

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2010.34.11.983

ISSN 1226-4881

# 강제대류 및 핵비등영역에 있어서 마이크로 흰 형상이 분무냉각 열전달에 미치는 영향

김 영 찬<sup>\*†</sup>

\* 안동대학교 기계자동차공학과

## Effects of Micro-fin Structure on Spray Cooling Heat Transfer in Forced Convection and Nucleate Boiling Region

Yeung Chan Kim<sup>\*†</sup>

\* Dept. of Automotive & Mechanical Engineering, Andong National Univ.

(Received May 17, 2010 ; Revised August 31, 2010 ; Accepted September 8, 2010)

**Key Words:** Spray Cooling(분무냉각), Heat Transfer(열전달), Micro-Fins(마이크로 흰), Droplet Flow Rate(액적유량밀도), Cooling Device(냉각장치), Full Cone Spray(원추형분무)

**초록:** 본 연구에서는 냉각면의 표면온도가 비교적 낮은 강제대류 및 핵비등영역에서 다양한 종류의 마이크로 흰이 가공된 냉각면의 분무냉각 열전달에 대해 실험적으로 연구하였다. 실험결과로부터 냉각면 표면에 가공된 마이크로 흰은 분무냉각 열전달을 촉진시키며, 냉각흰의 크기와 종류에 상관없이 분무유량이 증가할수록 분무냉각 열전달도 큰 폭으로 증가하고 있음을 알 수 있었다. 또한 희박한 분무영역에서는 냉각면에 가공된 흰의 크기와 형상이 분무냉각 열전달에 큰 영향을 미치고 있으나, 분무유량이 증가할수록 이러한 경향은 점차 약해져 본 실험에서 가장 높은 분무유량조건에서는 편평한 냉각면을 제외한 모든 냉각면의 열유속이 거의 동일하게 나타나고 있음을 알 수 있었다.

**Abstract :** In the present study, spray cooling heat transfer was experimentally investigated for the case in which water is sprayed onto the surfaces of micro-fins in forced convection and nucleate boiling regions. The experimental results show that an increase in the droplet flow rate improves heat transfer due to forced convection and nucleate boiling in the both case of smooth surface and surfaces of micro-fins. However, the effect of subcooling for fixed droplet flow rate is very weak. Micro-fins surfaces enhance the spray cooling heat transfer significantly. In the dilute spray region, the micro-fin structure has a significant effect on the spray cooling heat transfer. However, this effect is weak in the dense spray region. A previously determined correlation between the Nusselt number and Reynolds number shows good agreement with the present experimental data for a smooth surface.

### - 기호설명 -

- |   |   |
|---|---|
| $d_m$ : 액적의 평균직경 [m]                          | $Re_d$ : Reynolds 수, $(\rho Q'' d_m) / \mu_f$ |
| $h$ : 열전달계수 [ $W/m^2\text{ }^\circ C$ ]       | $T_f$ : 분무액체의 온도 [ $^\circ C$ ]               |
| $H$ : 분무노즐과 냉각면과의 거리 [m]                      | $T_s$ : 전열면의 표면온도 [ $^\circ C$ ]              |
| $k_f$ : 분무액체의 열전도계수 [ $W/m\text{ }^\circ C$ ] | $\mu_f$ : 액체의 점성계수 [ $kg/ms$ ]                |
| $Nu_d$ : Nusselt 수, $(h \cdot d_m) / k_f$     | $\Delta T_f$ : 냉각면의 표면온도 차이, $T_s - T_f$      |
| $Pr_f$ : 분무액체의 Prandtl 수                      |   |
| $Q$ : 분무액체유량 [ $m^3/s$ ]                      |   |
| $Q''$ : 국소액적유량밀도 [ $m^3/(m^2s)$ ]             |   |
| $r$ : 냉각면의 반경 [m]                             |   |

### 1. 서 론

고밀도 전자장비의 냉각에 있어서 증발 또는 비등과 같은 액체의 상변화(Phase change)를 동반할 경우 비교적 작은 액체유량으로도 높은 열유

† Corresponding Author, yeung@andong.ac.kr

속을 제거할 수 있어 효율적이고 강력한 냉각수단으로 활용될 수 있다. 특히 액체를 미립화하여 고온면에 충돌시키는 분무냉각기술을 적용할 경우 이러한 상변화에 의한 열전달은 더욱 향상되며 이와 관련된 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>(1~8)</sup>

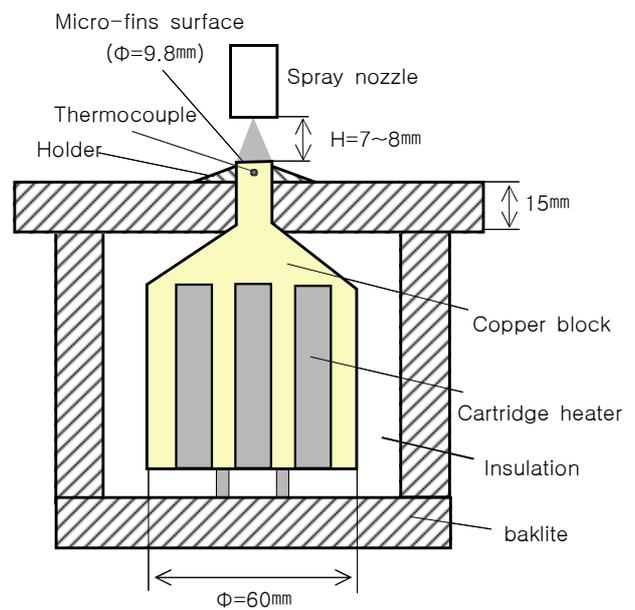
Mudawar 등<sup>(1~3)</sup>은 FC-72, PF-5052, 물 등 다양한 분무액체를 이용한 연구를 수행하여 분무액체의 평균크기와 CHF에 관한 상관식을 제안하였으며, 또한 분사각도가 분무냉각 열전달에 미치는 영향을 파악하였다. Yao 등<sup>(4)</sup>은 매우 희박한 분무 유량조건에서 냉각면 표면에 100~500 μm 크기의 냉각핀을 가공하여 분무냉각 열전달실험을 수행하였으며, Silk 등<sup>(5)</sup>은 냉각면 표면에 정육면체, 피라미드 등 다양한 형상의 마이크로 핀을 가공하여 이들 형상이 분무냉각 열전달에 미치는 영향을 연구하였다. 또한 Kim 등<sup>(6)</sup>은 미세다공질(Micro-porous)로 코팅된 표면층에 대한 분무냉각 실험을 수행하여 다공질 표면층이 증발열전달을 촉진시키고 있음을 확인하였다. 위에서 언급한 대부분의 연구결과로부터 마이크로 핀이 가공된 냉각면은 분무냉각 열전달을 촉진시키고 있음이 확인되고는 있으나, 아직 이들의 열전달 메커니즘을 명확히 설명할 수 있는 단계에는 이르지 못하고 있는 실정이다. 이를 위해서는 좀 더 다양한 형상의 냉각면과 넓은 범위의 실험조건에서 많은 연구가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 다양한 형상과 크기의 마이크로 핀을 냉각면 표면에 가공하여 이들 요소가 분무냉각 열전달에 미치는 영향에 대해 실험적으로 연구하였다. 특히 본 실험에서는 냉각핀의 크기가 500~900 μm의 범위에서 정육면체 형상과 삼각형 그루브 형상의 냉각핀이 가공된 냉각면에 대한 분무냉각 열전달실험을 수행하여, 이들 실험결과를 편평한 냉각면의 실험결과와 비교하여 열전달 촉진효과를 파악하였다.

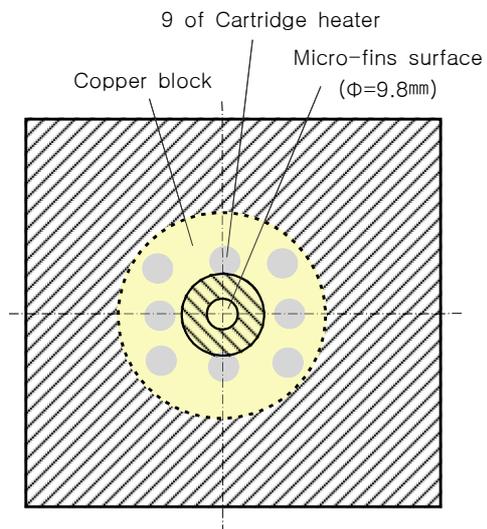
## 2. 실험장치 및 방법

본 실험에서는 물을 분무액체로 사용하였으며, 분무액체는 저장탱크에서 적절한 온도로 가열된 후 펌프, 유량계, 열교환기 등을 경유하여 분무노즐에 공급된다. 실험장치 및 방법은 기존의 연구<sup>(7)</sup>와 유사하지만, 다양한 크기와 종류의 마이크로 핀이 가공된 냉각면이 추가되었으며, 더 넓은 분

무유량 범위에서 실험을 수행하였다. 분무액체의 온도는 분무노즐에 공급되기 직전에 측정된 온도값을 사용하였으며, 25~55 °C의 온도범위에서 실험을 수행하여 분무액체의 온도가 분무냉각 열전달에 미치는 영향을 파악하였다. 분무노즐은 유량범위가 서로 다른 6 종류의 가압식 원추형(Full cone) 노즐을 사용하였다. 분무노즐의 오리피스 직경은 0.2~1.2mm의 범위이며 분무각은 2 기압에서 60°~70°이다.



(a) Longitudinal section of copper block



(b) Top view of copper block

Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

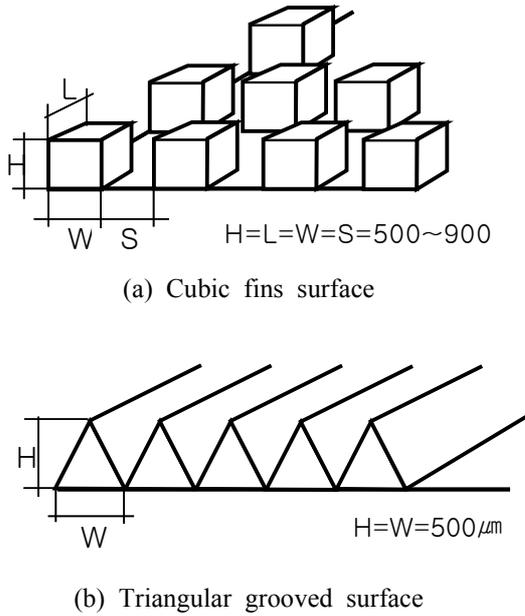


Fig. 2 Geometry of micro-fins surfaces

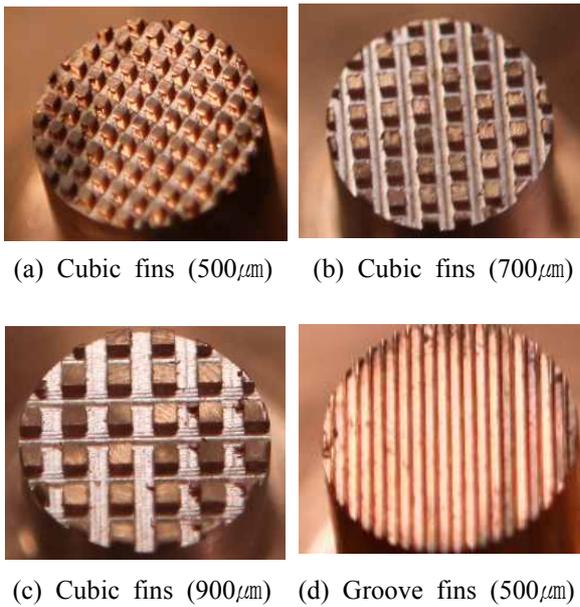


Fig. 3 View of micro-fins surfaces

분무노즐을 통과하는 분무유량은  $9.17 \times 10^{-7} \sim 3.08 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ 의 범위에서 설정하였으며, 분사압력은 약 2기압으로 일정하게 유지하였다. 분무노즐과 냉각면의 거리는 약 7~8 mm로 설정하였으며, 노즐의 분사각을 고려하여 분무노즐을 통과하는 액체유량의 대부분이 냉각면에 충돌할 수 있도록

Table 1 Specification of spray nozzles

Nozzle No.	오리피스 직경 (mm)	분무유량 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	평균직경 (SMD/ $\mu\text{m}$ )
1	0.2	$9.17 \times 10^{-7}$	130
2	0.3	$1.53 \times 10^{-6}$	160
3	0.4	$4.17 \times 10^{-6}$	190
4	0.5	$8.67 \times 10^{-6}$	230
5	0.8	$1.53 \times 10^{-5}$	270
6	1.2	$3.08 \times 10^{-5}$	300

Table 2 Specification of micro-fins surfaces

흰 형상	크기( $\mu\text{m}$ )	흰 개수	표면적( $\text{mm}^2$ )
Smooth	-	-	75.4
Cubic fins	500	-	156.4
Cubic fins	700	78	153.4
Cubic fins	900	40	153.8
Groove fins	500	25	168.5

거리를 설정하였다. Table 1에는 본 실험에서 사용한 분무노즐의 오리피스 직경과 분무유량, 액적의 평균직경(Sauter Mean Diameter)을 나타내었다. Table 1에 나타낸 노즐의 오리피스 직경과 액적의 평균직경은 분무노즐 제작사에서 제공하는 수치이며, 분무유량은 분사압력 2기압에서 직접 측정한 값을 나타내었음을 밝혀둔다.

Fig. 1에는 본 실험에서 사용한 실험장치의 개략도를 나타내었다. 그림에 나타낸 바와 같이 냉각면은 직경이 약 9.8 mm인 원통형 구리 블록을 가공하여 실험에 사용하였다. 냉각면의 반대쪽에는 냉각면과 일체형으로 제작된 직경이 60mm인 원통형 구리 블록에 용량이 200 Watt인 카트리지 히터를 9개 삽입하여 전원조절기를 이용하여 냉각면에 인가되는 열유속을 조절하였다. 구리 블록은 베이크라이트(Baklite)로 제작된 용기와 단열재를 이용하여 열손실을 최소화 하였다. 냉각면 표면으로부터 약 1.0 mm 아래 위치에 직경 0.5 mm의 K Type 열전대를 삽입하여 이 지점의 온도

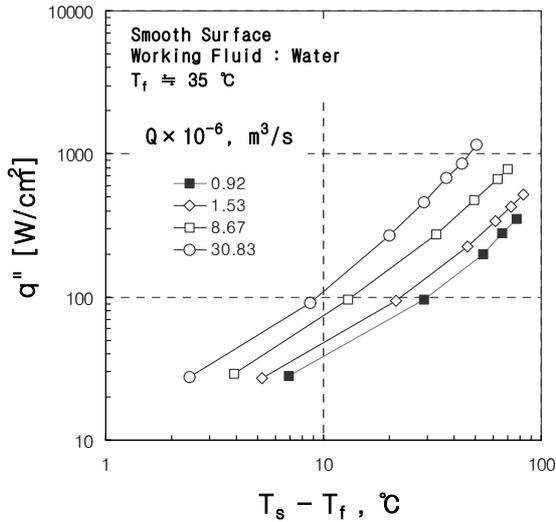


Fig. 4 Spray cooling heat flux for different droplet flow rate for smooth surface ( $Q = 9.17 \times 10^{-7} \sim 3.08 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ )

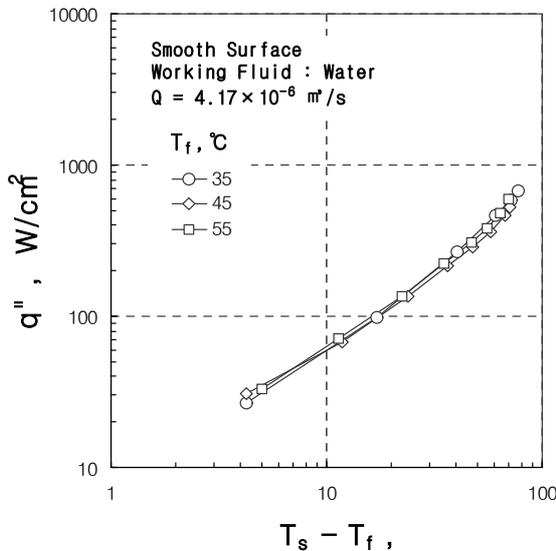


Fig. 5 Spray cooling heat flux for different liquid subcooling for smooth surface ( $T_f \approx 35 \sim 55 \text{ }^\circ\text{C}$ )

를 측정하였다. 냉각면의 표면온도는 이 지점에서 측정된 온도에 기초하여 열전도방정식을 이용하여 계산하였다. 본 실험에서 열손실은 카트리지 히터에 인가된 전력의 3% 미만이며, 표면 열유속 산출시 이러한 열손실을 고려하여 열유속을 계산하였다.

실험방법은 우선 구리 블록에 최초  $20 \text{ W/cm}^2$  정도의 낮은 열유속을 인가하여 냉각면의 온도가 정상상태에 도달한 시점에서의 냉각면 온도를 측정하였으며, 이후 점차적으로 열유속을 상승시켜

임계열유속 부근에 도달할 때까지 실험을 반복적으로 수행하였다.

본 연구에서는 앞서 설명한 바와 같이 냉각면의 표면온도가 비교적 낮은 강제대류 및 핵비등 영역(표면온도가 약  $130^\circ\text{C}$  이하)에서 Fig. 3에 나타난 다양한 마이크로 환이 가공된 냉각면 표면의 분무냉각 열전달에 대해 실험적으로 연구하였다. Fig. 3의 (a), (b), (c)에는 한 변의 길이가 약  $500 \mu\text{m}$ ,  $700 \mu\text{m}$ ,  $900 \mu\text{m}$ 인 정육면체 형상의 환을 각각 나타내었으며 (d)에는 밀면과 높이가 각  $500 \mu\text{m}$ 인 삼각형 그루브(Groove)가 가공된 냉각면의 사진과 개략도를 나타내었다. 본 연구에서는 위에서 언급한 4종류의 냉각면과 마이크로 환이 가공되어 있지 않은 편평한 냉각면을 이용하여 이들 표면 형상이 분무냉각 열전달에 미치는 영향을 실험적으로 연구하였다. Table 2에는 냉각면에 가공된 환의 개수와 이들 냉각면의 표면적을 계산하여 나타내었다.

### 3. 실험결과 및 고찰

Fig. 4에는 냉각환이 가공되어 있지 않은 편평한 냉각면(Smooth surface)을 사용하여 분무액체의 온도를 약  $35^\circ\text{C}$ 로 설정하고 분무유량을  $9.17 \times 10^{-7} \sim 3.08 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ 의 범위에서 변화시켜 분무냉각 열전달실험을 수행한 결과를 나타내었다. Fig. 4에 나타낸 표면 열유속,  $q_w$ 는 9개의 카트리지 히터에 인가된 전력을 측정하여 냉각면의 단위면적에 대해 나타낸 값이다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 분무액체의 온도를 거의 일정하게 유지한 상태에서 표면온도가 증가할수록 열유속도 함께 증가하고 있으며, 또한 분무액체의 유량이 증가할수록 표면 열유속이 큰 폭으로 증가하고 있음을 알 수 있다. 본 실험에서는 물을 작동유체로 사용할 경우 카트리지 히터용량의 문제로 임계열유속에 도달하기 전에 실험을 중단하였으므로 Fig. 4에 나타낸 실험결과에는 임계열유속이 포함되어 있지 않음을 밝혀둔다.

Fig. 5에는 분무액체의 유량을  $4.17 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 로 일정하게 설정하고 분무액체의 온도를  $35 \sim 55^\circ\text{C}$ 의 범위에서 변화시켜 표면 열유속을 측정한 결과를 나타내었다. Fig. 5에서 알 수 있듯이 표면 열유속은 액체의 온도가 변화하여도 거의 일정한 값을 나타내고 있음을 알 수 있다.

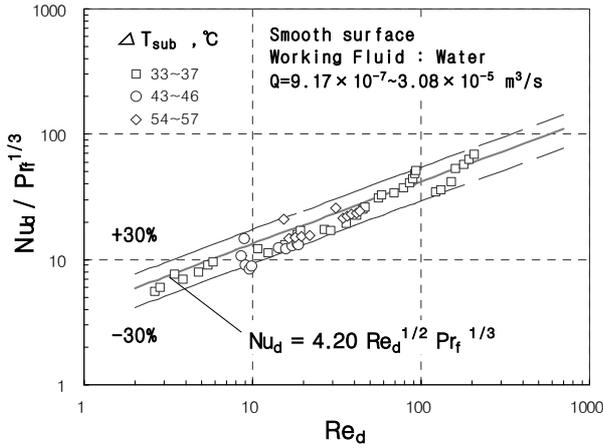


Fig. 6 Correlation of  $Nu_d$  and  $Re_d$  for smooth surface ( $Q = 9.17 \times 10^{-7} \sim 3.08 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $T_f \approx 33 \sim 57^\circ\text{C}$ )

Fig. 6에는 Fig. 4와 Fig. 5에 나타난 편평한 냉각면에 대한 실험결과들을 분무액적의 평균크기와 액적유량밀도에 기초한 무차원수  $Nu_d$ 와  $Re_d$ 를 이용하여 정리한 결과를 나타내었다. 본 논문의 저자는 과거 분무액적의 평균크기와 액적유량밀도에 기초한 무차원수  $Nu_d$ 와  $Re_d$ 를 이용하여 물과 FC-77에 대한 분무냉각 열전달실험을 수행하여 강제대류영역과 핵비등영역 일부에서 분무냉각 열전달을 예측할 수 있는 아래의 열전달 상관식을 제안하였다.<sup>(8)</sup>

$$Nu_d = 4.20 \cdot Re_d^{1/2} \cdot Pr_f^{1/3} \quad (1)$$

위 식에서 무차원수  $Nu_d$ 와  $Re_d$ 의 정의는 다음과 같다.

$$Nu_d = h \cdot d_m / k_f \quad (h = q_w / \Delta T_f) \quad (2)$$

$$Re_d = \rho \cdot Q'' \cdot d_m / \mu_f \quad (3)$$

위 식에서  $Q''$ 는 국소액적유량밀도이며, 본 연구에서는 분무각, 분사거리 등을 고려하여 참고 문헌<sup>(2)</sup>에 나타난 다음의 식을 이용하여  $Q''$ 를 계산하였다.

$$Q'' = \frac{Q}{2\pi H^2(1 - \cos(\theta/2))} \cdot \left[ \frac{1}{1 + (r/H)^2} \right]^{3/2} \quad (4)$$

위 식에서  $Q$ 는 분사노즐을 통과하는 분무액체의 전체유량이며  $\theta$ 는 분무각이다.  $H$ 는 노즐과 냉각면 표면과의 거리이며, 앞서 설명한 바와 같

이 노즐의 분사각을 고려하여 분무노즐을 통과하는 액체유량의 대부분이 냉각면에 충돌할 수 있도록 약 7~8mm의 범위에서 설정하였다.  $r$ 은 냉각면의 반경이며 본 실험장치의 경우  $r = 4.9\text{mm}$ 이다.

Fig. 6으로부터 본 실험결과는 기존의 열전달 상관식 (1)을 사용하여  $\pm 30\%$ 의 오차 범위 내에서 비교적 잘 정리될 수 있음을 알 수 있다. 단, Fig. 6에는 냉각면의 표면온도가 액체의 포화온도 이하인 영역, 즉 강제대류영역과 핵비등 일부영역의 실험결과만을 나타내었다. 이러한 실험결과로부터 분무유량이 분무냉각 열전달에 큰 영향을 미치는 요소임을 재확인하였으며, 냉각환이 가공되지 않은 편평한 냉각면을 이용한 본 연구의 실험결과는 기존의 연구결과로부터 얻은 열전달 상관식과 잘 일치하고 있음을 알 수 있었다.

Fig. 7에는 크기가 700  $\mu\text{m}$ 인 정육면체 냉각환을 가공한 냉각면에 대해 액체의 온도를 약 35°C로 일정하게 유지한 상태에서 분무유량을 점차 증가시켜 실험한 결과를 나타내었다.

편평한 냉각면을 이용한 실험결과와 마찬가지로 표면온도가 증가할수록 열유속이 증가하고 있으며, 또한 분무액체의 유량이 증가할수록 표면 열유속이 점차 증가하고 있음을 알 수 있다. 이러한 경향은 본 실험에서 사용한 모든 냉각면에 대해 동일하게 나타내고 있음을 알 수 있었다.

Fig. 8에는 분무유량과 분무액체의 온도를 동일하게 설정한 상태에서 다양한 냉각환에 대한 실험결과를 상호 비교하여 나타내었다. Fig. 8의

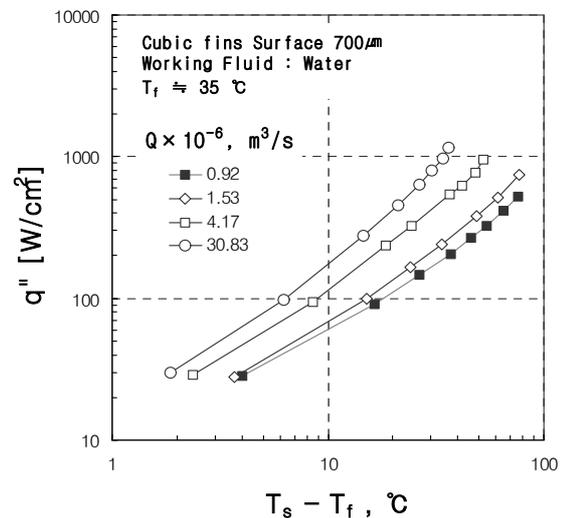


Fig. 7 Spray cooling heat flux for cubic fins surface of size 700  $\mu\text{m}$

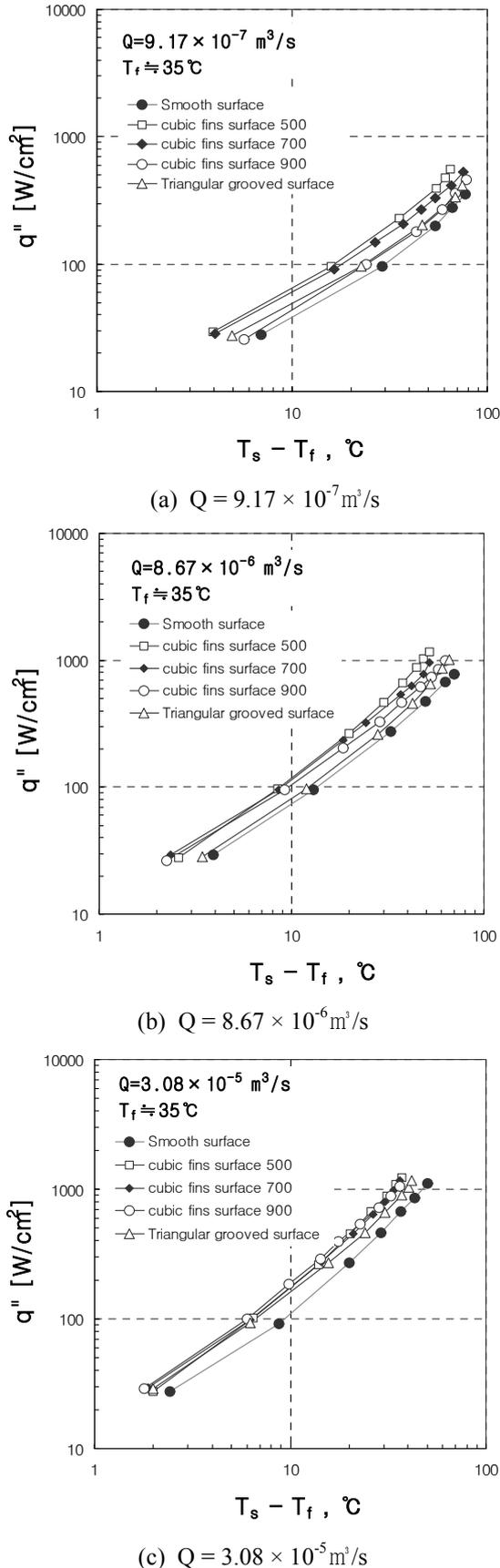


Fig. 8 Effect of micro-fins structure on heat flux

(a), (b), (c)에는 각각 분무유량을  $9.17 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $8.67 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $3.08 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ 로 설정하여 실험한 결과들을 나타내었다. Fig. 8의 (a)에서 알 수 있듯이  $Q = 9.17 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ 의 비교적 낮은 분무유량조건에서는 한 변의 길이가  $500 \mu\text{m}$ 인 정육면체 형상의 냉각원이 가공된 냉각면이 가장 열유속이 높게 나타나고 있으며, 그 다음으로 크기가  $700 \mu\text{m}$ ,  $900 \mu\text{m}$ 의 순으로 열유속이 높게 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한 삼각형 그루브 냉각원이 가공된 냉각면의 경우 크기가  $900 \mu\text{m}$ 인 정육면체 냉각원이 가공된 냉각면과 비슷한 열유속을 나타내고 있으며, 편평한 냉각면의 열유속이 가장 낮음을 실험결과로부터 알 수 있다. 그러나 분무유량이 증가할수록 냉각면의 형상에 의한 열전달촉진은 조금 다르게 나타나고 있음을 Fig. 8의 (b)와 (c)에 나타낸 실험결과들로부터 알 수 있다. 즉, 분무유량이 증가할수록 분무냉각 열전달의 냉각원 형상에 대한 의존도는 점차 약해지고 있으며, 특히 Fig. 8의 (c)에 나타낸  $Q = 3.08 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ 의 아주 큰 분무유량조건에서는 편평한 냉각면을 제외한 모든 냉각면의 열유속이 거의 동일하게 나타나고 있다. 그러나 큰 분무유량에서도 냉각원이 가공된 냉각면의 열유속은 편평한 냉각면에 비해서는 여전히 높은 값을 나타내고 있음을 알 수 있다.

편평한 냉각면에 비해 마이크로 환이 가공된 냉각면의 분무냉각 열전달이 향상되는 원인으로 여러 가지 요인들을 추정할 수 있지만 일반적으로 마이크로 환에 의한 모세관 효과와 표면적 증가를 우선적으로 생각할 수 있다. Fig. 9의 (a) 그림에 나타낸 바와 같이 마이크로 환이 가공된 냉각면에서는 표면에 충돌한 액적은 마이크로 환에 의해 얇게 퍼져 냉각면과 액체는 더 넓은 접촉면적을 가질 수 있는 것으로 판단된다. 냉각면 표면에 얇게 형성된 액막은 분무냉각 열전달을 크게 향상시키는 요인으로 작용하며, 열전도에 의해 액체에 전달되는 열은 아래의 열전도식을 이용하여 추정할 수 있다.

$$q_d = k_f (T_s - T_f) / \ell \tag{5}$$

여기서  $\ell$ 은 액막의 두께이며, 형성되는 액막의 두께가 얇을수록 전도열전달이 증가하는 것으로 알려져 있다. 이와 같이 액적의 크기가 비교적 작고 분무유량이 희박한 영역에서는 냉각면

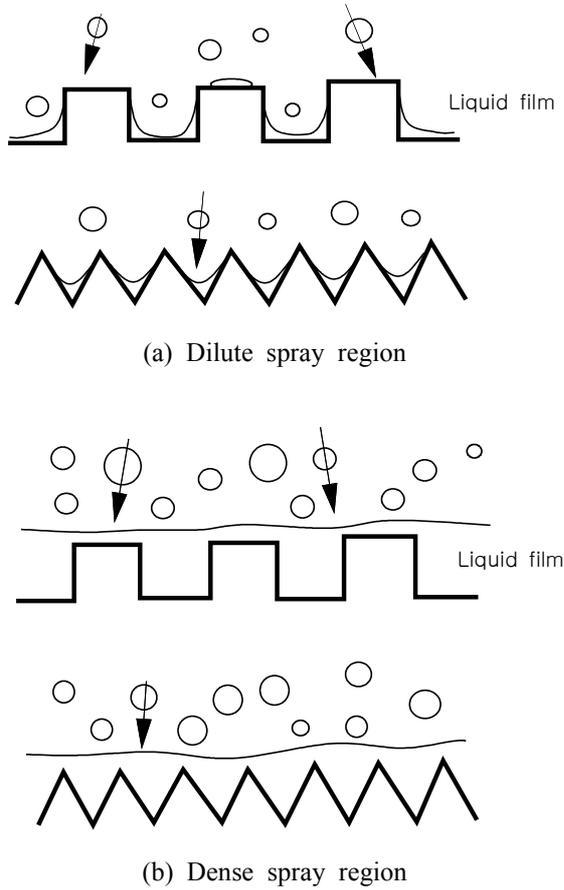


Fig. 9 Formation of liquid film in spray cooling

표면에 부분적으로 얇은 액막이 형성되며, 또한 냉각면의 일부는 액체에 완전히 잠기지 않고 액적의 직접충돌에 의해 열전달이 가능하여 분무냉각 열전달이 크게 향상될 것으로 판단된다. 이러한 관점에서 희박 분무영역에서는 흰의 크기가 작고 개수가 많은 500  $\mu\text{m}$  정육면체 흰의 경우가 열전달 촉진에 가장 유리할 것으로 판단된다.

그러나 분무유량이 증가할수록 Fig. 9의 (b)에 나타낸 바와 같이 미증발 액적에 의해 냉각면 표면에는 냉각흰 전체가 액체에 잠길 수 있을 정도의 아주 두꺼운 액막이 형성되며, 이 두꺼운 액막은 분무액적과 냉각면의 직접적인 충돌을 방해하여 열전달을 감소시키는 요인으로 작용할 수 있다. 이러한 분무유량조건에서는 냉각흰의 크기와 형상이 열전달에 미치는 영향이 작아지며, 열전달은 주로 냉각면의 표면적에 영향을 받을 것으로 추정된다. 본 실험에서 사용한 각종 냉각면의 표면적을 Table 2에 나타내었으며, 편평한 냉각면의 표면적과 비교할 때 마이크로 흰이 가공

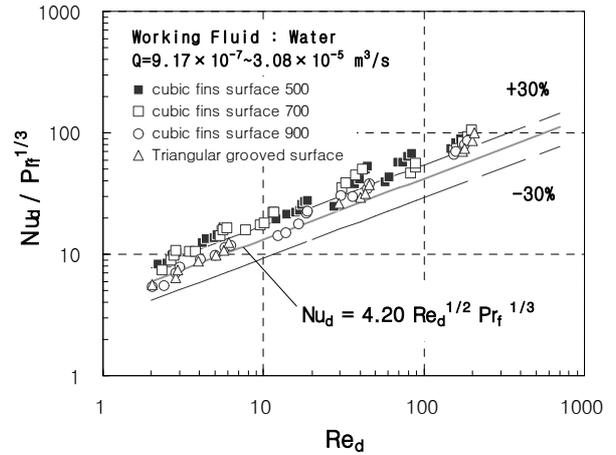


Fig. 10 Correlation of  $Nu_d$  and  $Re_d$  for micro-fins surfaces ( $Q = 9.17 \times 10^{-7} \sim 3.08 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $T_f = 33 \sim 39^\circ\text{C}$ )

된 냉각면의 표면적은 흰의 종류와 크기에 상관없이 약 2배 이상 증가된 비슷한 표면적들을 가지고 있음을 알 수 있다. 따라서 분무유량이 큰 영역에서는 표면적의 영향을 크게 받아 편평한 냉각면을 제외한 모든 냉각면의 열유속이 거의 비슷한 값을 나타내는 것으로 판단된다.

Fig. 10에는 마이크로 흰이 가공된 냉각면에 대한 실험결과들을 분무액적의 평균크기와 액적유량밀도에 기초한 무차원수  $Nu_d$  와  $Re_d$ 를 이용하여 나타내었다. 그림에는 편평한 냉각면에 대한 실험결과로부터 얻은 열전달 상관식을 함께 나타내어 마이크로 흰에 의한 열전달 촉진효과를 정량적으로 파악하였다. Fig. 10으로부터 마이크로 흰이 가공된 냉각면은 편평한 냉각면에 비해 30% 이상 열전달이 촉진되고 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 냉각면의 표면온도가 비교적 낮은 강제대류 및 핵비등영역에서 다양한 크기와 종류의 마이크로 흰이 가공된 냉각면의 분무냉각 열전달에 대해 실험적으로 연구하였다. 실험결과로부터 다음과 같은 사실을 알 수 있었다.

(1) 냉각흰의 크기와 종류에 상관없이 분무유량이 증가할수록 분무냉각 열전달도 큰 폭으로 증가하고 있음을 알 수 있었으며, 이러한 실험결과로부터 분무유량이 분무냉각 열전달에 큰 영향을 미치는 요소임을 재확인하였다. 또한 냉각흰이 가공되지 않은 편평한 냉각면을 이용한 본 연구

의 실험결과는 기존의 물과 FC-77의 실험결과로부터 얻은 열전달 상관식과 잘 일치하고 있음을 확인하였다.

(2) 분무유량이 비교적 작은 희박한 영역에서는 흰 크기가 작고 개수가 많은 냉각면이 가장 열유속이 높게 나타나고 있음을 알 수 있었다. 그러나 이러한 경향은 분무유량이 점차 증가할수록 약해져 본 실험조건에서 가장 높은 분무유량인  $Q = 3.08 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ 의 조건에서는 편평한 냉각면을 제외한 모든 냉각면의 열유속이 거의 동일하게 나타나고 있었다. 이는 마이크로 흰이 가공된 냉각면의 분무냉각 열전달에 있어서 모세관 효과와 표면적 증가에 의한 열전달촉진이 분무유량에 따라 서로 다르게 나타나기 때문인 것으로 판단된다.

(3) 다양한 크기와 종류의 냉각흰이 가공된 냉각면에 대한 실험결과들을 분무액적의 평균크기와 액적유량밀도에 기초한 무차원수  $Nu_d$ 와  $Re_d$ 를 이용하여 나타내어 냉각흰으로 인한 열전달 촉진효과를 확인한 결과, 편평한 냉각면에 비해 마이크로 흰이 가공된 냉각면은 평균적으로 30% 이상의 열전달 촉진이 발생되고 있음을 알 수 있었다.

## 후 기

본 논문은 2009년도 한국과학재단 일반연구자 지원사업(2009-0070838)의 연구비지원에 의하여 연구되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

(1) Estes, K. A. and Mudawar, I., 1995, "Correlation

of Sauter Mean Diameter and Critical Heat Flux for Spray Cooling of Small Surfaces," *Int. J. of Heat & Mass Transfer*, Vol. 38, pp. 2985~2996.

- (2) Mudawar, I. and Estes, K. A., 1996, "Optimizing and Predicting CHF in Spray Cooling of a Square Surface," *ASME J. of Heat Transfer*, Vol. 118, pp. 672 ~ 679.
- (3) Visaria, M. and Mudawar, I., 2008, "Theoretical and Experimental Study of Effects of Spray Inclination on Two-Phase Spray Cooling and Critical Heat Flux," *Int. J. of Heat & Mass Transfer*, Vol. 51, pp. 2398 ~ 2410.
- (4) Hsieh, C. C. and Yao, S. C. 2006, "Evaporative Heat Transfer Characteristics of a Water Spray on Micro-Structured Silicon Surfaces," *Int. J. of Heat & Mass Transfer*, Vol. 49, pp. 962~974.
- (5) Silk, Eric C., Kim, J. and Kiger, K., 2006, "Spray Cooling of Enhanced Surfaces (Impact of Structured Surface Geometry and Spray Axis Inclination)," *Int. J. of Heat & Mass Transfer*, Vol. 49, pp. 4910~4920.
- (6) Kim, J. H., You, S. M. and Choi, U. S., 2004, "Evaporative Spray Cooling of Plain and Microporous Coated Surfaces," *Int. J. of Heat & Mass Transfer*, Vol. 47, pp. 3307~3315.
- (7) Kim, Y. C., 2008, Experimental Study on Boiling Heat Transfer of PF-5052 in Spray Cooling," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 32-15, pp. 938~944.
- (8) Kim, Y. C., 2008, "Correlation of Droplet Flow Rate and Spray Cooling Heat Transfer in Forced Convection and Nucleate Boiling Region," *J. of ILASS-KOREA*, Vol. 13-3, pp. 143~147.