

〈論 文〉

액체 · 액체계의 막비등열전달 특성

김 병 주*

(1991년 7월 25일 접수)

Film Boiling Heat Transfer Characteristics in Liquid-Liquid System

Byong-Joo Kim

Key Words: Film Boiling(막비등), Liquid-Liquid System(액체-액체 계), Minimum Film Boiling Point(최소막비등지점), Film Boiling Heat Flux(막비등열유속), Contact Angle(접촉각), Interfacial Agitation(계면교양), Wall Superheat(벽 과열)

Abstract

Film boiling heat transfer characteristics in liquid-liquid systems are studied experimentally. Liquid gallium as a heating liquid, n-pentane, freon-113, and ethanol are used as boiling liquids. In gallium-n-pentane and gallium-freon-113 systems the minimum film boiling point occurred at higher temperature than those observed in copper-boiling liquid systems. However MFB point occurred almost at the same temperature for the case of ethanol. This difference are due to the effects of contact angle and interfacial agitations in gallium-boiling liquid systems. Film boiling heat transfer rate, for the gallium-boiling liquid systems considered in this work, found to be approximately 10% higher than those in copper-boiling liquid systems, whose main cause is believed to be gallium-boiling liquid interfacial agitations affected by the density ratio between gallium and boiling liquid.

———— 기 호 설 명 ————	
A : 열전달면적	σ : 표면장력
c : 정압비열	Δx : 간격
g : 중력가속도	하첨자
h : 열전달계수	c : 상부구리블럭
k : 열전도계수	$c1$: 상부구리블럭의 상단
L : 중발점열	$c2$: 상부구리블럭의 중심점
m : 질량	f : 증기막
q'' : 열유속	g : 갈리움
T : 온도	I : 계면
μ : 점성계수	old : 앞 단계
λ : 파장	1 : 액체
ρ : 밀도	min : 최소막비등지점
	sat : 포화상태
	v : 증기

*정회원, 홍익대학교 공과대학 기계공학과

w : 가열면

1. 서 론

온도가 다른 이중액체의 접촉과정에 대한 열전달 특성의 해석은 물-기름 계와 같은 이중액체의 분리 작업, 열교환률을 향상시키기 위한 직접접촉 액체-액체 열교환기, 그리고 용융금속의 냉각과정등에 관련하여 중요한 연구대상이 되어 왔다. 또한 액체 소디움 냉각증식소에 있어서 증기폭발의 발생 가능성 및 그 기구의 타당성을 평가하는 데 있어 직접 접촉 액체-액체 계의 막비등열전달 특성에 대한 이해는 필수적이라 할 수 있다. 용융상태의 금속이 저비등점의 액체내에 주입되어 증기폭발과정을 겪기 위해서는 초기 자신의 내부에너지를 보유한 체기동과정이 유도되어야 하며 만약 액체내 주입과 동시에 핵비등과정을 겪을 경우 내부에너지를 급속한 방출로 용융상태의 금속은 응고되어버릴 것이다. 따라서 초기용융금속의 온도가 적어도 최소막비등온도 이상일 때 증기폭발은 일단 발생가능할 것이다.

액체-액체 계의 열전달특성에 대한 많은 연구가 수행되었으나 막비등영역을 포함하는 넓은 온도범위에 대한 이해는 아직 부족하다. 고체-액체 계의 전열특성에 대한 이해도에 비해 액체-액체 계의 전열특성에 대한 이해가 상대적으로 부족한 이유는 실험의 경우 전열과정 중 액체-액체 계면의 요동이 심하여 기하학적 조건의 관찰이 불가능할 뿐만 아니라 가열액체 (heating liquid)를 폭 넓은 온도 범위에서 과열시키는 것이 용이하지 않기 때문이다. 이러한 이유로 액체-액체 계의 성층형 접촉 (stratified contact)시의 비등열전달 특성에 대한 연구가 일부 시도되었으나 만족할 만한 결과를 낳지 못했다⁽¹⁾.

액체-액체 계면의 요동을 줄이고 기하학적 조건을 단순화시킬 수 있는 방법으로 단일 액적 (liquid droplet)의 이중액체와의 직접접촉 전열과정에 대한 실험적 연구가 수행되었다⁽²⁾. 그 이외에 휘발성 액체의 과열한계 (superheat limit)의 실험에서 저비등점의 액적이 고비등점의 액체체적내에 주입되었으며⁽³⁾ 증기폭발에 관한 실험의 경우 용융상태의 고온 금속이 액적의 형태로 냉각수내에 주입되었다⁽⁴⁾. 그러나 이러한 실험에서 전열특성 즉 가열액체의 과열도나 가열액체의 온도의 함수로써 열전달을

을 해석한다는 것은 매우 어렵다고 하겠다.

본 연구에서는 실험적 해석을 통하여 액체-액체 계의 직접접촉 막비등열전달 특성을 최소막비등지점과 막비등열유속의 측면에서 해석하고자 한다. 이는 직접접촉 비등에 대한 효율적인 열전달의 온도영역이나 주어진 액체-액체 계의 조합에 대한 증기폭발의 발생가능성의 예측에 활용될 수 있을 것이다.

2. 막비등 열전달에 대한 연구

고체-액체 계의 비등열전달 특성의 해석은 지난 30여년간 꾸준히 계속되어 왔다. 천이 비등영역이 끝나는 최소막비등지점에서의 열유속은 Berenson⁽⁶⁾에 의해

$$q_{min}'' = 0.09 \rho_{vf} L \left[\frac{\sigma g (\rho_1 - \rho_v)}{(\rho_1 + \rho_v)} \right]^{1/4} \quad (1)$$

로 실험적으로 해석되었다. 가열수평면의 막비등열전달과정에 대한 이론적 해석은 Berenson⁽⁶⁾이 Taylor 불안정성 현상을 이용하여 최소 막비등지점에서의 열전달계수를

$$h_{min} = 0.425 \left[\frac{k_{vf}^3 \rho_{vf}}{\mu_{vf} \Delta T \left(\frac{\sigma}{g(\rho_1 - \rho_v)} \right)^{1/2}} \right]^{1/4} \quad (2)$$

로 유도하였다. 그러므로 등온으로 가정된 가열면의 최소막비등온도는

$$T_{min} = T_{sat} + \Delta T_{min} \quad (3)$$

$$\Delta T_{min} = 0.127 \frac{\rho_{vf} L}{k_{vf}} \left[\frac{g(\rho_1 - \rho_v)}{(\rho_1 + \rho_v)} \right]^{2/3} \left[\frac{\sigma}{g(\rho_1 - \rho_v)} \right]^{1/2} \left[\frac{\mu_{vf}}{g(\rho_1 - \rho_v)} \right]^{1/3} \quad (4)$$

로 주어진다. 그러나 식 (4)는 가열면의 열, 물리적 성질의 영향을 포함하고 있지 않으므로 최소막비등온도가 가열면의 재료적인 성질에 영향을 받는다는 실험적 관찰을 충분히 설명하지 못하고 있다.

고온표면의 비정상 적심 (transient wetting)이 막비등영역에서도 발생한다는 실험적 관찰에 근거하여 Henry⁽⁷⁾는 등온표면에 대한 Berenson의 최소막비등온도를 사용하여 최소 벽체적온도, $T_{w, min}$ 를

$$\frac{T_{w, min} - (T_{min})}{(T_{min} - T_i)} = 0.42 \left[\left(\frac{k_1 \rho_1 c_1}{k_w \rho_w c_w} \right)^{1/2} \frac{L}{c_w (\Delta T_{min})} \right]^{0.6} \quad (5)$$

의 실험적 관계식으로 정립하였다. 이는 막비등이

유지될 수 있는 가열면의 체적온도가 비등액체의 체적온도와 포화온도 그리고 가열면의 열적 성질에 의하여 결정된다는 것을 나타내고 있다.

막비등영역에서 가열면으로부터 복사전열의 영향이 그다지 크지 않을 때 포화막비등 열전달계수로 식(2)가 폭넓게 사용될 수 있다는 것이 실험적으로 증명되었다⁽⁸⁾.

Fauske⁽⁹⁾는 액체-액체 계에 있어서 세가지 형태의 열전달영역이 존재한다고 제안했다.

- (1) 직접접촉 액체-액체 대류열전달
- (2) 자연핵생성 열전달(Spontaneous nucleation heat transfer)
- (3) 막비등 열전달

이들 열전달영역은 비등액체(boiling liquid)와 가열액체의 양에 따라 어느 한구역만이 존재할 수도 있고 3 구역이 동시에 존재할 수도 있다. 고체-액체 계에서 관찰된 핵비등은 고체표면위에 공동으로부터의 핵생성에 의하여 설명되는데 반하여, 계면이 충분히 순수한 액체-액체 계에서는 이질핵생성(heterogenous nucleation)지역의 부재로 핵비등영역이 존재하지 않는다. 가열액체의 온도가 비등액체의 비등점보다 현저히 높더라도 경계면에 가스나 이물질이 존재하지 않으면 액체-액체 계는 경계면에서의 비등액체의 온도가 자연핵생성온도에 도달할 때까지 직접접촉에 의한 대류열전달을 수행한다.

자연핵생성에 의해 액체-액체 경계면에 기체막이 형성되면 비등액체의 온도가 자연핵생성온도보다 낮아져도 안정된 막비등 열전달영역은 유지된다. 고체-액체 계의 경우와 같이 액체-액체 막비등열전달의 경우에도 가열액체와 비등액체의 주기적인 접촉이 발생하며 이는 가열액체 표면에서 파문의 성장을 야기하기도 한다.

고온 수온표면에서의 막비등의 경우 최소막비등

온도는 가열액체와 비등액체의 조합에 따라 고체-액체 계에 비해 높을 수도 혹은 낮을 수도 있는 것으로 제시되었다⁽¹⁰⁾.

3. 실험장치 및 방법

3.1 액체-액체 계

액체-액체 계의 비등열전달에 대한 실험적 연구를 위하여 상변화 없이 높은 온도까지 현열을 보유할 수 있는 가열액체와 상변화과정을 겪는 비등액체의 선정이 먼저 이루어져야 한다. 가열액체에 대한 요구조건으로 융점은 낮고 비등점이 높으며, 밀도가 크고, 비등액체와의 열전달과정 중 침식이나 부식이 발생하지 않아야 하는 것등을 들 수 있다. 또한 비등액체와의 혼합없이 엄격히 분리될 수 있어야 하며 실험시의 안전성이 보장되어야 한다. 이 모든 조건을 고려하여 액체금속인 갈리움(Gallium, 융점 302.9K, 비등점 2676K)을 가열액체로 선정하였으며 비등액체로는 비등점, 밀도, 그리고 증발잠열등을 고려하여 펜탄, 프레온113, 에타놀을 선택하였다. Table 1에 비등액체들의 기본적인 상태량과 최고성장파장(the fastest growing wavelength)이 주어져 있다.

3.2 실험 장치

액체-액체 계의 비등열전달을 관찰하기 위하여 Fig. 1과 같이 제작된 실험장치는 가열부, 지지부, 시험부 그리고 응축부로 구성된다. 가열부는 갈리움이 놓이는 윗가열부와 카트리지지 봉가열기(cartridge rod heaters)가 설치되는 아래가열부로 구성되며 윗가열부는 중형태의 구리축으로 아래가열부와 볼트에 의해 체결되어 있다. 갈리움과 비등액체가 내재하는 파이렉스유리관은 윗가열부의 표면에 놓여지고 지지판에 의해 고정된다. 윗가열부와 같

Table 1 Properties of boiling liquids

Properties Boiling Liquid	Boiling temperature at 1 atm (K)	Liquid density (kg/m ³)	Latent heat (kJ/kg)	Fastest growing wavelength (mm)
N-Pentane	309.0	606.0	355.5	16.8
Freon-113	320.7	1507.0	143.9	11.2
Ethanol	351.5	737.0	841.5	18.9

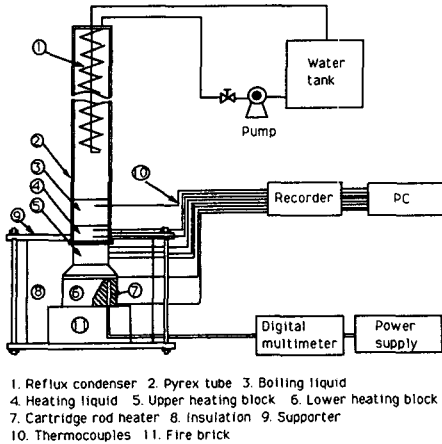


Fig. 1 A schematic diagram of the experimental apparatus

리움의 접촉표면에는 갈리움의 구리에 대한 침식을 방지하기 위하여 두께가 20 μ m인 테프론판을 부착하였다.

길이 15cm의 파이렉스유리관의 내경 (62mm)은 가열면 표면이 무한평판을 대표할 수 있고 모서리 효과를 상쇄할 수 있는 크기로 각 비등액체에 대해 적어도 최고성장파장의 3배 이상으로 선택되었다⁽¹¹⁾.

아래가열부에 설치된 10개의 카트릿지 봉가열기 (직경 5", 길이 2.25")의 허용 최고온도는 350°C, 열밀도는 29W/cm²로서 그 최대출력은 총 5kW이다. 전력공급장치에서 전압을 조절함으로써 가열기에 공급되는 열량을 조절하고 전류와 가열기의 저항을 측정하여 공급입력을 환산할 수 있다.

파이렉스유리관에 연결하여 설치된 응축부는 역류응축기 (reflux condenser)로 가열액체 표면에서 상변화한 비등액체의 증기는 응축기의 냉각수 유동관 외부를 지나 상승하는 중에 응축되어 다시 비등부로 되돌아가게 된다. 응축부는 서로 연결할 수 있는 단위형으로 제작되어 필요시 냉각수 순환량을 조절한다든가 혹은 여러개의 응축기를 연이어 연결하여 전열면적을 증가시킴으로써 증기의 완전응축을 유도할 수 있게 하였다. 응축부의 최상부는 내부가압화를 막기위하여 내부가압시 쉽게 개방될 수 있는 구조로 제작하였다.

윗가열부에는 Fig. 2와 같이 총 5개의 피부열전대(chromel-alumel type)를 설치하였다. 이들 중 가열부를 통한 공급열유속의 계산 및 가열액체가 위치하는 윗가열부표면의 온도를 검출하기 위해 윗

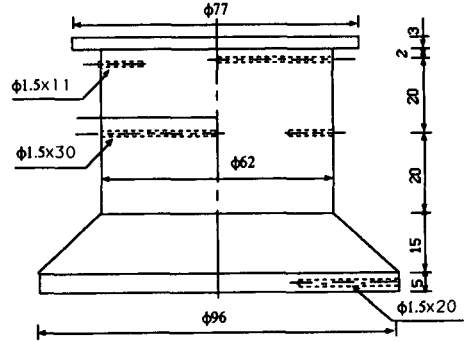


Fig. 2 Location of thermocouples in the upper heating block

가열부 축중심선상에 등간격으로 2개의 열전대가 위치하며, 공급 열유속을 재검사하고 반경방향으로의 온도변화를 측정하기 위하여 윗가열부 측면으로부터 11mm 깊이에 2개의 열전대를 설치하였다. 갈리움의 온도를 측정하기 위해 깊이 10mm의 갈리움층에 비등액체와의 접촉표면으로부터 2mm, 6mm인 지점에 두개의 열전대를 설치하였다. 가열부의 과열을 방지하고 정상상태의 도달을 확인하기 위해 윗가열부의 저면과 아래가열부의 저면에 각 1개씩의 열전대를 설치하였다.

윗가열부 및 가열유체의 열전대로부터 전달되는 신호는 온도기록기를 거쳐 마이크로 컴퓨터에 전달, 처리된다.

실험은 대기압하에서 행해지며 갈리움과 비등액체와의 표면에서 형성되는 슬래к 혹은 부식물을 제거하기 위한 노력이 매 실험마다 선행되어야 한다.

용융상태로 적절히 가열된 갈리움 위에 포화온도의 비등액체를 200cc 주입한 후 공급 열량을 서서히 증가시켜 막비등 현상을 육안으로 관찰할 수 있을 때까지 임계열유속을 증가할 정도의 가열입력이 가해진다. 막비등영역으로의 진입은 가열액체인 갈리움온도의 급격한 증가나 비등특성의 천이현상으로부터 쉽게 알 수 있다. 다시 열유속을 감소시켜 막비등영역에서 시스템이 허용하는 온도범위내에 정상상태를 유도한다. 가열기의 과열 및 파손을 방지하기 위해 대부분의 경우 윗가열부 표면온도는 최고 250°C까지 가열하였다. 주어진 가열입력에 대해 각 부의 온도가 더 이상 변화하지 않는 정상상태에 도달하면 가열 입력을 중지한 뒤 모든 가열부의 내부에너지가 비등액체의 상변화과정에 전달되는 냉각 과정을 유도한다. 구리가열부의 열용량이

상대적으로 크므로 이 냉각과정에는 1시간 20여분이 소요되어 과도기적 영향이 그다지 크지 않음을 볼 수 있다. 막비등냉각과정 동안 갈리움 및 가열부의 온도를 매 2초마다 측정하였으며 특히 최소막비등온도 부근에서는 급격한 온도변화를 고려하여 지연시간을 조절함으로써 매 0.2초마다 측정하였다.

3.3 열유속 계산

열유속 대 갈리움표면온도의 비등선도는 갈리움의 냉각과정 동안 수집된 온도 대 시간의 측정치를 1차원 열전도방정식에 대입하여 수치적으로 구하였다. 막비등영역에서 윗가열부와 갈리움의 접촉표면으로부터 5mm깊이에서 측정된 축중심과 가열부측면으로부터 깊이 11mm인 지점의 반경방향 온도차는 본실험의 최대허용온도에서 약 0.5°C를 보여주고 있으며 이는 축방향의 온도구배의 10%내이다. 반경방향의 온도구배를 고려하여 일차원 열전도식에 대입된 온도는 윗가열부 표면으로부터 같은 깊이의 축중심과 표면가까이에 설치된 두 열전대의 평균온도들이다. 우선 윗가열부 상단을 통과하는 열유속은 다음 식으로 구해지며

$$q_1'' = k \frac{T_{c2} - T_{c1}}{\Delta x} - \frac{(mc)_c}{A} \frac{T_{c1} - T_{c1,old}}{\Delta t} \quad (6)$$

여기서 T_{c1} 및 T_{c2} 는 윗가열부 상단 표면으로부터 5mm와 25mm깊이에 위치한 열전대들의 평균온도이며 $(mc)_c$ 은 윗가열부 상부 10mm의 구리체적의 열용량이다. Δx 는 열전대 사이의 축방향간격이며 A 는 열전달 단면적이다. 따라서 갈리움을 거쳐 비등액체로 전달되는 열유속은

$$q_2'' = q_1'' - \frac{(mc)_g}{A} \frac{T_g - T_{g,old}}{\Delta t} \quad (7)$$

로 계산된다. 여기서 $(mc)_g$ 는 갈리움의 열용량, T_g 는 갈리움의 평균온도이다. 갈리움의 비등액체와의 접촉계면온도는 계면으로부터 2mm와 6mm아래에 위치한 열전대와 갈리움과 윗가열부 구리블럭의 접촉면온도로부터 환산된다. 실험에서 밝혀진 평균열손실율은 가열입력의 약 8%정도에 달하는 것으로 밝혀졌다. 본 계산에서는 집중매개변수해석(lumped parameter analysis)를 사용하여 윗가열부표면으로부터 두께 10mm의 구리체적을 평균온도 T_{c1} 의 등온체적으로 고려하였다. 엄격한 의미에서 이러한 열유속 계산방법은 정미분치(true

differentials)에 대해서만 정확하다고 할 수 있다. 그러나 본 실험장치에 대한 집중매개변수 방법의 도입은 가열부의 크기와 재료의 높은 열전도성의 측면에서 볼 때 합리적인 결과를 줄 수 있을 것이다⁽¹²⁾.

4. 결과 및 고찰

가열부의 냉각과정 동안 갈리움-프레온113계의 경우 계면으로부터 2mm 깊이에 위치한 열전대에서 측정된 갈리움의 온도와 구리-프레온113계의 경우 윗가열부와 비등액체의 접촉표면으로부터 5mm깊이에서 측정된 온도가 함께 Fig. 3에 주어져 있다. 비등액체의 안정된 막비등 영역에서 냉각되기 시작한 갈리움의 온도는 냉각과정과 더불어 그 구배가 서서히 감소하는 경향을 나타내고 있다. 그러나 이는 최소막비등온도에 이르러 급격히 감소하여 비등액체는 천이비등영역을 거쳐 핵비등영역에

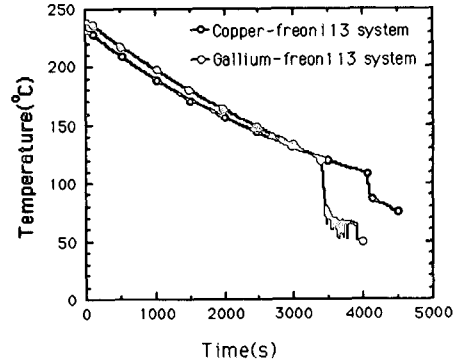


Fig. 3 Temperature trace of heating material for a transient cooling run of freon113

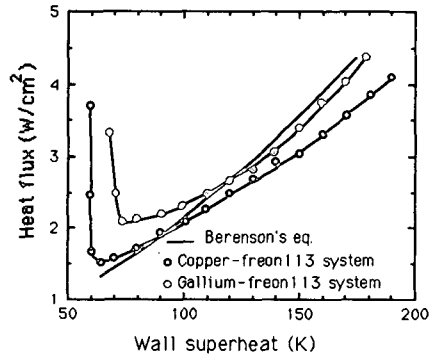


Fig. 4 Film boiling characteristics of freon113

도달하게 된다. 핵비등과정 중 기포의 왕성한 생성 및 이탈에 의한 갈리움의 요동으로 측정된 온도는 심한 변동을 보여주고 있다. 순수한 액체-액체계의 경우 핵비등과정은 불가능하나 본 실험의 경우 갈리움 표면에 존재하는 미세 스택을 기점으로 핵비등이 발달하였다.

이에 비해 구리-프레온113계의 경우 냉각과정중의 온도변화율이 갈리움-프레온113 계에 비해 적고 좀 더 낮은 온도에서 최소막비등지점이 형성됨을 볼 수 있다.

Fig. 4에 프레온113의 비등선도가 주어져 있다. 구리-프레온113계의 경우 비등곡선은 최소막비등온도를 기점으로 열유속이 확연하게 변하나 갈리움-프레온113계의 경우엔 완만한 곡선을 나타내고 있다. 이는 유체역학적 측면에서 정성적으로 해석될 수 있다. 즉 막비등 영역에서 주기적인 기포의 이탈과 비등액체의 유입은 갈리움의 요동을 유도하여 전달 열유속이 증가하며 특히 최소막비등지점 부근에 이르러 프레온113의 높은 밀도를 고려할 때 비등액체와 갈리움과의 직접접촉 횟수의 증가로 비등선도의 구배가 최소막비등온도 부근의 막비등영역에서 완만한 곡선을 나타내는 것으로 고려된다.

4.1 최소막비등지점

Table 2에 최소막비등지점에서의 온도 및 열유속에 대한 비교가 주어져 있다. 본 실험에서 측정된 구리-비등액체 계와 갈리움-비등액체 계에 대한 실험치와 Berenson과 Henry가 예측한 결과가 제시되어 있다. 최소막비등온도는 비등선도에서 가열매체의 과열도에 대한 열유속의 기울기가 영인 최소열유속의 지점으로 이는 냉각선도에서 가열매체 온도의 급격한 감소지점에 해당한다. 갈리움-펜탄,

갈리움-프레온113계의 최소막비등온도는 구리 계에 비해 약 10°C 정도 높은 것을 보여주고 있으나 에타놀의 경우는 거의 같은 값을 나타내고 있다. 고체-액체 계의 경우 최소막비등온도에 영향을 미치는 요소로써 표면거칠기와 접촉각을 들 수 있으며 표면거칠기가 작을수록, 접촉각이 작을수록 최소막비등온도가 증가하는 것으로 알려져 있다⁽¹³⁾. 본 연구에서 고체-액체 계의 비등실험에서 사용된 구리가열면의 최대표면조도는 0.895 μm 이며⁽¹⁴⁾ 액체-액체 계의 경우 가열면인 액체갈리움의 표면조도는 그 표면반사도와 액상임을 고려할 때 이보다 작을 것이다. 또한 접촉각은 구리-비등액체 계와 갈리움-비등액체 계의 경우 공히 가열면상에 비등액적을 올려놓은 뒤 정상상태에서 투상법에 의해 측정하였으며⁽¹⁴⁾ 갈리움-펜탄 계와 갈리움-프레온113계가 구리계의 경우보다 약 5도 높은 것으로 밝혀졌다. 이와는 달리 구리-에타놀 계의 경우 접촉각이 15도 정도인데 비하여 갈리움-에타놀 계는 완전적심(접촉각 0도)을 나타내었다. 이러한 고체-액체 계의 영향에 덧붙여 액체-액체 계의 경우 가열면인 갈리움표면이 비등액체와의 주기적인 접촉으로 요동함으로써 실질적인 증기생성량을 증가시켜 최소막비등온도에 큰 영향을 미치는 것으로 고려된다.

최소막비등열유속은 일반적인 막비등영역에서의 전열특성과 같이 액체-액체 계의 최소막비등온도가 고체-액체 계보다 높은 만큼 큰 값을 보여주고 있다.

Berenson이 제시한 실험적관계식의 T_{min} , q''_{min} 은 에타놀의 경우 오차가 있으나 본실험의 고체-액체 계의 결과를 예측하고 있다. 그러나 액체-액체 계의 경우에 대해서는 적용하기가 어려우며 Henry가 제시한, 가열매체의 열물성치를 고려한 $T_{w,min}$

Table 2 Comparisons of minimum film boiling point between liquid-liquid system and solid-liquid system

systems		Minimum film boiling points				
Boiling liquid	Heating material	T_{min} (K)	q_{min}'' (W/cm ²)	q_{min}'' (W/cm ²) [Eq. (1)]	T_{min} (K) [Eq. (2)]	T_{min} (K) [Eq. (3)]
N-pentane	Copper	367	1.3	1.27	363	386
N-pentane	Gallium	378	1.9			387
Freon-113	Copper	382	1.5	1.33	385	390
Freon-113	Gallium	392	2.1			394
Ethanol	Copper	414	2.0	1.54	425	426
Ethanol	Gallium	415	2.1			430

의 예측치도 실험치보다 큰 값을 제시하는 것으로 재고될 필요가 있다고 하겠다. 물론 Henry의 관계식이 액체-액체 계에 적용되기 위해서는 가열매체의 성질이 고려되어야 할 것이다.

에타놀의 경우 수온표면에서의 막비등열전달과정에 대한 Henry등의 결과는 본 실험의 갈리움의 경우에 비해 높은 온도 (180°C)를 제시하였다⁽¹⁰⁾. 이는 수온표면상의 에타놀 액적에 대한 측정치로 기하학적 조건이 다르고 수온에 대한 적심특성이 불량하여 갈리움의 경우와는 크게 다르기 때문으로 고려된다.

이러한 결과에 비추어 볼 때 액체-액체 계의 최소막비등온도에 영향을 미치는 중요 요소로 비등액체의 가열액체에 대한 적심특성을 들 수 있다. 그러나 이는 고체-액체 계에서 일반적으로 제시된, 즉 접촉각의 증가시 최소막비등온도가 감소하는 특성과 상이한 결과이다.

이 외에 계면의 요동효과가 최소막비등온도에 영향을 미치는 것을 무시할 수 없으나 그 영향은 상대적으로 미미할 것이다. 비등액체의 가열액체에 대한 부력, 즉 밀도비에 의해 결정되는 계면의 요동효과는 갈리움-프레온113계에서 볼 수 있듯이 최소막비등온도 부근에서의 열유속에 큰 영향을 주는 것으로 고려된다. 그러므로 액체-액체 계의 경우 최소막비등지점을 충분히 예측하기 위해서는 가열액체와 비등액체의 밀도비와 비등액체의 가열액체에 대한 적심특성등의 영향이 충분히 고려되어야 할 것이다.

4.2 막비등 전열특성

Fig. 4에 갈리움-프레온113, 구리-프레온113에 대한 비등선도가 주어져 있으며 또한 Berenson이 제시한 막비등열전달계수에 의해 계산된 열유속이 함께 도시되어 있다. 구리-프레온113계에 비해 갈리움-프레온113계의 열유속은 전체적으로 높은 값을 보여주고 있으며 주어진 가열매체의 과열도가 증가함에 따라 그 차이가 커짐을 알 수 있다. 구리-프레온113계의 전열특성에 대한 Berenson의 실험적 관계식은 Duignan등⁽⁹⁾의 주장과는 달리 과열도가 증가할수록 큰 오차를 보여주고 있다.

Fig. 5에 펜탄의 비등선도가 주어져 있다. 구리-펜탄 계와 비교할 때 갈리움-펜탄 계의 열유속 증가 특성은 프레온113의 경우와 거의 유사하다. 그러나 갈리움-프레온113계의 경우와는 달리 최소막

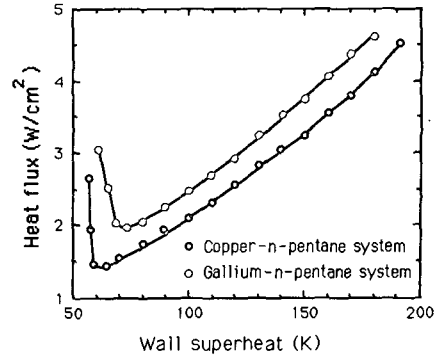


Fig. 5 Film boiling characteristics of n-pentane

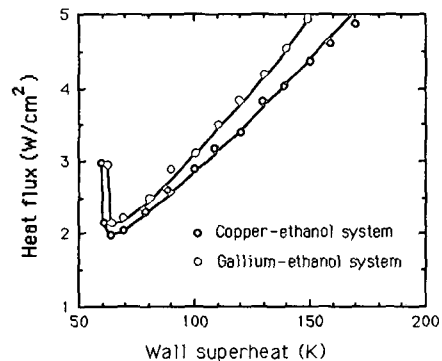


Fig. 6 Film boiling characteristics of ethanol

비등 지점으로부터 열유속이 일관되게 증가하고 있는 것은 펜탄의 낮은 밀도로 계면고양 효과가 작기 때문으로 고려된다.

Fig. 6에 제시된 에타놀의 경우 구리계와 비교하여 갈리움과의 접촉 비등열전달의 특징으로 초기의 핵비등 발달영역에서 갈리움표면상의 이물질이 기점으로 발생한 작은 기포가 표면위를 미끄러지듯 구르면서 성장하는 것이 관찰되었다. 이는 앞에서 제시되었듯이 갈리움에 대한 비등액체의 적심특성이 구리표면에 비해 높은 것을 의미한다. 프레온 113이나 펜탄의 경우에 비해 최소막비등지점 부근에서의 열유속은 구리-에타놀계의 경우와 거의 같으나 가열매체의 과열도가 증가할수록 그 차이가 증가하는 것을 볼 수 있다.

갈리움-에타놀 계의 경우 실험후 갈리움의 부식 분말이 갈리움표면 중앙에 미소 존재하는 것이 관찰되었다. 이는 대부분 초기에 막비등상태를 형성하기 위해 핵비등영역을 통과하는 과정중에 발생한 것으로 이에 대한 보정작업으로 막비등상태 도달후

비등액체인 에타놀을 교환해주는 작업을 수차 수형 하였으나 갈리움-에타놀 표면을 충분히 순수하게 유지하는 것은 불가능하였다. 이러한 계면에서의 불순물의 존재가 표면저칠기가 증가하는 효과를 주어 최소막비등온도 및 열유속에 일부 영향을 줄 수도 있으나 가열면의 크기에 비해 불순물의 양이 상대적으로 작으므로 그 효과는 미미할 것으로 고려된다.

본 실험에서 고려된 액체-액체 계의 경우 주어진 과열도에 대한 막비등열유속은 고체-액체 계에 비해 약 10% 정도 높은 것으로 측정되었으며 이러한 막비등영역에서의 열전달 특성에 큰 영향을 주는 중요 요소로 갈리움-비등액체 사이의 계면요동 효과를 들 수 있다. 최소막비등지점 가까이에서는 점축각의 영향이 크게 나타나지만 과열도가 커질수록 막비등열전달특성은 가열액체와 비등액체의 밀도비, 점도등의 물리적 성질에 의해 결정되는 계면고양효과에 크게 좌우될 것이다.

5. 결론

액체-액체 계의 막비등열전달 특성을 실험적으로 연구하였다. 가열매체로 액체금속인 갈리움이, 비등액체로 펜탄, 프레온113, 그리고 에타놀이 사용되었다.

갈리움-비등액체 계에서 최소막비등온도는 펜탄, 프레온113의 경우 구리 계보다 높은 온도에서 발생하였으나 에타놀의 경우 거의 같은 온도에서 발생하였다. 이러한 특성은 갈리움-비등액체계의 적십 특성과 계면의 요동효과에의 영향으로 고려된다.

막비등열전달율은 본 실험에서 고려된 갈리움-비등액체 계의 경우 갈리움과 비등액체 간의 밀도비에 영향을 받는 계면의 요동효과에 의해 구리-비등액체 계의 경우보다 약 10% 정도 높은 것으로 밝혀졌다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 일반연구지원에 의해 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

(1) Gordon, K.F., Singh, T., Weissman, E.Y., 1961,

"Boiling Heat Transfer between Immiscible Liquids", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 3, pp. 90~93.

(2) Iida, Y., Takashima, T., 1980, "Direct-Contact Heat Transfer Characteristics: Evaporation of a Drop Dropped onto a Hot Liquid Surface", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 23, pp. 1263~1271.

(3) 조성갑, 박호영, 1985, "고속촬영에 의한 과열한계에 달한 액적으로부터 기포의 성장과 붕괴에 관한 연구", 대한기계학회 1985년도 춘계학술대회, pp. 470~474.

(4) Kim, H., 1987, Single Droplet Vapor Explosion Experiment, Ph.D Thesis, Dept. of Nuclear Engr. and Engr. Physics, Univ. of Wisconsin-Madison.

(5) Berenson, P.J., 1960, "Transition Boiling Heat Transfer from a Horizontal Surface", Tech. Rept. 17, Sponsored Res. M.I.T., Cambridge, Massachusetts.

(6) Berenson P.J, 1961, "Film Boiling Heat Transfer from a Horizontal Surface", J. Heat Transfer, Vol. 83, No 3, pp. 351~358.

(7) Henry, R.E., 1974, "A Correlation for the Minimum Film Boiling Temperature", AIChE Symposium Series, Vol.70, pp. 81~90

(8) Duignan, M.R., Greene, G.A., Irvine Jr., 1991, "Film Boiling Heat Transfer to a Large Superheats from a Horizontal Flat Plate", J.Heat Transfer, Vol.113, pp. 266~268.

(9) Fauske, H.K., 1974, "Some Aspects of Liquid-Liquid Heat Transfer and Explosive Boiling", Proc. ANS Conf. on Fast Reactor Safety, Los Angeles.

(10) Henry, R.E., Quinn, D.J., Spleha, E.A., 1974, "An Experimental Study of the Minimum Film Boiling Point for Liq-Liq System", 5th Int. Heat Transfer Conf., Tokyo, pp. 101~104

(11) Klimenko, V.V., 1981, "Film Boiling on a Horizontal Plate-New Correlation", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 24, pp. 69~79.

(12) Lin, D.Y.T., Westwater, J.W., 1982, "Effect of Metal Thermal Properties on Boiling Curves Obtained by the Quenching Method", Proc. 7th Int. Heat Transfer Conf., Munich, Vol.4, pp. 155-160.

(13) Shoji, M., Witte, L.C., Yokoya, S., Ohshima, M., 1990, "Liquid-Solid Contact and Effects of Surface Roughness and Wettability in Film and Transition Boiling on a Horizontal Large Surface", Proc. Ninth Int. Heat Transfer Conf., Vol. 2, Jerusalem, Israel, pp.135~140.

(14) 신광섭, 김병주, 1991, "가열표면 조건이 비등열전달에 미치는 영향", 대한기계학회 '91년도 춘계학술대회 논문집 (Ⅱ), pp.413~416