

# 액체 충돌제트의 표면조도변화에 따른 이상유동 열전달 특성

임 성 환, 신 창 환, 조 형 희<sup>†</sup>

연세대학교 대학원 기계공학과, \*연세대학교 기계공학과

## Effect of Surface Roughness on Two-Phase Flow Heat Transfer by Confined Liquid Impinging Jet

Seong Hwan Yim, Chang Hwan Shin, Hyung Hee Cho<sup>†</sup>

Graduate School of Mechanical Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

\*School of Mechanical Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

(Received February 24, 2005; revision received May 27, 2005)

**ABSTRACT:** The water jet impingement cooling with boiling is one of the techniques to remove heat from high heat flux equipments. The configuration of surface roughness is one obvious condition of affecting the performance on heat transfer in nucleate boiling. The present study investigates the water jet impinging single-phase convection and nucleate boiling heat transfer for the effect of surface roughness to enhance the heat transfer in free surface and submerged jet. The distributions of the averaged wall temperature as well as the boiling curves are discussed. Jet velocities are varied from 0.65 to 1.7 m/s. Surface roughness by sand blast and sand paper varies from 0.3 to 2.51  $\mu\text{m}$  and cavity shapes on surface are semi-circle and v-shape, respectively. The results showed that higher velocity of the jet caused the boiling incipience to be delayed more. The incipient boiling and heat transfer increase with increasing surface roughness due to a large number of cavities of uniform size.

**Key words:** Confined jet(구속제트), Surface roughness(표면거칠기), Free surface(자유표면), Submerged jet(잠입제트), Jet impingement(충돌제트)

### 기 호 설 명

$D_h$  : 노즐 수력직경 [mm]

$H$  : 노즐과 가열면 사이의 거리 [mm]

Pr : Prandtl 수,  $\nu/a$

$q''$  : 열 유속 [ $\text{W}/\text{cm}^2$ ]

$R_a$  : 평균 표면거칠기 [ $\mu\text{m}$ ]

Re : Reynolds 수,  $V_n D_h / \nu$

$T_f$  : 노즐 입구에서 유체 평균 온도 [K]

$T_w$  : 충돌면의 벽온도 [K]

$V_n$  : 노즐 출구에서 유체 평균 속도 [m/s]

$W$  : 노즐 폭 [mm]

$x$  : 정체점부터의 유동방향 거리 [mm]

$y$  : 가열면부터의 수직방향 거리 [mm]

$z$  : 가열면 중심에서 측면방향 거리 [mm]

### 그리스 문자

$\alpha$  : 열확산계수 [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

<sup>†</sup> Corresponding author.

Tel.: +82-2-2123-2828; fax: +82-2-312-2159

E-mail address: hhcho@yonsei.ac.kr

$\nu$  : 동점성계수 [ $\text{m}^2/\text{K}$ ]

## 1. 서 론

증돌제트는 증돌면에서 국소적으로 높은 열전달 및 물질전달 효과를 얻을 수 있기 때문에 고온발열체의 냉각에 효과적으로 이용되어 왔으며, 제철산업, 전자장비 냉각 등에 사용되고 있다. 일반적으로 증돌제트 냉각방법에 있어 냉각유체로 여러 면에서 우수한 공기를 사용하지만, 냉각재로서 공기는 고온부의 열을 제거할 수 있는 열용량의 한계를 갖게 된다. 이에 비하여 액체를 냉각유체로 사용하는 경우 공기에 비해 수백배 이상 열용량을 갖는 장점이 있다. 또한 단상에서 뿐만 아니라 비등을 이용하게 되면 가열면의 온도를 일정하게 유지하기 용이하므로 많은 연구들이 이루어지고 있다. 단상의 액체 증돌제트에 의한 열전달에 관한 연구들<sup>(1)</sup>이 다양한 유동변수에 대해 수행된 반면, 비등에 관한 연구는 평균 열전달 관점에서 임계열유속(CHF)에 관한 많은 연구들이 이루어졌으며,<sup>(2)</sup> 이에 부수적으로 핵비등 영역을 다루고 있다. 특히 증돌제트의 국소적인 핵비등 열전달 측정은 제한적인 연구만이 이루어졌다.<sup>(3,5)</sup> 과냉 대류비등은 부분비등과 완전발달 비등 영역으로 크게 나눌 수 있다. 완전발달 비등 영역에서 유동속도, 과냉도, 노즐형상과 같은 대표적인 유동변수들의 영향이 거의 나타나지 않지만, 부분비등 영역에서는 단상과 핵비등 영역이 동시에 존재하며, 유동변수들이 영향을 미치게 된다.

증돌제트에서 부분비등의 국소적인 열전달 측정은 Vader et al.<sup>(3)</sup>과 Wolf et al.<sup>(4)</sup>의 연구 외에는 거의 이루어지지 않았다. 그들은 자유수면을 갖는 과냉수 평면 증돌제트에 대해 실험을 수행하고, 유동의 경계층은 기포에 의한 교란과 평판의 임계 레이놀즈수  $Re$ 에 의해 층류에서 난류로 천이되는 과정을 보였다. 또한 열전달을 향상시키는 방법들이 다양하게 연구되고 있으며, 표면거칠기의 대한 연구도 그 중 하나이다. 표면거칠기에 대한 연구는 수백나노에서 수십마이크로 스케일의 다양한 범위에서 연구되고 있으며, 공동형상에 관한 연구도 진행되고 있다. 비등열전달에 있어 표면거칠기에 대한 연구로 자연대류비등 열전달 특성과 원형관 내의 강제대류비등 열전달

특성에 대해서는 많은 연구가 이루어졌다. 자연대류에 관한 연구로 Gabour and Lienhard<sup>(6)</sup>은 단상 영역에서의 표면거칠기에 대한 열전달 특성을 연구하였고, 자연대류 비등열전달에 대한 표면거칠기에 대한 연구는 Corty et al.<sup>(7)</sup>에 의해 이루어졌다. 이들은 표면에 그루브(groove)와 스크래치(scratch)를 사용하여 표면거칠기에 대한 실험을 하였고, Vachon et al.<sup>(8)</sup>과 Marto et al.<sup>(9)</sup>이 니켈과 구리를 디스크 형태로 가공하고 표면처리하여 질소액체에서 실험하였다. 이들은 표면의 거칠기 변화가 많은 수의 공동과 잠재적으로 많은 핵공을 제공하며 이러한 공동과 핵공은 균일한 기포핵이 성장할 수 있는 기반이 됨을 보였다. 하지만 액체 증돌제트에서의 표면거칠기 효과에 대한 연구는 Mudawar et al.<sup>(5)</sup>의 연구 외에는 거의 이루어지지 않았다.

본 연구는 과냉수를 냉각유체로 사용하여 증돌제트에 대한 단상 및 부분비등과 완전발달비등의 핵비등 열전달영역에 대해 채널형태의 구속조건 하에서 표면거칠기에 따른 평균 열전달 특성을 고찰하고, 노즐 출구속도변화와 자유수면제트 및 잠입제트에 의한 효과 등이 열전달에 미치는 영향을 파악하고자 하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

본 실험에서 사용된 장치의 개념도를 Fig. 1에 도시하였다. 장치 내의 온도 및 압력을 조절하기 위해 냉각코일과 잠입히터가 설치된 두 개의 수조가 사용되었으며, 이차 수조는 난용성 기체(non-condensable gas)의 제거와 시험유체의 충전에도 사용된다. 일차적으로 온도가 조절된 시험유체는 주 수조에서 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 인버터에 의해 조절된다. 시험부에는 폭 2.0 mm, 길이 15 mm의 사각단면을 갖는 평면 노즐이 부착되며 노즐의 출구까지 거리는 5~8 W이다. 시험부 증돌면은 중앙에 길이 40 mm, 폭 1.4 mm의 구리블록을 사용하

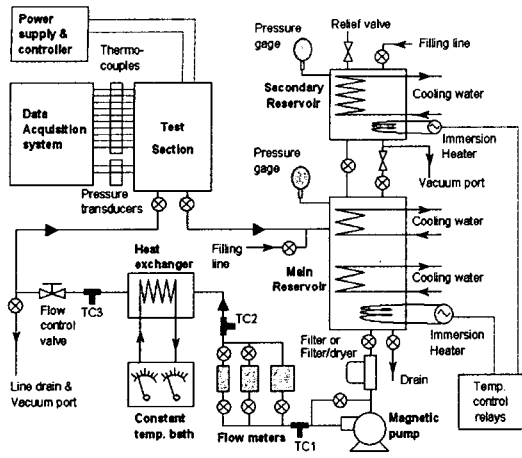


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

였으며, 구리블록 하단으로부터 길이 50 mm, 지름 10 mm의 300 W의 카트리지 히터 6개(1.8 kW)를 병렬연결하고 3kW(300 V, 10 A) 직류전원을 공급하였다. 가열면의 벽온도를 측정하기 위하여 총 5개의 K-type 열전대를 충돌면과 1 mm 아래에 열전대가 중앙에 위치할 수 있도록 하였으며, 열전대는 각각 구리 에폭시를 사용하여 고정시켰다. 또한 가열면의 표면거칠기에 따른 열전달 특성을 고찰하기 위해 샌드블라스트(sandblast)와 사포를 이용하여, 표면거칠기 0.3~2.5  $\mu\text{m}$ 를 갖도록 구리블록을 각각 제작하였다. 표면거칠기의 측정에는 비접촉식 3차원 조도측정기를 이용하여 측정하였으며 각 샌드블라스트와 사포에 따른 표면거칠기는 Table 1에 중심선 표면 평균 거칠기( $R_a$ )로 나타내었다. 중심선 표면 평균 거칠기는 거칠기 곡선에서 그 중심선의 방향으로 측정길이 부분을

Table 1 Surface roughness measured by profilometer

Sand paper/Sandblast No	Roughness average ( $\mu\text{m}$ )
Smooth (#1)	0.30
No. 800 (#2)	0.64
No. 600 (#3)	0.87
No. 400 (#4)	1.49
No. 100 (#5)	2.51
Sandblast (#1)	1.34
Sandblast (#2)	2.39

채취하고, 이 채취부분에 대해 중심선을 X축, 세로배율의 방향을 Y축으로 하였을 때, 거칠기 곡선에 대해 평균한 값을 나타낸다. 이러한 중심선 평균 거칠기값의 사용은 가공된 표면의 거칠기를 나타낼 때 보통 사용되며 안정적이고 쉽게 적용될 수 있는 변수이다. 구리블록으로부터의 열전달 손실을 최소화하기 위해 블록 주변을 220 mm 두께의 세라믹 단열재를 채웠으며, 후면부로는 10 mm 두께의 세라믹 판과 150 mm 두께의 세라믹 단열재를 채웠다. 충돌면은 가열면을 제외하고 180 mm×180 mm의 테프론판으로 제작되었다. 시험부의 상세도는 Fig. 2에 도시되어 있다. 노즐 입구온도와 압력 및 충돌면 하류의 수조 압력을 측정하기 위해 열전대와 절대 압력계, 차압계를 설치하였으며 온도와 압력 측정장치는 데이터 수집장치(34970A)에 의하여 획득된다. 열전대에 대한 온도보정을 용이하게 하기 위해 열전대와 데이터 수집장치 사이에 등온블록(iso-thermal block)을 설치하여 기준온도로 삼았으며, 등온블록 온도는 얼음물수조(ice-bath)를 측정하여 기준온도로 보정하였다. 실험의 편의상 좌표계의 설정은

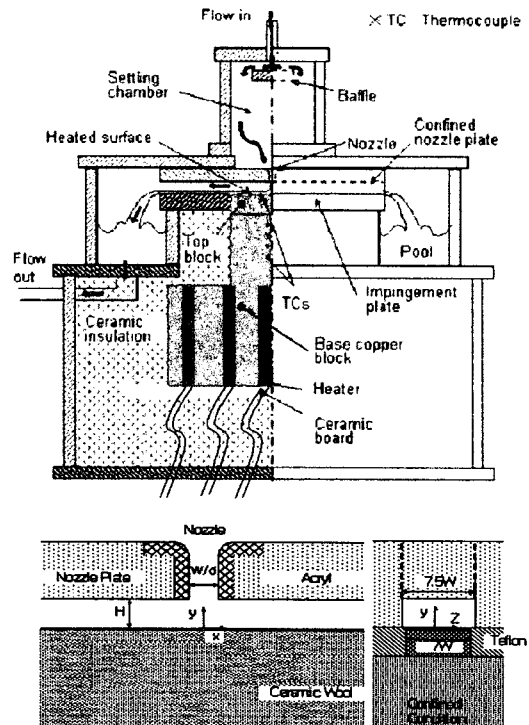


Fig. 2 Schematic of test section.

Fig. 2에 나타난 바와 같이 가열면의 따른 유동방향을  $x$ , 가열면으로부터 거리를  $y$ , 중심선에서 수직한 방향을  $z$ 로 하였다.

## 2.2 실험방법

실험은 평면제트에 대해 냉각수의 과냉도 50 K로 고정하고, 가열면과 노즐의 간격은  $H/W=1.4$ 에 대해 수행하였으며, 또한 속도의 효과를 고려하기 위해 세 가지 노즐 출구의 속도  $V_n=0.65, 1.0, 1.7$  m/s로 변화시켰다. 이때 노즐 수력직경,  $D_h=3.53$  mm에 대해서 레이놀즈수는 2,400, 4,100, 7,400이다.

본 실험에서 측면이 모두 막힌 구속조건에 대해 실험을 수행하였으며, 거의 일정한 평행류 영역이 형성되었다. 구속에 의해  $H/W=1$ 에서 잠입제트의 특성을 보인다는  $Wu^{(10)}$ 의 연구결과를 바탕으로  $H/W=1$ 인 경우를 잠입제트로 가정하였다. 시험부 상단의 홀을 통해 유동 하류에서의 압력을 대기압으로 유지하였으며, 실험에서 공급되는 열유속은 20~220 W/cm<sup>2</sup>까지 증가시켜 단상에서 비등 영역까지 측정하였다. 온도측정은 측정면으로부터 1 mm 아래에 고정된 열전대에 의해 측정되었으며, 충돌 벽면 온도를 계산하기 위해 유한체적법에 의한 2차원 수치해석과 1차원 전도방정식에 의한 결과를 비교하였고, 결과차이

가 0.23 K 이하였기 때문에 열전대에 의한 온도 측정 결과를  $y$ 방향의 1차원 전도로 가정하여 벽 온도를 계산하였다. 이를 통해 얻은 5개의 벽 온도를 면적 평균하여 각 열유속에 대한 평균 온도를 얻었다. 정상상태 조건을 얻기 위해 노즐 입구의 온도와 가열면의 벽온도를 측정하여 일정시간 동안 각각의 온도가 0.3 K의 오차범위 내에 도달하면 실험을 시작하였다. 온도분포를 얻기 위해 각 측정위치에서 70~150개의 데이터들을 획득하였고, 이에 대해 Kline and McClintock<sup>(12)</sup>의 오차해석방법에 적용하여, 벽온도에 대한 오차는  $\pm 1.98$  K였다. 열유속은 0.5%의 전도와 복사 손실을 포함하여 3.5%, 노즐 출구에서 평균 속도는 1.3%, 레이놀즈수는 2.9%의 오차를 갖는다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 노즐 출구속도에 대한 영향

Fig. 3은 구속조건 하에서 자유수면이 존재하며,  $H/W=4$ 이고, 노즐 출구에서의 속도  $V_n=1.0$  m/s 경우의 충돌면에서의 국소적으로 측정된 온도값을 면적 평균한 값<sup>(9)</sup>과 구리블록에서 측정된 평균 온도값을 면적 평균하여 도시하였다. Fig. 3에서 국소적으로 측정하여 면적 평균한 온도값이 구리블록의 평균 온도값보다 ( $\Delta T_f \leq 2.5$  K) 높게

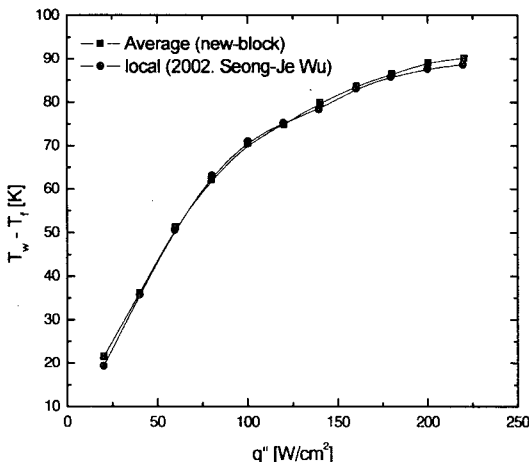


Fig. 3 Averaged wall temperature distributions between the local and the block measurements.

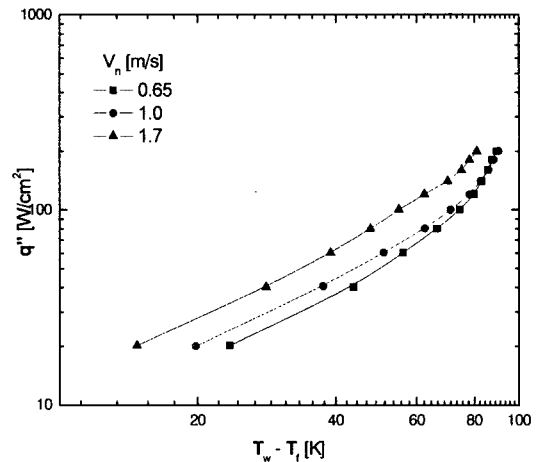


Fig. 4 The effect of velocity in free surface jet ( $H/W=4$ ).

나타남을 알 수 있다. 이는 측정경계조건인 일정 열유속조건과 일정온도조건의 차이로 설명될 수 있으며, 일반적인 일정열유속조건과 일정온도조건 오차는 5% 미만이다. 따라서 본 실험에서 측정된 온도차는 오차범위 안에 있음을 알 수 있다. 이는 평균 온도측정을 통하여서 가열면 평균 단상 및 비등 열전달 특성을 대변할 수 있음을 나타낸다. Fig. 3에서는 열유속이 60~80 W/cm<sup>2</sup>인 영역을 전·후로 유체의 특성이 변하는 것을 확인할 수 있다.  $q'' \leq 60 \sim 80 \text{ W/cm}^2$  이하인 영역은 열유속이 증가함에 따라 선형적으로 벽온도가 증가하는 단상영역을 나타내고 있으며,  $q'' \geq 60 \sim 80 \text{ W/cm}^2$  인 영역부터는 벽온도 증가가 점차적으로 감소하는 비등 영역을 나타내고 있다.

Fig. 4는 노즐속도에 대한 평균 열전달 특성을 나타낸 것이다. 단상영역의 경우 제트의 유속의 변화가 열전달의 향상을 충돌면의 전 영역에서 걸쳐 나타나지만 높은 열유속이 가해지면 점차적으로 비등이 시작되며 열전달은 유속의 변화와 무관하게 거의 동일하게 나타나게 된다. 이는 Vader et al.<sup>(3)</sup>의 연구결과에서 제시되었다. 노즐의 출구 속도가  $V_n = 0.65, 1.0 \text{ m/s}$ 인 경우 높은 열유속에서는 비등의 진행과정에 따른 높은 열전달에 의해 속도의 효과가 사라지고 유사한 열전달 크기를 갖는 반면, 출구속도가 1.7 m/s인 경우 높은 출구속도로 인해 정체점에서의 높은 열전달 성능을 보이고 빠른 유속으로 인해 비등이 일어날 만큼의 에너지를 얻지 못하여 높은 열유속 조건 하

에서도 단상 열전달 영역이 유지되어 열전달 효과가 상대적으로 감소하였다.

### 3.2 자유수면제트에서의 표면거칠기 특성

Fig. 5는 구속조건하에서 자유수면이 존재하며,  $H/W=4$ 이고, 노즐 출구에서의 속도  $V_n=1.0 \text{ m/s}$  경우의 표면거칠기에 따른 열유속과 온도차의 관계를 나타내고 있다. Fig. 5에서 표면의 거칠기가 증가할수록 단상에서는 열전달의 큰 차이가 없지만 비등 영역에서는 열전달이 향상됨을 알 수 있다. 이는 두 가지 요인으로 설명될 수 있다. 먼저 표면의 거칠기가 가열면의 많은 공동들을 기포핵으로 성장할 수 있도록 효율적인 핵생성 지점으로 활성화시키기 때문이다. 즉, 표면의 거칠기가 증가할수록 비등을 촉진시키는 활성 핵공이 증가하기 때문이다. 또한 거칠기가 증가할수록 기포와 액체의 경계면 사이에서 각(접촉각)이 커지기 때문에 입계 기포핵의 생성을 위한 자유에너지가 감소하여 보다 낮은 과열도에서 핵이 생성되고 성장하기 때문이다. 공동이나 홈의 입구부의 크기가 기포가 생성될 수 있는 과열도를 결정한다는 것은 Griffith and Wallis<sup>(11)</sup>에 의해 밝혀진 바 있다.

### 3.3 잠입제트에서의 표면거칠기 특성

Fig. 6은 구속조건 하에서  $H/W=1$ 인 잠입제트에서 노즐의 출구속도  $V_n=1.0 \text{ m/s}$ 인 경우에 대

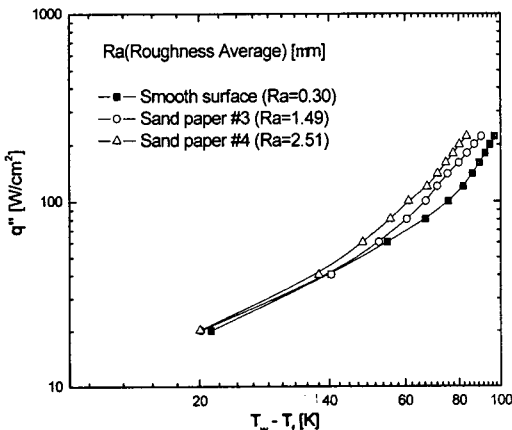


Fig. 5 Effect of surface roughness with free surface jet ( $H/W=4, V_n=1.0 \text{ m/s}$ ).

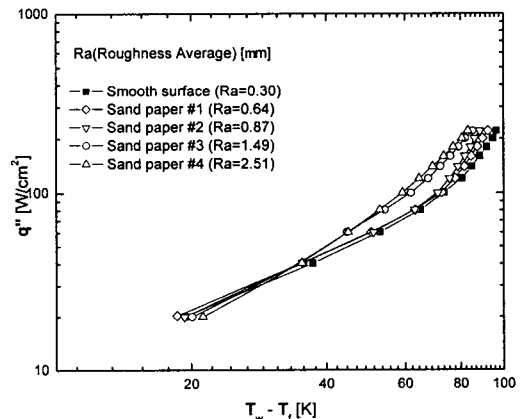


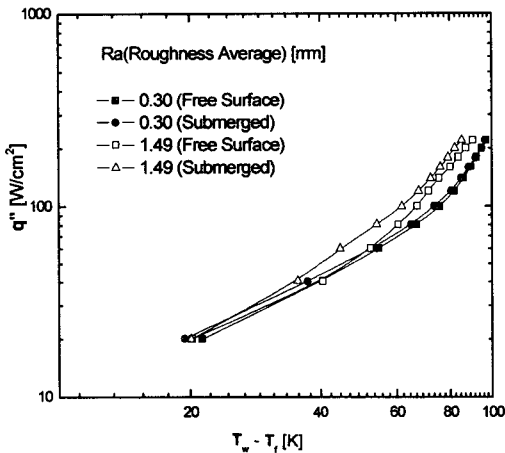
Fig. 6 Effect of surface roughness with submerged jet ( $H/W=1, V_n=1.0 \text{ m/s}$ ).

해 표면거칠기에 따른 열유속과 온도차의 관계를 나타내고 있다. 일반적으로  $H/W=4$ 인 경우 평행류 영역에서 자유수면의 액막 두께는 거의 1W에 이르고, 따라서  $H/W=1$  이하의 경우는 잠입제트 특성을 보인다. 또한  $H/W=1$ 의 구속조건 하에서는 출구속도의 절반값을 갖는 양방향으로 진행되는 채널내부유동으로 생각할 수 있다.<sup>(9)</sup> 따라서 난류경계층 천이는 매우 짧은 영역에서 이루어지는 유동특성을 보인다. 잠입제트에서 표면의 거칠기의 효과는 자유수면제트와 마찬가지로 단상보다 비등 영역에서 열전달 향상을 보이며, 이는 앞서 자유수면제트에서의 거칠기 증가에 따른 비등영역에서의 열전달 향상요인과 마찬가지로 표면의 거칠기가 가열면의 많은 공동들을 기포핵으로 성장할 수 있도록 효율적인 핵생성 지점으로 활성화시키기 때문이다.

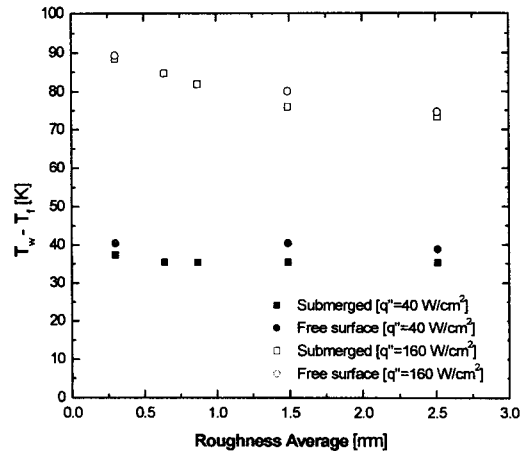
**3.4 표면거칠기에 따른 자유수면제트와 잠입제트의 열전달 특성 비교**

Fig. 7은 노즐 출구에서의 속도가  $V_n=1.0$  m/s인 경우 표면거칠기에 따른 잠입제트와 자유수면제트의 열전달 특성을 비교한 비등곡선을 나타내고 있다. Fig. 7(a)에서와 같이 단상과 비등영역에 있어 잠입제트의 경우 높은 열전달 특성을 보이고 있다. 이는 단상대류 영역에서 점성경계층이

잠입제트의 경우 상하의 양면에서 발달하여 난류의 성장을 촉진시키지만, 자유수면제트의 경우 자유 전단층에서의 경계층 발달은 거의 존재하지 않고, 가열면에서의 경계층만 발달하므로 난류의 발달은 지연되기 때문에 상대적으로 낮은 열전달 특성이 나타난다. 또한 비등 영역에 있어서는 표면의 거칠기가 증가함에 따라 균일한 활성 핵공을 생성하고, 층돌에 의한 강력한 대류효과에 의해 보다 빠르게 기포를 가열면으로부터 이탈시키기 때문에 자유수면과 잠입제트간의 차이는 유지된다. Fig. 7(b)는 단상( $q''=40$  W/cm<sup>2</sup>)과 비등 영역( $q''=160$  W/cm<sup>2</sup>)에서의 표면거칠기에 대한 가열면의 벽온도차로 나타난 열전달 특성을 보여주고 있다. 단상과 비등 영역에 있어 모두 잠입제트의 경우가 난류성분이 빠르게 촉진되어 벽면의 온도가 낮게 나타나게 되어 열전달이 높게 나타났다. 단상의 경우 표면의 거칠기에 따른 영향은 거의 없지만 비등 영역에서는 거칠기가 증가할수록 높은 열전달 특성을 얻었다. 또한 표면의 거칠기가  $R_a \geq 1 \mu\text{m}$ 이면 비등영역에서 자유수면제트와 잠입제트에서 열전달 차이가 크지 않음을 알 수 있다. 이는 고체 표면의 공동이 너무 크게 되면 공동 내에 액체가 침입하여 완전히 적시게 되고, 핵이 생성될 수 있는 활성 핵공이 감소하기 때문이다.



(a) Boiling curve for various surface roughness: free surface versus submerged jet

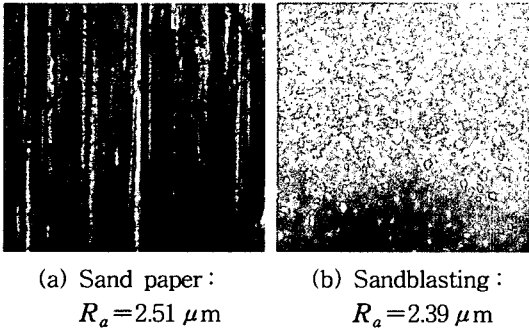


(b) Wall temperature for various surface roughness

Fig. 7 Comparison of temperature distribution for free surface and submerged jet.

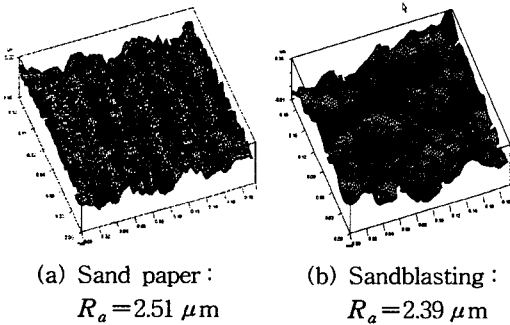
3.5 표면거칠기 형상에 따른 열전달 특성

Fig. 8은 표면거칠기의 형상을 3차원 비접촉식 조도측정기를 통해 얻은 사진이다. 사진에서 알 수 있듯이 각각의 두 경우에 대해 거칠기는 거의



(a) Sand paper :  $R_a = 2.51 \mu m$   
 (b) Sandblasting :  $R_a = 2.39 \mu m$

Fig. 8 Photograph of surface roughness.



(a) Sand paper :  $R_a = 2.51 \mu m$   
 (b) Sandblasting :  $R_a = 2.39 \mu m$

Fig. 9 Cavity shape.

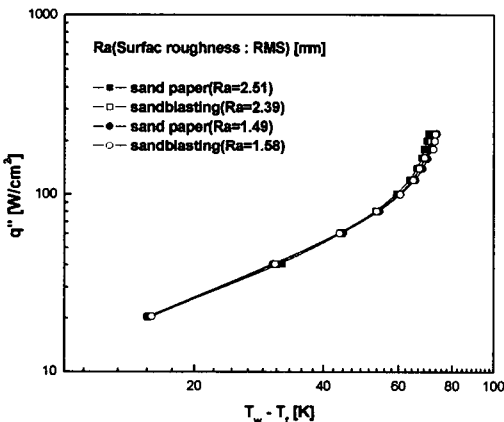


Fig. 10 Boiling curve for cavity shape at  $H/W = 4$ ,  $V_n = 1.0$  m/s.

같지만 표면의 형상은 3차원적으로 사포로 가공했을 때 V형상과 샌드블라스트를 사용한 경우 반구형임을 Fig.9를 통해 알 수 있다. Fig.9(a)는 사포를 사용한 경우이며, Fig.9(b)는 샌드블라스트를 사용하여 구리블록 표면에 거칠기를 얻은 것이다. 같은 표면거칠기를 갖더라도 표면의 공동의 형상에 따라 기포핵이 성장하여 공동으로부터 이탈하는 조건의 차이가 있다. Fig.10은 기포의 형상과 거칠기의 크기에 따른 열전달 특성을 나타내고 있다. 단상 영역에서는 앞서 언급한 공동의 크기뿐만 아니라 공동의 형상에 따른 영향도 거의 없었다. 그러나 비등 영역에 있어서는 사포(V형상)에 의한 거칠기 형상에서 차이는 크지 않지만 좀더 높은 열전달 특성이 나타났다. 이는 공동이 이루는 각도(공동협각)가 V형상인 경우가 반구의 경우보다 더 작기 때문이다. 일반적으로 공동이 이루는 각도(공동협각)가 감소할수록 접촉각이 증가한다. 따라서 접촉각이 증가하면 낮은 과열도에서 핵생성을 촉진시킬 수 있다. 하지만 공동형상이 비등에 미치는 영향을 좀더 정량적으로 확인하기 위해서는 공동의 정확한 크기와 형상에 대한 연구가 더 필요할 것이다.

4. 결 론

액체 충돌제트에서 과냉수를 냉각유체로 사용하여 단상과 핵비등 영역에 대한 평균 열전달 특성 및 표면거칠기에 대한 평균 열전달 특성을 고찰하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 노즐의 출구속도에 대한 영향은 단상영역에서 유속이 증가함에 따라 열전달이 향상되었으나, 비등 영역에서는 그 차이가 크지 않았다. 또한 큰 속도에서는 정체점에서의 높은 열전달로 인해 비등이 지연됨을 알 수 있었다.

(2) 표면거칠기가 증가함에 따라 단상 영역에 대해서는 차이가 없지만 비등 영역에 대해서는 평균 열전달이 증가함을 알 수 있었다. 이는 표면의 공동으로부터 기포핵이 균일하게 생성되며, 핵공이 증가하여 비등을 촉진시키기 때문이다.

(3) 잠입제트와 자유수면제트에서 열전달 특성은 단상영역의 경우 잠입제트 및 자유수면제트 모두 거칠기 증가에 따라 열전달 차이가 없었지만 비등 영역의 경우 거칠기가 증가할수록 평균 열전달이 향상되었다. 또한 잠입제트의 경우가 자

유수면제트에 비해 거칠기 증가에 따른 비등 영역에서의 열전달 성능이 우수하였다.

(4) 표면거칠기의 형상에 따른 열전달은 V형상의 공동을 가진 경우가 반구형태의 공동을 가진 경우보다 비슷한 표면거칠기에서 평균 열전달의 향상을 얻었다. 하지만 그 차이가 크지 않았다. 따라서 공동형상이 비등에 미치는 영향을 확인하기 위해서는 공동의 정확한 크기를 비롯하여 기하학적 형상 및 고체의 적심 특성에 대한 연구가 더 필요할 것이다.

### 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. 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.
6. Gabour, L. A. and Lienhard, J. H., 1994, Wall roughness effects on stagnation-point heat transfer beneath an impinging liquid jet, *ASME J. Heat Transfer* 116, pp. 81-87.
7. Corty, C. and Foust, A., 1955, Surface variables in nucleate boiling, *Chem. Eng. Prog. Symp. Ser.*, Vol. 51, No. 17, pp. 1-12.
8. Vachon, R. I., Tanager, G. E., Davis, D. L. and Nix, G. H., 1968, Pool boiling on polished and chemically etched stainless-steel surface, *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 90, pp. 231-238.
9. Marto, P. J., Moulson, J. A. and Maynard, M. D., 1968, Nucleate pool boiling of nitrogen with different surface conditions, *ASME Journal of Heat Transfer* 90, pp. 437-444.
10. Wu, S. J., 2003, Single-Phase Convection and Boiling Heat Transfer of Confined Impinging Jets, Ph.D. thesis, Yonsei University, Seoul, KOREA.
11. Griffith, D. T. and Wallis, J. D., 1960, The role of surface condition in nucleate boiling, *Chem. Eng. Prog. Symp. Series*, No. D, p. 49.
12. Kline, S. J. and McClintock, F. A., 1953, Describing uncertainty in single-sample experiments, *Mechanical Engineering*, Vol. 75, pp. 3-8.