

<학술논문>

DOI <https://doi.org/10.3795/KSME-B.2017.41.9.597>

ISSN 1226-4881(Print)
2288-5324(Online)

계면활성제 수용액 내 고온 수직 금속봉의 최소막비등점에 대한 연구

이 치 영^{*†} · 김 재 한^{*}

* 부경대학교 소방공학과

Investigation on Minimum Film Boiling Point of Highly Heated Vertical Metal Rod in Aqueous Surfactant Solution

Chi Young Lee^{*†} and Jae Han Kim^{*}

* Dept. of Fire Protection Engineering, Pukyong Nat'l Univ.

(Received March 11, 2017 ; Revised May 17, 2017 ; Accepted June 11, 2017)

Key Words: Minimum Film Boiling(최소막비등), Surfactant(계면활성제), Triton X-100(트리톤 X-100), Quenching(급랭)

초록: 다양한 온도 조건의 계면활성제 수용액 내에서 급속 냉각되는 고온 수직 금속봉의 최소막비등점에 대한 실험을 수행하였다. 액체로는 Triton X-100 수용액(100 wppm)과 순수(pure water)를 이용하였고, 액체의 온도는 77 °C~100 °C 영역이었다. 고체 시편으로는 시편 중심의 초기 온도가 500 °C인 스테인레스 스틸(stainless steel) 수직봉을 이용하였다. Triton X-100 수용액과 순수에서, 액체의 온도가 감소함에 따라 최소막비등점의 도달시간은 감소하였고, 온도 및 열유속은 증가하였다. 한편, 본 실험 온도 영역에서, Triton X-100 수용액의 경우가 순수의 경우보다 최소막비등점의 도달시간은 길었고, 온도 및 열유속은 감소하는 경향을 나타냈다. 본 실험데이터를 토대로 고온 수직 금속봉에 대해서 Triton X-100 수용액과 순수에서의 최소막비등 온도에 대한 실험식을 제안하였다.

Abstract: In this study, experiments were conducted on the MFB(minimum film boiling) point of highly heated vertical metal rod quenched in aqueous surfactant solution at various temperature conditions. The aqueous Triton X-100 solution(100 wppm) and pure water were used as the liquid pool. Their temperatures ranged from 77 °C to 100 °C. A stainless steel vertical rod of initial center temperature of 500 °C was used as a test specimen. In both liquid pools, as the liquid temperature decreased, the time to reach the MFB point decreased with a parallel increase in the temperature and heat flux of the MFB point. However, over the whole present temperature range, in the aqueous Triton X-100 solution, the time to reach the MFB point was longer, while the temperature and heat flux of the MFB point were reduced when compared with pure water. Based on the present experimental data, this study proposed the empirical correlations to predict the MFB temperature of a high temperature vertical metal rod in pure water and in aqueous Triton X-100 solution.

- 기호설명 -

A : 표면적(m²)

Bi : Biot수(-)

c : 비열(J/kg·°C)

g : 중력가속도(9.81 m/s²)

h_{fg} : 증발잠열(J/kg)

k : 열전도도(W/m·°C)

q'' : 열유속(W/m²)

V : 부피(m³)

T : 온도(°C)

ΔT : 온도차(°C)

t : 시간(sec)

Δt : 시간차(sec)

† Corresponding Author, cylee@pknu.ac.kr

그리스문자

μ : 점성계수(Pa·s)

ρ : 밀도(kg/m³)

σ : 표면장력(N/m)

첨자

B : Berenson⁽¹³⁾ 상관식

c : 시편 중심 온도

crit : 임계조건

l : 액체

MFB : 최소막비등

N&H : Nishio and Hirata⁽¹⁴⁾ 상관식

sat : 포화조건

sub : 과냉도

v : 증기

1. 서론

급랭(quenching)은 매우 높은 온도로 가열된 물체가 훨씬 낮은 온도의 액체에 의해 급격히 냉각될 때 일어나는 현상이다. 높은 온도의 물체가 급격하게 냉각되면서, 열전달 영역은 일반적으로 막비등, 천이비등 및 핵비등, 그리고 단상자연대류로 변화한다.⁽¹⁾ 이러한 급랭 현상은 원자력 발전소의 원자로 내 핵연료 냉각 및 화재 상황에서 뜨거운 고체 표면 냉각 과정 등에서 관찰할 수 있다.

지금까지 급랭 시 과도 열전달 현상에 대하여 고체 시편⁽²⁻⁷⁾뿐 아니라 액체⁽⁸⁻¹⁰⁾의 영향을 파악하기 위한 다양한 연구가 수행된 바 있다. 그러나, 계면활성제는 비등 현상에 지대한 영향을 미치는 것으로 알려져 있고, 그에 대한 다양한 연구가 이루어져 왔으나,⁽¹¹⁾ 계면활성제 수용액의 액체풀(liquid pool)을 이용한 급랭 열전달 연구는 상대적으로 매우 적었다. Wu 등⁽¹²⁾은 고온의 구형(sphere) 구리 시편과 SLS(Sodium Lauryl Sulfate) 계면활성제가 첨가된 액체풀을 이용하여 급랭 실험을 수행하였다. 이 연구에서는 SLS 계면활성제가 임계열유속에 미치는 영향을 평가하였으나 최소막비등점(MFB point; minimum film boiling point)에 대한 연구는 수행하지 않았다. 급랭 시 계면활성제가 최소막비등점에 미치는 영향에 대한 연구가 거의 이루어지지 않은 것으로 판단되는 바, 이에 대한 실험이 더욱 활발하게 수행되어야 한다.

일반적으로 계면활성제는 수용액의 표면장력을 감소시키는 것으로 알려져 있고, 표면장력은 최소막비등점에 영향을 미칠 수 있다. 표면장력을 고려한 최소막비등 온도에 대한 예측 상관식인

Berenson⁽¹³⁾ 상관식 $[T_{MFB,B}$, 식 (1)]과 Nishio and Hirata⁽¹⁴⁾ 상관식 $[T_{MFB,N\&H}$, 식 (2)]을 아래에 나타내었다.

$$T_{MFB,B} = T_{sat} + 0.127 \left(\frac{\rho_v h_{fg}}{k_v} \right) \left[\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\rho_l + \rho_v} \right]^{2/3} \times \left[\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)} \right]^{1/2} \left[\frac{\mu_v}{g(\rho_l - \rho_v)} \right]^{1/3} \quad (1)$$

$$T_{MFB,N\&H} = T_{sat} + 0.03451 T_{crit} \times \left(\frac{T_{crit} - T_{sat}}{T_{crit} \sqrt{\sigma}} \right)^{1.2} \quad (2)$$

여기서, T , ρ , h_{fg} , k 는 각각 온도, 밀도, 증발잠열, 열전도도를 나타낸다. σ , μ , g 는 각각 표면장력, 점도, 중력가속도를 의미한다. 하첨자인 MFB, sat, v, l, crit은 최소막비등점, 포화조건, 증기, 액체, 임계점을 의미한다. Berenson⁽¹³⁾ 상관식과 Nishio and Hirata⁽¹⁴⁾ 상관식을 살펴보면, 표면장력이 감소함에 따라 Berenson⁽¹³⁾ 상관식은 최소막비등 온도가 감소하는 것으로 예측하고 있으나, Nishio and Hirata⁽¹⁴⁾ 상관식은 최소막비등 온도가 증가하는 것으로 예측하고 있다. 이처럼 기존 상관식에서도 표면장력과 최소막비등점 간 상관관계에 대한 예측이 명확하지 않은 상황이며, 이에 대한 검증이 필요하다.

본 연구에서는 다양한 온도 조건의 Triton X-100 계면활성제 수용액과 고온의 수직 급속봉을 이용하여 급랭 실험을 수행하였다. 급랭 실험 결과를 바탕으로 에너지 평형식과 집중계 해석(lumped system analysis)을 적용하여 계면활성제가 최소막비등점에 미치는 영향을 보고하고 검토하였으며, 최소막비등 온도에 대한 실험식을 제안하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에서는 본 연구자의 기존 연구^(5,6)를 참고하여 실험장치 및 시험부를 제작, 이용하였다.

Fig. 1에 나타낸 바와 같이 실험장치는 시편을 포함한 시험부, 시편을 가열하는 전기로와 전기로 제어기, 시험부를 상하로 움직이도록 하는 이송장치, 급랭 현상이 일어나는 액체와 액체 온도를 제어하기 위한 가열기, 온도 실험데이터 수집을 위한 데이터수집장치로 구성된다.

시험부는 시편과 2개의 스테인레스 스틸 튜브(stainless steel tube)를 연결하고 직경 0.5 mm K-type 열전대를 삽입하여 제작하였다. 급랭이 일어나는 시편은 직경 10 mm, 길이 50 mm의 원통형이며,

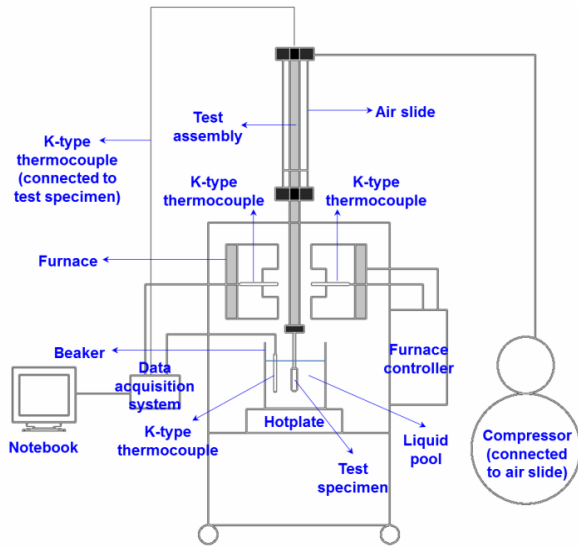


Fig. 1 Schematic of quenching experimental set-up

하부는 곡률 반경 5 mm의 반구형으로 가공하였다. 시편의 재질은 스테인레스 스틸이고, 중심부에 25 mm 깊이로 지름 0.5 mm의 구멍을 가공하였다. 해당 구멍에 지름 0.5 mm의 K-type 열전대를 삽입하고 시편을 지름 3.175 mm, 길이 150 mm인 스테인레스 스틸 튜브에 연결한 이후, 이를 다시 지름 12.7 mm, 길이 900 mm인 스테인레스 스틸 튜브에 연결하였다. 시험부 전체를 상하로 움직일 수 있도록 하기 위하여, 12.7 mm 스테인레스 스틸 튜브 부분을 에어 슬라이드(air slide)를 이용하여 제작한 시편 이송장치에 고정하였다. 급랭이 일어나는 액체의 경우, Triton X-100 비이온계(nonionic) 계면활성제 수용액(100 wppm)과 순수(pure water)를 이용하였다. 한편, 액체 온도를 측정하기 위하여 유리 비이커(beaker)에 K-type 열전대를 설치하였고, 액체를 원하는 온도로 가열하기 위하여 유리 비이커를 가열기 위에 위치시켰다. 시편과 액체의 온도를 측정하기 위한 열전대를 데이터수집장치(Data Translation, DT9828)에 연결하여 온도 실험데이터를 저장하였다.

실험방법은 다음과 같다.^(5,6) 전기로 및 액체를 원하는 온도로 가열한 다음, 시편을 전기로 내부에 이송장치를 이용하여 위치시킨다. 시편의 온도가 원하는 온도가 되었을 때, 이송장치를 이용하여 빠른 속도로 시편을 액체에 떨어뜨린다. 급랭시 일어나는 시간에 따른 시편의 온도 변화를 데이터수집장치를 이용하여 저장한다. 데이터 수집 속도는 초당 20개로 설정하였고, 실험은 각 조건에서 1회 실시하여 실험데이터를 획득하였다.

본 연구에서는 시편의 중심 온도가 500 °C이고,

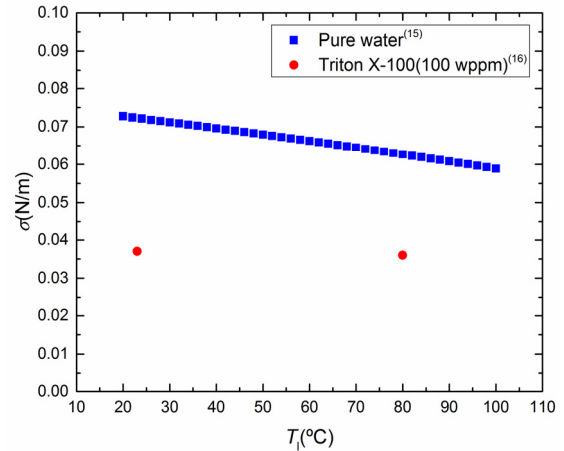


Fig. 2 Equilibrium surface tension of pure water and aqueous Triton X-100 solution^(15,16)

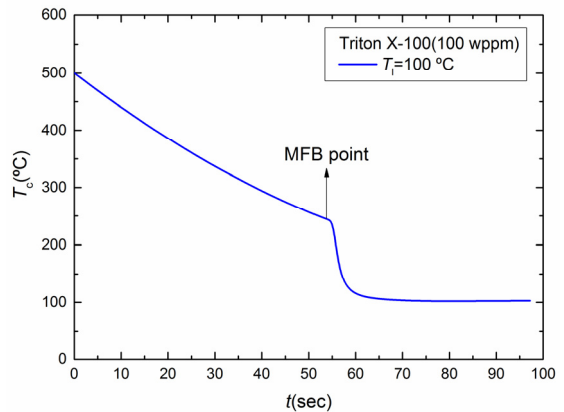


Fig. 3 Typical quenching curve in aqueous Triton X-100 solution of 100 °C

액체의 온도는 약 77 °C~100 °C인 조건에서 실험을 수행하였다.

계면활성제는 수용액의 표면장력에 지대한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. Fig. 2에 본 연구에서 이용한 순수과 Triton X-100 수용액의 온도(T_1)에 따른 표면장력(σ) 측정 관련 기존 결과^(15,16)를 나타내었다. 순수에 비하여 Triton X-100 수용액은 표면장력이 작은 것으로 나타났다. 온도가 증가함에 따라 순수의 표면장력은 점차적으로 감소하였으나, Triton X-100 수용액의 경우, 23 °C와 80 °C에서의 표면장력 측정 데이터는 큰 차이를 보이지 않았다. 한편, 온도가 증가함에 따라 순수과 Triton X-100 수용액 간 표면장력 차이가 감소하는 것으로 나타났다.

3. 실험결과

Fig. 3에 Triton X-100 수용액의 온도가 100 °C 일

때, 급랭 곡선(시간(t)에 따른 시편 중심의 온도(T_c) 변화 곡선)을 나타내었다.

Fig. 3에서 시간에 따른 열전달 현상의 변화를 설명하면 일반적으로 다음과 같다.^(5,6) 초기에는 시간에 따른 온도 변화가 천천히 감소하는 경향을 보이며, 이 구간을 막비등 영역이라 부른다. 이 영역에서는 시편 주위에 증기막이 형성되어 주위의 액체가 가열된 시편에 접촉하지 않는 영역이다. 시편 주위에 열전도도가 낮은 증기막이 존재하므로, 열전달 성능이 낮고, 따라서 시간에 따른 온도 감소가 천천히 일어난다. 이후 특정한 점을 지나면, 시편 중심의 온도는 시간에 따라 급격하게 감소하며, 이 구간은 천이비등 및 핵비등 영역에 해당한다. 이 구간에서는 증기막이 붕괴되어 주위의 액체가 가열된 시편에 접촉하게 되고, 가열된 시편 주위에서 격렬한 기포 생성 및 이탈이 일어나기 때문에 열전달 성능이 증대된다. Fig. 3에 나타낸 바와 같이, 막비등 영역에서 천이비등 및 핵비등 영역으로의 변화가 일어나는 점은 일반적인 비등 곡선에서의 최소막비등점에 해당되고, 막비등 영역의 종료점을 의미한다. 천이비등 및 핵비등 영역 이후에는 시편의 온도가 다시 천천히 변화하는 것을 관찰할 수 있으며, 이 구간은 비등 열전달 현상이 종료된, 단상자연대류 영역이다.

Fig. 3에 나타낸 결과를 이용하여, Fig. 4에 시간에 따른 시편 중심 온도의 변화율($\Delta T_c/\Delta t$)을 나타내었다. 약 54초에서 약 64초 사이의 구간이 다른 시간 구간에 비해 시편 중심의 온도 변화율이 큰 것을 알 수 있으며, 이 구간이 앞서 설명하였던 천이비등 및 핵비등 영역이다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 주위 액체가 가열된 시편에 접촉하게 되고, 시편 주위에서 활발한 기포 생성 및 이탈에 의해 열전달 성능이 증대되기 때문이다.

Fig. 5에 다양한 온도 조건의 Triton X-100 수용액에 대한 급랭 곡선을 나타내었다. 액체의 온도가 감소함에 따라 급랭 곡선은 왼쪽으로 이동하는 경향을 나타냈고, 최소막비등점은 더 높은 온도에서 발생하는 것으로 관찰되었다. 이는 액체 온도가 감소함에 따라 시편 주위에 생성된 증기막 내용축 현상이 활발하게 일어나므로 증기막이 빨리 붕괴될 수 있기 때문이다.⁽¹⁷⁾ 따라서 액체의 온도가 낮아짐에 따라 증기막 붕괴가 일찍 일어나서 급랭 곡선은 왼쪽으로 이동하게 되고, 최소막비등점의 온도는 증가하게 된다.

본 연구에서는 Triton X-100 계면활성제가 최소막비등점에 미치는 영향에 초점을 맞추어 연구를

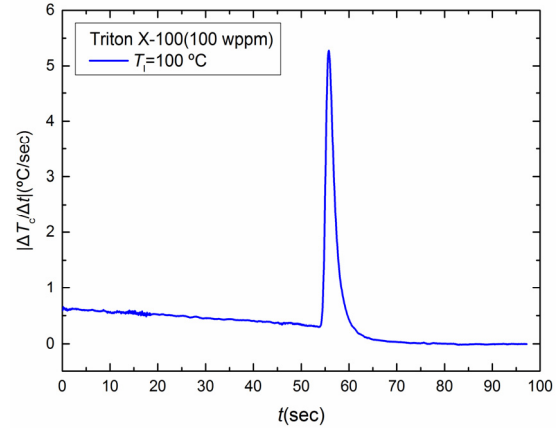


Fig. 4 Rate of rod center temperature change with time in aqueous Triton X-100 solution of 100 °C

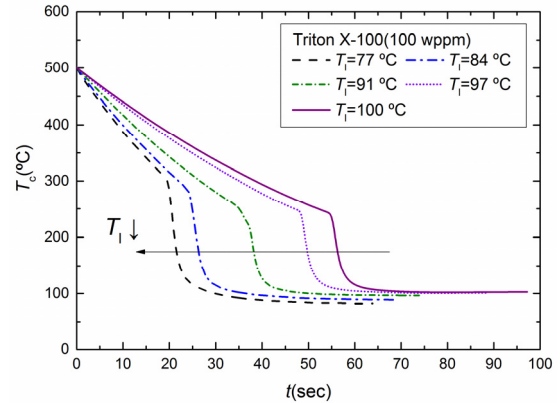


Fig. 5 Quenching curves in aqueous Triton X-100 solution of various temperature conditions

수행하였다. 비교를 위해 순수를 이용하여 추가적인 급랭 실험을 수행하였다. Triton X-100 수용액과 순수에서 수직 금속봉의 최소막비등점을 찾기 위하여, 급랭 곡선으로부터 아래와 같은 에너지 평형식을 이용하여 시편의 표면온도와 열유속 간 곡선을 얻었다.⁽¹⁾

$$q'' = -\rho c \frac{V}{A} \frac{dT}{dt} \tag{3}$$

여기서, q'' 와 c 는 각각 열유속 및 비열을 나타내고, V 와 A 는 각각 시편의 부피 및 열전달 면적을 의미한다. ΔT 는 시편과 액체의 온도차를 나타내고, t 는 시간을 나타낸다. 식 (3)을 이용하여 얻은 시편의 온도와 열유속 간 곡선으로부터 최소막비등점을 도출하였다. 한편, 막비등 영역에서는 Biot 수가 매우 작아서($Bi < 0.1$) 집중계 해석의 적용이 타당한 것으로 알려져 있으므로,^(4,10) 시편의 벽면

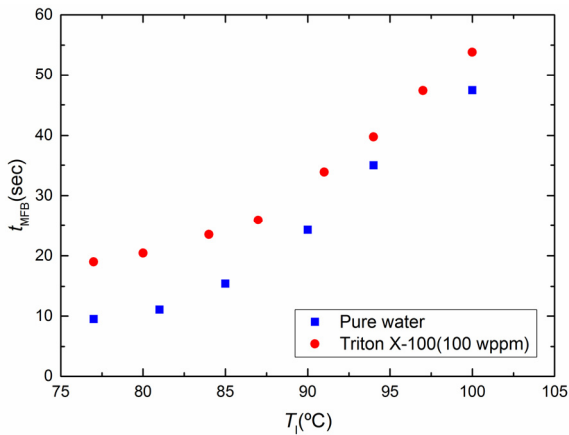


Fig. 6 Reaching time to MFB point in pure water and aqueous Triton X-100 solution of various temperature conditions

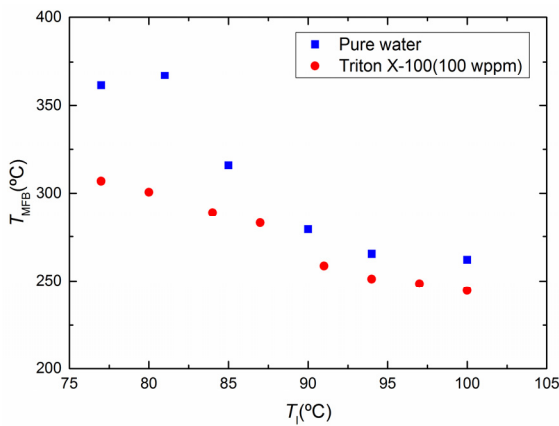


Fig. 7 MFB temperature in pure water and aqueous Triton X-100 solution of various temperature conditions

온도와 열유속 간 곡선을 도출하는데 집중계 해석 방법을 적용하였다. 본 연구에서는 Kline⁽¹⁸⁾이 제안한 방법을 이용하여 불확실도(uncertainty y)를 평가하였고, 시편의 부피, 면적, 시간에 따른 온도 차 변화의 불확실도는 2%, 1.3%, 3.6% 이내이고, 열유속의 불확실도는 9% 이내로 평가되었다.

Figs. 6-9에 Triton X-100 수용액과 순수에서 수직 금속봉의 최소막비등점에 대한 실험결과를 나타내었다.

최소막비등점에 도달하는 시간(t_{MFB}), 즉, 막비등 영역이 종료되는 시간(Fig. 6)은 Triton X-100 수용액과 순수 모두의 경우에서 액체의 온도가 증가함에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 본 실험의 액체 온도 영역에서 Triton X-100 수용액이 순수에 비하여 최소막비등점 도달시간이 증가하는 것으로 측정되었다. 이는 막비등 영역이 더 늦은

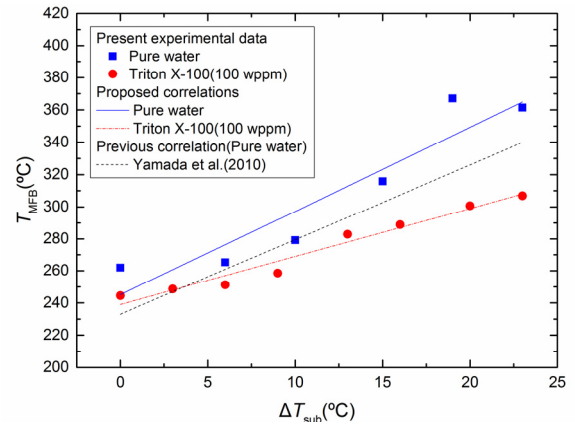


Fig. 8 MFB temperature and its correlation in pure water and aqueous Triton X-100 solution of various liquid subcooling conditions

시간에 종료된다는 것을 의미한다.

최소막비등점 온도(T_{MFB} , Fig. 7)의 경우, 두 액체에서 모두, 액체의 온도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타냈으며, 본 실험의 액체 온도 영역에서, 순수에서보다 Triton X-100 수용액에서 더 낮은 최소막비등 온도를 나타냈다. 서론 부분에서 표면장력에 대한 최소막비등 온도 예측이 기존 상관식 간 경향 차이가 있다는 것을 언급한 바 있다. 본 실험 결과를 토대로 볼 때, Triton X-100 수용액이 순수에 비해 더 낮은 표면장력을 나타낼 것으로 보이고(Fig. 2), 더 낮은 최소막비등 온도를 보였다(Fig. 7). 즉, 본 실험에서는 표면장력이 작은 경우 최소막비등 온도가 낮아지는 경향이 관찰되었다.

기존 연구^(19,20)를 살펴보면 액체의 과냉도(ΔT_{sub})와 최소막비등 온도(T_{MFB}) 간 관계를 아래와 같은 상관식 형태로 나타낼 수 있다.

$$T_{MFB} = C_1 \Delta T_{sub} + C_2 \quad (4)$$

여기서 C_1 과 C_2 는 상수이다. Fig. 7의 실험결과를 이용하여 Fig. 8에 과냉도와 최소막비등 온도 간 관계를 나타내었다. Triton X-100 수용액과 순수에 대하여 본 실험의 액체 과냉도 구간에 대하여 식 (4)의 상수 C_1 과 C_2 값을 결정하였다. 실험데이터로부터 얻은 상수 C_1 과 C_2 값의 경우, Triton X-100 수용액은 3.0과 239.0이고, 순수는 5.2와 245.1이었다. 액체의 과냉도가 증가함에 따라 최소막비등 온도가 증가하는 경향을 보이고 있으며, 이는 기존 연구 결과^(19,20)와 일치한다. 한편, 본 실험데이터 중 순수의 결과를 수직 금속봉과 순수를 이용한 Yamada 등⁽¹⁹⁾의 기존 상관식과 비교하여 보았

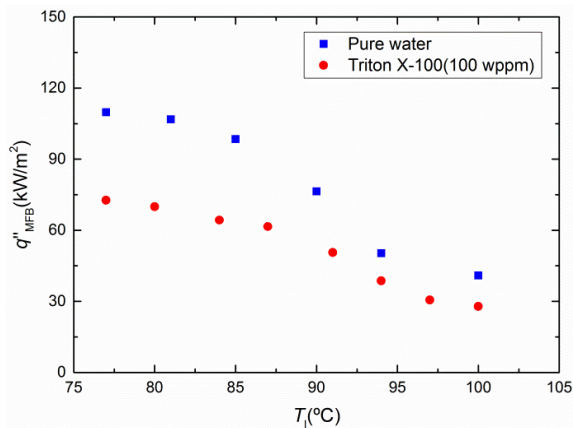


Fig. 9 MFB heat flux in pure water and aqueous Triton X-100 solution of various temperature conditions

다. Yamada 등⁽¹⁹⁾은 식 (4)의 C_1 과 C_2 값을 각각 4.65와 233로 제안하였다. 전체적으로, 본 실험 상관식이 Yamada 등⁽¹⁹⁾의 상관식에 비하여 최소 막비등 온도를 약간 크게 예측하고 있음을 알 수 있고, 두 실험 상관식 간 차이는 6%로 평가되었다. 이러한 차이가 나타난 이유 중 하나는 Yamada 등⁽¹⁹⁾이 사용한 시편의 재질(pure silver) 및 크기(지름: 32 mm, 길이: 48 mm, 하부 반구형의 반경: 16 mm)가 본 실험에서 사용한 시편의 재질 및 크기와 다르기 때문으로 판단된다.

최소막비등점 열유속(q''_{MFB} , Fig. 9)의 경우, Fig. 7에 나타난 최소막비등 온도와 유사한 경향을 나타내었다. 두 액체에서 모두 액체의 온도가 증가함에 따라 최소막비등 열유속이 감소하는 경향이 나타났으며, Triton X-100 수용액에서 순수에서보다 더 낮은 최소막비등 열유속이 나타났다.

Figs. 6-9를 토대로 볼 때, Triton X-100 계면활성제는 최소막비등점의 도달시간을 증가시키고, 최소막비등점의 온도 및 열유속을 감소시키는 것으로 나타났다. 이는 Triton X-100 계면활성제가 막비등 영역에서 증기막 붕괴를 지연시키는 역할을 한다는 것을 의미하고, 추후 계면활성제와 증기막 붕괴 간 상관관계를 규명하기 위한 세부 연구가 필요할 것으로 판단된다. 한편, Figs. 6-9에서 나타난 바와 같이, 액체의 온도가 낮을 경우가 높은 경우에 비해 순수와 Triton X-100 수용액 간 차이가 큰 것처럼 관찰되는데 추후 이와 관련한 추가 연구가 필요하다. 서론에서 언급한 바와 같이 기존의 비등 관련 연구에서 계면활성제 수용액의 액체풀과 수직봉을 이용하여 급랭 실험을 수행하여 계면활성제가 최소막비등점에 미치는 영향을 파악한 연구는 거의 찾아볼 수 없다. 본 연구는

이러한 연구 주제에 대한 선행 실험 결과이며, 추후 계면활성제 종류와 농도가 급랭 시 최소막비등점에 미치는 영향에 대한 다양한 연구가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 Triton X-100 수용액(100 wppm)과 순수를 이용하여 다양한 액체 온도 조건에서 급랭 열전달 실험을 수행하였다. 이를 통하여 Triton X-100 계면활성제와 액체의 온도가 최소막비등점의 도달시간, 온도 및 열유속에 미치는 영향을 파악하였다.

액체의 온도가 낮아짐에 따라 Triton X-100 수용액과 순수 모두에서 최소막비등점에 도달하는 시간은 짧아지고, 최소막비등점의 온도 및 열유속은 증가하는 경향을 나타냈다. 이는 액체의 온도가 감소함에 따라 증기막에서의 응축이 활발하게 일어나기 때문으로 판단된다. 순수에 비하여 Triton X-100 수용액에서 최소막비등점의 도달시간은 길게 나타났고, 최소막비등점의 온도 및 열유속은 감소하는 경향을 나타냈다. 이는 Triton X-100 계면활성제에 의해서 증기막의 붕괴가 지연될 수 있음을 의미한다. 본 실험데이터를 이용하여 Triton X-100 수용액과 순수에 대하여 수직 금속봉의 최소막비등 온도에 대한 실험 상관식을 제안하였다.

후기

이 논문은 2015학년도 부경대학교의 지원을 받아 수행된 연구임(C-D-2015-1260).

참고문헌 (References)

- (1) Kim, H., DeWitt, G., McKrell, T., Buongiorno, J. and Hu, L., 2009, "On the Quenching of Steel and Zircaloy Spheres in Water-based Nanofluids with Alumina, Silica and Diamond nanoparticles," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 35, pp. 427~438.
- (2) Sinha, J., Hochreiter, L. E. and Cheung, F. B., 2003, "Effects of Surface Roughness, Oxidation Level, and Liquid Subcooling on the Minimum Film Boiling Temperature," *Exp. Heat Transfer J. Therm. Energy Gener. Transport Storage Convers*, Vol. 16, No. 1, pp. 45~60.
- (3) Kang, J. Y., Kim, S. H., Jo, H. J., Park, G. Y., Ahn, H. S., Moriyama, K., Kim, M. H. and Park, H. S., 2016., "Film Boiling Heat Transfer on a Completely Wetttable

- Surface with Atmospheric Saturated Distilled Water Quenching,” *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 93, pp. 67~74.
- (4) Fan, L. W., Li, J. Q., Li, D. Y., Zhang, L. and Yu, Z. T., 2014, “Regulated Transient Pool Boiling of Water During Quenching on Nanostructured Surfaces with Modified Wettability from Superhydrophilic to Superhydrophobic,” *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 76, pp. 81~89.
- (5) Lee, C. Y., Chun, T. H. and In, W. K., 2014, “Effect of Change in Surface Condition Induced by Oxidation on Transient Pool Boiling Heat Transfer of Vertical Stainless Steel and Copper Rodlets,” *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 79, pp. 397~407.
- (6) Lee, C. Y., In, W. K. and Koo, Y. H., 2016, “Transient Pool Boiling Heat Transfer During Rapid Cooling Under Saturated Water Condition,” *J. Nucl. Sci. Technol.*, Vol. 53, No. 3, pp. 371~379.
- (7) Bolukbasi, A. and Ciloglu, D., 2007, “Investigation of Heat Transfer by Means of Pool Film Boiling on Vertical Cylinders in Gravity,” *Heat Mass Transfer*, Vol. 44, pp. 141~148.
- (8) Bolukbasi, A. and Ciloglu, D., 2011, “Pool Boiling Heat Transfer Characteristics of Vertical Cylinder Quenched by SiO₂-water Nanofluids,” *Int. J. Therm. Sci.*, Vol. 50, pp. 1013~1021.
- (9) Kim, H., Buongiorno, J., Hu, L. and McKrell, T., 2010, “Nanoparticle Deposition Effects on the Minimum Heat Flux Point and Quench Front Speed during Quenching in Water Based Alumina Nanofluids,” *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 53, pp. 1542~1553.
- (10) Lee, S. W., Kim, S. M., Park, S. D. and Bang, I. C., 2013, “Study on the Cooling Performance of Sea Salt Solution During Reflood Heat Transfer in a Long Vertical Tube,” *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 60, pp. 105~113.
- (11) Cheng, L., Mewes, D. and Luke, A., 2007, “Boiling Phenomena with Surfactants and Polymeric Additives: A State-of-the-art Review,” *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 50, pp. 2744~2771.
- (12) Wu, W. T., Lin, H. S., Yang, Y. M. and Maa, J. R., 1994, Critical Heat Flux in Pool Boiling of Aqueous Surfactant Solutions as Determined by the Quenching Method,” *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 2377~2379.
- (13) Berenson, P. J., 1961, “Film-boiling Heat Transfer From a Horizontal Surface,” *J. Heat Transfer*, Vol. 83, pp. 351~358.
- (14) Nishio, S. and Hirata, M., 1978, “Direct Contact Phenomenon Between a Liquid Droplet and High Temperature Solid Surface,” *6th International Heat Transfer Conference*, Toronto, Canada, Hemisphere, New York, pp. 245~250.
- (15) Thermophysical Properties of Fluid Systems, NIST(National Institute of Standards and Technology): <http://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>.
- (16) Manglik, R. M., Wasekar, V. M. and Zhang, J., 2001, “Dynamic and equilibrium surface tension of aqueous surfactant and polymeric solutions,” *Exp. Therm. Fluid. Sci.*, Vol. 25, pp. 55~64.
- (17) Freud, R., Harari, R. and Sher, E., 2009, “Collapsing Criteria for Vapor Film Around Solid Spheres as a Fundamental Stage Leading to Vapor Explosion,” *Nucl. Eng. Des.*, Vol. 239, pp. 722~727.
- (18) Kline, S. J., 1985, “The Purpose of Uncertainty Analysis,” *J. Fluids Eng.*, Vol. 107, pp. 153~160.
- (19) Yamada, T., Toyoda, K., Shigechi, T., Momoki, S., Kanemaru, K. and Yamaguchi, T., 2010, “Film Boiling Heat Transfer around a Vertical Finite-length Cylinder with a Convex Hemispherical Bottom,” *Heat Tran Asian Res*, Vol. 39, No. 3, pp. 166~177.
- (20) Dhir, V. K. and Purohit, G. P., “Subcooled Film-Boiling Heat Transfer from Spheres,” *Nucl. Eng. Des.*, Vol. 47, 1978, pp. 49~66.