

비등을 수반하는 발열면에 충돌하는 수분류의 임계열유속에 관한 연구

이종수* · 김희동** · 최국광***
(1998년 9월 9일 접수)

Critical Heat Flux of an Impinging Water Jet on a Heated Surface with Boiling

Jongsu Lee, Heuydong Kim and Kukkwang Choi

Key Words: Critical Heat Flux(임계열유속), Impingement Jet(충돌분류), Weber Number(웨버수)
Degree of Subcooling(과냉각도), Saturated Boiling(포화비등)

Abstract

The purpose of this paper is to investigate a critical heat flux(CHF) during forced convective subcooled and saturated boiling in free water jet system impinged on a rectangular heated surface. The surface is supplied with subcooled or saturated water through a rectangular jet. Experimental parameters studied are a width of heated surface, a height of supplementary water and a degree of subcooling. Incipient boiling point is observed in the temperature of 6~8°C of superheat of test specimen. CHF depends on jet velocity for various boiling-involved coolant system. CHF also is proportional to the nozzle exit velocity to the power of n, where n is 0.55 and 0.8 for subcooled and saturated boiling, respectively. CHF is enhanced with a higher jet velocity, higher degree of subcooling and smaller width of a heated surface.

기호설명

<p>As : 발열면의 면적[m²]</p> <p>As : 발열면의 면적[m²]</p> <p>b : 발열면의 폭[m]</p> <p>B : 노즐출구의 단축 길이[m]</p> <p>h_{fg} : 증발잠열[J/kg]</p> <p>l : 발열면의 길이[m]</p> <p>q̇ : 열유속[W/m²]</p> <p>q̇_c : 임계열유속[W/m²]</p> <p>S : 보조수층의 높이[m]</p> <p>ΔT_{sat} : 발열면과열도[°C]</p> <p>V_o : 노즐출구의 평균속도[m/s]</p>	<p>μ_f, μ_v : 기·액의 절대점성계수[N s / m²]</p> <p>ν : 동점성계수[m²/s]</p> <p>ρ_f, ρ_v : 기·액의 밀도 [kg/m³]</p> <p>ΔT_{sub} : 액체의 과냉각도[°C]</p>
--	--

1. 서론

비등을 수반하는 발열체에 충돌하는 분류에 의한 냉각은 전달되는 열의 대부분이 액체의 기화열에 의하여 효과적으로 흡수되므로 가열면과 액체간의 온도차이가 작더라도 열전달이 잘 이루어 지므로 높은 열전달 효과를 가질 뿐만 아니라, 임계열유속(critical heat flux ; CHF)을 상승시키는 수단으로서 효과적이기 때문에 대형화 고용량화 되고 있는 원자로나 증기보일러, 토카막 핵융합로 그리고 소형화 대용량화 고집적화 되고 있는 전자 칩에 응용되고 있다.^(1~4) 특히 전자 냉각에 대한 임계열유속을 예상하는 문제는 전자부품의 국소 과열로 말미암아 칩이나 시스템 레벨에 야

* 회원, 안동정보대학 기계과
E-mail : meggang@www.ait.ac.kr
TEL : (0571)820-8210 FAX : (0571)822-7709

** 회원, 안동대학교 기계공학과

*** 회원, 인천대학교 기계공학과

기될 수 있는 잠재적인 고장 때문에 매우 중요하다.⁽⁵⁾ 따라서 가장 효과적인 열전달 메커니즘인 핵비등 영역을 확대시키는 방법의 연구 및 응용이 필요하게 되었다. 그러나 비등 열전달에는 열부하의 상한인 임계열유속이 존재하기 때문에 이 상한을 상승시키는 수단의 개발이 요망되고 있는데, 그 유효한 방법이 충돌분류이다.

충돌분류 비등계에서는 주로 핵비등 영역이 실제로 응용되며, 핵비등 영역에서는 공업적 응용에서 과대 열부하에 의한 발열체의 과열로 물리적 소손이나 안전성을 고려하여 제한되는 최대 열유속이 바로 임계열유속이다. 비등을 수반하는 충돌분류계에서의 임계열유속 발생 메커니즘은 수조비등에서의 수력학적 불안정성 모델과 액체 미세충 건조모델과는 달리 발열면 위에서의 액체의 증발과정 뿐만 아니라 기체-액체의 유체역학적 과정이 동시에 지배하는 복잡한 현상이어서 충돌분류계의 유동조건과 열유속 조건에 따라 매우 다양한 메커니즘을 나타내고 있다. 충돌분류에서의 임계열유속 메커니즘으로는 Sharan 등⁽⁶⁾은 증발되는 액체의 운동에너지에 의해 이탈하는 기액의 양이, 발열면 위에 새로이 유입되는 액상 표면의 기계적 에너지를 소비하는 양을 초과할 때 임계열유속이 발생한다고 하였다. 이 표현은 기계적 에너지 안정성 기준에 입각하여 설명하고 있다. 또한 甲藤⁽⁷⁾은 충돌 후 발열면상에 흐르는 액막류와 발열면에서 발생하는 증기류와의 사이에 유체역학적 힘의 균형으로 인하여 발열면 주변에서 액체가 발열면에 접촉할 수 없는 분리 문제를 임계열유속 기구에서 거론하고 있다.

Fig. 1은 유체역학적 불안정에 의하여 발생하는 액막의 건조 모델을 수정하여 충돌분류 비등계에 적용한 것이다.⁽⁴⁾ 이 모델에서 분류 반쪽에서 하류 쪽을 따라서 발열면상에 존재하고 있는 임계열유속 근방의 액막류는 포화온도로 되어 있고, 여기에서 격한 핵비등이 발생하고 있다. 이 격한 핵비등에 의하여 분출된 증기류에 의하여 액막의 대부분이 분리 비산된다. 이때 가열면에서 멀어지는 증기류는 가열면에 가까워지는 액체와 대향류의 관계이다. 이와 같은 메커니즘을 갖는 충돌분류 비등계의 임계열유속은 분류속도가 증가함에 따라 증가하며, 노즐직경이나 분류유량의 영향은 없는 것으로 나타났다. 그러나 비교적 낮은 압력하에서는 분류속도의 증가함에 따라 임

계열유속이 증가하지만, 높은 압력하에서는 분류속도와는 관계가 없다고 하였다.^(7,8) Sharan 등⁽⁶⁾은 가열면의 형상과 평판의 폭 또는 직경, 원통의 반경과 같은 특성크기가 임계열유속에 미치는 영향을 분석하고 예측 상관식을 제시한 바 있다. 여기서 임계열유속 값은 가열면의 크기가 커질수록 작아지고, 일정한 크기 이상에는 그 영향이 소멸됨을 제시하였다. 또한 충돌분류비등계의 임계열유속에 관여하는 물리량을 이용하여 무차원정리식을 도출하는 일련의 연구가 수행되었으며, 甲藤 등⁽⁷⁾은 웨버수, 레이놀즈수, 기-액간의 비중비, 점성비, 중력항 등으로 비등계의 임계열유속의 무차원식에서 강제대류속도, 점성력, 발열면 크기의 항을 제외시킴으로서 수조비등의 임계열유속을 나타낼 수 있는 포괄적인 무차원식을 제시하였다.

본 연구는 임계열유속 조건이 냉각 한계를 결정하므로 임계열유속을 정확히 예측하고, 이를 안정성 측면에서 증진시키기 위한 연구이다. 따라서 상향 장방향의 3차원 수분류가 충돌하는 발열면이 3차원 분류의 어떤 영역에 위치하느냐에 따라서 열전달 특성이 달라진다.⁽²⁾ 그러므로 본 연구에서는 충돌분류에 의하여 냉각되는 비등 발열면을 노즐폭의 20배 위치인 특성감쇄 영역에 위치하였다. 발열면의 온도는 냉각수의 포화온도로부터 임계열유속 온도까지 정상가열범으로 점진적으로 증가시켰다. 임계열유속에 영향을 미치는 제반 인자로서는 과냉각도, 분류속도, 발열면의 형상비 그리고 열전달 촉진이나 억제에 위한 변수로서 보조수층 높이에 대하여 각각 고찰하고, 임계열유속과 관련된 제반 인자의 영향을 차원 해석에 의하여 무차원식을 구하였다. 또한 충돌분류 비등계의 임계열유속과 기타 유동 형상에서의 임계열유속과 비교 해석하였다.

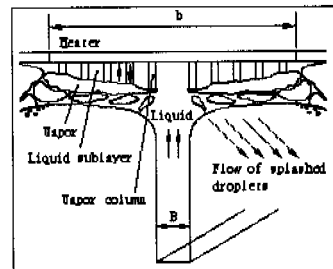


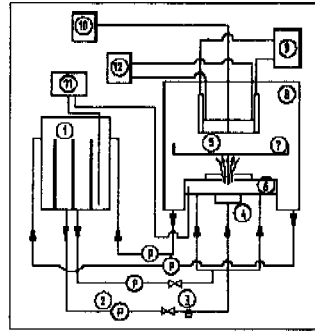
Fig. 1 Jet impingement boiling structure near CHF

2. 실험장치 및 실험방법

비등 발열면에 충돌하는 수분류의 입계열유속에 관한 실험장치는 Fig. 2와 같다. 실험장치에서 가열용 히터(3kW×3)가 내장된 가열수조(φ500×1000) ①에 의하여 냉각수를 일정 온도까지 가열하였다. 고압펌프(SF-3700, 5HP, 1720rpm) ②에서 가압된 냉각수는 장방형 노즐 ④에서 비등이 발생하는 발열면 ⑤에 충돌된다. 이 때 발열면은 장방향의 하향이고, 장방향 분류는 발열면에 충돌할 때 분류의 비산 액적류에 의하여 벽면분류 영역의 교란효과가 있고, 분류액의 회수가 용이한 상향분류로 하였다. 장방형 노즐출구에서 분류속도는 배관계의 오리피스(Honeywell, No. SS-29-101) ③을 이용하여 조절하였다. 장방형 노즐 ④는 노즐의 입구와 출구의 형상은 장방형 단면이다. 노즐 입구와 출구에서 장변길이(L)는 20mm로 같게 하고, 노즐출구의 단변길이(B)가 3mm로 되도록 축류비를 5로 설계하였다.

보조수를 동반하는 수분류의 경우에는 수조 ⑥의 보조수가 일정한 높이가 되도록 주분류를 분출시키는 상태에서 보조수 공급량을 조절하고, 주분류와 보조수의 온도가 일정한 과냉각도가 유지될 때까지 분류와 발열면 ⑤를 셔터 ⑦에 의하여 차단한 상태에서 순환시켰다. 그 후 셔터를 제거하여 발열면 ⑤에 충돌되는 수분류는 회수조 ⑧에서 다시 가열수조 ①로 순환되도록 순환펌프(200W, 1/4HP, 양정 7m) 2대를 설치하였고, 보조수공급은 가열수조로부터 별도의 배관을 통해서 펌프(100W, 1/8HP, 양정 7m)를 사용하여 주분류에 의하여 동반 유출된 유량만큼 밸브를 조정하여 공급할 수 있게 하였다.

가열수조 ①의 과냉각수의 온도와 노즐입구에서 온도는 가열수조와 노즐입구에 각각 설치한 T-형 열전대(φ70μm)를 사용하여 전자식 온도계 ⑩에서 측정하였다. 이때 가열수조와 노즐입구에서 분류의 온도차는 ±1℃임을 확인하였다. 발열면 ⑤를 등열유속 조건으로 가열시키는 방법은 정류기 ⑨에 연결된 구리전극을 통하여 직류전원을 공급하고, 이 구리전극의 양단에 체결된 발열면이 직접 통전 가열된다. 발열면은 비등실험에서 열전달이 가장 크게 나타나는 발열면의 도심의 이면에 K-형 열전대(φ50μm)를 용착하였으며, 발열



①Heating water tank ②High pressure pump ③ Orifice ④Rectangular nozzle ⑤Heated specimen ⑥ Water chamber ⑦Shutter ⑧Recovery water tank ⑨ Rectifier ⑩Multicorder ⑪Thermometer ⑫Voltmeter
Fig. 2 Apparatus diagram for CHF experiment

면의 도심과 양단 사이에서는 약 3℃ 미만의 온도차가 나타났다. 이 발열면 이면의 온도는 멀티 레코더 ⑩에서 기록하였으며, 발열면에 부가되는 부하전력은 시편 이면의 양단에 연결된 전위차계 ⑫에 의하여 측정하였다. 발열면의 위치는 노즐의 단변길이(B)의 20배 위치인 60mm 간격으로 일정하게 하였다. 이 위치는 삼차원 장방형 분류 구조에서 분류중심선상의 속도가 2차원분류의 경우와 거의 동일한 비율로 분류중심선 방향 간격이 증가함에 따라 감소하는 특성감쇄 영역(characteristic decay region)에 위치하였다.

실험 변수로는 분류의 과냉각도 (ΔT_{sub}), 분류속도 (V_o), 무차원 보조수층 높이(S/B), 발열면의 형상비(b/l)의 4개를 변수로 하였다. 분류의 과냉각도는 대기압에서 과냉각도가 17℃미만이면 포화비등과 유사한 비등기구⁽⁹⁾를 갖기 때문에 20℃, 30℃, 40℃로 하였다. 과냉각도가 0℃인 포화비등 입계열유속 실험에서는 보조수를 사용하지 않은 단일충돌수분류로 하였다. 장방형 노즐 출구에서의 분류속도 범위는 3.0~6.9m/s로 하고, 각각의 과냉각도와 분류속도에 대하여, 보조수조 내의 보조수 높이를 노즐출구의 단변길이(B)로 무차원한 무차원 보조수층 높이(S/B)를 0, 1, 2, 3으로 변화시켰다.

발열면은 종래의 연구에서 널리 이용되었던 원형^(7~9)이 아닌 장방형으로 하였다. 장방형 발열면(두께 φ100μm, SUS304)은 장변길이(l)는 15mm로 하고, 폭(b)를 5, 10, 15, 20, 25mm로 하였다. 발

열면의 가열방법은 열유속을 점진적으로 증가시키되, 강제대류 냉각영역에서부터 핵비등 영역을 거쳐 한계 열유속까지 등열유속조건으로 직접 통전가열하였다. 발열면 이면의 도심에는 K-형 열전대(φ50μm)를 용착한 후, 베이크라이트판(15×70×15)에 접착제를 사용하여 기밀성을 유지하였다. 열유속은 펜기록기(Graphtec Corp, MC6715) ⑩을 이용하여 기록된 발열면의 이면온도 (T_o)와 시편 이면 양단의 직류전압(E)를 측정하고, 발열면의 온도에 따른 시편의 고유저항(R)의 값에 의하여 주열 가열이 이루어지도록 하였다.

분류가 충돌하는 발열면 표면의 온도 (T_w)는 발열면의 표면과 이면에 대류표면과 전도저항에 의하여 상당한 온도 구배가 존재하기 때문에, 측정된 시편 이면의 온도 (T_o)로부터 식 (1)로 계산하였다.

$$T_w = T_o - \frac{\dot{q} t_s}{2\alpha_s} \quad [^\circ\text{C}] \quad (1)$$

여기서 \dot{q} 는 충돌면의 열유속, t_s 는 발열면의 두께, α_s 는 발열면의 열전도도를 나타낸다. 직접 측정변수들을 토대로 임계열유속의 불확실성 해석(Uncertainty analysis)⁽¹⁰⁾은 임계열유속 $\dot{q}_c = f(b, l, R, E)$ 이므로 임계열유속의 불확실성은 다음의 식 (2)로 계산하였다.

$$\frac{\delta \dot{q}_c}{\dot{q}_c} = \frac{\delta \dot{q}_c}{\dot{q}_c} = \sqrt{\left(\frac{\partial \dot{q}_c}{\partial E} \delta E\right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{q}_c}{\partial b} \delta b\right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{q}_c}{\partial l} \delta l\right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{q}_c}{\partial R} \delta R\right)^2} \quad (2)$$

식 (2)로부터 임계열유속 영역에서의 불확실성 $\delta \dot{q}_c / \dot{q}_c = 4.1 \sim 7.1\%$ 로 나타났다.

3. 실험결과 및 고찰

발열면의 폭(b)가 10mm인 경우에 과냉각도와 분류속도의 영향을 비등곡선 Fig. 3에 나타내고 있다. 이 비등 곡선의 각 조건에서 정상상태의 열유속을 점진적으로 증가시켰을 때, 동일한 속도에 대하여 발열면 과열도는 증가한다.

이때 비등곡선은 3개의 영역, 즉 강제대류 냉각 영역, 핵비등 영역, 임계열유속점으로 구분된다. 강제대류 냉각영역은 선도상에서 곡선의 구

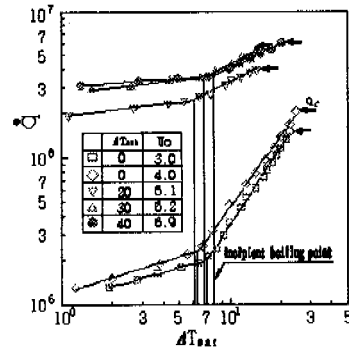


Fig. 3 Boiling curve of the impinging water jet for velocity and the degree of subcooling

배가 완전한 저과열도 영역이며, 발열면상에서 냉각액은 기포가 발생되지 않고 액막을 형성하면서 발열면상을 유동한다. 핵비등 영역은 비등곡선의 구배가 급한 고과열도 영역이며, 이 핵비등 영역에서는 고열유속에 의하여 발열면에서 액적이 발생되어 비산된다. 그리고 각 조건에서 최고 열유속을 나타내는 임계열유속점은 핵비등 영역에서 고열유속이 되면 발열면이 적열되어 소손되는데, 이 때의 열유속을 임계열유속이라고 하며 이 점은 그림의 각 조건에서 마지막 점의 기호 (◀)가 이에 해당한다

그리고 강제대류 냉각영역으로부터 핵비등으로의 천이를 나타내는 시점을 비등개시점이라고 하며, 이 시작점은 초기비등 곡선과 핵비등 곡선과의 교점이 된다. 이 그림에서 포화액의 분류속도가 3.0m/s인 경우 비등개시점의 과열도는 7.0°C로 나타났으며, 본 실험범위에서는 발열면 과열도 (ΔT_{sat})가 6~8°C 범위에 비등개시점이 존재하는데, 相原,⁽³⁾ Akhanda⁽¹¹⁾ 등의 연구결과에서 나타난 범위와 일치하고 있다.

자유 충돌 수분류계의 핵비등 영역의 비등곡선은 각각의 경우 동일한 발열면 과열도에서 분류속도가 증가하면 열유속 (\dot{q})도 증가하고 있어서, 분류속도의 영향을 나타내고 있다. 이는 相原,⁽³⁾ 鳥飼⁽¹²⁾의 연구결과와 같이 정성적으로 유사한 경향을 나타내고 있다. 그러나 충돌분류계^(5,13,14)에서의 핵비등 열전달 특성은 유속, 과냉각도, 유량, 가열면의 크기 등이 핵비등 곡선에 영향을 미치지 않고 있으며, 한 개의 핵비등 곡선으로 나타난다고 하는 결과와는 정성적으로 다른 특이성을

나타내고 있다. 이러한 분류속도의 영향은 발열면의 크기라는 관점에서 볼 때, 門出 등⁽¹⁵⁾은 발열면 직경(D)/노즐직경(d)의 값이 10 이상의 발열면상에서 분류속도가 핵비등 곡선에 영향을 끼치지 않는 결과를 보고하였다. 그러나 본 실험에서 발열면폭(b)는 노즐폭(B)의 1.6~8.3배, 발열면 길이 (l)은 노즐길이(L)의 0.75배로서, 발열면을 노즐의 출구단면과 비교해 볼 때, 발열면 길이는 노즐출구 길이보다 작다. 또한 발열면의 폭은 형상비에 따라 노즐폭의 1.6~8.3이므로, 이 때 발열면 폭에 대한 노즐폭의 비인 b/B의 값이 10 이하의 값을 나타내고 있다. 그러므로 이 결과와 비교할 때 상대적으로 발열면은 충돌영역에 노출되는 면적이 크다. 또한 본 실험은 Table 1에 나타난 바와 같이 노즐출구 면적이 비교적 크기 때문에, 유량은 수십 배에 이르므로 많은 유량이 발열면에 충돌하여 상대적으로 높은 열량을 흡수하게 된다.

Fig. 4는 과냉각도가 0℃인 포화충돌수분류에서 발열면의 형상비의 영향에 대한 선도이다. 분류속도가 증가하면 액체와 발열면 사이에 기포가 존재하는 시간이 짧아져 냉각효과가 상승하기 때문에 임계열유속이 증대한다. 그리고 동일한 분류속도에서 발열면의 폭 b가 5,10,15mm인 경우에는 발열면의 폭이 작을수록 임계열유속이 증가됨을 알 수 있다. 이 현상은 본 연구자의 기존 연구⁽²⁾에 의하면 장방형분류의 충돌영역이 노즐의 짧은변 방향으로 노즐폭(B)의 2.6배이므로, 발열면의 폭이 작을수록 충돌영역내에 근접하기 때문인 것으로 생각된다. 그러나 발열면의 폭이 25mm인 경우가 20mm인 경우보다 높은 임계열유속을 나타내고 있다. 이는 가열면이 길이 방향으

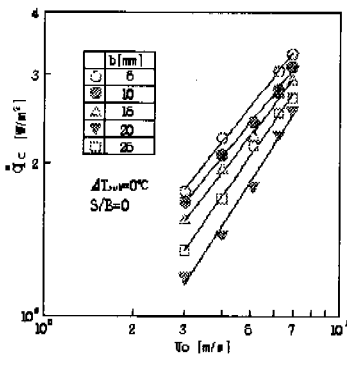


Fig. 4 Effect of specimen width on CHF for saturated boiling

로는 분류의 충돌영역에 완전히 포함되지만, 가열면 폭방향으로는 가열면의 폭이 5~10mm의 경우는 충돌영역 범위내이고, 15mm 이상의 가열면은 경계층 유동 및 천이영역에 있게 된다. 따라서 충돌영역범위 밖의 벽면분류 영역에 있는 시편의 폭 20, 25의 경우에는 특이현상이 나타나고 있다. 이때 포화비등에서의 임계열유속 (\dot{q}_c)와 분류속도 (V_0)의 관계는 식 (3)과 같다.

$$\dot{q}_c = C V_0^{0.79} \quad (3)$$

Fig. 5는 포화비등의 단일수분류(S/B=0)의 경우에 대하여, Fig. 6은 보조수를 동반한 수분류로서 동일한 보조수층 높이에 대하여 과냉각도가 임계열유속에 미치는 영향을 선도화한 것이다. 이들 선도에서 임계열유속은 동일한 과냉각도에서 분류속도가 증가하면 증가하는 경향을 가지며, 동일한 분류속도에서도 과냉각도가 증가하면 임계열유속도 증가하고 있다. 이와같은 경향은 Vliet 등⁽⁹⁾의 결과와 정성적으로 일치하고 있다. 과냉각비등에서는 임계열유속과 분류속도의 관계를 식 (4)와 같이 표시할 수 있다.

$$\dot{q}_c = C V_0^n, \quad (3.0 \leq V_0 [\text{m/s}] \leq 6.9) \quad (4)$$

여기서 포화비등에서는 지수 n의 값이 0.79, 과냉각 비등에서 지수 n의 범위는 0.51~0.59의 값이며 평균지수는 0.55로 나타났다. 식 (3)과

Table 1 Comparison of flow rate

	Exit Area of Nozzle	Flow rate
	($\times 10^{-6}$)[m ²]	($\times 10^{-6}$)[m ³ /s]
	60.00	180~414
甲藤(Ref.16)	11.55	17~173
Ruch(Ref.13)	0.13	0.2~0.89
門出(Ref.8)	3.14	15~188.4
鳥飼(Ref.12)	80.00	40~160

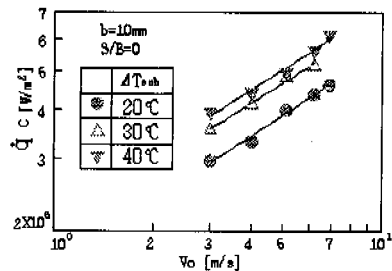


Fig. 5 Effect of degree of subcooling on CHF for

S/B=0

(4)에서 볼 때 포화비등과 과냉각 비등계에서, 각각 임계열유속의 분류속도에 대한 영향은 다소 차이가 나타나고 있다.

Fig. 7은 과냉각도가 30℃인 경우에 보조수층의 영향을 나타낸다. 단일수분류에 비하여 보조수를 사용한 경우가 임계열유속이 낮으며, 보조수 사용의 경우 S/B=2인 경우가 비교적 높은 임계열유속을 나타내고 있다. Fig. 8은 임계열유속의 분류속도 의존성을 각 유동구조에 대하여 비교 검토하였다. 이 비교 그림에서 유동구조는 관내유동 비등계, 자유공간내의 충돌분류 그리고 충돌분류와 벽분류의 두 가지 유동구조를 동시에 갖는 제한 공간계 충돌분류비등계에 대하여 비교하였다.

이들 유동계에서는 모두 유동속도의 증가가 임계열유속 (\dot{q}_c)의 증가를 나타내고 있다. 이 그림에서 (a)는 평면분류, ⁽¹⁴⁾ (b)는 루버 디플렉터를 갖는 평면분류 유동형태⁽¹⁷⁾를 나타내고, (c)는 수직 사각형 채널유동 형태⁽¹⁾를 (d), (e), (f)는 충돌분류의 유동형태를 나타내고 있다. 특히 (e)는 제한 공간을 갖는 유동형태를 (f)는 보조수를 동반한 상향충돌분류계인 본 실험의 경우를 나타낸다. 평면분류의 경우인 (a)의 속도지수는 0.33이고, (b)는 흡입공기 풍량을 조절하고 유도하기 위한

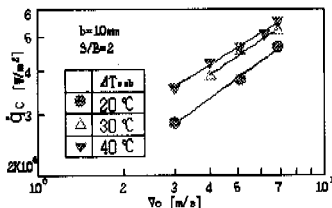


Fig. 6 Effect of degree of subcooling on CHF for S/B=2

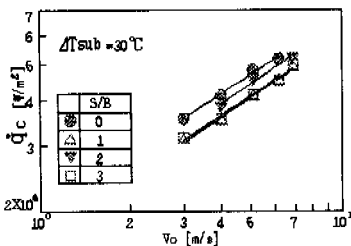


Fig. 7 Effect of the height supplementary water on CHF for $\Delta T_{sub}=30^\circ\text{C}$

안내날개를 설치한 경우로서 분류속도지수는 0.68, (c)는 속도지수가 저속영역 ($V_0 < 2\text{m/s}$)에서는 0.3, 고속영역 ($V_0 > 2\text{m/s}$)에서는 0.5이다.

또 (e)의 유동은 충돌분류와 벽분류 그리고 채널유동의 혼합된 유동특성을 갖게되는데, 이 유동형태의 속도지수는 0.70으로서 순수 충돌분류 (d)경우의 속도지수 $n=0.16\sim 0.44$ 보다 큰 지수 값을 나타내고 있다. 따라서 디플렉스나 제한 공간을 사용한 경우가 임계열유속을 증진시키는 것을 알 수 있다. 그리고 보조수를 사용한 본 실험의 경우 평균 속도 지수가 0.55인데, 이 값은 제한 공간이나 디플렉스가 없는 평면분류 (a), (b)나 채널유동인 저속영역의 (c)와, 보조수를 동반하지 않은 충돌수분류(d)와 같은 유동구조보다는 큰 속도지수를 나타내고 있으며, 이러한 현상은 보조수를 사용한 본 실험의 경우 주분류가 보조수 층을 통과하면서 보조수의 유량이 부가되어 발열면에 닿는 보조수동반 분류에서의 평균 속도지수가 높게 나타나고 있다. 또한 제한 공간을 갖는 경우인 (d)보다는 다소 작은 속도 지수값을 나타낼 수 있다.

보조수를 동반하지 않은 충돌수분류(d)와 같은 유동구조보다는 큰 속도지수를 나타내고 있으며, 제한 공간을 갖는 경우인 (d)보다는 다소 작은 속도 지수값을 나타낼 수 있다.

이와 같은 여러 가지 유동형태에서 액막의 유동속도와 임계열유속의 관계는 저속영역에서의

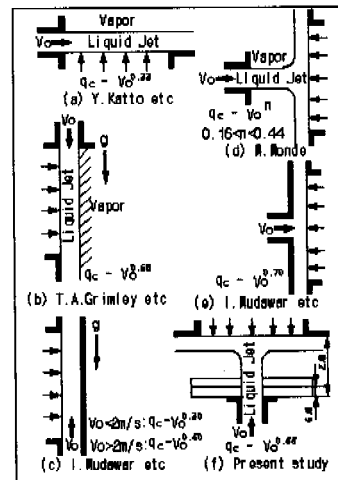


Fig. 8 CHF dependence on velocity for various

research system

임계열유속은 발열면 위에 하나의 증기층이 형성되고, 증기막의 상류영역으로만 액체의 유입이 허용된다. 따라서 증기막으로 인한 발열면의 급속한 온도상승에 의해서 발열면이 건조-적열되어 임계열유속이 일어난다는 것은 전술한 바와 같다. 그러나 속도가 증가하면, 고속영역에서는 발열면에 발생한 증기막이 여러 개로 분할되어 발열면에 형성되고, 분할된 증기층의 하부에서 일어나는 건조-적열 현상이 임계열유속을 발생시킨다.⁽¹⁾ 그런데 임계열유속이 발생하는 위치는 고속영역에서는 발열면의 끝부분에서 적열-과단되며, 저속영역으로 갈수록 이 과단위치는 발열면의 중심쪽으로 이동되는 경향이 있다. 본 실험에서는 발열면의 도심에서 가열면의 끝까지의 길이는 7.5mm이고, 이 길이는 압력측정 실험에서 얻어진 결과에 의하면 노즐장변 방향으로의 충돌반폭⁽²⁾이 12.8mm이라는 측면에서 볼 때, 발열면의 전영역에서 온도구배가 거의 미소하다고 볼 수 있다. 따라서 속도가 증가함에 따라 발열면의 도심과 끝부분과의 사이에 온도차이가 약간씩 증가하고 있고, 임계열유속의 발생 위치는 발열면의 끝부분 쪽 임을 확인하였다.

이와 같은 충돌분류 비등계에서 임계열유속에 영향을 주는 제인자는 분류속도, 분류유량, 발열면의 방향, 실험계의 압력, 발열면의 크기 등이 있다. 또한 임계열유속은 We수에 따라서 $We < 10$ 범위에서 수조비등에서의 임계열유속과 유사한 기구를 갖는 수조비등 임계열유속 영역, $10 < We < 100$ 범위는 대류와 수조의 천이 임계열유속 영역이다. 그리고 $We > 100$ 범위는 강제대류의 영향이 지배적인 강제대류 임계열유속 영역으로 구분 짓고 있으나,⁽¹¹⁾ 본 실험의 경우, 임계열유속의 열전달 특성을 과냉각도 (ΔT_{sub}), 발열면폭(b), 분류속도(V_o), 보조수층 높이(S/B)를 실험변수로 하여 검토하였으며, We수는 2000~11000의 값을 갖는 강제대류 임계열유속계 영역이다.

임계열유속에 대한 무차원 정리식을 구하기 위하여 충돌분류 포화비등계에서 발열면상의 형상비에 관한 임계열유속을 지배하는 물리량으로서는 분류속도(V_o), 가열면의 폭(b)과 길이(l), 임계열유속(\dot{q}_c), 증발잠열(h_{fg}), 표면장력(σ), 기액 양 상태의 밀도(ρ_v, ρ_f), 기액 양 상태의 점

성계수(μ_v, μ_f)이다. 여기서 형상비를 하나의 무차원수로 정하고 l, V_o, ρ_v, h_{fg} 를 기본량으로 하면 6개의 무차원 수가 결정되며, 식 (5)와 같은 음함수로 표기할 수 있다.

$$F \left[\frac{b}{l}, \frac{\dot{q}_c}{\rho_v V_o h_{fg}}, \frac{\sigma}{\rho_v V_o^2 l}, \frac{\rho_v}{\rho_f}, \frac{\mu_v}{\rho_v V_o l}, \frac{\mu_f}{\rho_v V_o l} \right] = 0 \quad (5)$$

식 (5)에서 5항과 6항을 조합하면 μ_f/μ_v 가 되고, 충돌분류 포화비등에서는 ρ_f/ρ_v 및 μ_f/μ_v 가 임계열유속 발열면 과열도에 대하여 거의 미소한 값의 범위를 나타내고 있기 때문에 무시할 수 있으므로 포화충돌분류 비등계의 임계열유속은 다음 관계식으로 정리된다.

$$\left\{ \frac{\dot{q}_c}{\rho_v V_o h_{fg}} \right\} = C \left\{ \frac{\sigma}{\rho_v V_o^2 l} \right\}^m \times \left\{ \frac{b}{l} \right\}^n \quad (6)$$

식 (6)에서 우변 제1항은 역웨버수 (We^{-1})이며, 지수 m을 구하기 위하여 Fig. 9와 같이 좌변의 임계열유속 무차원항 ($\dot{q}_c/\rho_v V_o h_{fg}$)과 역웨버수의 관계를 나타내었다. 이 그림에서와 같이 모든 형상비에 대하여 역웨버수의 지수 $m=0.10$ 로 나타났다.

Fig. 10은 형상비(b/l)의 지수 n을 구하기 위하여 종축에는 $(\dot{q}_c/\rho_v V_o h_{fg})(We^{-1})$, 횡축에는 (b/l)을 취하여 플로팅한 결과 $n = -0.16$ 로 나타났다. 이 그림의 관계식에서 임계열유속 무차원항은 발열면의 폭 b가 20mm인 경우를 제외하면 모든 발열면의 폭의 변화에 대하여 그 무차원 정리식은 다음의 식 (7)과 같이 정리된다.

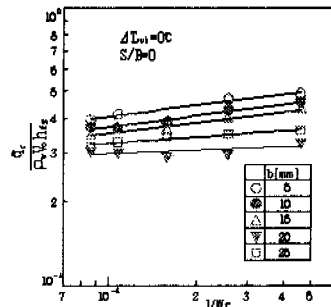


Fig. 9 CHF correlations for specimen width in $\Delta T_{sub}=0^\circ\text{C}$ and $S/B=0$

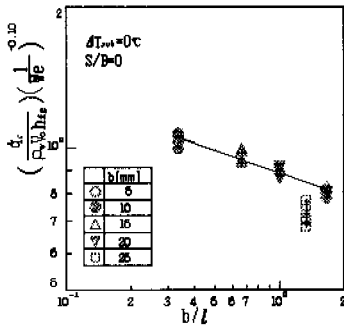


Fig. 10 Dimensionless parameter correlations for specimen width in $\Delta T_{sub}=0^{\circ}C$ and $S/B=0$

$$\frac{\dot{q}_c}{\rho_v V_o h_{fg}} = 0.4192 \left\{ \frac{1}{We} \right\}^{0.1} \left\{ \frac{b}{l} \right\}^{-0.16} \quad (7)$$

그리고 과냉각 비등에서 임계열유속에 대한 무차원 정리를 위하여, 이에 관계하는 인자를 임계열유속 (\dot{q}_c), 분류속도 (V_o), 기·액 양상의 밀도 (ρ_v, ρ_f), 증발잠열 (h_{fg}), 가열면 길이(l), 정압비열 (c_p), 액체의 과냉각도 (ΔT_{sub}), 표면장력(σ)의 9개이다. 여기서 $l, V_o, \rho_v, h_{fg}, \Delta T_{sub}$ 를 반복변수로 하여, 임계열유속의 무차원항에 대하여 양함수로 나타내면 다음과 같다.

$$\left\{ \frac{\dot{q}_c}{\rho_v V_o h_{fg}} \right\} = F \left[\left\{ \frac{\rho_f}{\rho_v} \right\}, \left\{ \frac{1}{We} \right\}, \left\{ \frac{c_p \Delta T_{sub}}{h_{fg}} \right\} \right] \quad (8)$$

본 실험범위에서 기·액의 밀도비는 미소한 값의 범위에서 거의 일정한 값을 나타내고 있기 때문에 무시하고, 식(8)를 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\left\{ \frac{\dot{q}_c}{\rho_v V_o h_{fg}} \right\} = C \left\{ \frac{1}{We} \right\}^m \times \left\{ \frac{c_p \Delta T_{sub}}{h_{fg}} \right\}^n \quad (9)$$

식 (9)에서 과냉각액에 대한 임계열유속의 무차원항과 역웨버수의 관계는 Fig. 11에서 $S/B=0$ 인 경우에 대하여 나타낸 바와 같이 임계열유속의 무차원 값은 역웨버수가 증가함에 따라 유사한 기울기로 증가하고 있으며, 과냉각도, 보조수층 높이에 대하여 그 증가 구배인 지수 $m=0.23$ 으로 나타나고 있다.

이 지수 값은 포화액의 무차원 관계식을 나타내는 식 (7)의 역웨버수의 지수 0.1에 비하여 중

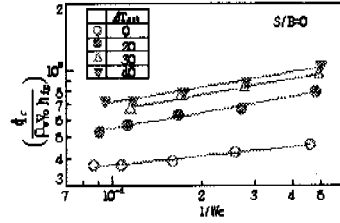


Fig. 11 Effect of We number on CHF with degree of subcooling for $S/B=0$

가구배가 크지만, 古谷⁽⁴⁾의 0.327보다는 증가구배가 작게 나타나고 있다. 따라서 식 (9)은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\left\{ \frac{\dot{q}_c}{\rho_v V_o h_{fg}} \right\} \left\{ \frac{1}{We} \right\}^{-0.23} = C \left\{ \frac{c_p \Delta T_{sub}}{h_{fg}} \right\}^n \quad (10)$$

Fig. 12은 과냉각액의 무차원 보조수층 높이 $S/B=2$ 인 경우에 식 (10)에서 지수 n 을 구하기 위하여 종축에는 $(\dot{q}_c / \rho_v V_o h_{fg}) (1/We)^{-0.23}$ 횡축에는 과냉각도 무차원항 $(c_p \Delta T_{sub} / h_{fg})$ 를 취하여 선도로 나타낸 결과 임계열유속 무차원항은 과냉각 무차원 항의 0.31승에 비례하여 증가하고 있으며, 식 (11)과 같은 무차원식이 도출되었다.

$$S/B=2 : \left\{ \frac{\dot{q}_c}{\rho_v V_o h_{fg}} \right\} = 12.4271 \left\{ \frac{1}{We} \right\}^{0.23} \times \left\{ \frac{c_p \Delta T_{sub}}{h_{fg}} \right\}^{0.31} \quad (11)$$

마찬가지로 단일수분류($S/B=0$) 및 보조수층 높이가 $S/B=1,3$ 에 대하여 과냉각도의 무차원항 지수 n 를 구하여 무차원 임계열유속을 역웨버수와 과냉각액 무차원에 대한 관계식을 나타내면 다음과 같은 무차원식을 도출하였다.

$$S/B=0 : \left\{ \frac{\dot{q}_c}{\rho_v V_o h_{fg}} \right\} = 16.4483 \left\{ \frac{1}{We} \right\}^{0.23} \times \left\{ \frac{c_p \Delta T_{sub}}{h_{fg}} \right\}^{0.39} \quad (12)$$

$$S/B=1 : \left\{ \frac{\dot{q}_c}{\rho_v V_o h_{fg}} \right\} = 7.9679 \left\{ \frac{1}{We} \right\}^{0.23} \times \left\{ \frac{c_p \Delta T_{sub}}{h_{fg}} \right\}^{0.16} \quad (13)$$

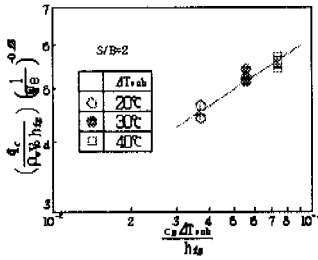


Fig. 12 Dimensionless correlation of CHF with degree of subcooling for S/B=2

$$S/B=3 : \left\{ \frac{q_c}{\rho_v V_o h_{fg}} \right\} = 6.5174 \left\{ \frac{1}{We} \right\}^{0.23} \times \left\{ \frac{c_p \Delta T_{sub}}{h_{fg}} \right\}^{0.10} \quad (14)$$

식 (11)~식 (14)의 각 단일 수분류 및 보조수 동반 수분류에 대한 무차원 임계열유속에 관한 실험식의 도출은 최소자승법으로 구하였으며, 실험식의 상관계수는 0.92이다.

Fig. 13은 식 (13)~식 (16)의 각각의 보조수층 높이에 대한 무차원 임계열유속에 관한 실험식을 나타내었다. 이 선도에서 볼 때, 분류속도가 저속의 4m/s 근방에서는 보조수의 영향이 작지만, 속도가 증가함에 따라 보조수의 영향이 명백하게 나타나고 있다. 속도 전반에서 볼 때, 단일수분류가 보조수를 사용한 경우 보다 임계열유속이 높으며, 보조수를 사용하는 경우 S/B=2인 경우에 가장 높은 임계열유속을 나타내고 있다. 이는 비등 동반 충돌수분류계에서 오히려 보조수 동반 충돌수분류가 보조수를 사용하지 않은 경우보다 열전달 효과가 낮아지는 열전달 억제 효과가 나타나는 특이성을 나타내고 있다. 보조수를 사용한 경우에는 보조수 층이 S/B=2에서 임계열유속이 가장 높게 나타나고 있으며, 이는 단상 충돌 수분류에서 S/B=2에서 최대 국소 열전달(2)을 나타내는 경우와 정성적으로 같은 효과를 나타내고 있다.

4. 결론

비등을 동반하는 발열면에 연직 상향으로 충돌하는 장방형 자유수분류계가 단일 수분류 및 보조수 동반 수분류의 각 경우와, 과냉각도, 분류속

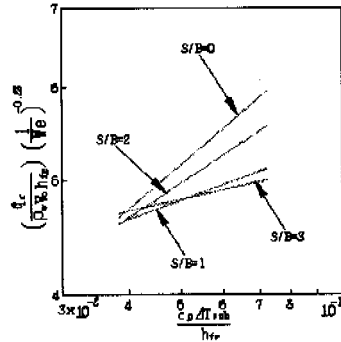


Fig. 13 Dimensionless correlation of CHF with the height of supplementary water

도 및 발열면의 폭의 변화를 실험변수로 하였다. 이 때 열유속은 저열유속의 강제대류 냉각영역에서 고열유속의 핵비등 영역을 지나 공업적 안전성 측면에서 발열면의 물리적 소손을 가져오는 임계열유속까지 가열하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 천이되는 비등개시점의 발열면과열도는 6~8℃ 범위로 나타났다.

(2) 동일한 분류속도에서 발열면 폭이 20mm인 경우를 제외하면, 발열면의 폭이 작을수록 임계열유속이 증가되었다.

(3) 동일한 과냉각도에서 분류속도가 증가하면 임계열유속도 증가하며, 경향을 가지며, 동일한 분류속도에서도 과냉각도가 증가하면 임계열유속도 증가하고 있다.

(4) 분류속도의 변화에 따른 임계열유속은 보조수를 사용한 경우가 평면분류나 저속의 채널유동 그리고 단일충돌수분류 유동구조에서 보다 크고, 제한공간을 갖는 경우보다는 다소 작다.

(5) 분류속도가 증가함에 따라 보조수의 영향이 명백하게 나타나며, 보조수 동반의 경우 임계열유속은 S/B=2인 경우에 가장 높게 나타났다.

후 기

이 논문은 1997년도 한국학술진흥재단의 공모 과제 연구비에 의하여 연구되었으며 관계기관에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Mudawar, I. and Wadsworth, D.C., 1991, "Critical Heat Flux from a Simulated Chip to a Confined Rectangular Impinging Jet of Dielectric Liquid," *Int.J.Heat Mass Transfer*, Vol. 34, No. 6, pp. 1465~1479.
- (2) 이종수, 엄기찬, 최국광, 1996, "장방형 충돌수분류 냉각제의 국소열전달에 관한 연구," 대한기계학회 논문집(B), 제20권, 제4호, pp. 1395~1405.
- (3) 相原利雄, 鈴木和彌, 金柱均, 笠原敬介, 1991, "細径クライオプロブにおける液體窒素の微細噴流沸騰熱傳達," 日本機械學會論文集(B編), 57卷, 538號, pp. 186~191.
- (4) 古谷正裕, 井上 显, 丹野隆治, 1995, "二次元衝突噴流による凹面および平面の冷却特性と限界熱流束," 日本機械學會論文集(B編), 61卷, 591號, pp. 4094~4100.
- (5) Wolf, D.H., Incropera, F.P. and Viskanata, R., 1996, "Local Jet Impingement Boiling Heat Transfer," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, No. 7, pp. 1395~1406.
- (6) Sharan, A. and Lienhard, J.H., 1985, "On Predicting Burnout in the Jet Disk Configuration," *Transactions of the ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 107, pp. 398~401.
- (7) 甲藤好朗, 門出政則, 1975, "衝突噴流沸騰系のバーンアウト機構の研究," 日本機械學會論文集(第2部), 41卷, 341號, pp. 306~314.
- (8) 門出政則, 甲藤好郎, 1977, "衝突噴流沸騰系のバーンアウトの研究(第1報, 氣液の舉動の特性)," 日本機械學會論文集(第2部), 43卷, 373號, pp. 3399~3407.
- (9) Vliet, G.C. and Leppert, G., 1964, "Critical Heat Flux for Nearly Saturated Water Flowing Normal to a Cylinder," *Transactions of the ASME Journal of Heat Transfer*, pp. 59~67.
- (10) Holman, J.P., 1989, *Experimental Methods for Engineers*, 4th Ed., McGraw Hill, New York, pp. 41~49.
- (11) Akhanda, M.A.R. and James, D.D., 1991, "An Experimental Study of the Relative Effects of Transverse and Longitudinal Ribbing of the Heat Transfer Surface in Forced Convective Boiling," *Transactions of the ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 113, pp. 209~215.
- (12) 鳥飼欣一, 鈴木康一, 竹内光生, 1989, "ぬれ難い面の沸騰傳熱に關する研究," 日本機械學會論文集(B篇), 55卷, 511號, pp. 770~775.
- (13) Ruch, M.A. and Holman, J.P. 1975, "Boiling Heat Transfer to a Freon-113 Jet Impinging Upward onto a Flat, Heated Surface," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 18, pp. 51~60.
- (14) Katto, Y. and Ishii, K., 1978, "Burnout in a High Heat Flux Boiling System with a Forced Supply of Liquid Through a Plane Jet," *Proc. 6th Int. Heat Transfer Conf.*, Vol. 1, pp. 435~440.
- (15) 門出政則, 1979, "衝突噴流沸騰系のバーンアウトの研究(第3報, バーンアウト熱流束の無次元整理式の擴張)," 日本機械學會論文集(B篇), 46卷, 406號, pp. 1146~1155.
- (16) 甲藤好郎, 石井和徳, 1978, "平面噴流による強制液體供給, 高熱流束沸騰系のバーンアウト," 日本機械學會論文集(B編), 44卷, 384號, pp. 2817~2823.
- (17) Grimley, T.A., Mudawar, I. and Incropera, F.P., 1988, "CHF Enhancement in Flowing Fluorocarbon Liquid Films Using Structured Surfaces and Flow Deflectors," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 31, pp. 55~65.
- (18) McGillis, W.R., Carey, V.P. and Strom, D.B., 1991, "Geometry Effects on Critical Heat Flux for Subcooled Convective Boiling from an Array of Heated Elements," *Transactions of the ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 113, pp. 463~471.