

衝突水噴流에 의한 서브쿨 Burnout熱流束에 관한 연구

Subcooled Burnout Heat Flux on a Heated Surface with Impinging Water Jet

엄 기 찬*, 이 종 수**, 박 성 연***

K. C. Ohm, J. S. Lee, S. Y. Park

Key words : Burnout heat flux(번아웃 열유속), Nucleate boiling(핵비등), Subcooling(과냉각도), Supplementary water(보조수)

Abstract

Convective nucleate boiling and burnout heat flux have been studied on a flat, downward facing, constant heat flux surface cooled by an impinging water jet. The tests are progressed from low, nonboiling power to high, burnout heat flux power. The jet velocity and the subcooling do not affect the nucleate boiling curve of $q \sim \Delta T_{sat}$ diagram, but the supplementary water height affects the curve. For the case of dimensionless height of supplementary water $S/D=1$, the boiling curve shift to the higher heat flux than that of $S/D=0$ or $S/D=2$. Burnout heat flux is enhanced with increasing jet velocity and subcooling. Also, by using the supplementary water($S/D=1$ or $S/D=2$), burnout heat flux is larger than that of the simple water jet($S/D=0$). A generalized correlation for the burnout heat flux data in the present boiling system with an impinging water jet is successfully evolved.

기 호 설 명

c_p : 정압비열 [J/kg·K]

D : 노즐의 직경 [m]

h : 열전달계수 [$W/m^2 \cdot K$]

H : 노즐-전열면간 거리 [m]

l : 전열면의 길이 [m]

L_h : 증발잠열 [kJ/kg]

q : 열유속 [W/m^2]

q_{bo} : burnout 열유속 [W/m^2]

S : 보조수층의 높이 [m]

T_f : 분류유체의 온도 [$^{\circ}C$]

T_{sat} : 포화온도 [$^{\circ}C$]

T_w : 전열면의 온도 [$^{\circ}C$]

$\Delta T_{sat} = T_w - T_{sat}$: 과열도 [$^{\circ}C$]

$\Delta T_{sub} = T_{sat} - T_f$: 서브쿨도 [$^{\circ}C$]

$\Delta T_f = T_w - T_f$: 전열면-유체의 온도차 [$^{\circ}C$]

V_o : 분류속도 [m/s]

ρ : 밀도 [kg/m^3]

σ : 표면장력 [N/m]

* 인하공업전문대학 기계설계과

** 안동공업전문대학 기계과

*** 대우전자(주)

참 자

l : 액체

v : 증기

1. 서 론

서브쿨액에 의한 충돌수분류계에서의 강제대류 비등열전달은 沸騰水型 원자로, 고온 금속의 냉각 및 대형 컴퓨터요소의 냉각에 이르기까지 유효하게 응용되고 있다. 특히 분류속도나 서브쿨도가 큰 경우에는 高熱流束의 냉각효과를 얻을 수 있으며, 따라서 噴流沸騰系에서는 전열면의 燒損을 야기시키는 한계 열유속 또는 燒損과단을 일으키는 번아웃(burnout)熱流束의 증대효과를 기대할 수 있다. 충돌분류 비등계의 열전달 특성에 관한 연구로서는 Ruch등⁽¹⁾이 R-113을 분류유체로 하는 원형분류 비등계에서 핵비등실험을 통해 핵비등 열유속은 표면과열도에 의존하며, 분류속도와 노즐직경의 변화가 핵비등곡선에 영향을 미치지 않는 것으로 보고 하였으며, Monde등⁽²⁾은 분류액체를 물 및 R-113으로 하고 가열면의 방향을 상향 및 하향으로 하는 원형 충돌액분류의 비등실험에서 핵비등기구의 제안과 burnout열전달의 무차원정리를 하였다. Ma등⁽³⁾은 분류액을 R-113으로 하는 원형 충돌분류에 의한 비등실험에서 정체점 열전달의 연구를 수행하여 열전달이 單相 對流영역에서는 분류속도와 서브쿨도에 영향을 받지만, 핵비등 영역에서는 분류속도의 영향을 받지 않으며 서브쿨도에 제한적인 영향을 받는 것으로 보고 하였다. Vader등⁽⁴⁾은 4각 충돌수분류에 의한 정체선(stagnation line)상 및 노즐 폭방향의 국소 비등열전달 실험에서, 폭방향의 국소 온도분포를 제시하여 單相 대류 영역으로부터 초기비등, 부분비등, 완전히 발달된 핵비등현상을 설명하였으며, $q \sim (T_w - T_s)$ 의 대수 선도상에 정체선상 및 폭방향 임의점의 비등곡선에서 핵비등 영역에서는 모든 점의 데이터가 단일곡선상에 분포됨을 보여주고 있다. Chang등⁽⁵⁾은 분류액이 R-113인 원형 충돌분류의 비등 열전달의 연구에서, 핵비등 영역에서는 분류속도나 서브쿨도

가 변화해도 $q \sim \Delta T_{sat}$ 의 대수선도상의 핵비등곡선 상에 영향을 주지 않으나 분류액의 質(quality)의 크기에는 영향을 받아 동일한 열유속에서 질의 크기가 클수록 표면과열도가 감소하고 있다. 勝田⁽⁶⁾ 등은 분류액을 R-11, R-113, 물, 활성제 첨가액으로 하는 원형분류비등의 연구에서 분류속도, 전열면의 크기, 유량에 의한 한계열유속에 미치는 영향을 보고하였으며 그 무차원 정리식을 제시하였다. 필자중 1인⁽⁷⁾은 분류액을 물로 하는 원형 충돌분류계의 포화비등 열전달의 실험에서 단상대류영역 및 핵비등영역에서 분류속도의 영향을 검토하였으며, 핵비등영역에서 가열면의 크기에 따른 영향과 핵비등열전달의 무차원 정리식을 제시한바 있다. 최근에는 Wolf등⁽⁸⁾이 4각 수분류에 의한 비등열전달 실험에서 분류속도가 핵비등곡선에 영향을 주지 않음을 밝혔으나 burnout열유속에 관한 데이터는 제시하지 않았다.

본 연구에서는 핵비등 열전달과 burnout열유속에 관하여 분류액을 서브쿨도 $\Delta T_{sat} = 20 \sim 40^\circ\text{C}$ 의 물로하는 상향 원형충돌분류계의 비등실험을 수행하였다. 또 열전달의 증진수단으로서 보조수를 이용하였으며, 실험의 변수는 분류속도, 서브쿨도, 보조수층 높이로 하고 이들에 의한 단상대류영역, 비등개시점, 핵비등영역, burnout열유속에 미치는 영향을 실험적으로 검토하였다.

2. 실험장치 및 방법

Fig.1은 실험장치의 개략도이다. 가열수조 1내의 일반수도물은 가열기 12에 의해 일정한 온도로 가열된후 主펌프(Pm)에 의하여 노즐 4로 송출되며, 노즐출구의 속도는 오리피스 2의 전후에 설치한 수은 마노미터 3에 의하여 측정한다. 이때 보조수 공급펌프 Ps에서도 동일한 온도의 물을 보조수조 5내에 공급하여 보조수층 높이가 임의의 분류속도에서 일정한 수위가 유지 되도록 밸브 Vs로 조정한다. 따라서 보조수를 사용하는 경우는 주분류가 보조수층을 통과하면서 보조수를 동반하여, 전열면에 충돌하는 유량은 많아지고 충돌속도는 감소하게 된다. 이때 실험에 착수하기 전까지 샤프터 6

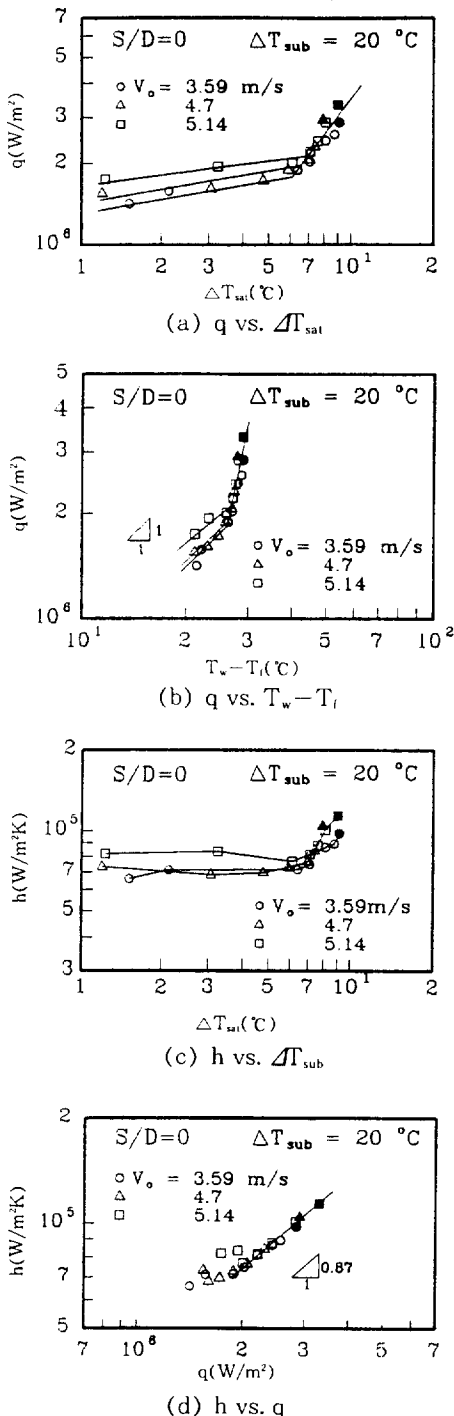


Fig.2 Effect of jet velocity on impingement boiling and burnout heat flux at $S/D=0$

그러나 비등개시점의 우측영역은 핵비등영역으로서 분류속도의 크기에 관계없이 $q \sim \Delta T_{sat}$ 의 대수선도상에 데이터가 약간의 흐트러짐을 갖는 단일곡선상에 분포하고 있다. 이와같이 단상대류영역에서는 표면과열도가 일정한 조건에서 열유속이 분류속도의 영향을 받는 것은 유체의 유체역학적 작용(속도, 난류, 속도구배등)에 지배를 받기 때문이다. 그러나 핵비등에서는 표면을 이탈하는 기포에 의해 야기되는 유체의 혼합과 상변화에 흡수되는 에너지(증발잠열)의 영향을 받으며 분류속도의 영향은 받지 않기 때문이다⁽⁸⁾. 이 선도에서 흑색기호는 burnout 열유속을 나타내며 분류속도의 증가에 따라 burnout 열유속도 증대함을 알 수 있다.

Fig.2(b)는 동일한 데이터를 q 와 $(T_w - T_f)$ 의 관계로 표시하였다. 여기서 열유속 q 와 열전달계수 h 와의 관계는 다음 식으로 정의된다.

$$q = h(T_w - T_f) = h[(T_w - T_{sat}) + (T_{sat} - T_f)] \\ = h(\Delta T_{sat} + \Delta T_{sub}) \quad (3)$$

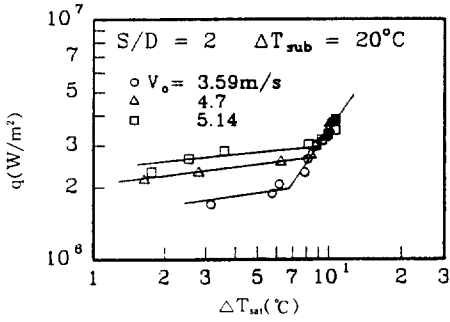
비등영역에서는 에너지전달이 ΔT_{sat} 에 의해 결정되며 유체온도 T_f 에는 거의 영향을 받지 않으나, 단상대류영역에서는 에너지전달이 $\Delta T_f = T_w - T_f$ 에 의해 결정되며, 따라서 식 (3)에서 보듯이 h 가 일정하면 (Fig.2(c)의 단상대류영역 참조) q 와 ΔT_f 는 선형적이며 Wolf 등⁽⁸⁾의 결과와 일치한다. Fig. 2(c)에는 동일한 데이터를 열전달계수 h 와 표면과열도 ΔT_{sat} 의 관계로 표시하였다. 이 선도에서 단상대류영역에서는 표면과열도의 변화에 따라 열전달계수의 변화는 거의 일어나지 않는데, 이것은 (b)도의 단상대류영역에서 $q = c(T_w - T_f)$ 와 식 (3)을 비교하면 $h = c$ 가 되어 거의 일정하며, Ma 등⁽³⁾의 연구에서 나타난 경향과 일치한다. 그러나 단상대류영역에서 분류속도가 증가하면 열전달계수가 증대하고 있으며 (Fig.3(b), Fig.4(b)도 함께 참조), $h \sim \Delta T_{sat}$ 의 대수선도상에서도 $q \sim \Delta T_{sat}$ 의 대수선도상에서와 마찬가지로 핵비등영역에서는 분류속도의 크기에 관계없이 하나의 곡선을 이루지만 burnout 점의 열전달계수는 분류속도의 증가에 따라 역시 증대한다. Fig.2(d)는 열전달계수 h 와 열유속 q 의 관계를 나타낸 선도로서, 단상대류영역에서는 역시 분류속도의 영향을 받아 동일한 열유속에서는 분류

속도가 클수록 열전달계수가 증가하지만, 핵비등영역에서는 분류속도의 영향을 받지 않으며 $h \propto q^{0.87}$ 의 관계가 성립하여 Wolf등⁽⁵⁾의 결과와 일치한다.

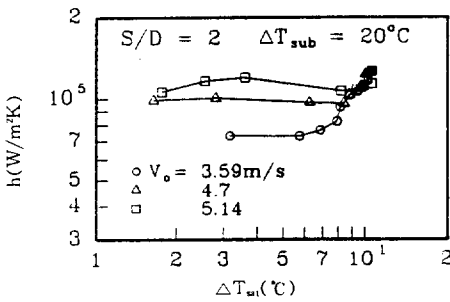
보조수를 사용하는 경우에도 Fig.3에서 보는 것처럼 보조수를 사용하지 않는 경우의 Fig.2의 분류속도에 대한 영향과 동일한 경향을 나타내고 있다.

3.2 분류 서브쿨도의 영향

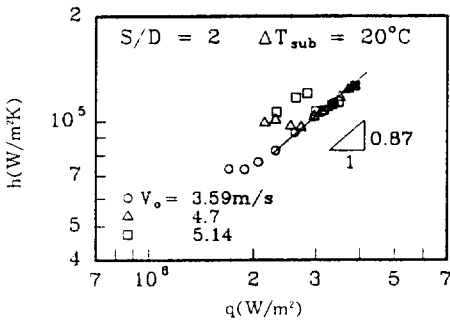
Fig.4(a)는 분류속도가 일정한 상태에서 분류의 서브쿨도가 비등곡선에 미치는 영향을 표시한 선도이다. 단상대류영역에서는 분류의 서브쿨도가 증가할수록 열유속이 증대하며, 역시 비등개시점의 표



(a) q vs. ΔT_{sat}

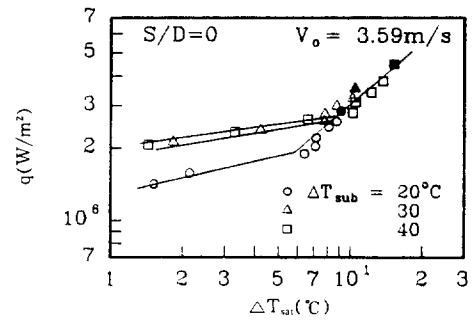


(b) h vs. ΔT_{sat}

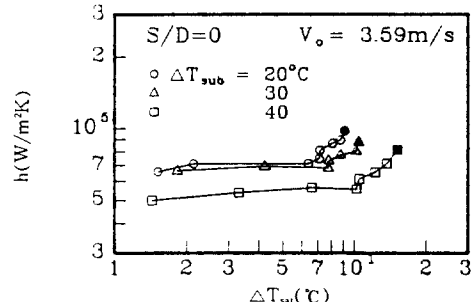


(c) h vs. q

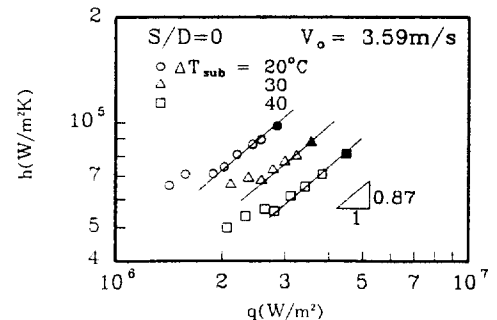
Fig.3 Effect of jet velocity on impingement boiling and burnout heat flux at $S/D=2$



(a) q vs. ΔT_{sat}



(b) h vs. ΔT_{sat}



(c) h vs. q

Fig.4 Effect of subcooling on jet impingement boiling and burnout heat flux at $S/D=0$

면 과열도, 열유속도 각각 증대하고 burnout 열유속(흑색기호) 및 그 표면과열도가 증대하고 있는데, 이것은 서브쿨도가 클수록 가열면에서 발생된 증기기포가 過冷液膜流에 의해 응축이 촉진되므로서 과냉액체의 공급을 촉진시키기 때문이라고 생각된다. 그러나 분류 서브쿨도의 변화는 핵비등곡선에는 영향을 주지 않으며, 이러한 경향은 Chang 등⁽⁵⁾과 戸田等⁽¹¹⁾의 연구에서도 나타나고 있다. 동일한 데이터를 $h \sim \Delta T_{sat}$ 선도에 나타내면 Fig.4(b)와 같다. 이 선도의 단상대류영역에서는 동일한 표면 과열도에서 서브쿨도가 작은 경우에 열전달계수가 높다. 이것은 단상대류영역의 열전달계수 h 는 3.1절에서 언급한 바와 같이 유체역학적 특성에 지배를 받으며 ΔT_{sat} 나 q 와는 독립적이다^(b). 따라서 식 (3)에서 $h = q/(\Delta T_{sat} + \Delta T_{sub})$ 의 ΔT_{sat} 가 일정할 때 ΔT_{sub} 가 감소하면 h 가 증가하기 때문이다. 핵비등영역에서도 ΔT_{sat} 가 일정할 때 열전달계수 h 는 ΔT_{sub} 가 작을수록 높다. 핵비등영역에서는 식 (4)의 관계로 표시할 수 있으며, 열전달계수는 식 (5)와 같이 된다. 따라서 ΔT_{sat} 가 일정하면 ΔT_{sub} 가 작을수록 열전달계수

$$q = c \Delta T_{sat}^n = h (\Delta T_{sat} + \Delta T_{sub}) \quad (4)$$

$$h = \frac{c \Delta T_{sat}^n}{\Delta T_{sat} + \Delta T_{sub}} = \frac{q}{(q/c)^{1/n} + \Delta T_{sub}} \quad (5)$$

h 가 증가하며, burnout 열유속점의 열전달계수도 서브쿨도가 작은 경우에 더 큰 값을 갖고 핵비등영역의 h 는 q 와 ΔT_{sub} 의 함수이다. Fig.4(c)의 $h \sim q$ 의 관계도 동일한 열유속조건에서 서브쿨도가 낮을수록 열전달계수가 증가하는 것은 식 (5)에서 ΔT_{sub} 가 작을수록 h 가 증가하기 때문이다.

자유흐름의 온도가 일정한 상태에서 경계층흐름이 층류로부터 난류로의 천이가 일어나지 않는다면 $q \sim \Delta T_{sat}$ 대신에 $q \sim (T_u - T_f)$ 로 표시할 수 있는데⁽⁴⁾, 층돌분류에서는 일반적으로 벽면분류영역의 임의 반경에서 경계층흐름이 난류로 천이하며, 본 연구의 데이터는 정체점에서의 값이므로 핵비등 데이터를 $q \sim (T_u - T_f)$ 선도로 표시하면 Fig.5와 같다. 이 선도에서 핵비등 및 burnout 열유속(흑색기호)의 데이터는 $h = q/(T_u - T_f) = q/[(q/c)^{1/n} + \Delta T_{sub}]$ 에서 열유속이 일정할 때 ΔT_{sub} 가 증가하면 $(T_u - T_f)$ 도

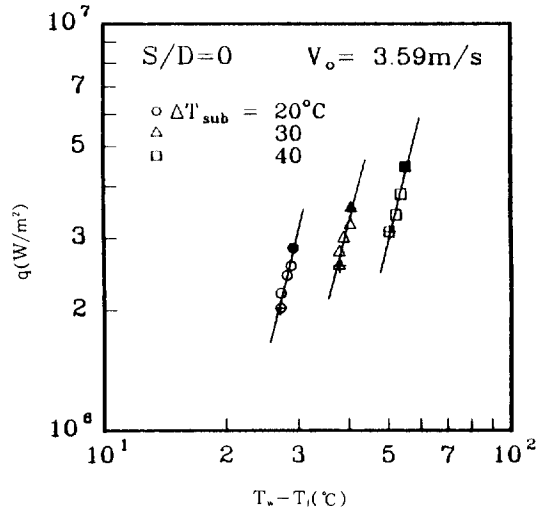


Fig.5 Nucleate boiling curves at different sub-coolings. (S/D=0)

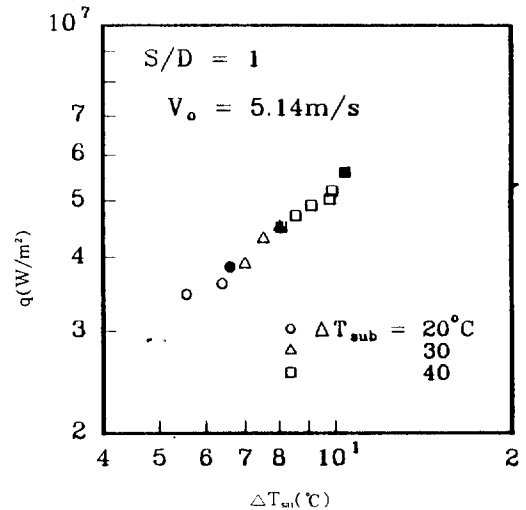


Fig.6 Nucleate boiling curves at different sub-coolings. (S/D=1)

그만큼 증가하므로 서브쿨도의 차만큼 핵비등곡선이 우측으로 이동하고 있으며, 비등개시점(+표시점)과 burnout 열유속(흑색점)은 서브쿨도가 클수록 증대한다. 보조수를 사용하는 경우에도 핵비등곡선에 미치는 서브쿨도의 영향(Fig.6: 흑색기호는 burnout점)도 Fig.4(a)와 동일한 경향을 나타내고 있다.

3.3 보조수의 영향

엄등⁽¹²⁾은 단상충돌분류의 열전달 증진방안으로 보조수를 사용하여 $H/D=20\sim50$ 의 영역에서 보조수층 높이(S)가 노즐직경(D)의 1, 2, 3배인 조건에서 실험한 결과, $S/D=1$ 인 경우에 가장 높은 열전달 증진효과를 얻은바 있으며, 핵비등영역에서도 보조수 이용에 의한 열전달 증진효과를 기대하여 $S/D=1$ 과 $S/D=2$ 의 경우에 대하여 실험하고 보조수를 사용하지 않는 경우($S/D=0$)와 비교한 결과, Fig.7과 같이 단상대류영역과 핵비등영역에서 공히 $S/D=1$ 인 경우에 열전달 증진효과를 얻을 수 있음을 확인하였으나 $S/D=2$ 의 경우는 보조수를 사용하지 않는 경우와 거의 동일한 열전달의 곡선을 이루고 있다. 그러나 burnout열유속(흑색 기호)은 $S/D=1$ 뿐아니라 $S/D=2$ 의 경우도 $S/D=0$ 에 비해 증진되었다.

3.4 Burnout열유속의 무차원정리

서브쿨 분류비등에서 burnout열유속에 관한 지배물리량은 burnout열유속(q_{bo}), 분류속도(V_o), 氣·液兩相의 밀도(ρ_v , ρ_l), 증발잠열(L_h), 가열면의 길이(l), 정압비열(c_p), 분류유체의 서브쿨도(ΔT_{sub}), 표면장력(σ)의 9개이며, 기본량을 질량(M), 길이(L), 시간(t), 증발잠열(L_h), 서브쿨도(ΔT_{sub})로 하여 π 정리를 하면 다음의 무차원항 4개가 얻어진다.

$$q_{bo}/\rho_l V_o L_h, \sigma/\rho_l V_o^2 l, \rho_v/\rho_l, c_p \Delta T_{sub}/L_h \quad (6)$$

따라서 식 (6)에서 burnout열유속을 나타내는 첫 무차원수에 대한 다른 무차원수의 영향을 나타내는 함수관계를 식 (7)과 같이 표시하고, ϕ_{sub} 의 함수는 서브쿨도에 관계되므로 외삽에 의한 포화액(서브쿨도 : 0)에도 적용할 수 있도록 식 (8)과 같이 정의하였다.

$$\frac{q_{bo}}{\rho_l V_o L_h} = C_1 \left(\frac{\sigma}{\rho_l V_o^2 l} \right)^m \cdot \phi_{sub} \left(\frac{\rho_v}{\rho_l}, \frac{c_p \Delta T_{sub}}{L_h} \right) \quad (7)$$

$$\phi_{sub} = 1 + C_2 \left(\frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^n \cdot \left(\frac{c_p \Delta T_{sub}}{L_h} \right)^p \quad (8)$$

Fig.8(a)는 burnout열유속에 미치는 분류속도

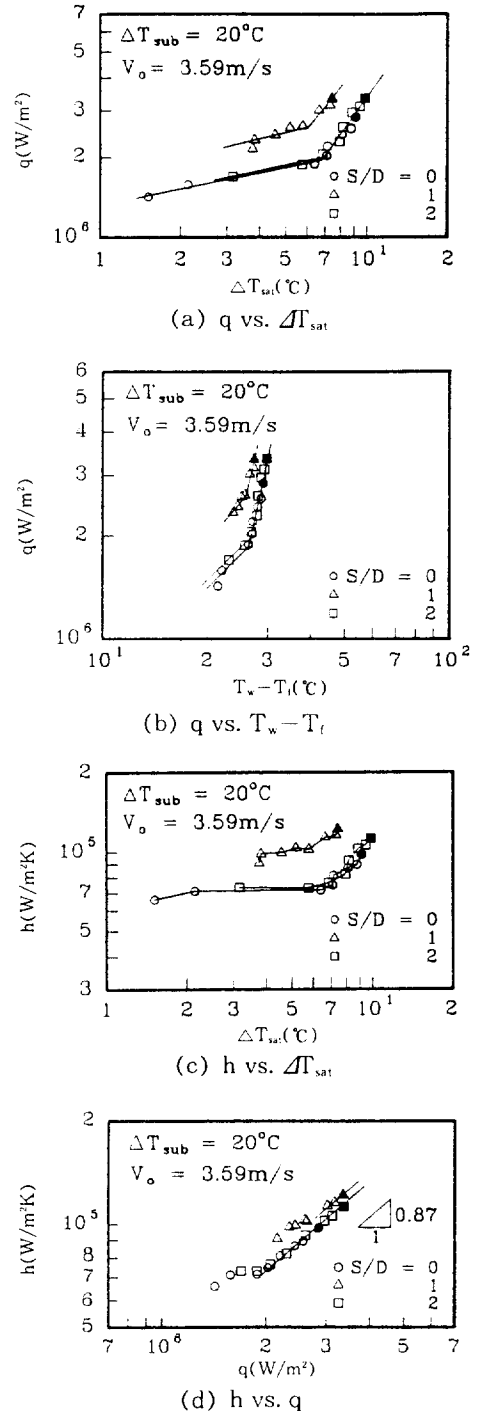


Fig.7 Effect of supplementary water height on jet impingement boiling and burnout heat flux

의 영향을 표시한 선도로서 파라미터는 서브쿨도이고, Fig.8(b)는 파라미터가 보조수층의 무차원 높이이다. 이들 선도에서 분류속도의 증가에 따라 burnout열유속이 증대하며, Fig.8(a)에서 서브쿨도가 클수록, 그리고 Fig.8(b)에서 보조수를 사용하므로서 burnout열유속의 증대효과가 나타나고 있으며, 이때 $S/D=1$ 의 조건에서 증대효과가 가장 크다. 이들 결과를 burnout열유속과 분류속도와의 관계를 표시하면 다음과 같다.

$$q_{bo} \propto \left(\frac{V_o}{l}\right)^{0.56} \quad (9)$$

강제대류 비등계에서 勝田⁽⁶⁾ 및 Vliet⁽¹³⁾은 $q_{bo} \propto V_o^{0.5}$ 의 관계를 얻어 근사한 관계가 있음을 알 수 있다. 따라서 식 (7)의 우변에서 첫번째 무차원수인 역 Weber수의 burnout열유속에 미치는 영향을 나타내는 지수 m 은 시편의 길이가 일정한 본

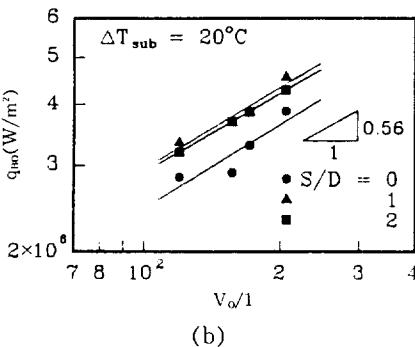
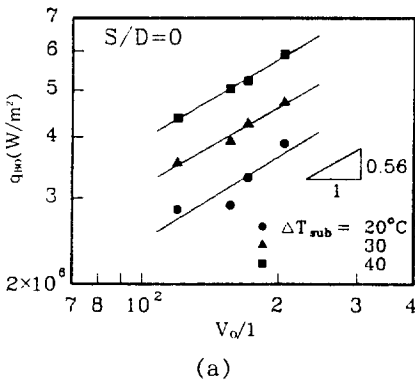


Fig.8 Relationship between burnout heat flux and jet velocity

실험에서는 분류속도의 영향을 받는 것으로 간주할 수 있으며, 식 (9)와 연관 지으면 $m=0.22$ 가 되므로 식 (7) 및 식 (8)은 다음식으로 표시할 수 있다.

$$\frac{q_{bo}}{\rho_i V_o L_h} / C_1 \left(\frac{\sigma}{\rho_i V_o^2 l} \right)^{0.22} = \phi_{sub} = 1 + C_2 \left(\frac{\rho_i}{\rho_v} \right)^n \cdot \left(\frac{c_p \Delta T_{sub}}{L_h} \right)^p \quad (10)$$

보조수를 사용하지 않는 $S/D=0$ 의 경우, 각 상수 및 지수를 구하면 $C_1=2.947$, $n=0.245$, $p=1.572$, $C_2=10.63$ 이 되어, 이 결과는 Fig.9(a)와 같이 정리되며 무차원 실험식은 식 (11)로 표시된다.

$$\frac{q_{bo}}{\rho_i V_o L_h} = 2.947 \left(\frac{\sigma}{\rho_i V_o^2 l} \right)^{0.22} \cdot \phi_{sub} \quad (11)$$

여기서, $\phi_{sub} = 1 + 10.63 \left(\frac{\rho_i}{\rho_v} \right)^{0.245} \cdot \left(\frac{c_p \Delta T_{sub}}{L_h} \right)^{1.572}$

보조수를 사용하는 경우에는 $\frac{q_{bo}}{\rho_i V_o L_h} / \phi_{sub}$

$= C \left(\frac{\sigma}{\rho_i V_o^2 l} \right)^{0.22}$ 의 관계로부터 구하면 $S/D=1$ 의 경우는 식 (12), $S/D=2$ 의 경우는 식 (13)으로 정리되며 각각 Fig.9(b)와 Fig.9(c)에 표시하였다.

$$S/D=1 : \frac{q_{bo}}{\rho_i V_o L_h} = 3.243 \left(\frac{\sigma}{\rho_i V_o^2 l} \right)^{0.22} \cdot \phi_{sub} \quad (12)$$

$$S/D=2 : \frac{q_{bo}}{\rho_i V_o L_h} = 3.182 \left(\frac{\sigma}{\rho_i V_o^2 l} \right)^{0.22} \cdot \phi_{sub} \quad (13)$$

위의 식 (11), 식 (12), 식 (13)은 각각 $S/D=0, 1, 2$ 에서의 burnout열유속에 관한 무차원 실험식이다. 그런데 이 식들은 우변의 상수만이 다르며, 따라서 burnout열유속은 $S/D=1$ 의 경우가 가장 크고, 보조수를 사용하지 않는 경우에 비하여 약 10%, $S/D=2$ 의 경우는 약 8%의 증진효과가 얻어졌다. 본 연구의 모든 범위 ($S/D=0 \sim 2$)에 적용할 수 있는 포괄적인 무차원 실험적으로 표시하기 위하여 보조수의 영향을 나타내는 다음과 같은 함수 $\phi_{S/D}$ 를 도입한다.

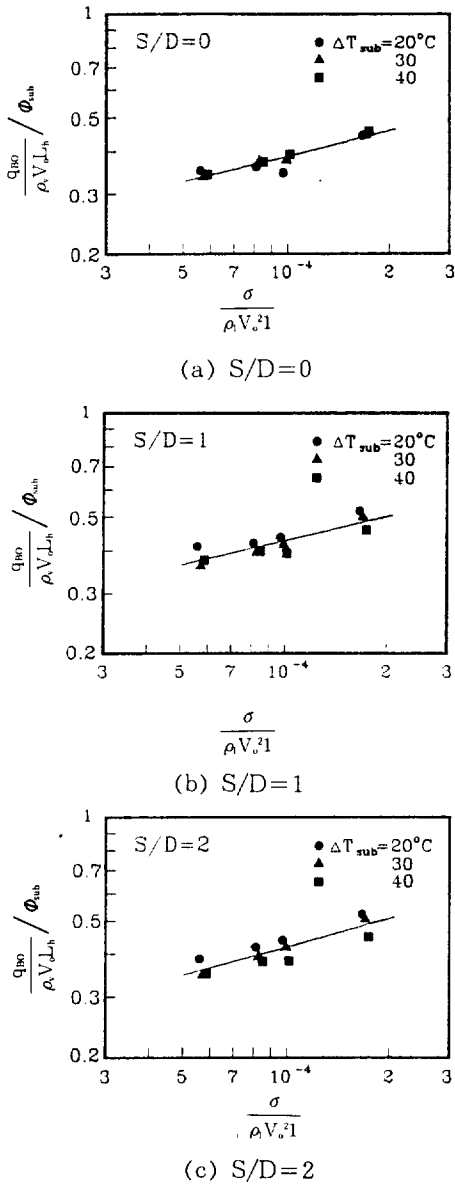


Fig.9 Dimensionless correlation of burnout heat flux

$$\phi_{S/D} = 1 + C_3 (S/D)^a \quad (14)$$

$S/D=1$ 및 $S/D=2$ 의 실험결과와 식 (11)을 이용하여 식 (14)의 상수 및 지수를 구하면 다음과 같이 된다.

$$\phi_{S/D} = 1 + 0.1 (S/D)^{-0.327} \quad (15)$$

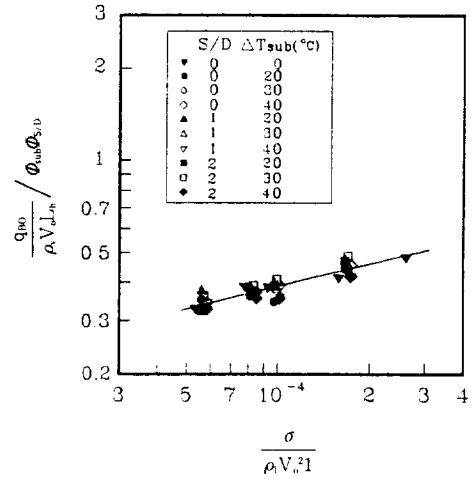


Fig.10 Dimensionless correlation of burnout heat flux

따라서 서브쿨도 및 보조수의 영향을 모두 고려한 무차원 관계는 Fig.10과 같이 문헌 [7]의 포화비 등에 대한 burnout 열유속도 함께 표시 하였으며, 다음 식으로 정리할 수 있다.

$$\frac{q_{bo}}{\rho_i V_o L_h} = 2.947 \left(\frac{\sigma}{\rho_i V_o^2 l} \right)^{0.22} \cdot \phi_{sub} \cdot \phi_{S/D} \quad (16)$$

여기서, $\phi_{sub} = 1 + 10.63 \left(\frac{\rho_i}{\rho_v} \right)^{0.245} \cdot \left(\frac{c_p \Delta T_{sub}}{L_h} \right)^{1.572}$

$$\phi_{S/D} = 1 + 0.1 (S/D)^{-0.327}$$

이다.

4. 결 론

노즐-전열면간 거리는 일정하고 분류유체를 물로 하는 상향 원형충돌수분류에 의한 평판 전열면상의 비등실험을 전열면이 소손과단되는 burnout 점까지 열유속을 증대시켜 가면서 수행하였다.

분류속도는 3.59~6.19m/s, 서브쿨도는 20, 30, 40°C, 무차원 보조수층의 높이는 $S/D=0, 1, 2$ 로 변화시켜 실험한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) $q \sim \Delta T_{sat}$ 의 관계에서 단상대류영역에서는 동일한 표면과열도에 대하여 분류속도, 서브쿨도가

증가할수록 열유속이 증대하며, 분류속도 및 서브쿨도가 일정한 조건에서는 보조수층 높이 $S/D=1$ 의 경우에 가장 높은 열유속이 실현되었다. 그러나 $h \sim \Delta T_{sat}$ 의 관계에서 단상대류영역에서는 분류속도가 증가할수록 열전달계수가 증가하지만 서브쿨도가 증가하면 감소한다.

2) $q \sim \Delta T_{sat}$ 의 대수선도에서 분류속도, 서브쿨도는 핵비등곡선상에 영향을 미치지 않으나 비등개시점의 열유속과 표면과열도 및 burnout열유속은 분류속도, 서브쿨도의 증가에 따라 증대한다. 그러나 보조수를 사용하는 경우, 보조수층의 높이가 핵비등곡선에 영향을 미치게 되어 $S/D=1$ 에서 가장 높은 열유속이 실현되었으며, $h \sim \Delta T_{sat}$ 의 관계에서는 분류속도가 핵비등곡선에 영향을 미치지 않으나 서브쿨도 및 보조수층높이는 영향을 미치게 되어 하나의 곡선으로 표시할 수 없다. 핵비등영역에서 열전달계수와 열유속의 관계는 $h \sim q^{0.87}$ 로 나타났다.

3) 동일한 표면과열도에서 burnout열유속 및 그 열전달계수는 분류속도, 서브쿨도가 증가함에 따라 증대하며, burnout열유속은 $S/D=1$ 과 2의 조건에서 보조수를 사용하지 않는 경우보다 각각 약 10%, 8%만큼 증대하였다. burnout열전달에 대한 차원해석을 하여 본 실험의 모든 범위에 적용할 수 있는 무차원 실험식을 식 (16)과 같이 제시하였다.

참 고 문 헌

1. 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.
2. Monde, M. and Katto, Y., 1978, "Burnout in a High Heat Flux Boiling System with Impinging Jet", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 24, pp. 295~305.
3. Ma, C. F. and Bergles, A. E., 1986, "Jet Impingement Nucleate Boiling", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 29, No. 8, pp. 1095~1101.
4. Vader, D. T., Incropera, F. P. and Viskanta, R., 1992, "Convective Nucleate Boiling on a Heated Surface Cooled by an Impinging, Planar Jet of Water", ASME, J. Heat Transfer, Vol. 114, pp. 152~160.
5. Chang, C. T., Kojasoy, G. and Landis, F., 1995, "Confined Single and Multiple Jet Impingement Heat Transfer-II, Turbulent Two-phase Flow", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 38, No. 5, pp. 843~851.
6. 勝田, 黒瀬, 1981, "液膜の沸騰熱傳達に 關する研究(第2報, 核沸騰限界熱流束について)", 日本機械學會論文集, 47卷, 421號, pp. 1849~1860.
7. 엄기찬, 서정운, 1986, "衝突水噴流에 의한 飽和沸騰 熱傳達", 空氣調和·冷凍工學, 15권 2호, pp. 782~787.
8. Wolf, D. H., Incropera, F. P. and Viskanta, R., 1996, "Local Jet Impingement Boiling Heat Transfer", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 39, No. 7, pp. 1395~1406.
9. 鐵鋼材料便覽, 1967, 日本機械學會, 日本鐵鋼協會, 東京, 丸善株式會社.
10. Bergles, A. E. and Rohsenow, W. M., 1964, "The Determination of Forced Convection Surface Boiling Heat Transfer", ASME, J. Heat Transfer, pp. 365~372.
11. 戸田, 内田, 1972, "蒸發, 沸騰を伴う フィルム・クーリングに 關する研究", 日本機械學會論文集(第2部), 38卷, 311號, pp. 1830~1837.
12. Ohm, K. C., Choi, G. G. and Seo, J. Y., 1988, "Augmentation of Heat Transfer from upward Circular Impinging Water Jet", Trans. Japanese Association of Refrigeration, Vol. 5, No. 1, pp. 79~88.
13. Vliet, G. C. and Leppert, G., 1964, "Critical Heat Flux for Subcooled Water Flowing Normal to a Cylinder", J. Heat Transfer, Vol. 86, pp. 68~74.