평면 충돌제트에서 노즐 깃이 단상 및 비등 열전달에 미치는 영향

신창환† · 임성환* · 우성제** · 조형희***

The Effect of Nozzle Collar on Single Phase and Boiling Heat Transfer by Planar Impinging Jet

Chang Hwan Shin, Seong Hwan Yim, Seong Je Wu and Hyung Hee Cho

Key Words : Jet Impingement(충돌제트), Convective Nucleate Boiling(대류핵비등), Planar Jet(평면제트), Free Surface(자유수면), Nozzle Collar(노즐깃)

Abstract

The water jet impingement cooling is one of the techniques to remove heat from high heat flux equipments. We investigate the local heat transfer of the confined water impinging jet and the effect of nozzle collar to enhance the heat transfer in the free surface jet and submerged jet. Boiling is initiated from the furthest downstream and the wall temperature increase is reduced with developing boiling, forming the flat temperature distributions. The reduction in the nozzle-to-surface distance for $H/W \leq 1$ causes the significant increases and distribution changes in heat transfer. Developed boiling reduces the differences in heat transfer for various conditions. The nozzle collar is employed at the nozzle exit. The distances from heated surface to guide plate, H_c are 0.25W, 0.5W and 1.0W. The liquid film thickness is reduced and the velocity of wall jet increase as decreased spacing of collar to heated surface. Heat transfer is enhanced for region from the stagnation to x/W~8 in the free surface jet and to x/W~5 in the submerged jet. For nucleate boiling region of further downstream, the heat transfer by the nozzle collar is decreased in submerged jet compare with higher velocity condition. It is because the increased velocity by collar is de-accelerated at downstream.

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 : 노즐입구에서 냉매 평균온도
T_w : 충돌면의 국소 벽온도
V_j : 노즐 출구에서 냉매 평균속도
H_c : 가열면부터의 노즐 깃 거리
W : 노즐폭
x : 정체점부터의 유동방향 거리
y : 가열면부터의 수직방향 거리
z : 가열면 중심에서 측면방향 거리

하첨자
c : 경계층 천이 시작점의 임계치

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

1. 서 론

고온요소의 냉각을 위한 충돌제트 열전달 기법은 전자장비나 가스터빈 블레이드의 냉각, 제철산업이나 의료, 군사산업 등에 적용되고 있다. 액체를 냉각유체로 사용하는 충돌제트의 경우 공기에 비해 수백배 이상의 높은 열용량을 갖는 반면 장치의 무게나 비용, 제작 등의 면에서 단점을 갖게 된다. 하지만 액체냉매의 상변화에 의해 가열면 온도를 일정하게 유지하기 용이하므로 이에 대한

연구들이 상당히 이루어지고 있다. 비등을 이용한 열전달에 관한 연구로서 수조비등, 강제대류비등에 관한 연구 뿐만 아니라, 보다 높은 고온발열체의 냉각을 위한 분무비등냉각과 충돌제트 비등에 관한 연구들이 이루어지고 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.[3~5] 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 30~300 W/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_c에 의해 층류에서 난류로 천이되는 과정을 보였다. 또한 속도는 부분비등 영역의 열전달에는 영향을 주지만 완전 발달된 영역에서는 거의 영향을 주지 않았다. 그 외 다른 연구들에서는 정체점영역과 평행류영역에서 2~9개의 국속적 열전달 측정을 하였다.[5,6] 또한 충돌제트는 전자장비냉각과 같이 고가의 냉매를 사용하는 많은 응용분야에서 유동 공간의 제약은 피할 수 없다. 이러한 구속조건(confined condition)하에서 가열면과 노즐간 간격은 완전발달 비등영역에서는 그영향이 미미하고, 반면에 간격의 감소가 임계열유속의 증대를 가져옴을 앞선 연구들[5~7]에서 보였다.

본 연구는 과냉수를 냉각유체로 평면충돌제트에 대한 단상 열전달 그리고 부분비등과 완전발달 비등의 핵비등 열전달영역에 대해 채널형태의 구속조건하에서 국소적인 열전달을 측정하고 노즐 끝단의 깃이 열전달에 미치는 영향을 파악하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 실험에서 사용된 장치의 개념도를 Fig. 1에에 도시 하였다. 장치 내의 온도 및 압력을 조절하기위해 냉각코일과 잠입히터가 설치된 두개의 수조가 사용되었으며, 이차 수조는 난용성 기체(non-condensible gas)의 제거와 시험유체의 충전에도 사용된다. 일차적으로 온도가 조절된 시험유체는 주수조에서 나와 기어형 마그네틱 펌프에 의해 이송된다. 유량에 따라 세 개의 체적형 유량계 중 하나를 지나도록 조절된 시험유체는 항온조와 연결된 열교환기를 통과하여 노즐출구의 제트온도를 만족시키며 시험부로 유입된다. 유량은 펌프의 밸브와 시험부 상류의 유량조절밸브 및 펌프조절용 인버터에 의해 조절된다. 충돌면의 중앙에 가열길이 80 mm, 폭 14 mm, 두께 0.467 mm의 인코넬 합금판을 부착하고, 10 kW(20 V, 500 A)직류전원 공급 및 조절장치를 연결하였다.

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 충돌 표면의 뒷면에 중심선을 따라 용접하였다. 후면부로의 열전달 손실을 최소화하기 위해 110 mm두께의 세라믹울 단열재를 채웠다. 충돌면은 가열면을 제외하고 테플론판 180 mm×180 mm로 제작되었다. 시험부에는 폭 2.0 mm, 길이 15.0 mm의 사각단면을 갖는 평면노즐이 부착되며 노즐의 출구까지의 길이는 5W~8W이다. 시험부의 상세도는 Fig. 2에 도시 되어 있다. 노즐은 깃의 역할을 위해 깃과 가열면의 거리 H_c는 0.25W, 0.5W, 1W가 되도록 하였다. 깃의 폭은 노즐 중심으로부터 0.5W ~ 1.5W 이다. 노즐 입구온도와 압력 및 충돌 하류의 수조 압력을 측정하기 위해 열전대와 절대압력계, 차압계를 설치하였다. 온도와 압력측정장치는 에질런트테크놀로지의 데이터 수집장치(34970A)에 의하여 획득된다. 많은 수의 열전대에 대한 온도 보정을 용이하게 하기 위해 열전대와 데이터 수집장치 사이에 등온블럭

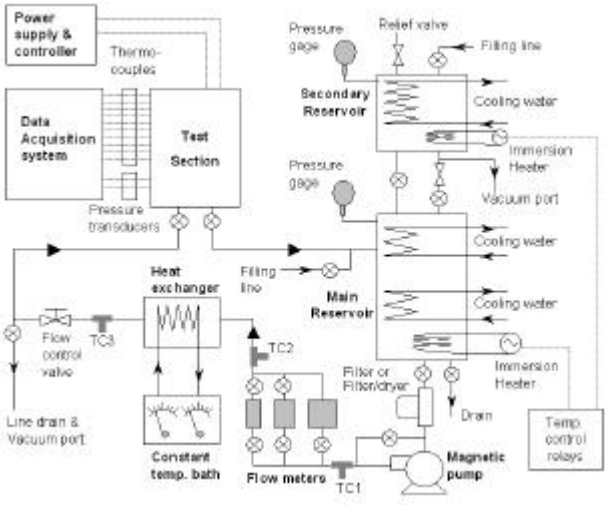

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

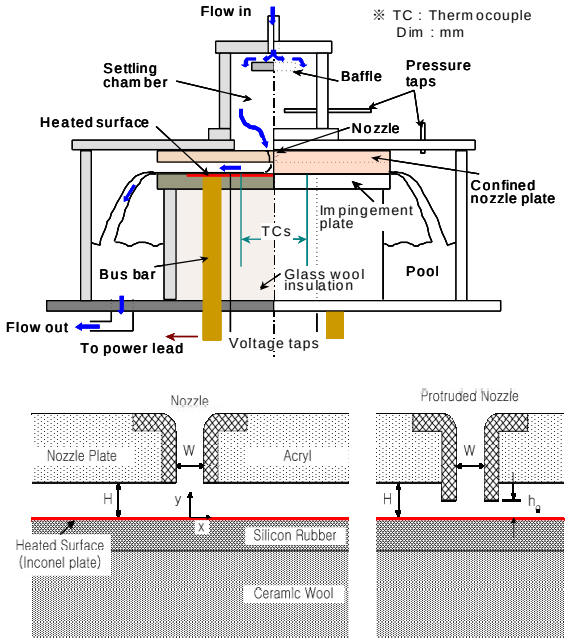

Fig. 2 Schematic of test section

(iso-thermal block)을 설치하여 기준온도로 삼았으며, 등온블럭 온도는 얼음물수조(ice-bath)를 기준온도로 보정하여 사용하였다. 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 평면제트의 냉각수 과냉도 50 K에 대해 구속조건과 자유수면제트, 잠입제트에 대해 수행하였다. 또한 속도의 효과를 고려하기 위해 세가지 속도, V_n =1.0, 1.7, 3.3 m/s로 변화시켰다. 노즐 수력직경에 대해서 레이놀즈수는 4,100, 7,400, 14,100이다. 시험부 상단의 홀을 통해 유동의 하류에서는 압력을 대기압으로 유지시켰다. 실험에서 공급 열유속은 20~294 W/cm^{2}까지 증가시켜, 단상영역에서 완전발달비등영역에 걸쳐 측정하였다. 국소적인 온도는 가열판 후면에 용접된 열전대에 의해 측정되며, 충돌벽면의 온도를 계산하기 위해 유한체적법에 의한 2차원 수치해석과 1차원 전도방정식에 의한 결과 차이는 0.23 K이하 였다. 따라서 열전대에 의한 온도측정결과는 y방향의 1차원 전도로 가정하여 벽온도를 계산하였다.

정상상태 조건을 얻기 위해 노즐입구의 온도와 가열면의 벽온도를 측정하여 일정시간 동안 각각의 온도가 0.3 K의 오차범위내에 도달하면 실험을 시작하였다. 열전대를 가열면에 용접함으로써 유발되는 오차는 Wolf[8]의 실험에서 제시한 방법으로 보정하였다. 열전달계수는 냉각수의 평균온도를 사용하지 않고, 노즐입구의 온도와 벽온도의 차를 사용하여 얻었다. 온도분포를 얻기 위해 각 측정위치에 대해 70 ~ 150개의 데이터들을 획득하고, 이에 대해Kline과 McClintock[9]의 오차해석방법에 적용하여, 벽온도에 대한 오차는 ±1.7 K였다. 열유속은 0.5%의 전도와 복사 손실을 포함하여 3.5%, 열전달계수는 7.6%, 노즐출구에서 평균속도는 1.3%, 레이놀즈수는 2.9%의 오차를 갖는다.

3. 결과와 검토

3.1 자유수면제트에서의 속도에 대한 영향

충돌제트는 유동의 특성상 일반적으로 정체점영역과 가속영역, 평행류영역으로 나누어 고려한다. 이때 정체점에서 가장 낮은 벽면 온도를 보이며 하류로 진행함에 따라 벽면온도는 서서히 증가하며, 층류에서 난류로 천이영역에서 벽온도는 다시 낮아지고 이후 서서히 상승하는 열전달 특성을 가진다. 따라서 하류에서 열유속이 증가함에 따라 벽면의 온도가 증가하여 비등이 서서히 시작되고, 열유속이 보다 커짐에 따라 상류로 그 비등점들이 이동하게 된다. 하지만 정체점영역에서는 여전히 낮은 벽면온도를 보이며, 정체점은 유동의 전압이 모두 가열면에 주어지므로 그 지점에서의 압력은 하류에서의 대기압보다는 높은 압력을 형성하여 물의 포화온도 또한 크게 만들게 된다. 이는 하류에 비해 정체점에서는 높은 열유속에서도 단상을 유지하고, 낮은 벽면온도와 높은 열전달계수를 갖게 한다. 이후 정체점에서도 비등이 시작되면 가열면 전체의 온도는 위치에 상관없이 전체적으로 거의 균일한 온도장을 형성하게 된다. 이러한 비등이 존재하는 충돌제트의 열전달 특성은 Vader 등[3]의 논문에 자세히 설명되어 있으며, 실험도 앞선 그들의 논문에서 제시한 열전달 특성을 잘 반영하고 있음을 확인하였다.[10] 단상영역에서

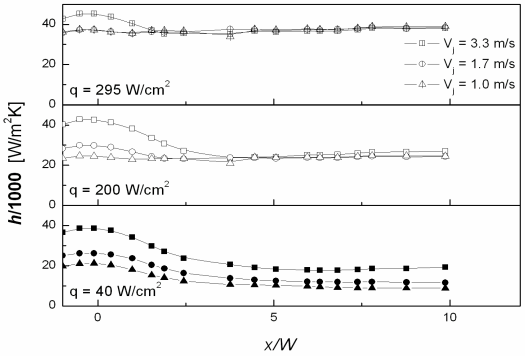

Fig. 3 Velocity effects on convection distributions

열전달은 Pr, Re 의 함수로 충돌제트의 속도가 열전달에 직접적인 영향을 미침을 나타낸다. Fig. 3 에서 q"=40 kW/cm^2 인 단상영역의 경우, 제트의 유속의 변화가 열전달의 향상을 충돌면 전 영역에 걸쳐 보여주고 있다. 하지만 높은 열유속이 가해진 하류에서 비등이 충분히 발달하면 열전달은 유속의 변화와 무관하게 거의 동일한 열전달계수를 보이고 있으며, 열유속이 보다 증가함에 따라 그 영역이 상류로 이동하게 된다. 충돌제트의 속도가 높은 경우 정체점 영역에서 충돌하는 유체는 가열면에 보다 높은 압력을 유발하고, 따라서 냉각수의 포화온도를 상승시켜 현재 실험에서 사용된 가장 높은 열유속에서도 비등이 완전히 발달하지 못하여 유속에 비해 높은 열전달계수를 보이고 있다. 비등이 완전히 발달된 영역에서 열전달계수는 유동속도의 함수가 아니며, 공급되는 열유속에 의해 결정됨은 앞선 많은 논문에서 제시되었다. 일반적으로 비등곡선은 가열면의 온도 과열도에 대한 열유속의 그래프로 표현되지만 Fig. 4 에서와 같이 열유속과 열전달계수의 그래프로도 비등곡선에서 설명한 비등 열전달 특성을 충분히 반영하고 있다. 단상 영역의 경우 열유속의 변화가 열전달계수에 큰 영향을 미치지 못하지만 비등이 시작되어 부분비등 영역에 도달하면 일차 변곡점을 형성하고, 보다 높은 열유속에서는 열전달은 거의 열유속만의 함수로 표현되는 2 차 변곡점이후의 열전달 특성을 보인다. 정체점영역은 하류의 다른 지점의 열전달계수의 변화들과 비교해 볼 때 긴 영역에 걸쳐 단상 열전달 특성을 가지고 있음을 알 수 있다. 또한 정체점영역은 부분비등영역을 거의 거치지 않고 완전발달 비등 영역의 특성을 보이고 있다.

3.2 가열면과 노즐면 간격에 대한 영향

H/W=4이고 자유수면이 존재하는 충돌제트는 원형제트의 경우 원주방향으로 유동이 퍼지게 되어 점점 얇은 액막을 형성하는 반면에 평면제트의 경우 유동의 주방향으로 표면장력의 효과에 의해 하류로 진행함에 따라 거의 일정한 액막을 형성하게 된다. 본 실험은 특히 측면이 모두 막힌 구속조건에 대해 실험을 수행함으로써 거의 일정한 두께의 액막이 평행류 영역에서 형성되며, 단순 계산상으로 두 방향으로 유체가 흘러감으로 노즐폭의 절반 정도의 두께를 가질 것으로 예상할 수 있으나 평균 약 0.8*W*의 두께를 갖는 것으로 측정되었다.[10] 따라서 *H/W*가 1이하인 경우 상부의 노즐면과 하부의 가열면 사이에 표면장력 효과에 의해 *H/W*=1인 경우 *H/W*=4인 잠입제트의 열전달 특성과 거의 유사하게 나타나고 있다. 하지만 유동단면에 대한 평균 유체 온도와 상하단면의 거리가 경계층 발달에 영향을 미치게 됨으로 거리가 좁은 경우 유동장과 온도장의 발달이 빠르게 진행되어 천이영역이 보다 상류에서 시작되어 급속히 하류에서 난류영역으로 진행되는 반면에 *H/W*=4인 잠입제트의 경우 노즐면과 가열면의 간격이 넓으므로 천이가 더디게 진행됨을 Fig. 5에서 알 수 있다. 정체점 영역에서는 노즐 출구에서 가열면과 노즐면의 간격이 좁은 경우 분출되는 유체의 유동과 온도장에서 주변의 유체 혼입이 적으므로 다소 높은 열전달 값을 보이고 있다. 하지만 전체적인 열전달 특성이나 계수 값은 위의 결과와 거의 유사하다고 볼 수 있다. 노즐면과 가열면의 간격을 0.5*W*로 좁게 한 경우 기존에 자유수면에서 형성

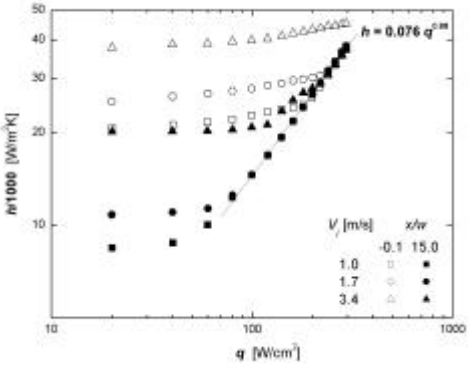

Fig. 4 Boiling Curve : Convection coefficient versus Heat flux

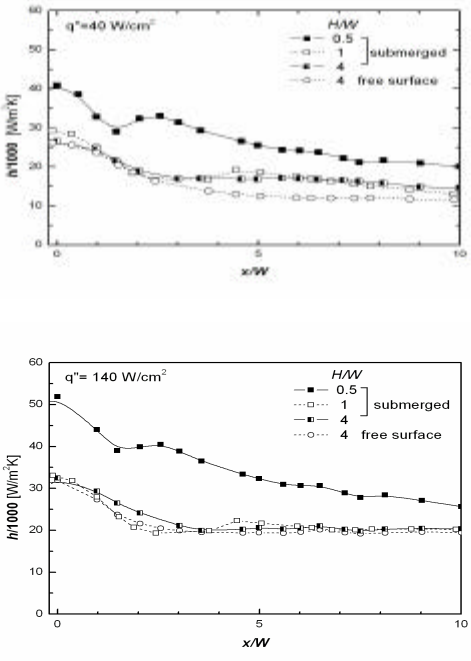

Fig. 5 Effect of spacing for the submerged and free surface jet

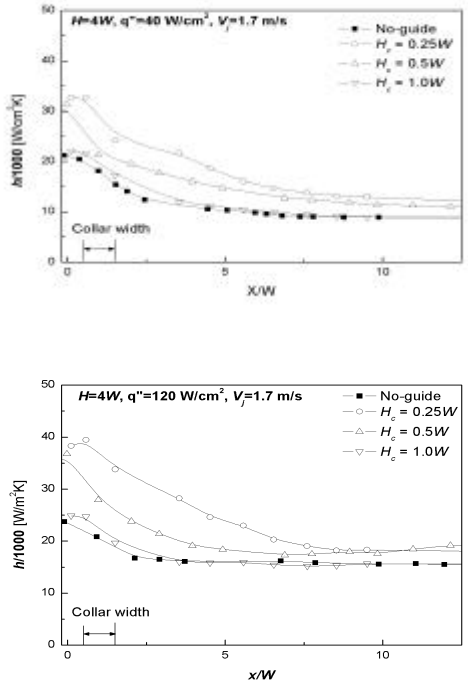

Fig. 6 Nozzle collar effect with free surface jet

되는 액막의 두께이하로 유로를 줄이게 되고 이는 유동의 속도 증가를 가져오게 된다. 이는 앞서 자유수면이 존재하는 경우의 속도변화에서 설명한 바와 같이 단상 영역에서는 높은 열전달 효과를 보여주고 있다. 또한 증대된 속도의 영향은 천이 영역을 보다 상류에서 시작하고 급속히 난류로 천이 시키는 열전달 특성을 나타나게 한다. Fig. 5의 보다 높은 열유속 조건에서는 자유수면의 존재유무나 가열면과 노즐면 간격의 효과는 전 영역에 대해 거의 유사한 열전달 계수를 보여줌으로 결국 비등이 진행되고 있음을 반증하고 있다. 하지만 H/W=0.5인 경우 증대된 유속이 가열면에 형성되는 기포의 생성을 억제하거나 비등의 발달을 지연시키게 됨으로 여전히 높은 열전달계수를 보이고 있다.

3.3 자유수면에서 노즐 깃의 영향

잠입제트에 대하여 가열면과 노즐면 간격이 좁아짐에 따라 열전달이 증대됨을 앞서 보였다. 여기서는 자유수면을 유지하고 액막을 얇게 하여 유속을 증대시키기 위한 방법으로 노즐출구의 끝단에 유동방향에 대해 1W의 폭을 갖는 깃을 형성하여 자유수면이 존재하는 경우 액막의 두께의 변화와 유속의 변화가 열전달에 미치는 영향을 파악하였다. 정체점 영역이후 주변에서 혼입되는 유체를 깃을 통해 차단하고, 가속영역에서는 좁은 간격을 형성하게 하여 높은 유속을 얻고, 이로 인해 얇은 액막이 형성되게 하는 것이 본 실험에 사용된 깃의 역할이다. 정체점영역에서 깃은 주변에서 혼입되는 유체를 차단함으로 깃이 없는 경우에 비해 높은 열전달계수를 보이고 있다. Fig. 6에서 알 수 있듯이 깃이 설치됨으로 인해 정체점영역에서는 잠입제트 조건하의 가열면과 노즐면 간격의 효과가 적용되어 상당히 높은 열전달 영역을 얻게 되었으며, 깃에 의해 증대되는 유속의 가속영역이 상당한 하류에 까지 영향을 미침으로 단상과 부분비등영역에 걸쳐 높은 열전달 얻을 수 있었다. 유속의 증대효과는 하류영역까지는 영향을 미치지 못하여 깃의 영향이 하류에서는 크지 않음을 알 수 있었다.

3.4 잠입제트에서 노즐 깃의 영향

Fig. 7은 잠입제트에서 노즐깃이 열전달에 미치는 영향을 나타내고 있다. 잠입제트에서 노즐 깃은 깃 이후의 유속증대와 난류촉진기의 역할을 하게 된다. 정체점 영역에서는 깃에 의해 노즐에서 분출된 제트가 주변의 유체와 차단되어 노즐 출구의 정체점영역에서 유체온도가 높은 열전달 효과를 가져오며, 가속영역에서는 깃이 유속의 증대를 가져옴으로써 난류의 발달을 촉진시키고, 이후의 하류영역에서는 높은 유속조건의 결과와 유사한 값을 보이고 있다. 이는 잠입제트의 경우 낮은 유량에서도 높은 유속의 효과를 가져오는 열전달 향상이 이루어 짐을 보여주는 것이다. 열유속이 높아 비등이 발달하기 시작하는 영역에서는 깃의

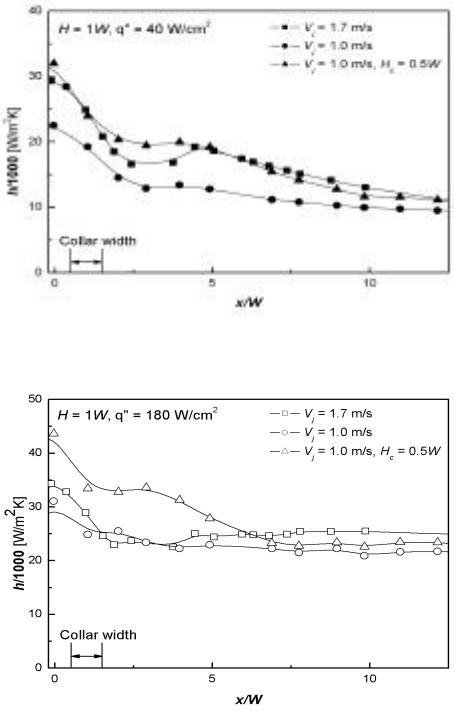

Fig. 7 Nozzle collar effect with submerged jet

효과는 보다 큰 열전달 향상을 가져온다. 정체점 영역에서 뿐만 아니라, 기존의 단순 노즐에 비해 가속영역을 길게 가져감으로써 높은 유속인 경우에 비해 높은 열전달 효과를 x/W=5까지 얻을 수 있음을 보여준다. 하지만 깃에 의한 열전달 향상은 하류 영역에서는 높은 유속조건에 비해 낮은 값을 보이는데 이는 깃에 의해 감소된 유로에 의해 가속된 유동의 벽제트가 하류로 진행하면서 감쇠되어 하류영역에서 열전달은 높은 유속조건에 비해 낮은 값을 보이는 것으로 설명될 수 있다

4. 결 론

본 실험은 물을 냉각유체로한 구속된 충돌제트에 대한 열전달 특성을 단상영역과 비등영역에 대해 국소적으로 측정하고, 또한 노즐의 끝단에 깃을 형성하여 그에 따른 열전달 향상을 얻었다.

(1) 자유수면제트의 경우 하류에서 시작된 비등이 상류로 전파되고, 각 지점에서의 열전달은 단상, 부분비등, 완전발달비등으로 진행되는 일반적인 비등 열전달 특성을 보이고, 정체점 영역에서는 부분비등영역이 거의 없이 완전발달비등 영역의 특성을 보인다. 잠입제트의 경우 H/W=4에서의 열전달계수는 노즐과 가열면의 간격을 거의 액막의 두께인 H/W=1인 경우와 비교하여 상 하단의 경계층발달의 차이에도 불구하고 거의 유사한 값을 보였다.

(2) 자유수면제트에서 노즐끝단에 깃을 설치하여 이에 의해 형성되는 액막의 두께를 얇게하고, 유속을 증대시켜 높은 열전달특성을 갖도록 하였다. 이때 H/W=4이며 깃의 간격, H_c/W=1인 경우는 액막의 높이와 유속이 거의 유사함으로 그 열적 특성 또한 유사하며, 반면에 깃을 액막의 높이 이하로 설치한 H_c/W=0.5와 0.25의 경우는 높은 열유속 조건하에서도 x/W~8까지 낮은 벽면온도를 유지함을 알 수 있었다.

(3) 잠입제트의 경우 깃은 난류촉진기의 역할을 하여, 층류에서 난류로의 천이를 촉진시켜 깃이 없는 경우에 비해 x/W~5까지의 영역에 걸쳐 높은 열전달을 보이며, 이 값은 높은 유속의 경우와 거의 유사하였다. 하지만 그 이후의 하류에서는 깃에 의해 유발된 유속의 증대가 하류로 진행함에 따라 감쇠 되어 높은 유속조건에 비해 낮은 열전달 특성을 보였다. 따라서 액체충돌제트의 경우 깃에 의해 일정하류영역에서는 적은 유량으로 높은 열전달을 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

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) 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.

(7) 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.

(8) 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).

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

(10) Wu, S. J., 2003, “Single-phase Convection and Boiling Heat Transfer of Confined Impinging Jets,” *Ph.D. Thesis*, Yonsei University, Seoul, KOREA.