 온도 이상의 영역을 막비등 영역으로 구분 한다.

액적비등의 본격적 연구는 1959년에 Tamura(1)에 의한 연료액적 증발실험을 시초로 시작된 이 후, 현재까지 많은 연구가 연료액적 외에 물, 냉매, 기타 유기혼합물 액체 등에 대하여 수행되었다. 그러나 그 대부분이 Leidenfrost 온도의 예측이나 또는 그 이상의 온도 영역에서의 액적 증발시간, 열전달계수 등에 대한 이론·실험적인 관계식들이었고, 그 이하의 온도에서나 핵비등영역에 대하여는 비등기구의 복잡성으로, 발표된 자료들이 다른 영역에 비하여 매우 부족한 실정이다. 지금까지 발표된 연구 중, 본 연구와 관련된 액적 핵비등영역에 대한 내용을 언급하면 다음과 같다. Hirogasu 등(2)은 주위 압력을 변화시키며, 각 종 연료 액적에 대하여 비등 실험을 수행한 결과, 압력이 높을수록 동일 가열면 온

도에서 열유속이 증가하며 또한 해비등 영역도 넓어지는 경향을 얻었다. Johnson 등(3)은 비등기간 중 가열면의 온도를 변화시키며, 물을 비등액으로 사용한 푸울 해비등 천이 열전달 실험에서, 면의 평균온도로 부터 계산된 열유속을 푸울 해비등 정상 열전달에서 얻은 비등곡선과 비교한 결과, 거의 일치함을 발견했다. 이 결과는, 면의 온도가 정상적으로 유지되는 푸울비등 시의 해비등 기구를 면의 온도가 계속 변하는 액적 비등시에도 적용할 수 있고 또한, 열전달 관계식도 푸울 비등시의 것을 액적비등에서도 사용할 수 있음을 제시한다. Makino(4) 등은 대기압 하에서 가열면의 재질과 물액적 크기를 변화시키며 실험하여 측정된 증발 기간과 고속 camera 에 의하여 측정된 면적 변화로부터 열유속을 계산했고, 이 열유속의 시간 평균값과 각종 가열면의 시간 평균온도와와의 관계를 정리한 결과, 열유속은 단지 증발기간 중의 가열면 평균온도와 액체 포화온도 차이에만 의존하고 면의 재질에 무관 하다고 했다.

Michichiyoshi 등(5)은 고속 camera 를 사용한 실험에서, 가열면에 액적이 낙하되면 액적 내에서 첫번째 기포가 발생될 때까지 면과 액체는 계속 접촉하고 있으며, 이 기간중 가열면의 온도는 초기 온도 T_{wo} 로부터 순간적으로 온도 강하가 일어나 T_d 에 도달한다. 이 기간을 지연기간이라 한다. 지연기간 후의 가열면 온도가 해비등 영역의 온도로 유지되면, 액적은 면과 계속 직접 접촉한 상태에서 내부의 연속적인 기포 발생으로 활발한 비등이 이루어지며 증발을 완료한다. 그러나 가열면의 온도가 아직 매우 높게 유지된 상태이면, 액적이 가열 표면 위로 부유되어 막비등이 진행된다. 또한 액체가 면과 직접 접촉하며 비등이 진행될 경우, 가열 표면의 온도는 지연기간 중의 온도를 유지하거나 또는 액적 크기에 따라 더욱 강하되는 경향이 있다고 발표했다.

이 외에 Groendes 등(6)도 액적 증발기간 중의 가열면 천이 온도 변화를 측정하여, 초기온도 T_{wo} 부터 지연기간 중의 온도 강하를 1 차원 천이 열전도 해석에 의하여 예측했으나, 액적 증발기간 중의 온도변화는 초기 온도가 매우 높은 막비등 영역에 대하여만 언급하였다.

이상의 연구 결과들로부터 액적 비등시의 열유속은 푸울 비등시의 관계식을 사용하여 예측 가능하고, 이를 위하여는 표면온도의 변화를 정확히 파악하여야 하며, 액적 전 증발기간 예측을 위하여는 액적과 면간의 접촉면적 변화를 나타낼 수 있는 적절한 액적 비등모델이 제시되어야 한다. 그러나, 아직, 해비등 영역에서의 표면온도 변화나 접촉면적 변화를 예측할 만한 적절한 관계식이나 방법들이 제시되지 않은 실정이다. 따라서 본 연구의 목적은 액적 초기 직경, 액적과 면간의 접촉각, 가열면 초기온도로부터 증발기간 예측을 위한 방법을 제시하는 것이며, 이를 위하여 비등기간 중의 면적변화를 나타낼 수 있는 액적 비등모델과 가열 표면에서의 온도 변화를 나타낼 수 있는 천이 열전도 모델을 설정했다. 열전도 모델로부터 예측된 표면온도 T_w 와 푸울 비등 열전달 관계식을 사용하여 열유속을 계산했고, 이 계산값들을 액적비등 모델로부터 유출된 관계식에 대입하여 전 증발시간을 예측했으며, 그 결과들은 실험치들과 비교적 잘 일치했다.

II. 이론적 모델의 설정

액적이 가열면에 위치하여 접촉면적을 통한 열전달로 가열면이 냉각될 때, 액체와 가열

면 간의 접촉면적은 증발이 완료될 때까지 계속 변화하고 있다. 면적의 시간에 따른 변화율은, 초기 액적 크기 및 가열판 내의 천이 열전도 현상으로 인한 표면온도 변화에 지배적인 영향을 받으므로 액적 증발 기간을 정확히 예측하기는 매우 어려운 일이다.

본 연구에서는, 단순화를 위하여, 가열면상에서 액적 형상이 계속 구의 윗부분(spherical cap)을 유지하며, 가열판 내에서의 열전달은 2차원 천이 열전도에 의한다는 가정 하에서 증발기간을 예측할 수 있는 모델을 다음과 같이 설정했다.

1. 접촉면에서의 온도변화 및 천이 열전달

가열면에 액적이 접촉하여 초기 표면온도 T_{wo} 가 T_w 로 강하하는 과정은 다음과 같은 과정으로 구분할 수 있다. 즉, 액적이 접촉 순간, 천이 열전달은 액체 및 가열판 내에서 모두 존재여, 우선 액체 전체를 포화온도까지 가열시키고, 다음에는 기포핵 발생에 필요한 포화온도 이상의 과열액층이 가열면에 인접한 영역에서 형성된다. 기포 발생에 필요한 에너지가 과열액층에 형성되면, 액적 내에 첫번째 기포가 발생되며, 이 때까지의 기간을 지연기간, t_d 라 한다.

액적 낙하 직후, 순간적으로 강하된 접촉면의 온도 T_c 는, 서로 다른 초기온도의 반무한 고체가 접촉한 경우의 계면 온도와 같다는 가정에서, 식 (1)과 같이 표시된다.

$$T_c = [(T_{wo} - T_{lo}) / (1 + \frac{\sqrt{(\rho c k)_l}}{\sqrt{(\rho c k)_w}})] + T_{sat} \quad (1)$$

여기서 도입한 반무한 고체의 가정은, 기포 발생에 요구되는 과열액층이 액적 높이에 비하여 매우 작고, 또한 가열판 내로 침투한 온도변화 깊이도 T_d 의 짧은 시간으로 인하여 판 두께에 비하여 매우 작다는 것에 근거를 두었다. 식 (1)에서 T_{wo} 는 액적의 초기 온도, T_{sat} 는 액체의 포화온도, ρ 와 c , k 는 각각 밀도, 비중, 열전도 계수이며, 첨자 l 과 w 는 액체와 가열면을 의미한다.

한편, 첫번째 기포가 발생될 때까지의 지연기간, t_d 는 Han 과 Griffith(7)의 기포발생 이론으로부터, 표면장력을 σ , 열확산계수를 α , 증발 잠열을 h_{fg} 로 표시하면, 식 (2)로 계산할 수 있고,

$$t_d = \frac{144 \sigma^2 T_{sat}^2}{\rho^2 h_{fg}^2 (T_d - T_{sat})^2 \pi \alpha l} \quad (2)$$

이 기간 중에 전달한 열량 Q_d 는, 반무한 고체의 1차원 천이 열전도 해석으로부터 구한 전열율을 q_d 로 표시하면 식 (3) 과 같다.

$$Q_d = \int_0^{t_d} q_d dt = 2 k (T_{wo} - T_c) \sqrt{\frac{t_d}{\pi \alpha w}} \quad (3)$$

이러한 열량전달으로, 가열면은 접촉 초기 강하된 온도 T_c 에서 더욱 작은 T_d 에 도달하나, t_d 가 매우 짧고, 금속 가열판의 열용량은 비교적 크므로, T_d 는 근사적으로 T_c 로 고려할 수 있다.

지연시간이 끝난 후, 액적 내부에서는 연속적인 기포 발생으로 활발한 비등이 진행된다. 이 때의 비등 기구는, Johnson(3)이 제시한 천이 핵비등 곡선이 정상상태 푸울 핵비등 곡선과 거의 일치 한다는 실험 결과로부터, 푸울 비등 기구와 같다고 가정할 수 있다. 그러나 비등 접촉면적이 변화하고 있으므로, 매 순간에 해당하는 표면 온도로부터 열전달계수, h 를 계산하여야 한다.

따라서 가열판 내의 다음과 같은 2차원 천이 열전도 해석으로부터, 액체와의 계면에서 온도, T_w 를 구할수 있다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a_w \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

식 (4)에 대한 초기 조건 및 경계 조건들은 다음과 같다.

• 초기조건($t \leq 0$) : t_d 직후의 조건이 초기조건이 되어야 하므로, 접촉면적의 반경을 R , 가열판의 반경을 R_p , 가열판 두께를 H 로 표시하면,

$$z = 0, 0 \leq r \leq R \text{ 에서 } T = T_d, -k \frac{\partial T}{\partial z} = q_d \quad (5)$$

$$z \geq \sqrt{\pi a_w t_d}, 0 \leq r \leq R_p \text{ 에서 } T = T_{wo}, \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (6)$$

를 만족하는 z 의 다차함수와,

$$0 \leq z \leq R_p \text{ 에서 } \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, \lim_{r \rightarrow R_p} T = T_{wo}, \lim_{r \rightarrow R_p} \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (7)$$

를 만족시키는 r 의 exponential 함수를 포함한다.

• 경계조건($t > 0$) :

$$z = 0, 0 \leq r \leq R \text{ 에서 } k_w \left(-\frac{\partial z}{\partial z} \right) = h (T_{z=0} - T_{sat}), \quad (8)$$

$$z = 0, R < r \leq R_p \text{ 에서 } \frac{\partial T}{\partial z} = 0, \quad (9)$$

$$z = H, 0 \leq r \leq R_p \text{ 에서 } \frac{\partial T}{\partial z} = 0, \quad (10)$$

$$r = 0 \text{ 와 } r = R_p \text{ 에서 } \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (11)$$

식 (8) 은 가열판 표면에서 고체-액체 접촉 면적 내의 비등 열전달 조건이며, 대류 열전달 계수, h 는 다음과 같이 표시되는 Rohsenow 의 관계식을 사용했다.

$$h = \frac{1}{c_f^3} k_l \sqrt{(\rho_l - \rho_v) \frac{g}{\sigma}} \left[\frac{c_l (T_w - T_{sat})}{h_{fg}} \right]^2 \frac{1}{Pr^2} \quad (12)$$

식 (12) 에서 c_f 의 값은 동판 및 스테인레스 강의 경우, 모두 $c_f = 0.013$ 의 값을 선택하여 사용했으며, 탄소강의 경우에도 이 값을 적용했다.

식 (9) 는 가열판 표면에서 액체와 접촉하지 않고, 대기 중에 노출된 면에 대한 단열 조건이며, 식 (10), (11) 역시 가열판 밑면과 중심축 및 원주면에서의 단열조건을 나타낸다.

2. 액적 비등 모델

본 단원에서는, 액적이 가열면 상에서 비등하여 증발할 때, 앞 단원에서 구한 접촉면 온도 및 전열을 등을 사용하여, 액체-고체 간의 직접 접촉 면적 및 증발시간, $tevap$ 를 예측하기 위한 모델 설정에 대하여 언급하겠으며, 기하학적 단순화를 위하여 다음의 가정들을 도입했다.

(1) 증발기간 중, 가열면 상에서 액적의 구(球)의 윗부분(spherical cap) 형상을 유지한다. 초기 액적크기가 매우 큰 경우 적용키 곤란하나, 본 실험에서 사용된 액적 크기($V_0 \leq 0.477 \text{ cm}^3$)에서는 적용 가능 했다.

(2) 증발기간 중, 액체와 고체의 접촉 각도는 정적인 과정에서 측정된 각도를 유지한다.

(3) 액적 낙하 초기 충격으로 인한 액적의 불규칙한 현상은 없다고 가정한다. 이 가정은, 액적을 가열면에서 매우 가까운 위치에서 낙하시키면 성립할 수 있다.

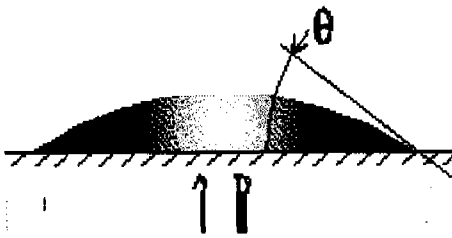


Fig. 1. Droplet on the heated surface.

이상의 가정들로부터 Fig. 1 과 같은 액적 증발 모델을 고려하겠다.

그림에서 액적의 체적을 V , 고체면과 액체간의 접촉각을 θ 로 표시하면, 초기기 접촉 면적의 반경 R_0 은 식 (13)과 같이 V_0 와 θ 만의 함수로 표시할 수 있다. 이 관계식에서 θ 는 정적인 상태에서의 접촉각이며, 초기 체적 V_0 는 낙하 직전의 액적에 대한 측정으로부터 구할수 있으므로 열전달 해석에서 구한 전열율에 대한 정보를 사용하여, 증발 기간 중의 매순간 연속적인 접촉면적 변화를 계산할 수 있다.

$$R_o = \left[\frac{3 V_o}{\pi} \left(\frac{\sin \theta}{1 - \cos \theta} \right) \left(\frac{\sin \theta}{2 + \cos \theta} \right) \right]^{1/3} \quad (13)$$

한편, 이 액적이 완전 증발하는데 요구되는 총 열량, Q 는 액체의 초기온도를 T_{lo} , 증발이 완료되는 시간을 t_{evap} , 액체 접촉면적을 A 라 하면,

$$Q = V_o \rho_l [h_{fg} + c_l (T_{sat} - T_{lo})] = \int_0^{t_{evap}} h (T_w - T_{sat}) A dt \quad (14)$$

이다. 식 (14) 에서 t_{evap} 를 직접적으로 구할 수 없고, 또한 h 및 T_w 도 각각 시간에 따라 변하므로, t_{evap} 의 계산을 위하여 시간을 미소시간, Δt 로 구분하면, 이 기간 중, 증발로 인하여 감소된 체적, ΔV 는 식 (15)와 같다.

$$\Delta V = \frac{[h (T_w - T_l) \pi R^2 \Delta t]}{\rho_l [h_{fg} + c_l (T_{sat} - T_l)]} \quad (15)$$

윗 식에서 액체온도, T_l 은 $0 \leq t \leq t_d$ 기간에서 액체 초기온도 T_{lo} 를, $t_d < t \leq t_{evap}$ 에서는 액적 전체가 포화온도로 가열 되었으므로 T_{sat} 를 사용하고, T_w 는 열전도 해석에서 계산한 결과치를 적용한다. 또한 미소시간, Δt 는 2 차원 천이 열전도 수치계산에서 요구되는 수렴값을 만족하게끔 선택한다. ΔV 의 감소로 인한 새로운 접촉면적의 반경 R 는, 식 (13) 에 의하여

$$R = \left[\frac{3 (V - \Delta V)}{\pi} \left(\frac{\sin \theta}{1 - \cos \theta} \right) \left(\frac{\sin \theta}{2 + \cos \theta} \right) \right]^{1/3} \quad (16)$$

이다. 지연기간 후에는 기포 발생으로 인한 비동 기구가, 증발 완료시 까지, 일정하게 유지되므로 등간격의 Δt 에 의하여 반복 계산하며, 이러한 반복 계산은 $R \leq 0$ 또는 $\sum \Delta V \geq V_o$ 까지 계산하여, 계산 횟수를 N 라 하면 식 (17) 과 같이 총 증발기간, t_{evap} 를 예측할 수 있다.

$$t_{evap} = t_d + N \Delta t \quad (17)$$

III. 실험장치 및 방법

실험은 앞 장에서 제시한 증발시간 예측방법 및 재질에 따른 가열면의 온도 강하 등을 확인하기 위하여 가열판의 재질을 3 가지로 변화시켜 수행했으며, 이를 위하여 측정해야 할 물리적 변수들은, 액적의 초기 질량(직경), 초기 등은 표면온도, 표면의 온도변화, 액적

증발기판 등 이다.

1. 실험장치

실험장치의 개략도는 Fig. 2 와 같이, 가열 요소 및 가열판 등을 수용하는 가열 블록(heating block)과 공급열량을 제어하고 온도 등을 측정하는 측정 제어부분, 액체를 공급하는 액적 공급장치 등으로 구성되었다.

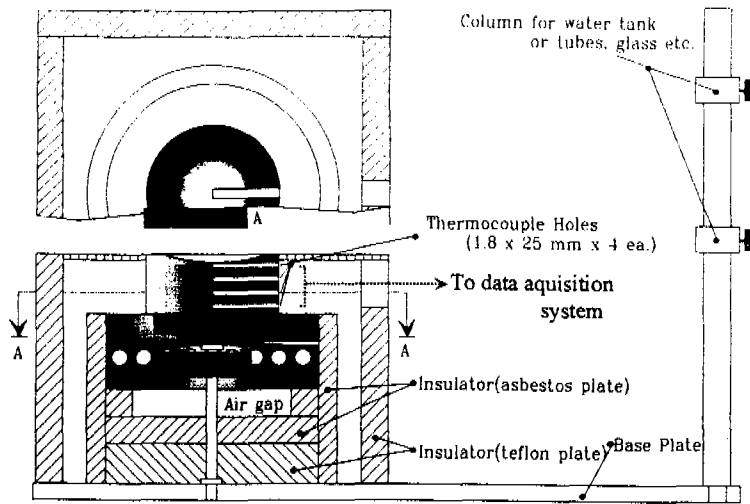


Fig. 2. Sectional Diagram of Heating apparatus.

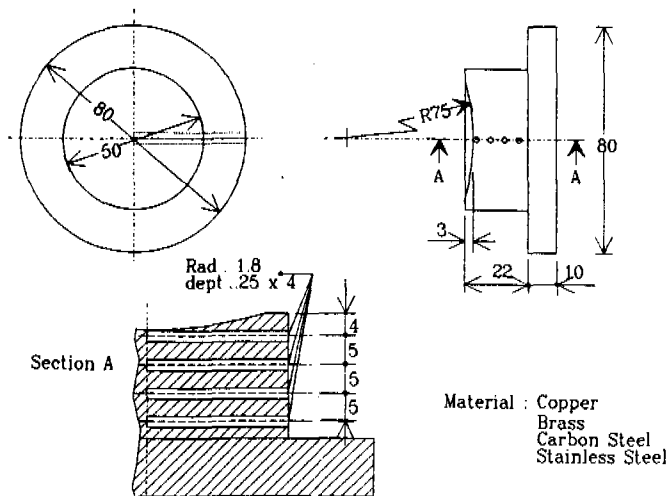


Fig. 3. Details of Heating Plate

가열블럭은 동판으로서, 블럭 내에 직경 12.8 mm 의 Watlow cartridge heater(1 kw, 120 V)를 삽입했고, 그 주위는 가열판이 설치되는 윗면을 제외하고 모두 단열 시켰다. 가열판 중심에는 지나친 과열과, 초기온도의 용이한 설정을 위하여 열전대가 설치되어 있으며, 이 열전대는 thermostat 와 연결되어, 의도한 초기온도에 도달하면 전원이 자동 차단하도록 했다. 이 가열 블럭 위에 설치되는 가열판은, 본 실험에서 동, 탄소강, 스테인레스강 등의 3 가지로 재질을 변화시켰고, 가열판의 기하학적 열용량 효과를 최소로 하기 위하여, 직경 80 mm, 두께 10 mm 의 원통 금속판 위에 열전대 설치와 액적 접촉표면 가공을 위하여 직경 50 mm, 높이 22 mm 인 돌출부를 설치하였다. 가열판은, 측정 전에 농온을 유지하기 위하여, 주위를 난열시켰으며, 액적 접촉표면은, 액적이 열전대가 설치된 면의 중심에서 벗어나는 것을 방지하기 위하여, Fig. 3 과 같이 반경이 75 mm 의 구면으로 가공했다. 표면온도 측정을 위한 열전대는 표면에 직접 설치함이 바람직 하나, 표면 상태 및 접촉각 등의 변화를 초래하므로, 표면에서 0.3 mm 깊이에 설치했고, 초기의 균일한 온도 확인을 하여 5.3 mm, 10.3 mm 깊이에도 열전대를 설치했다.

열전대들은 측정정확도의 정확한 접촉을 보장하기 위하여 외부에서 스프링으로 밀어주는 기구로 고정시켰다. 사용한 열전대는 직경 0.2 mm 선재에 유리섬유로 피복된 K type 이며, 기준 접점은 OMEGA 의 zero point reference junction 을 사용했다. 열전대는 각각 DC 증폭기와 A/D 변환기를 거쳐 micro - computer 에 연결했으며, 표면온도는 recorder 에도 병렬로 연결했다. Micro - processor 는 DT8325 data acquisition system과 Global Lab. software 를 사용했다.

액적은 증발후 잔유물이 거의없는 시판용 증류수를 사용했고, 초기의 과냉온도 및 낙하속도를 일정하게 유지하기 위하여 액체 저장 tank 에 저장했다가, 유리관 끝단의 주사침으로부터 낙하시켰으며, 주위 공기유동의 영향을 배제하기 위하여 주위에 아크릴 원통을 설치했다.

2. 실험방법

실험전 모든 열전대들은 금속 블럭 내의 한개 구멍에 삽입하고, 이 블럭을 천천히 가열 및 냉각하며 표준 열전대와 비교하여 교정했다. 그 결과 표준 열전대와는 1 °C 이내의 절대오차가 존재했으나, 설치될 열전대 끼리의 상대오차는 거의 없었다.

가열면의 초기 온도는, 증류수 액적내에서 해비등이 일어날 수 있는 영역인 100 - 200 °C 의 온도범위에서 5 °C 간격으로 증가시키며 실험했으며, 최고 온도에 도달한 후에는, 다시 5°C 간격으로 감소시키며 실험했다. 가열면이 요구 온도까지 가열 또는 냉각되어 ± 2 °C 의 균일한 온도의 정상상태에 도달하면 액적을 표면에 낙하시켰으며, 낙하 및 낙하시키는 액체 저장탱크와 주사침 사이를 연결하는 유리관에 설치된 cock 로 조절했다.

액적은 주사침 끝에서 표면장력과 액적중량이 평형상태를 이룰 때 자유 낙하하며, 고체면과의 충돌시 분열하지않고 낙하 후에도 준정상적인 상태로 가열면 상에 위치할 수 있게 하기 위하여, 8 mm 높이에서 낙하했다. 액적 증발시간에 절대적인 영향을 미치는 액적 초기의 크기는 #13, #18, #22, #24 의 주사침을 사용하여 변화시켰다. 초기 질량의 측정은, 비이커에 약 50 방울 정도를 낙하시켜 전체 질량을 측정후, 액적수로 나누고 이를 5 회 반복하여 그 산술 평균치를 산출했으며, 이로부터 계산한, 구형의 경우, 직경은 Tab. 1. 과 같다.

Tab. 1. The initial diameter of droplet

	# 13	# 18	# 22	# 24
초기직경(mm)	4.50	3.29	2.84	2.54

액적 증발 후, 가열면 상에 불순물 잔재로 인한 영향을 제외하기 위하여, 매 실험이 끝나면 표면을 아세톤액으로 닦아내었다. 또한 실험중의 표면 산화로 인한 영향을 감소하기 위하여, 모든 가열판은 실험전에 300 - 350 °C 에서 약 4 시간 동안 가열하고 상온에서 방치 상태로 냉각했으며, 냉각후, 각 표면들은 # 800 sand paper 가공하여 동일한 거칠기를 갖도록 했다.

액적 접촉각의 측정은, 이와같은 표면 처리가 끝난 후, 수행했다. 접촉각 측정의 타당한 방법은 가열면의 온도를 액적 비등시의 온도와 동일하게 유지한 상태에서 측정하는 방법이지만, 현재로서는 이러한 방법의 측정이 불가능하므로, 가열면을 실온으로 유지하고 액체만을 포화온도로 유지한 정적인 상태에서 측정했다. 측정은 가열면을 상온에서 건조시킨 후, 사용한 주사침을 통하여 액적을 낙하하여, 표면에 위치한 정적인 액적을 Questar QM - 1 의 원거리 현미경으로 10 - 20 배 확대하여 액적과 표면간의 접촉각을 측정했다. 측정된 접촉각은, 본 실험에서 사용한 액적크기의 범위내에서, 가열판의 종류에 관계없이, 28 - 33 ° 이며, 액적의 크기가 증가할수록 감소하는 경향을 보였다.

IV. 결과분석

가열면과 액적이 접촉하여 비등이 일어날 때의 열유속은, 높은 열전달 계수로 인하여, 면의 초기온도 및 위치에 따라 급격한 변화가 있으므로, 두 점간의 온도측정에 의한 실험적방법은 거의 불가능한 상태이다. 따라서 본 연구에서는 기존의 pool 열전달 관계식을 이용하여 면의 온도강하와 변화를 예측했으며, 그 결과들을 실험적으로 측정된 액적 증발기간과 비교하였다. 이와같은 과정의 내용들을 분석하면 다음과 같다.

1. 가열면의 온도변화

우선 가열면 각 위치에서의, 수치적 계산에 의하여 산출한 온도변화를 고려하면, Fig. 4 와 같다. 여기서 초기온도는 3가지 재질 모두 140 °C 이며, 초기의 구액적 반경이 3.82 mm 이고, 시간은 가열면 내에서 온도 차이가 제일 클 때(면의 온도가 최하에 도달)와 제일 작을 때(증발 완료 순간)를 기준하여 표시했다. 증발기간 중의 온도변화 범위는 이와같은 온도 범위 내에서 존재하며, 그 차이는, 내부 열전도 저항이 작은 동판의 경우가 가장 작고 저항이 큰 스테인레스판이 가장 크게 변함을 알 수 있다. 또한 반경방향의 온도 변화는 재질에 관계없이, 액적 초기 접촉반경($R_0 = 2.26$ mm)의 약 2 배 거리인, $r = 5$ mm 이내에서는 급격히 변화하나, 그 이상의 거리에서는 초기온도와 거의 차이가 없었다.

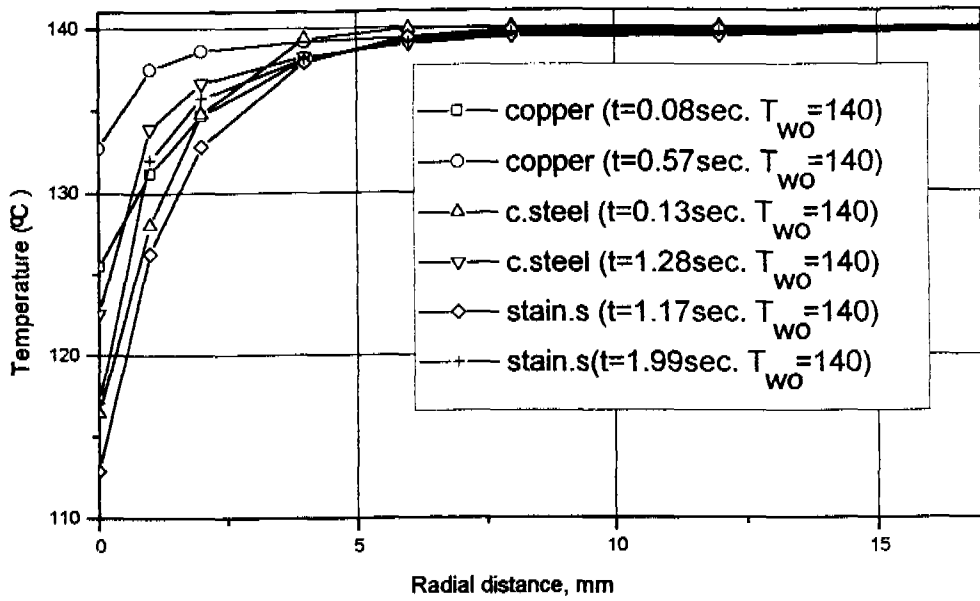


Fig. 4. Temperature changes on heated surface.

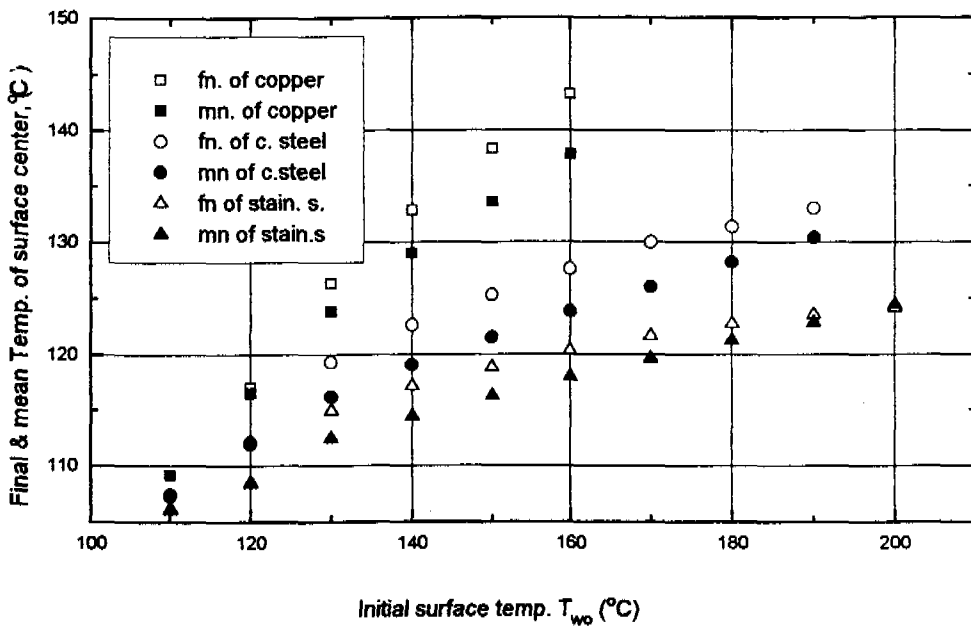


Fig. 5. Effect of T_{wo} on final and mean surface temperature.

Fig. 5. 는 낙하 전의 반경이 3.29 mm 인 구형 액적이 핵비등 영역 내의 임의의 초기 온도 T_{wo} 로 가열된 가열면에 낙하하여, 증발이 완료될 때까지의, 접촉면 중심에서 시간 평균온도와 비등 완료시의 최종온도를 나타내고 있다. 그림에서, 초기 온도 T_{wo} 가 증가할수록 평균온도와 초기 온도 T_{wo} 와의 차이는 증가하는 경향을 보이며, 이러한 경향은 스테인레스강이 가장 현저하고 동판이 가장 낮게 나타났다. 그 원인은, 동판의 열확산계수 $\alpha_{cu} = 1.105 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ 에 비하여 스테인레스강은 $\alpha_{ss} = 4.728 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 이므로, 접촉면에서의 냉각으로 인한 온도강하를 고체 내부에서의 전도 열확산에 의한 보상이 동계전에서 높게 일어나기 때문으로 판단된다. 따라서, 동일한 초기 가열면 온도에서도 동판에서는 증발 말기에 막비등이 일어날 수 있는 반면, 스테인레스 강과 같이 α 가 낮은 재질에서는, 상당한 온도 강하로 인하여, 계속 핵비등을 유지할 수 있다는 것을 의미한다. 또한 면의 평균온도와 최종온도와의 차이는, 동판에서 T_{wo} 증가에 따라 계속 증가하는 경향을 보이나 탄소강이나 스테인레스강에서는 증가하다가 감소하는 경향을 보였다. 최종온도가 평균온도보다 높다는 것은, 증발과정 중의 표면온도가 강하 하였다가 다시 증가하는 기간이 존재한다는 암시하며, 그 차이가 클수록 온도 상승폭이 크거나 또는 전 증발기간 t_{evap} 에 대한 온도상승기간의 비율이 높다는 것을 의미한다. 그러므로 동판에서는 표면에서의 열유속이 증가하여도, 초기 온도 강하 후, 비교적 짧은 기간동안에도, 상당한 온도에 도달하여 증발 완료시의 온도는 평균온도와 많은 차이를 나타낸다. α 가 낮은 탄소강이나 스테인레스강에서도, 표면에서 열유속이 작은 경우에는 온도 상승율은 낮지만 충분한 증발기간으로 인하여 평균온도보다 높은 최종온도에 도달한다. 그러나 열유속이 높은 경우에는, 어느정도의 열역학적 평형상태의 온도상승이 이루어지기 전에 이미 증발이 완료되므로 최종온도는 평균온도와 큰 차이 갖지 않으며, 이러한 현상은 높은 온도의 동판에서도 나타날 수 있지만, 이미 증발을 완료하거나 또는 막비등영역에 해당하므로 계산에서는 제외했다. 이와 같은 현상은 Fig. 6. 에서, 접촉면적 중심온도의 시간에 따른 변화에서도 제시되고 있다.

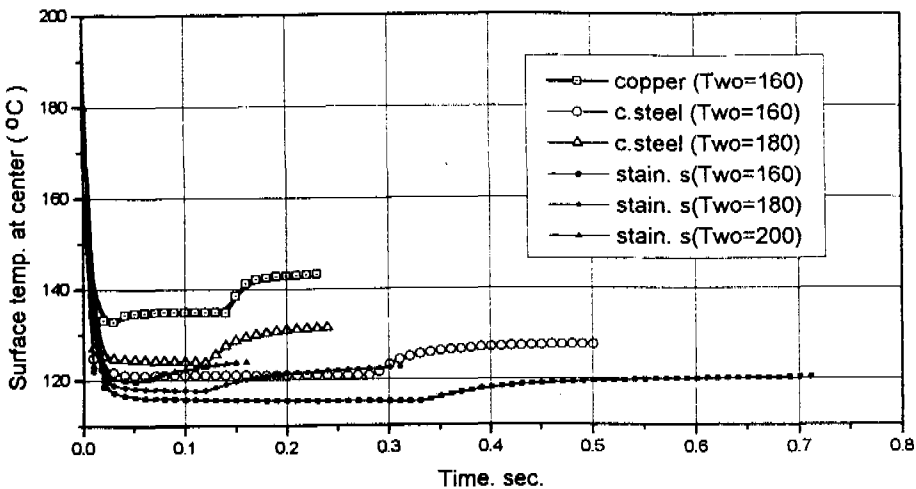


Fig. 6. Temperature changes of center with time at $T_{wo} = 160 - 200 \text{ }^\circ\text{C}$

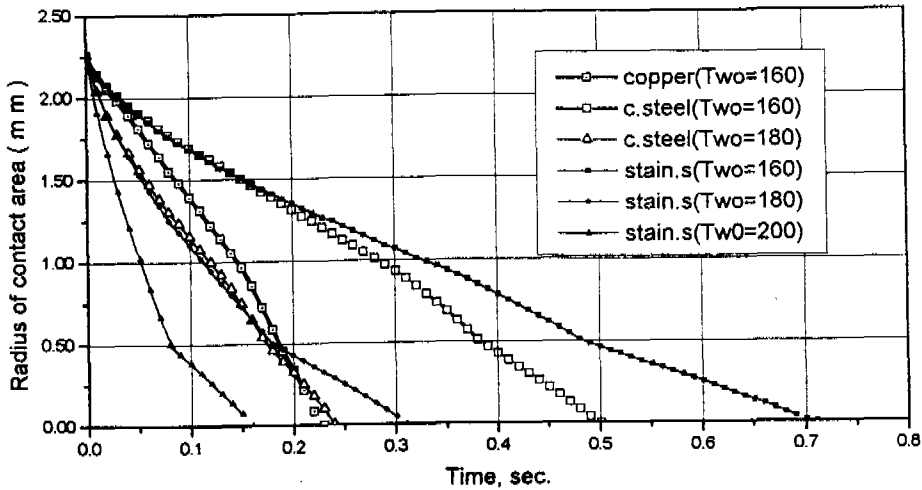


Fig. 7. Contact area changes with time at $T_{wo} = 160 - 200\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig. 6 은 동판, 탄소강, 스테인레스강의 표면에 면에 초기 직경이 3.29 mm 의 구(球) 액적을 온도 $T_{wo} = 160, 180, 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 의 가열면에 낙하했을 때, 시간에 따른 온도변화를 표시했다.

이 온도 변화 곡선에서, 초기 가열면 온도가 높을수록 또는 가열면 재질의 α 가 작을수록 초기 온도 T_{wo} 로부터의 온도강하는 증가함을 보이고 있다. 이러한 온도 강하는, 상온상태의 액체 초기온도를 포화온도까지 상승시키고, 첫번째 기포 발생에 필요한 에너지를 보충시키므로, 면의 초기온도가 낮을수록 또는 α 가 작은 재질일수록 강하기간이 길어진다.

일단, 액적 내에서 기포가 발생하여 준정상상태의 활발한 비등이 진행하면 표면에서 액적으로의 열전달과 가열면 내부에서 표면으로의 전도 열전달이 거의 평형상태에 도달하여, 표면온도가 일정하게 유지되거나 또는 매우 완만하게 감소하는 기간이 존재한다. 이러한 기간은 고체 내부에서의 열저항이 작을수록, 또는 초기 표면온도가 높을수록 짧아진다. 이 기간이 끝나면, 그 기간동안의 증발로 액적 접촉면적이 감소하고, 그로 인하여 표면에서의 비등 열전달량이 감소되며, 결과적으로 표면으로의 전도 열확산량과 표면에서의 냉각열량의 평형이 이루어지지 못한다. 따라서 액적증발이 완료될 때까지 표면 온도는 계속 증가하며, 이 기간 중의 온도 상승은, 동일한 초기온도인 경우, 내부 열저항이 작은 재질일수록 증가하며, 동일 재질에서는 초기온도가 높을수록 증가한다. 따라서 스테인레스강과 같이 내부 열전도저항이 큰 재질은 온도 상승기간이 길지만, 온도 상승폭이 매우 작으므로, 증발기간 중의 평균온도와 최종온도와의 차이가 작아지며, 동(銅)과 같이 내부 전도저항이 작은 재질은, 비교적 짧은 온도상승 기간에서도 상당한 표면온도를 증발 말기(末

期)에 유지하므로, 평균온도와와의 차이가 커지고, 초기 표면온도가 높은 경우에는 막비등이 일어날 수 있다.

Fig. 7 은 Fig. 6 에 해당하는 초기온도에서의 접촉면적 반경 R 의 변화를 나타낸 것이다. 시간에 따른 R 의 변화 경향은 가열면의 초기온도가 높거나 또는 가열면 재질의 열전도계수가 클수록 급속히 감소하여 증발기간이 짧아짐을 나타내며, 이것은 증발기간이 초기온도 외에 가열면 재질에도 상당한 영향을 받는다는 것을 의미한다. 또한 스테인레스강의 경우, 증발기간 말기에서 접촉반경의 시간에 대한 감소율이 감소하고 있으나, 동판의 경우에는 이와 반대로 증발기간 말기에서 감소율이 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 증발기간 말기의 온도 상승량(Fig. 6)과 관계하는 현상으로, 스테인레스강보다 동판에서의 더욱 증가한 가열표면 온도상승으로 액적 증발을 가속시키기 때문으로 판단된다.

2. 가열면의 초기온도와 증발기간과의 관계

본 실험에서 측정된, 동판과 초기 직경이 2.54, 2.84, 3.42 mm의 구액적, 탄소강판과 직경이 2.84, 3.42 mm의 구액적, 스테인레스강과 직경이 2.84, 3.42, 4.5 mm의 구액적에 대한, 초기 가열면 온도와 증발 기간과의 실험적 관계는 Fig. 8 과 같다. 표시한 대부분의 실험치들은, 초기 액적 크기 및 온도가 동일한 경우에 대하여, 최대값과 최소값의 한계치인 2 개의 실험점으로 나타냈고, 온도 범위는 핵비등이 관찰되는 범위 내에서 국한했다.

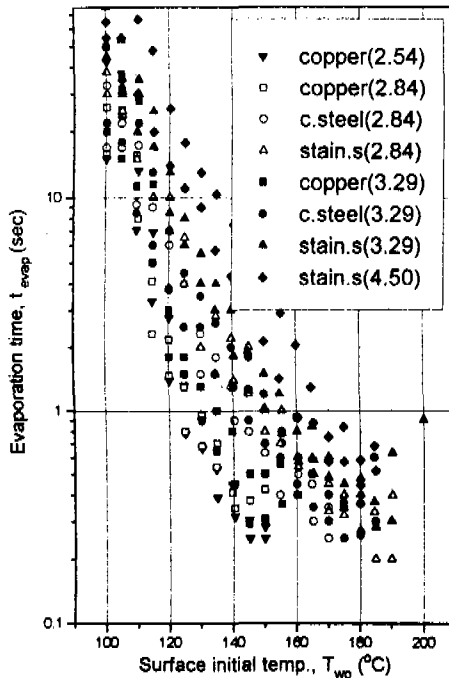


Fig. 8. t_{evap} vs. T_{wo} for 3 plate material.

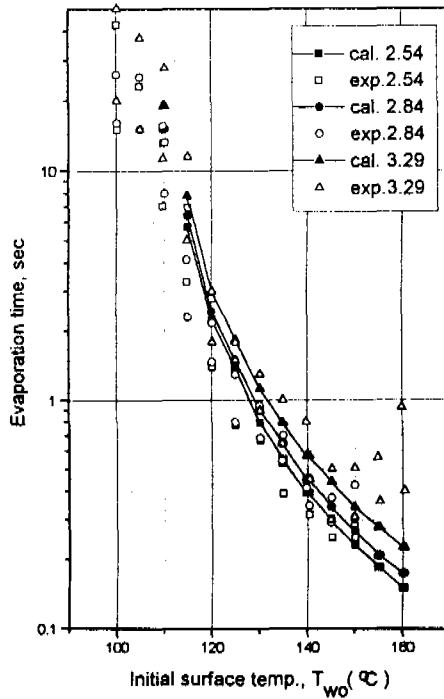


Fig.9. Evaporation curves from calculation and data vs. T_{wo} for copper plate.

그 결과 동판에서는 $T_{wo} = 160\text{ }^\circ\text{C}$, 탄소강에서 $T_{wo} = 180\text{ }^\circ\text{C}$, 스테인레스에서는 $T_{wo} = 190\text{ }^\circ\text{C}$ 이하의 온도범위에서 실험치들이 선택되었다. 이들 실험치들은, 증발기간이 초기 가열면 온도와 액적 크기 및 가열면의 재질에 따라 상당한 영향을 받으며, 동일한 조건에서도 약 $\pm 50\%$ 의 오차범위에서 측정되었다. 동일 가열면 재질에서 액적 크기를 변화하여 증발기간을 표시한 것은 Fig. 9, 10 과 같다. Fig. 9 는 동판 가열면에 대한 것으로, 실선은 본 연구에서 제시한 증발기간 예측방법에 의하여 계산한 값을 나타냈다. 계산값은, 핵비동 경계 영역의 온도 지점을 제외하고는, 최대/최소 실험치들의 산술평균값의 $\pm 30\%$ 이내 값을 가지므로 비교적 양호한 예측값이라 하겠다.

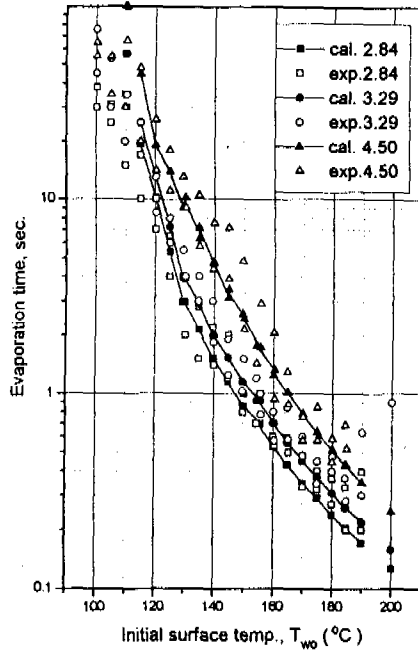


Fig. 10. Evaporation curves from calculation and data vs. T_{w0} for stainless steel.

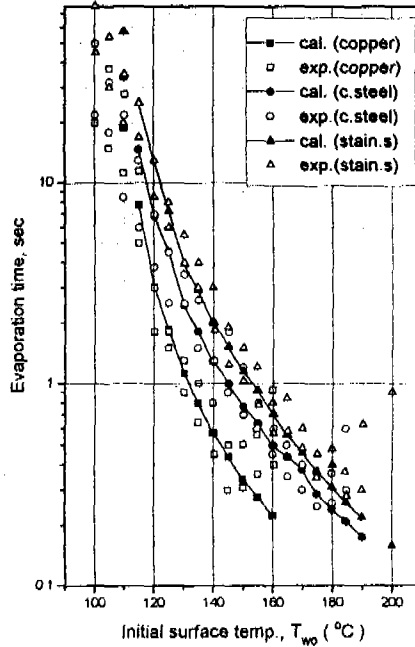


Fig. 11. Evaporation curves from calculation and data vs. T_{w0} for 3 plate material.

단, 온도가 낮은 핵비등 경계지점(100 - 110 °C)에서 계산값이 실험치보다 낮은 이유는, 본 계산에서, 온도가 낮은 핵비등 영역에서 지배적인 자연대류 열전달량을 고려하지 않았

고, 또한 이러한 온도 영역에서는 가열면과 직접 접촉하는 면적 외에서 존재하는 증발현상을 무시할 수 없기 때문에 판단한다. 한편, 온도가 높은 해비등 영역의 경계 지점에서는, 증발 말기에, 원래의 액적으로부터 작은 액적들이 분리하여, 막비등 상태로 증발이 완료되므로 계산값들은 실험치보다 낮은 값을 얻었다. 이러한 현상은, 앞에서 언급한 α 가 큰 재질의 작은 온도 강하와 높은 표면 온도 상승으로 인하여, 가열면의 초기 온도가 비교적 높은 경우, 증발 말기에 가열 표면이 막비등 온도 영역까지 상승하기 때문이다. 따라서 동판에서는 해비등 한계가 가열면의 초기온도가 150 - 160 °C 로 제한 되었다. 그러나 α 가 작은 스테인레스 강판(Fig. 10)에서는 상당한 온도 강하와 증발 말기의 완만한 온도 상승으로 해비등 영역이 약 $T_{\text{two}} = 190$ °C 까지 연장 되었다. 이와 같은 해비등 한계 온도의 증가를 제외하면, Fig. 10 의 스테인레스강판에서도 동판에서의 경우와 유사한 온도 증가에 따른 증발기간 감소를 보이고 있다. 그러나 본 실험에서 가장 큰 초기 기두의 직경이 4.5 mm의 액적에 대하여는, 접촉각의 감소로 계산값에 비하여 작은 증발기간을 기대했으나, 이와 반대되는 경향을 보였으며, 그 원인은 실험시의 표면온도 측정에서 오차이거나 또는 본 연구에서 제시한 방법이 초기 액적이 커짐에 따라 적용에 제한 받은 것으로 추정된다.

Fig. 11 은 재질에 따른 증발기간 변화를 고려하기 위한 것으로 초기 액적 직경이 3.29 mm 인 액적을 3 종류의 가열판 위에서 측정한 실험값과 계산값을 표시했다. 이로부터 증발기간은, 초기 액적 크기 및 온도가 동일하여도 가열면의 재질에 따라, 이론 및 실험치 모두가 현저한 차이를 나타내며 이러한 변화 경향은, 증발기간 중의 표면온도 변화와 관련하여, 열확산계수 α 가 큰 재질일수록 증발기간이 짧아지고, 작은 재질일수록 길어짐을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 연구에서는 가열면 상에 액적이 위치하여 해비등영역 내에서 비등할 때, 면의 재질 및 초기온도가 가열판의 온도변화와 증발기간에 미치는 영향을 설정한 모델에 의하여 예측했고, 그 결과를 동, 탄소강, 스테인레스강판의 가열면과 초기반경이 2.54 mm - 4.5 mm의 증류수 액적을 사용한 실험치들과 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 액적 낙하 직후, 가열면은 초기온도로부터 상당한 온도 강하가 일어나며, 가열면의 열확산율이 작을수록 또는 초기온도가 높을수록 온도 강하가 증가한다.

2. 충분한 열용량의 가열판에서 액적이 면과 접촉하여 비등이 진행되는 동안, 초기 온도 강하 이후의 가열면 온도는 증발이 완료될 때까지 계속 증가하며, 시간에 따른 증가율은 열확산율이 큰 재질에서는 높은 값을 갖는다. 따라서 높은 열확산율의 재질에서는, 비교적 낮은 초기온도에서도 증발 말기의 가열면 온도가 막비등 영역까지 상승할 수 있으므로, 해비등이 일어날수 있는 면의 초기온도 범위가 좁아진다.

3. 본 연구에서 제시한 방법에 의하여 예측된 증발기간은 실험치들과 ± 30 % 이내에서 잘 일치하고 있으며, 초기액적 크기 및 초기 가열면 온도가 동일한 경우, 열확산 계수가 큰 재질일수록 액적 증발기간이 짧아지는 경향도 실험치들과 잘 일치하고 있다.

참 고 문 헌

1. Tamura, Z. and Tanasawa, Y., Seventh International Combustion Symposium, P.509-522, 1958.
2. Hiroyasu, H., Kadota, T. and Senda, T., "Evaporation of a fuel droplet contacting with a hot surface in pressurized and heated ambient gas", Trans. Japan Soc. Mech. Engrs **39**(328), 3779-3787, 1973.
3. Johnson, H. A., Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol.14, p.67-82, 1971.
4. Makino, K. and Michiyoshi, I., "Effects of the initial size of water deoplet on its evaporation on heated surfaces", Int. J. Heat Mass Transfer **22**, p.979-981, 1979.
5. Michiyoshi, I. and Makino, K., "Heat transfer characteristics of evaporation of a liquid droplet on heated surfaces", Int. J. Heat Mass Transfer **21**, p.605-613, 1978.
6. Groendes, V. and Mesler, R., "Measurement of transient surface temperature beneath Leidenfrost water drops", Heat Transfer 1982, Proc. 7th int. Heat Transfer Conf., Munchen, Vol. 4, p.131-136, Hemisphere, Washington DC, 1982.
7. Han, C. Y. and Griffith, P., Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 14, P.67-82, 1971.
8. Makino, K. and Michiyoshi, I., "The behavior of a water droplet on heated surfaces", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 27, p.781-791, 1984.
9. Michiyoshi, I. and Makino, K., "Discussions of transient heat transfer to a water droplet on heated surfaces under atmospheric pressure", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.30, p.1895-1905, 1987.