평면충돌제트에 의한 단상 및 비등 열전달의 국소적 측정

우성제* · 신창환** · 조형희†

(2003 년 10 월 11 일 접수, 2004 년 6 월 17 일 심사완료)

The Local Measurements of Single Phase and Boiling Heat Transfer by Confined Planar Impinging Jets

Seong Je Wu, Chang Hwan Shin and Hyung Hee Cho

Key Words : Confined Jet(구속제트), Convective Nucleate Boiling(대류 핵비등), Jet Impingement(충돌제트), Planar Jet(평면제트)

Abstract

Single-phase convection and nucleate boiling heat transfer were locally investigated for confined planar water jets. The detailed distributions of the wall temperature and the convection coefficient as well as the typical boiling curves were discussed. The curve for the single-phase convection indicated the developing laminar boundary layer, accompanied by monotonic increase of the wall temperature in the stream direction. Boiling was initiated from the furthest downstream as heat flux increased. Heat transfer variation according to the streamwise location was reduced as heat flux increased enough to create the vigorous nucleate boiling. Velocity effects were considered for the confined free-surface jet. Higher velocity of the jet caused the boiling incipient to be delayed more. The transition to turbulence precipitated by the bubble-induced disturbance was obvious only for the highest velocity, which enabled the boiling incipient to start in the middle of the heated surface, rather than the furthest downstream as was the case of the moderate and low velocities. The temperature at offset line were somewhat lower than those at the centerline for single-phase convection and partial boiling, and these differences were reduced as the nucleate boiling developed. For the region prior to transition, the convection coefficient distributions were similar in both cases while the temperatures were somewhat lower in the submerged jet. For single-phase convection, transition was initiated at $x/W \cong 2.5$ and completed soon for the submerged jet, but the onset of transition was retarded to the distance at $x/W \cong 6$ for the free-surface jet.

기호설명

h	: 열전달계수, $q''/(T_w - T_f)$
H	: 노즐과 가열면 사이의 거리
l	: 노즐길이
Pr	: Prandtl 수
q''	: 열유속
Re	: Reynodls 수
T_f	: 노즐출구에서 냉각재 평균온도
T_w	: 충돌면의 국소 벽온도
V_n	: 노즐 출구에서 냉각재 평균속도
W	: 노즐폭
x	: 정체점부터의 유동방향 거리
y	: 가열면부터의 수직방향 거리
z	: 가열면 중심에서 측면방향 거리

* 회원, ㈜ 삼성전자

** 연세대학교 기계공학과

† 책임저자, 회원, 연세대학교 기계공학과
E-mail : hhcho@yonsei.ac.kr
TEL : (02)2123-2828 FAX : (02)312-2159

하첨자

c : 경계층 천이 시작점의 임계치

1. 서 론

고온발열체의 냉각을 위한 충돌제트 열전달 기법은 전자장비나 가스터빈 블래이드의 냉각, 제철산업이나 의료, 군사산업 등에 적용되고 있다. 충돌제트에서 공기는 여러면에서 우수한 냉각유체로 다양한 분야에 이용되고 있지만, 냉각재로서 공기는 고온부의 열을 제거할 수 있는 열용량의 한계를 갖게 된다. 이에 비하여 액체를 냉각유체로 사용하는 경우 공기에 비해 수백배 이상의 높은 열용량을 갖는 반면 장치의 무게나 비용, 제작 등의 면에서 단점을 갖게 된다. 특히 단상의 액체를 냉각유체로 사용하는 경우, 보다 높은 열전달의 강제대류를 위해서는 동력원이 필요하게 되고, 이는 비용의 증가와 소음발생의 원인이 되고 있다. 하지만 비등을 이용하는 경우 동력원으로서 모세관력을 이용할 수 있고, 상변화에 의해 가열면 온도를 일정하게 유지하기 용이하므로 이에 대한 연구들이 상당히 이루어지고 있다. 비등에 의한 고온발열부의 냉각은 특히 전자장비의 냉각과 같은 급격한 열유속 증가곡선을 그리고 있는 발열체의 냉각에 중요한 역할을 하게 될 것이다. 따라서 비등을 이용한 열전달에 관한 연구로서 수조비등, 강제대류비등에 관한 연구 뿐만 아니라, 보다 높은 고온발열체의 냉각을 위한 분무비등냉각과 충돌제트 비등에 관한 연구들이 이루어지고 있다. 특히 충돌제트의 경우 불균일한 열유속의 분포를 갖는 발열체의 냉각에 주요한 냉각 기술이 될 수 있다. 단상의 액체 충돌제트에 의한 열전달에 관한 연구들[1]이 다양한 유동 파라메타에 대해 수행된 반면 비등에 관한 연구는 평균 열전달 관점에서 임계열유속(CHF)에 관한 많은 연구들이 이루어졌고,[2] 이에 부수적으로 핵 비등영역을 다루고 있다. 특히 충돌제트의 국소적인 핵 비등 열전달 측정은 제한적인 연구만이 이루어졌다.[3~7] 과냉대류비등은 부분비등과 완전발달 비등영역으로 크게 나눌 수 있다. 완전발달 비등영역에서는 유동속도, 과냉도, 노즐 형상과 같은 대표적인 유동 파라메타들의 영향이 거의 나타나지 않지만, 부분비등 영역에서는 단상과 핵비등 영역이 동시에 존재하고 있으며, 물의 충돌제트의 경우 30~300W/cm^2 과 같이 넓은 열유속 범위에 걸쳐 나타나고 있다.

충돌제트에서 부분비등의 국소적인 열전달 측정은 Vader 등[3]과 Wolf 등[4]의 연구 외에는 거의 이루어지지 않았다. 그들은 자유수면을 갖는 과냉수 평면충돌제트에 대해 실험을 수행하고, 유동의 경계층은 기포에 의한 교란과 평판의 임계레이놀드수, $Re_{x,c}$ 에 의해 층류에서 난류로 천이되는 과정을 보였다. 또한 속도는 부분비등 영역의 열전달에는 영향을 주지만 완전 발달된 영역에서는거의 영향을 주지 않았다. 그외 다른 연구들에서는 정체점영역과 평행류영역에서 2~9개의 국소적인 열전달 측정을 하였지만 자세한 설명은 하지 않았다.[5~7] 또한 충돌제트의 응용에서 제철산업과 같이 냉각유체를 회수하지 않는 경우를 제외하고, 전자장비냉각과 같이 고가의 냉각재를 사용하는 많은 응용분야에서 유동 공간의 제약은 피할 수 없다. 이러한 구속조건(confined condition)하에서 가열면과 노즐간 간격은 완전발달 비등영역에서는 그영향이 미미하지만, 간격의 감소가 임계열유속의 증대를 가져옴을 앞선 연구들[5,6,8,9]에서 보였다.

본 연구는 과냉수를 냉각유체로 평면충돌제트에 대한 단상 열전달과 부분비등에서 완전발달 과냉비등에 이르는 핵비등 열전달영역에 대해 채널형태의 구속조건하에서 국소적인 열전달 특성을 속도변화와 자유수면에 의한 효과 등에 대해 측정하고, 해석하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 실험에서 사용된 장치의 개념도를 Fig. 1에 도시 하였다. 장치 내의 온도 및 압력을 조절하기 위해 냉각코일과 잠입히터가 설치된 두개의 수조가 사용되었으며, 이차 수조는 난용성 기체(non-condensible gas)의 제거와 시험유체의 충전에도 사용된다. 일차적으로 온도가 조절된 시험유체는 일차수조에서 나와 기어형 마그네틱 펌프에 의해 이송된다. 유량에 따라 세 개의 체적형 유량계 중 하나를 지나도록 조절된 시험유체는 항온조와 연결된 열교환기를 통과하여 선택된 노즐출구 제트온도를 만족시키며 시험부로 유입된다. 유량은 펌프의 우회관 밸브와 시험부 상류의 유량조절밸브 및 펌프조절용 인버터에 의해 조절된다. 충돌면의 중앙에 길이 80 mm, 폭 14 mm, 두께 0.46 mm의 인코넬 합금판을 부착하고, 10 kW(20 V, 500 A)직류전원 공급 및 조절장치를 연결하였다. 시험부에는 폭 2.0 mm, 길이 15.0 mm의 사각단면을 갖는 평면노즐이 유동안정화를 위한 다공판을 가진플레넘 하류에 부착된다. 노즐의 입구는 둥굴게 가공하고, 출구까지의 길이는 $5W$~$8W$이다. 시험부의 상세도는 Fig. 2에 도시되어 있다. 본 실험에서는 가열면

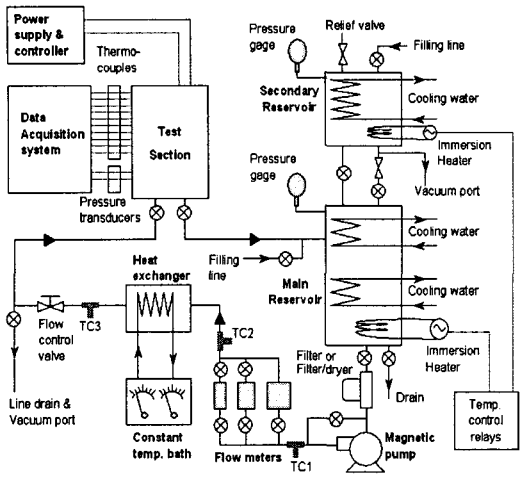


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

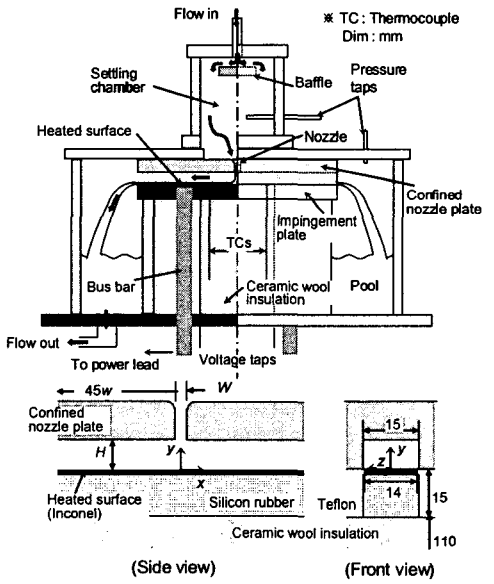


Fig. 2 Schematic of test section

과 노즐면사이에 측면벽의 존재유무에 따라 구속조건을 정의하였다. 따라서 실험장치는 두 경우에 대한 실험이 모두 가능하도록 설계되었다. 구속조건의 경우 노즐과 가열면 간격에 따라 세가지 형태의 노즐부를 제작하여 가열면과 체결하였다. 가열면에 공급된 전압을 측정하기 위하여 가열면 양단에 전압탭을 용접하였다. 이때 공급된 열유속의 계산을 위해 측정된 가열면 길이는 72 mm이다. 가열면의 벽온도를 측정하기 위하여 48개의 K-type 열전대를 충돌면의 뒷면에 측면벽의 존재유무에 따라 발생하는 2차원 열전달 특성을 측정하기 위해 가열면의 중심선과 또한 2.5W이동한 오프셋선을 따라 용접하였다. 후면부로의 열전달 손실을 최소화하기 위해 110 mm두께의 세라믹울 단열재를 채웠다. 충돌면은 가열면을 제외하고 테플론판으로 제작되었다. 냉각유체는 이온이 제거된 순수를 사용하고, 실험에 앞서 난용성 기체를 제거하였다.

노즐 입구온도와 압력 및 충돌하류의 수조 압력을 측정하기 위해 열전대와 절대압력계, 차압계를 설치하였다. 온도와 압력측정치는 에질런트테크놀로지의 데이터 수집장치(34970A)에 의하여 획득된다. 많은 수의 열전대에 대한 온도보정을 용이하게 하기 위해 열전대와 데이터 수집장치 사이에 등온블럭(iso-thermal block)을 설치하여 기준온도로 삼았으며, 등온블럭 온도는 얼음물수조(ice-bath)를 측정하여 기준온도로 보정하였다. 실험의 편의상 좌표계의 설정은 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 가열면을 따른 유동방향을 x, 가열면으로부터 거리를 y, 중심선에서 유동에 수직한 방향을 z로 하였다.

2.2 실험방법

실험은 H/W=0.5, 1.0, 4.0의 세가지 노즐면과 가열면 간격에 대해 과냉도 50K에 대해 구속조건과 자유수면, 잠입제트에 대해 수행하였다. 또한 속도의 효과를 고려하기 위해 세가지 속도, V_n=1.0, 1.7, 3.3m/s로 변화시켰다. 시험부 상단의 홀을 통해 유동의 하류에서는 압력을 대기압으로 유지시켰다. 열유속은 20~294 W/cm^{2}까지 증가시켜, 단상영역에서 완전발달 비등영역에 걸쳐 측정하였다. 국소적인 온도는 가열판 후면에 용접된 열전대에 의해 측정되며, 충돌벽면의 온도는 유한체적법에 의한 2차원 수치해석과 1차원 전도방정식에 의한 결과 차이는 0.23K이하 였다. 따라서 열전대에 의한 온도측정결과는 y방향의 1차원 전도로 가정하여 벽온도를 계산하였다.

정상상태 조건을 얻기 위해 노즐입구의 온도와 가열면의 벽온도를 측정하여 일정 시간동안 각각의 온도가 0.3K의 오차범위내에 도달하면 실험을 시작하였다. 열전대를 가열면에 용접함으로써 유발되는 오차는 Wolf[10]의 실험에서 제시한 방법으로 보정하였다. 열전달계수는 노즐입구의 온도와 벽온도의 차를 사용하여 얻었다. 온도분포를 얻기 위해 각 측정위치에 대해 70~150개의 데이터들을 획득하고, 이에 대해Kline과 McClintock[11]의 오차해석방법에 적용하여, 벽온도에 대한 오차는 ±1.7K였다. 열유속은 0.5%의 전도와 복사 손실을 포함하여 3.5%, 열전달계수는 7.6%, 노즐출구에서 평균속도는 1.3%, 레이놀드수는 2.9%의 오차를 갖는다.

3. 결과와 검토

3.1 구속조건하에서의 열전달 특성

구속조건하에서 자유수면이 존재하며 H/W=4이고 노즐출구에서의 속도(V_n)가 1.7 m/s인 경우 가열벽면 온도의 국소적인 측정결과를 Fig. 3에 표시하였다. x/W>4인 하류영역에서 중심선과 오프셋선 간의 온도차이는 열유속이 증가함에 따라 오프셋선의 온도가 점점 더 낮게 나타나지만 열유속에 대한 상대적인 비는 거의 동일하며, 보다 높은 열유속에 의해 비등이 발달하면 그 차이는 다시 감소한다.

단상대류 영역인 q"≤60 W/cm^{2}에서 유동방향에 대한 벽온도는 서서히 증가하는 경향을 보이고 있으며, 이는 발달하는 층류경계층을 의미한다. 비등은 열유속의 증가에 따라 최하류에서 시작된다. 열유속, q"≥100 W/cm^{2}이고, x/W≥5인 하류영역에서 벽온도는 균일한 분포를 보이며, 이는 부분비등영역으로 열유속의 증가와 함께 그림에 표시된 바와 같이 상류로 확산된다. 비등이 열전달에서 탁월한 성능을 보인다는 설명에 맞게 높은 열유속에서는 공급열유속의 증대에 비해 벽온도의 증가는 크지 않음을 분명히 보여주고 있다. 또한 정체점과 하류에서의 온도차이도 서서히 줄어들고 있다.

열유속과 온도차의 관계를 Fig. 4(a)에 표시하였다. 열전달을 표현하기 위해 국소적인 벽온도와 노즐 출구에서의 냉각유체 온도차, ΔT_f 를 단상과 비등영역 모두를 표현하기 위해 사용하였다. 일반적으로 포화온도를 지난 첫 변곡점에서 비등이 시작(onset of boiling)되고, 이차 변곡점이후에서 열유속의 증대에 대해 벽온도가 거의 일정하여 열전달계수는 급속히 증가하는 완전발달 비등영역이 된다. 따라서 x/W≥9.9인 하류영역에서 비등은 ΔT_f =60 전후에서 시작되며, ΔT_f >75 K에서 완전발달된 특성을 보인다.

완전발달 비등영역에서는 정체점과 하류영역에서 위치에 따른 특성이 보이지 않고, 전영역에 걸쳐 거의 동일한 열전달 계수를 갖는다. Fig. 4(b)에는 완전발달 영역의 특성을 보다 자세히 보이기 위해 열유속에 따른 열전달의 변화를 로그스케일로 표시하였다. 모든 비등곡선은 실제로 완전발달 영역에서 하나의 선으로 표현된다. 따라서 완전발달 비등영역에서는 속도와 위치의 영향은 거의 나타나지 않으므로 본 실험에 대해 다음과 같은 열유속과 열전달계수의 상관식을 얻었다.

$$h = 0.076\ q''^{0.88} \qquad (1)$$

이때 h 와 q"의 단위는 각각 W/m^{2}K, W/m^2 이다.

3.2 구속조건에 따른 특성

구속조건의 유무에 따른 중심선에서 벽온도의 분포를 Fig. 3에서 z/W=0과 2.5의 비교에서 알 수 있다. 구속이 없는 평면충돌제트는 가열면에 충돌 후 제트의 양 끝단에서 일정거리까지 반경방향으

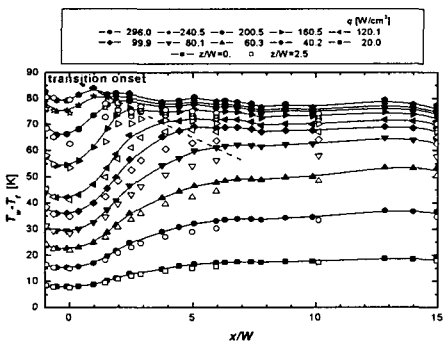
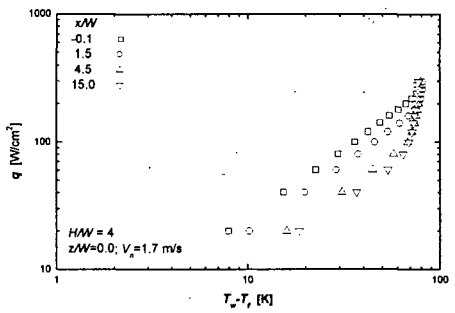
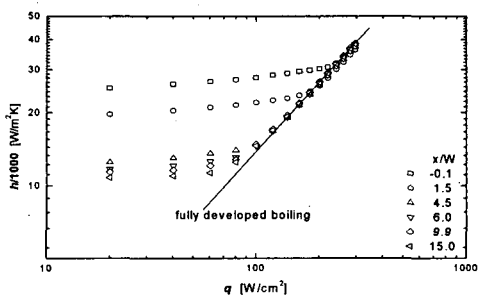


Fig. 3 Temperature distributions for the confined free surface jet at H/W=4, V_n=1.7 m/s



(a) Heat flux versus temperature difference ΔT_f



(b) h versus heat flux

Fig. 4 Convection coefficient distribution

로 넓게 퍼지면서 얇은 액막을 형성하고, 하류로 진행함에따라 유동방향의 중심으로 유체가 모여짐으로 구속조건과 유사한 유동특성을 보인다.[12] 따라서 충돌의 효과가 지배적인 정체점영역과 평행류영역인 하류에서는 두 경우에 대한 뚜렷한 차이점이 보이지 않지만, 가속영역인 $0.5 \le x/W \le 2$에서는 구속조건이 없는 경우의 노즐 양단에서 제트가 분사될 때 표면장력의 영향으로 원형을 형성하고 가열면에 충돌한 후 원형제트와 유사하게 반경방향으로 얇은 액막을 형성하게 되어 열전달을 향상시키게 되므로 측벽이 존재하는 구속조건보다 낮은 벽온도를 나타낸다. 하지만 평면제트의 경우 측면부가 존재함으로써 야기되는 구속조건은 벽면온도의 변화에는 전체적으로 큰 영향을 미치지 않는다.

3.3 노즐출구 속도의 영향

Fig. 5에는 노즐 출구 속도 범위 1.0~3.3 m/s에서 속도변화에 따른 열전달계수의 분포를 나타내었다. V_n=1.0m/s인 경우 단상대류영역인 q"= 40 W/cm^{2}과 하류에서 비등이 시작된 q"= 200 W/cm^2 의 핵비등영역까지, V_n=1.7 m/s인 경우와 거의 유사한 경향을 보이고 있다. 높은 유속인 V_n=3.3 m/s에서는 x/W=4~7지점에서 열전달계수가 최소값을 보이고, 하류로 갈수록 다시 증가하는 경계층 천이영역이 존재한다. 이러한 천이의 시작점은 열유속의 증가와 더불어 상류로 이동하게 된다. 이는 기포의 발생과 이에 따른 교란에 의해 천이가 촉진되는 것으로 사료된다. Vador 등[3]은 단상대류영역에서 냉각유체의 온도, 열유속, 제트 속도에의해 특징지워지는 임계표면 레이놀드수, $Re_{x,c}$를약 3.6×10^5으로 정의하고, 비등의 경우 제트 속도,V_n=1.8~4.5 m/s의 범위내에서 x_c/W는 열유속의 증가에 따라 $x/W \cong 1.6$까지 감소한다고 하였다.

본 연구에서 Blasius의 속도분포와 임계표면레이놀드수를 적용하면 속도 V_n=1.0, 1.7, 3.3m/s에 대해서 각각 임계수력경계층 두께는 0.87, 0.51, 0.25 mm이고, 임계거리 x_c는 49, 28, 14mm이다. 현재 측정영역의 가열면 길이는 30mm이하이므로 단상대류영역에서 낮은 속도인 1.0과 1.7m/s에서는 천이점이 나타나지 않고 난류로의 천이의 시작은 단상대류영역에서 가장 높은 속도인 V_n=3.3 m/s, x/W=7에서만 관찰되었다.

하지만 열전달계수의 분포가 균일하거나 미소한 2차 최대치가 나타나는 상류영역은 임계위치로 간주하고, 균일한 분포를 보이는 영역은 천이과정으로 고려해야 한다. 이는 난류가 경계층의 혼합에 영향을 미치고, 따라서 하류영역에서 벽온도의 증가를 저지하거나, 벽온도의 감소를 가져온다. Vador 등[3]의 연구와 비교하여 본 실험에서 액막의 두께는 상대적으로 작은 값인 약 1W를 보였다[12] 평행류 영역에서 낮은 속도(1.0, 1.7 m/s)와 액막 두께에서 난류로의 천이는 벽온도를 외부의 낮은 유체로 열을 적절히 이송하지 못하게 된다. 따라서 천이에 의한 2차 최대치는 높은 유속인 V_n= 3.3 m/s에서만 관찰된다. 열유속의 증가와 함께 완전발달 비등영역에 도달하게 되어 열전달 계수의 차이는 감소한다. 실제로 q"=295W/cm^2, x/W>2의 발달된 비등영역에서는 미소한 차이를 보이고 있다.

3.4 잠입제트(submerged jet)의 특성

H/W=4인 경우 평행류영역에서 자유수면의 액막두께는 거의 1W에 이르고, 따라서 $H/W \le 1$인 경우 잠입제트의 특성을 보이게 된다. 일반적으로 H/W=1의 구속조건하에서는 노즐 출구속도의 절반

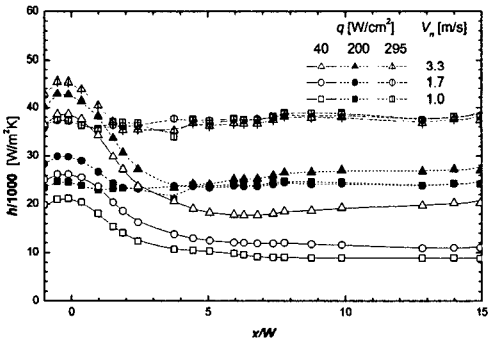


Fig. 5 Velocity effects on convection distributions

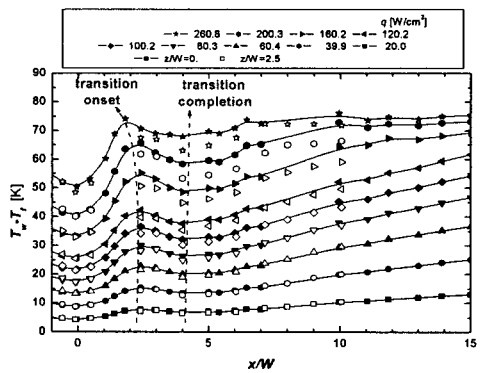


Fig. 6 Temperature distributions for the confined submerged jet at H/W=1 and V_n=3.3 m/s

값을 갖는 양방향으로 진행하는 채널내부유동으로 생각할 수 있다. Fig. 6에는 H/W=1, V_n=3.3 m/s인 경우의 온도분포를 보였다. 오프셋선의 온도는 H/W=4에서와 같이 중심보다 약간 낮은 값을 보인다. 난류경계층 천이는 x/W≅2.5에서 시작되어 x/W≅4에서 종료되어 매우 짧은 영역에서 이루어진다. 이 경우 레이놀드수는 수력직경에 대해서는 21,500이고 2W에 대해서는 24,400이다. Yang 등[13]은 레이놀드수 26,000의 공기에 대해 반원형의 2차원 슬롯제트에 의한 평판 충돌제트 실험을 수행하여, H/W=1인 경우 천이영역은 x/W=3~4에서 시작되어 x/W=6~7에서 완료됨을 보였다. 이때 천이영역의 길이는 3W로 유사한 레이놀드수에서 Fig. 7에 얻어진 길이의 약 2배의 크기이다. 그들의 구속조건은 반원형태로, 존재하지 않는 경우와 유사하다. Yoon 등[14]은 H/d≤1인 경우에 대한 원형 충돌제트 실험에서 노즐벽 두께를 증가시켜 구속조건을 증가시킬 경우 외부의 영향이 전단층에 미치는 영향을 제한하므로 천이영역이 감소함을 보였다. 따라서 본 연구에서 높은 구속조건으로 주변의 액체가 존재하지 않으므로, 짧은 천이 영역을 갖게 된다.

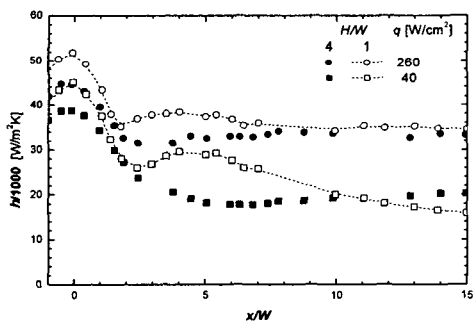


Fig. 7 Comparison of convection coefficient distributions of free-surface (H/W=4) and submerged (H/W=1) jets at V_n=3.3 m/s

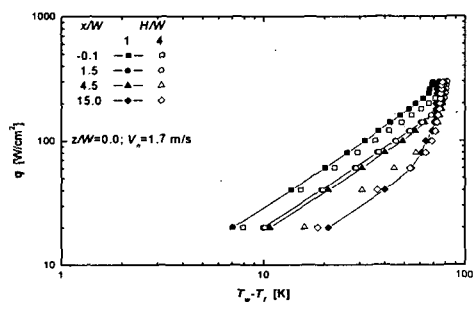


Fig. 8 Boiling curves for the confined planar jet

비등이 충분히 발달한 경우인 q"=260.8 W/cm^{2}에서 기포의 거동에 의해 천이의 시작점은 촉진된다. 그러나 천이 시작점의 위치는 단상대류영역에서는 거의 변하지 않는다. 난류경계층은 천이 이후에 발달하게 되고, 벽온도는 서서히 증가한다. 결과적으로 비등은 가열면의 최하류에서 시작되고 벽온도의 증가는 비등의 발달로 감소되고 균일한 온도분포를 갖는다.

3.5 자유수면과 잠입제트의 비교

자유수면제트와 잠입제트의 열전달계수 분포를 Fig. 7에 비교하였다. H/W=4에서 자유수면의 두께가 약 1W의 크기를 가지므로, H/W=1인 잠입제트와 비교하면, 두 경우의 차이가 자유수면의 존재유무에 의해 발생하는 것인지, 내부 혹은 외부 유동을 형성함에 따라 발생하는 것인지 파악할 수 있을 것이다. 천이 이전 영역에서 열전달계수는 잠입제트에서 약간 낮은 값을 보이지만 그 분포양상은 거의 유사하다. 단상대류영역에서 천이는 x/W≅2.5에서 시작되어 잠입제트는 급속히 종료되지만, 자유수면제트에서 천이는 x/W≅6이상의 하류에서 시작된다. 이는 점성경계층이 잠입제트의 경우 상하의 양면에서 발달하여 난류의 성장을 촉진시키지만, 자유수면제트의 경우 자유전단층에서의 경계층 발달은 거의 존재하지 않고, 가열면에서의 경계층만 발달하므로 난류의 발달은 지연된다. 보다 하류인 x/W>12인 영역에서 잠입제트에서는 천이의 완료이후에도 계속적으로 열전달 계수는 자유수면제트보다 낮다. 비등이 발달한 q"=260 W/cm^{2}에서는 x/W>5인 경우 그 차이는 상당히 감소한다. 그러나 충돌의 강력한 대류효과에 의해 상류영역에서 자유수면과 잠입제트 간의 차이는 유지된다. 이들의 비등곡선은 Fig. 8에 나타내었다. H/W≅1인 경우 x/W=1.5와 4.5에서 비등곡선은 거리상의 차이에도 불구하고 매우 유사하다. 이는 유동거리에 관계없이 비등시작의 지연은 유사함을 보여준다. H/W=1과 4의 x/W<2.0인 경우 유사한 값을 보이며, 앞서 설명한 천이영역의 차이에 의해 x/W=4.5에서는 두 경우의 차이는 커지지만 하류에서는 다시 유사한 값을 보여준다.

4. 결 론

평면충돌제트에서 물을 냉각재로 사용하여 단상과 핵비등 영역에 대한 국소적인 열전달 특성을 고찰하였으며 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 단상대류영역에서 유동방향을 따른 벽온도는 서서히 증가하고, 비등은 열유속이 증가함에 따라 최하류에서 시작된다. 핵비등이 활발히 이루

어지면 열유속의 증가에 비해 벽온도의 증가는 감소한다. 하류에서 발달한 비등은 정체점 영역까지 완전 발달된 비등영역에 도달하면 전 가열면에서 균일한 열전달계수를 보인다.

(2) 노즐출구의 속도를 증가시키면 높은 유속에서는 천이영역이 확연히 나타나고, 기포의 발생과 이에 따른 교란에 의해 열유속이 증가하면 천이의 시작점은 상류로 이동한다.

(3) 사면이 채널과 같은 형태로 구속된 경우 평면제트의 경우 오프셋선상의 온도는 단상과 부분비등 영역에서는 다소차이가 나지만 비등이 발달할수록 감소한다. 하지만 전체적으로 그 차이는 크지 않다.

(4) 잠입제트와 자유수면제트에서 천이 이전 영역에서 열전달 계수는 잠입제트가 약간 낮은 값을 보이지만 그 양상은 비슷하다. 하지만 천이의 경우 잠입제트는 보다 상류에서 시작하여 급속히 종료되며, 자유수면제트는 다소 하류에서 시작된다. 두 경우 모두 완전발달 비등영역에서는 유사한 열전달 계수를 갖는다.

후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정 연구실 사업지원의 결과이며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

(1) Webb, B. W. and Ma, C. -F., 1995, "Single-Phase Liquid Jet Impingement Heat Transfer," *Advances in Heat Transfer*, Vol. 26, No. 5, pp. 105~217.

(2) Wolf, D. H., Incropera, F. P. and Viskanta, R., 1993, "Jet Impingement Boiling," *Advances in Heat Transfer*, Vol. 23, pp. 1~132.

(3) 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.

(4) Wolf, D. H., Incropera, F. P. and Viskanta, R., 1996, "Local Jet Impingement Boiling Heat Transfer," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 39, pp. 1395~1406.

(5) Kamata, T., Kumagai, S. and Takeyama, T., 1988, "Boiling Heat Transfer to an Impinging Jet Spurted into a Narrow Space: Part I, Space with an Open End," *Heat Transfer-Japanese Res.*, Vol. 17, No. 5, pp. 71~80.

(6) Kamata, T., Kumagai, S. and Takeyama, T., 1988, "Boiling Heat Transfer to an Impinging Jet Spurted into a Narrow Space: Part II, Space with a Limited End," *Heat Transfer-Japanese Res.*, Vol. 17, No. 4, pp. 1~11.

(7) Miyasaka, Y. and Inada, S., 1980, "The Effect of Pure Forced Convection on the Boiling Heat Transfer Between a Two- Dimensional Subcooled Water Jet and a Heated Surface," *J. Chem. Eng. Jpn*, Vol. 13, pp. 22~28.

(8) Wadsworth, D. C. and Mudawar, I., 1990, "Cooling of a Multichip Electronic Module by Means of Confined Two-Dimensional Jets of Dielectric Liquid," *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 112, pp. 891~898.

(9) Mudawar, I. and Wadsworth, D. C., 1991, "Critical Heat Flux from a Simulated Chip to a Confined Rectangular Impinging Jet of Di-Electric Liquid," *Int. J. Heat Transfer*, Vol. 34, pp. 1465~1479.

(10) Wolf, D. H., 1993, "Turbulent Development in a Free-Surface Jet and Impingement Boiling Heat Transfer," *Ph.D. Thesis*, Purdue University, West Lafayette, IN, U.S.A. (1993).

(11) Kline, S. J. and McClintock, F. A., 1953, "Describing Uncertainty in Single-Sample Experiments," *Mechanical Engineering*, Vol. 75, pp. 3~8.

(12) Wu, S. J., 2003, "Single-Phase Convection and Boiling Heat Transfer of Confined Impinging Jets," *Ph.D. Thesis*, Yonsei University, Seoul, KOREA.

(13) Yang, G, Choi, M. and Lee, J. S., 1997, "Effects of Slot Jet Width on Jet Flow Structure and Heat Transfer Characteristics for Jet Impingement on Flat Plate," *Proc. KSME 1997 Spring Annual Meeting(B)*, pp. 619~624.

(14) Yoon, S., Yang, G, Sohn, D. and Choi, M., 1999, "An Experimental Study on Heat Transfer and Flow Characteristics of a Circular Impinging Jet on a Flat Plate: Effects of Nozzle Wall Thickness and Nozzle Exit Pressure," *Transactions of the KSME (B)*, Vol. 23, No. 10, pp. 1285~1295.