

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2008.32.12.938

PF-5052의 분무냉각 비등열전달에 관한 실험적 연구

김 영 찬[†]

(2008년 8월 6일 접수, 2008년 10월 7일 수정, 2008년 10월 24일 심사완료)

Experimental Study on Boiling Heat Transfer of PF-5052 in Spray Cooling

Yeung-Chan Kim

Key Words : Spray Cooling(분무냉각), Boiling Heat Transfer(비등열전달), CHF(임계열유속), Cooling Technique(냉각기술), Full Cone Spray(원추형분무)

Abstract

The boiling heat transfer was experimentally investigated for the PF-5052 sprays impacting a square heated test surface in a downward direction. Full cone spray nozzles were employed for the spray cooling experiment, and experiments were made under the test conditions of $Q=3.32 \times 10^{-6} \sim 12.98 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, $\Delta T_{\text{sub}}=5 \sim 25 \text{ }^\circ\text{C}$. Also, heat transfer measurements were made using the copper block of $10 \times 10 \text{ mm}^2$ test area heated by nine cartridge heater. From the experimental results, correlation between the Nusselt number and Reynolds number based on droplet-flow-rate was developed. The correlation shows good predictions with $\pm 30 \%$ error for PF-5052.

기호설명

A : 전열면의 단면적 [m^2]
 D : 액적유량밀도 [$\text{m}^3/(\text{m}^2\text{s})$]
 d_m : 액적의 평균직경 [m]
 h : 대류 열전달계수 [$\text{W}/\text{m}^2\text{ }^\circ\text{C}$]
 k_f : 분무액체의 열전도계수 [$\text{W}/\text{m }^\circ\text{C}$]
 Nu_d : Nusselt 수, $(h \cdot d_m) / k_d$
 Pr_f : 분무액체의 Prandtl 수
 Q : 분무액체유량 [m^3/s]
 Q'' : 카트리지 히터의 소비전력 [W]
 q'' : 표면 열유속 [W/m^2]

R_a : 중심선 평균거칠기 [nm]
 Re_d : Reynolds 수, $(\rho D d_m) / \mu_d$
 T_f : 분무액체의 온도 [$^\circ\text{C}$]
 T_s : 전열면의 표면온도 [$^\circ\text{C}$]
 T_{sat} : 분무액체의 포화온도 [$^\circ\text{C}$]
 ρ : 액체의 밀도 [kg/m^3]
 μ_f : 액체의 점성계수 [kg/ms]
 σ_f : 액체의 표면장력 [N/m]
 ΔT_f : 전열면의 표면온도, $T_s - T_f$
 ΔT_{sat} : 전열면의 과열온도, $T_s - T_{\text{sat}}$
 ΔT_{sub} : 액체의 과냉도, $T_{\text{sat}} - T_f$

1. 서론

비등열전달은 표면온도가 액체의 포화온도 이상으로 가열되었을 경우 발생하는 열전달 현상이며, 열전달특성이 각각 다른 핵비등(nucleate

[†] 회원, 안동대학교 기계공학과
E-mail : yeung@andong.ac.kr
TEL : (054)820-6013 FAX : (054)820-5092

boiling), 천이비등(transition boiling), 막비등(film boiling)영역으로 나누어질 수 있다. 그리고 핵비등영역과 천이비등영역의 경계에 임계 열유속(Critical Heat Flux, CHF)점, 천이영역과 막비등영역의 경계에 최소 열유속(Minimum Heat Flux)점이 존재하여 전체적인 비등곡선은 N자형을 나타내는 것으로 알려져 있다. 또한 액체를 미립화하여 고온물체를 냉각시키는 분무냉각 비등열전달의 경우에 있어서도 열전달특성은 위에서 언급한 N자형 비등곡선을 나타내고 있다. 분무냉각기술은 미립화된 액적의 유량밀도, 크기, 충돌속도 등을 적절히 조절함으로써 냉각속도의 제어가 가능하며 또한 냉각성능이 우수하여 금속재료의 열처리, 고밀도 전자부품의 냉각, 경수로의 긴급 냉각장치 등 광범위한 산업분야에 활발히 이용되고 있으며 이와 관련된 많은 연구가 진행되어 왔다. 그러나 분무냉각은 열전달 현상이 복잡하고 열전달에 영향을 미치는 인자가 매우 많아 현재까지도 분무냉각 열전달의 매카니즘을 명확히 이해하고 적용하는데 많은 어려움이 있는 실정이다. 본 연구의 저자는 주로 금속재료의 열처리분야에서의 적용을 염두에 두고 막비등영역과 최소 열유속점을 대상으로 분무냉각 열전달현상에 대한 실험적 연구^(1,2)를 수행하였으며, 이들 연구결과에 기초하여 분무냉각 열전달 모델^(3,4)과 분무냉각 열전달 상관식⁽⁵⁾을 제안하였다.

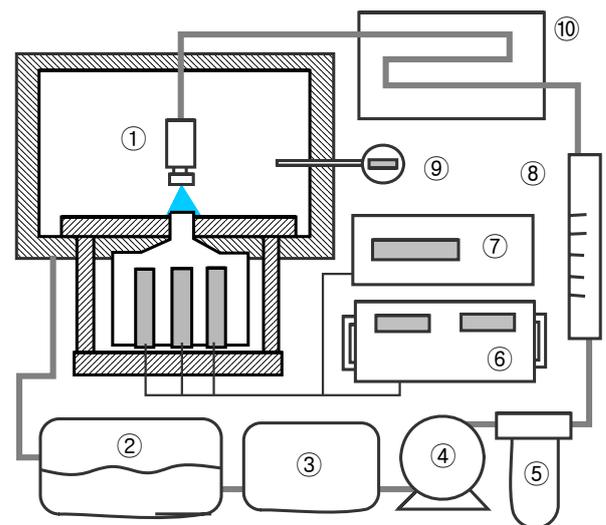
최근 비등열전달 현상은 재료의 가공 및 열처리분야뿐만 아니라 전자장비의 냉각기술에도 적극적으로 활용되고 있다. 전자장비의 냉각기술에는 주로 절연성이 우수하고 화학적으로 안정된 FC (fluoro-carbon) 냉매가 이용되고 있으며, 반도체 칩을 모사한 발열체에 대한 FC 냉매의 풀비등(pool boiling) 열전달 또는 강제대류비등(forced convective boiling) 열전달⁽⁶⁻⁸⁾에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 또한 마이크로 핀(micro-fin),⁽⁹⁾ 마이크로 채널(micro-channel)⁽¹⁰⁾이 가공된 냉각면을 대상으로 연구를 수행하거나 미립화한 액체를 냉각면에 분사하여 열전달 촉진효과에 대해 연구한 결과들을 보고하였다.⁽¹¹⁻¹⁴⁾

본 연구에서는 PF-5052 냉매를 이용하여 강제대류 및 핵비등영역을 대상으로 분무냉각 비등열전달 실험을 수행하였으며, 주로 분무유량, 액체의 온도, 냉각면의 표면 거칠기 등이 열전달에 미치는 영향에 대해 연구하였다. 재료의 열처리

분야와 비교할 때 전자장비 냉각의 경우 발열체의 표면의 온도가 높지 않기 때문에 강제대류 및 핵비등영역의 열전달특성이 매우 중요할 것으로 판단되며, 위에서 언급한 바와 같이 본 연구에서는 이러한 영역을 대상으로 분무냉각 열전달특성을 파악하고 분무유량과 열전달과의 상관관계를 연구하였다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1에 실험장치의 개략도를 나타내었다. 작동유체는 앞서 설명한 바와 같이 PF-5052를 사용하였다. 작동유체는 저장탱크 ②와 ③에서 적절한 온도로 가열된 후 펌프 ④, 필터 ⑤, 유량계 ⑧, 열교환기 ⑩를 경유하여 분무노즐 ①에 공급된다. 열교환기는 작동유체의 정확한 온도제어를 위해 설치하였다. 분무노즐은 유량범위가 서로 다른 3종류의 가압식 원추형(Full cone) 노즐을 사용하였다. 3종류 분무노즐의 오리피스 직경은 각각 0.8, 1.2, 1.7 mm이며 분사각은 46~55°이다. 본 실험에서 사용한 노즐은 노즐의 분무유량이 증가할수록 분무각이 작아지는 특성이 있다. 분무노즐을 통과하는 분무액체의 유량, $Q=3.32 \times 10^{-6} \sim 12.98 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 의 범위에서 실험을 수행하였다.

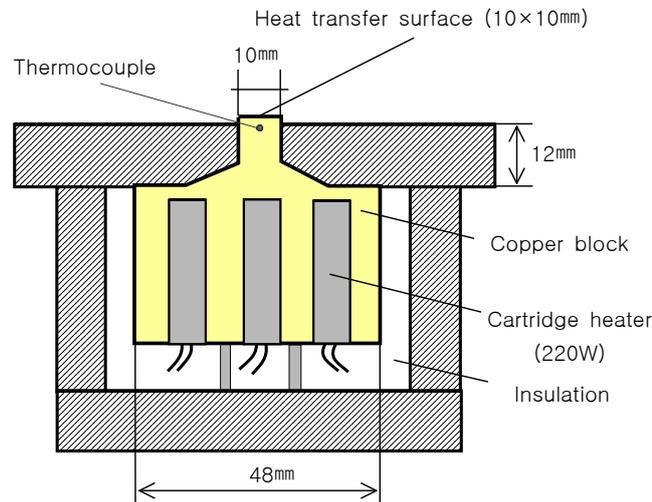


① Spray Nozzle ② Reservoir Tank ③ Heating Tank ④ Pump ⑤ Filter ⑥ Power Supply ⑦ Data Logger ⑧ Flow Meter ⑨ Pressure Sensor ⑩ Heat Exchanger

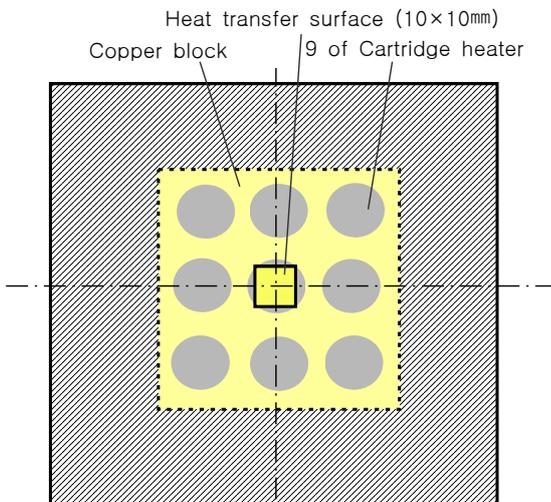
Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

PF-5052 냉매의 비등점은 대기압에서 50 °C이며, 포화상태에서 냉매의 주요 물성치는 각각 $\rho_f = 1644 \text{ kg/m}^3$, $k_f = 0.058 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, $\mu_f = 0.000537 \text{ kg/ms}$, $\sigma_f = 0.013 \text{ N/m}$, $C_{p,f} = 1.09 \text{ kJ/kg}$ 이다. 또한 작동유체의 온도를 25~45°C로 변화 시켜 액체의 온도변화가 분무냉각 비등열전달에 미치는 영향 등을 고찰하였다.

Fig. 2에는 본 실험에서 사용한 전열면의 개략도를 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 전열면적의 크기가 10×10 mm인 구리 블록을 특별 제작하여 실험에 사용하였다. 구리 블록에는 용량이 220 Watt인 카트리지 히터를 9개 삽입하였으며



(a) Longitudinal section of copper block



(b) Top view of copper block

Fig. 2 Schematic of copper block

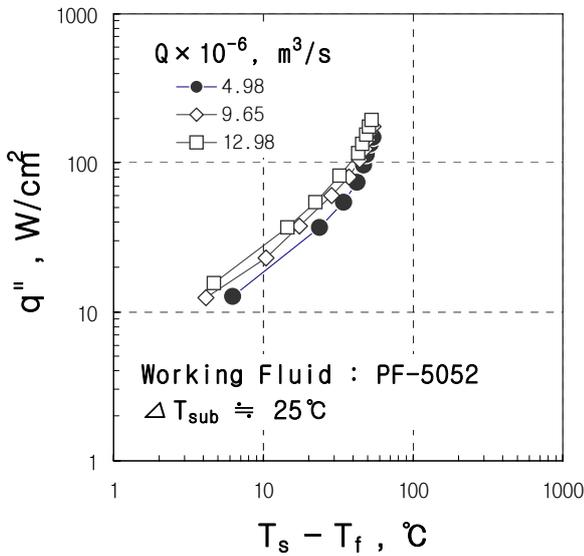
전열면에 인가되는 열유속은 Fig.1에 나타난 전열장치 ⑥을 이용하여 조절하였다. 구리 블록은 G-10 플라스틱으로 제작된 용기와 단열재 등을 이용하여 열손실을 최소로 하였다. 전열면 표면으로부터 약 1mm 지점에 열전대를 설치하여 이 지점의 온도를 측정하였다. 전열면의 표면온도는 이 지점에서 측정된 온도와 카트리지 히터의 소비전력에 기초하여 아래의 열전도 방정식을 이용하여 계산하였다.

$$Q'' = k \cdot A \cdot (T_s - T_p) / L \tag{1}$$

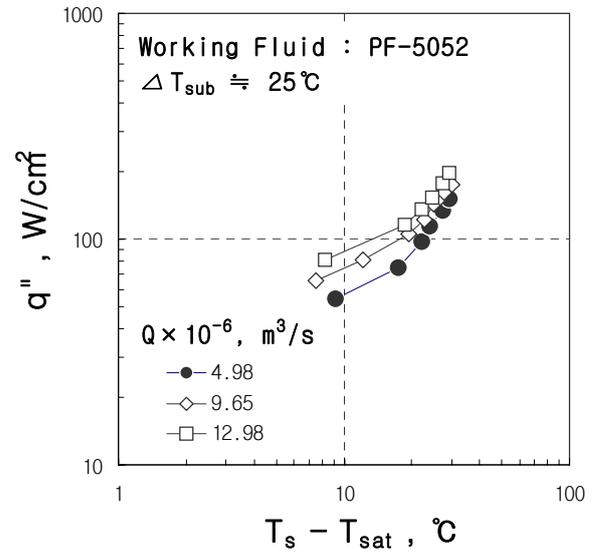
위 식에서 T_p 는 열전대에 의해 측정된 온도이며, L 은 전열면 표면과 온도측정 위치와의 거리이다. 본 연구에서는 분무액체의 유량, 과냉도 이외에도 전열면의 표면조도를 변화시켜 열전달에 미치는 영향에 대해 실험하였다. 전열면은 No.150 ~ No.2000 범위의 샌드페이퍼를 사용하여 표면을 가공하였으며, 가공된 전열면을 표면조도 측정기로 측정한 후 실험에 사용하였다. 본 실험에서는 구리블록을 감싸고 있는 G-10 플라스틱의 내부 및 외부의 표면온도를 측정하여 열손실을 추정하였다. 열손실은 카트리지 히터에 인가된 전력의 5% 미만이며, 본 실험에서는 이러한 열손실을 고려하여 열유속을 산출하였다. 분무노즐과 전열면의 거리는 10mm로 설정하였으며 노즐을 통과하는 액체유량의 대부분이 전열면에 충돌하도록 장치를 구성하였다. 실험방법은 우선 구리 블록에 최초 10 W/cm² 정도의 낮은 열유속을 인가하여 전열면의 온도가 정상상태에 도달한 시점에서의 전열면 온도를 측정하였으며, 이후 점차적으로 열유속을 상승시켜 임계 열유속점 부근에 도달할 때까지 실험을 반복적으로 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

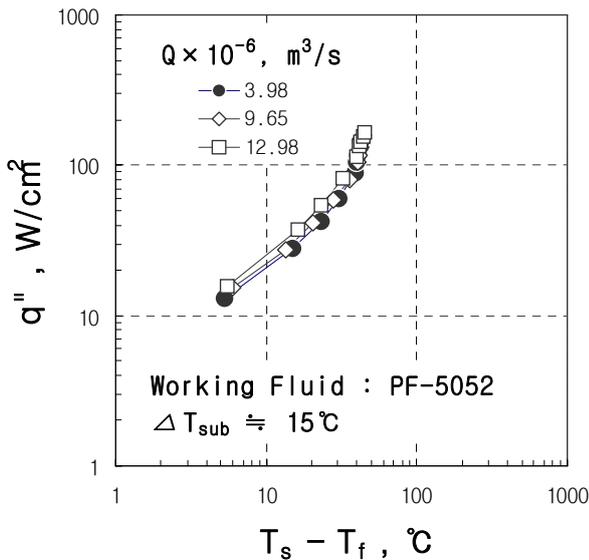
Fig. 3, 4에는 분무액체의 과냉도, $\Delta T_{sub} \approx 15, 25 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 각각 설정하고 분무액체의 유량을 $3.98 \times 10^{-6} \sim 12.98 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 의 범위에서 변화시켜 표면 열유속을 측정된 결과를 나타내었다. Fig. 3에는 표면 열유속과 ΔT_f 의 관계를 나타내었으며, Fig. 4에는 표면 열유속과 ΔT_{sat} 의 관계를 나타내었다. Fig. 3, 4에서 알 수 있듯이 $\Delta T_{sub} \approx 25 \text{ }^\circ\text{C}$ 인 경우에 있어서는 분무액체의 유량이 증가할수록



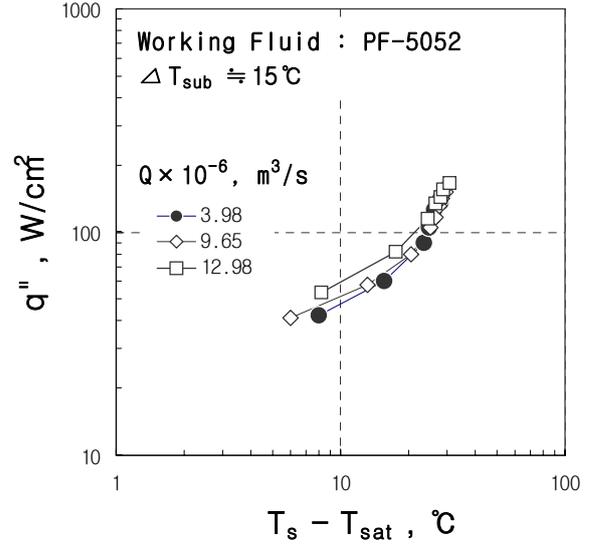
(a) $\Delta T_{sub} = 25^\circ\text{C}$



(a) $\Delta T_{sub} = 25^\circ\text{C}$



(b) $\Delta T_{sub} = 15^\circ\text{C}$



(b) $\Delta T_{sub} = 15^\circ\text{C}$

Fig. 3 Spray boiling curves for different flow rate

열유속이 점차 증가하고 있으나, $\Delta T_{sub} \approx 15^\circ\text{C}$ 인 경우에 있어서 이러한 경향은 점차 약해지고 있음을 알 수 있다.

이는 액체의 온도가 포화상태에 가까울수록 액체의 온도상승에 소비되는 현열이동이 작아지고 액체의 증발에 소비되는 잠열이동이 분무냉각 열전달을 지배함으로써 분무액체의 유량이 열전달에 미치는 영향은 점차 약해지는 것으로 판단된다. 이러한 경향은 Fig. 4에 나타난 표면 열유속과 ΔT_{sat} 와의 관계에서 더욱 명확히 나타나고

Fig. 4 Spray boiling curves for different flow rate

있음을 알 수 있다.

Fig. 5, 6에는 분무액체의 유량, $Q=12.98 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 로 설정하고 액체의 과냉도를 변화시켜 열유속을 측정하여 나타내었다. Fig. 5에서 알 수 있듯이 표면온도와 액체온도의 차이, ΔT_f 가 비교적 낮은 영역에서는 액체의 과냉도에 상관없이 거의 동일한 열유속을 나타내고 있으나 ΔT_f 가 큰 영역에서는 동일한 ΔT_f 조건에서 과냉도가 작을수록 열유속이 조금 증가하는 경향이 있음을 알 수 있다. 이는 과냉도가 작은 액체는 상대적

으로 낮은 표면온도에서 비등이 시작되기 때문인 것으로 판단된다.

그러나 Fig. 6에 나타낸 바와 같이 비등이 시작되는 지점으로 추정되는 과열영역, 즉 전열면의 표면온도가 액체의 포화온도 이상으로 가열된 영역을 대상으로 표면 열유속과 표면과열도의 관계를 나타낸 그림에서는 액체의 과냉도가 클수록 열유속이 증가하고 있음을 알 수 있다.

Table 1에는 임계열유속을 정리하여 나타내었

다. 표에서 알 수 있듯이 임계열유속은 분무액체의 유량이 증가할수록, 과냉도가 클수록 약간 증가하는 경향이 있음을 알 수 있다. 또한 분무

Table 1 Critical Heat Flux (W/cm^2)

T_f ($^{\circ}C$) \ Q (m^3/s)	4.98×10^{-6}	9.65×10^{-6}	12.98×10^{-6}
25	149.9	173.5	195.3
35	141.9	158.3	165.7
45	135.5	140.3	145.5

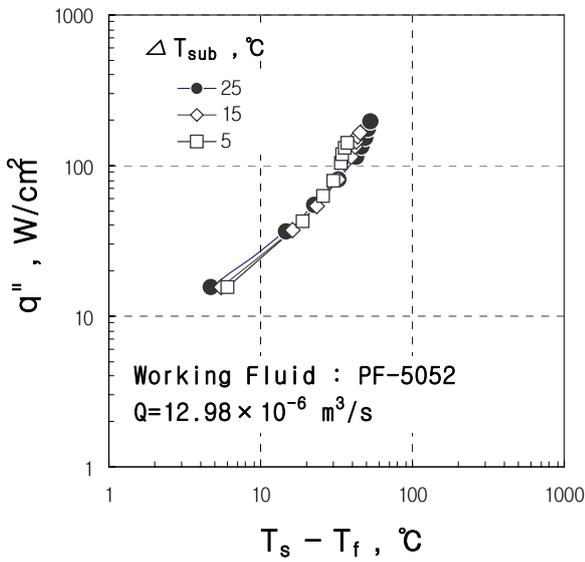


Fig. 5 Spray boiling curves for different subcooling at $Q=12.98 \times 10^{-6} m^3/s$

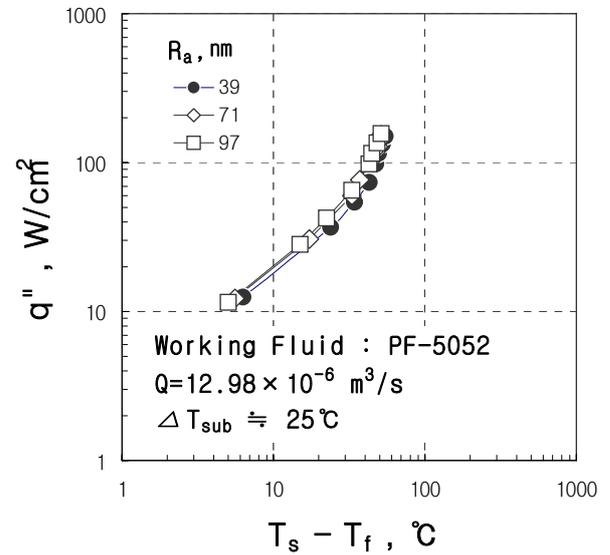


Fig. 7 Spray boiling curves for different surface roughness

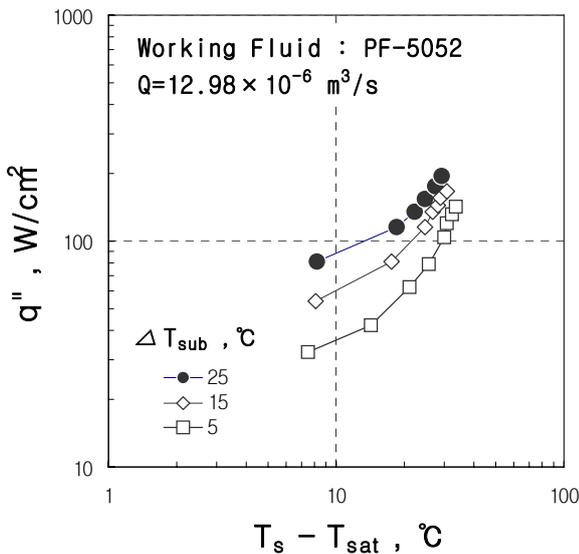


Fig. 6 Spray boiling curves for different subcooling at $Q=12.98 \times 10^{-6} m^3/s$

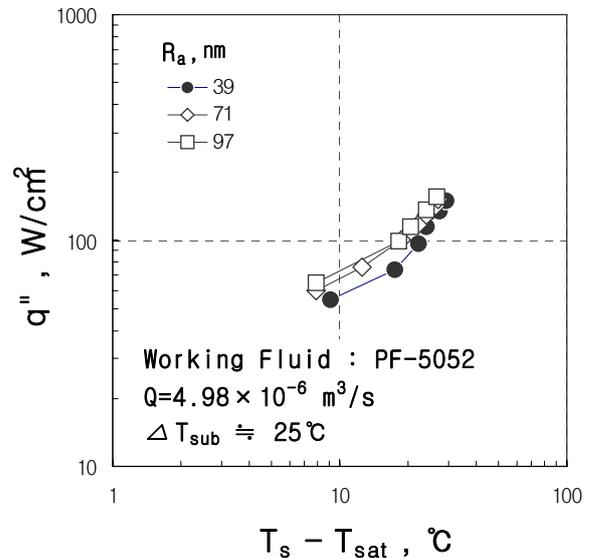


Fig. 8 Spray boiling curves for different surface roughness

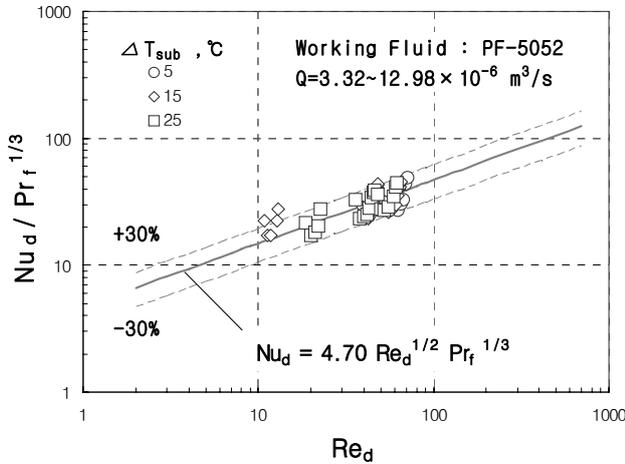


Fig. 9 Correlation of Nu_d and Re_d in spray cooling

액체의 유량과 온도에 따라 약간씩 차이가 있지만 임계열유속은 대략 $\Delta T_{sat} = 25 \sim 30$ °C의 범위에서 나타나고 있음을 알 수 있었다.

Fig. 7, 8에는 전열면의 표면조도를 변화시켜 분무냉각 비등열전달을 측정된 실험결과를 나타내었다. 표면조도는 앞서 설명한 바와 같이 No. 150 ~ No. 2000의 샌드페이퍼를 이용하여 표면을 가공한 후 시판의 표면조도 측정기를 이용하여 중심선 평균 거칠기를 측정하였다. 본 실험에 사용된 시험편의 R_a 는 39 nm, 71 nm, 97 nm의 3종류를 사용하였다. Fig. 7, 8에서 알 수 있듯이 전열면의 표면온도가 낮은 영역에서는 거의 동일한 열유속을 나타내고 있으나 표면온도가 비교적 큰 영역에서는 전열면의 표면조도가 클수록 열유속이 약간 증가하는 경향이 있다. 이는 표면상태가 거친 경우가 더 낮은 온도에서 비등이 시작되기 때문인 것으로 추정된다. 표면조도의 영향은 기존의 연구결과⁽⁹⁻¹¹⁾에서도 이와 유사한 경향을 나타내고 있다. 주로 전열면 표면에 마이크로 스케일의 흰을 가공하거나 화학약품 처리에 의해 가공된 표면을 대상으로 열전달 촉진실험을 수행하였으며, 그 결과 표면조도가 클수록 열전달이 향상되거나 임계열유속이 증가하는 것으로 나타나고 있다. 그러나 전반적으로 본 실험범위 내에서 표면조도의 영향은 매우 작음을 알 수 있었다.

본 연구에서는 선행연구⁽¹³⁾에서와 마찬가지로 분무액체의 평균크기와 액적유량밀도에 기초한 무차원수를 이용하여 실험결과를 정리하였으며, 그 결과를 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9에 나타낸 무차원수 Nu_d 와 Re_d 의 정의는 다음과 같다.

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

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

위 식에서 D 는 액적유량밀도이며 Q 를 액적이 충돌하는 전열면의 면적으로 나눈 값이다. 그리고 d_m 은 액적의 SMD이며 참고문헌의 관계식⁽¹²⁾을 이용하여 이론적으로 계산한 값을 사용하였다. 본 실험에서 분무액체의 평균직경은 노즐의 종류, 유량 등에 따라 100~200 μ m의 범위의 값을 나타내고 있음을 계산결과로부터 알 수 있었다. Fig. 9에 나타낸 바와 같이 본 연구의 실험결과는 $10 < Re_d < 100$ 의 범위에서 다음의 상관식을 이용하여 $\pm 30\%$ 의 오차 범위 내에서 비교적 잘 정리될 수 있음을 알 수 있다.

$$Nu_d = 4.70 \cdot Re_d^{1/2} \cdot Pr_f^{1/3} \quad (4)$$

Fig. 9에는 전열면의 표면온도가 70 °C 이하 ($\Delta T_{sat} \leq 20$ °C)의 실험결과만을 정리하여 나타내었으며 표면온도가 70 °C보다 큰 영역, 즉 임계열유속 부근의 실험값들은 포함하고 있지 않음을 밝혀둔다. 본 실험에서는 강제대류영역과 핵비등영역을 명확히 구분하는 것이 어려워 Fig. 9에는 강제대류영역에 대한 실험결과뿐만 아니라 전열면의 표면온도가 비교적 낮은 초기 핵비등영역의 실험결과들을 함께 나타내어 정리하였다. 상관식 (4)는 FC-77을 사용하여 실험한 선행연구⁽¹³⁾의 결과보다 10%의 오차범위에서 높게 나타나고 있음을 알 수 있었으며, 또한 $0.5 < Re_d < 30$ 의 범위에서 물을 사용한 기존의 상관식⁽¹⁴⁾과 비교할 때 분무냉각 열전달에 대한 Re_d 의 의존성이 낮게 나타나고 있음을 알 수 있었다. 향후 더 넓은 분무액체 유량범위와 다양한 액체를 대상으로 분무냉각 실험을 수행하여 상관식 (4)의 실용성을 검증할 필요가 있는 것으로 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 PF-5052 냉매를 사용하여 분무액체의 유량, $Q=3.32 \times 10^{-6} \sim 12.98 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 의 범위에서 10×10 mm의 구리 전열면을 냉각시키는 분무냉각 비등열전달 실험을 수행하였다. 주로 강제대류영역과 핵비등역을 대상으로 실험을 수행하

였으며, 실험결과 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 분무액체의 과냉도와 분무유량이 증가할수록 열유속이 약간 증가하지만, 포화상태에 가까운 과냉도에서는 분무액체의 유량이 분무냉각 비등열전달에 미치는 영향이 비교적 작음을 알 수 있었다.

(2) 전열면의 표면조도가 클수록 낮은 표면온도에서도 비등이 빨리 시작되어 열유속이 약간 증가하는 경향이 있으나, 본 실험범위 내에서 표면조도의 영향은 비교적 작게 나타나고 있음을 알 수 있었다.

(3) 강제대류영역과 핵비등영역의 실험결과들은 분무액체의 평균크기와 액적유량밀도에 기초한 무차원수 Nu_d 와 Re_d 를 이용한 열전달 상관식 (4)를 이용하여 $\pm 30\%$ 의 오차 범위 내에서 비교적 잘 정리될 수 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

- (1) Kim, Y. C., Nishio, S. and Ohkubo, H., 1994, "Spray Cooling with Formation of Liquid Film Flow: Distribution of Heat Transfer Coefficient in High Temperature Region," *Trans. of the JSME(B)*, Vol. 60-574, pp. 2158~2164.
- (2) Kim, Y. C. and Yun, S. M., 2006, "Study on Film Boiling Heat Transfer of Spray Cooling in Air-Water Full Cone Spray System," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 30-12, pp. 1236~1242.
- (3) Nishio, S. and Kim, Y. C., 1998, "Heat Transfer of Dilute Spray Impinging on Hot Surface," *Int. J. of Heat & Mass Transfer*, Vol. 41, pp. 4113~4119.
- (4) Kim, Y. C., 2005, "Film Boiling Heat Transfer Model of Spray Cooling Focusing on Rebound Motion of Droplets," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 29-2, pp. 287~293.
- (5) Kim, Y. C. and Yun, S. M., 2006, "Study on Correlation of Droplet Flow rate and Film Boiling Heat Transfer in Spray Cooling," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 31-4, pp. 335~340.
- (6) Wadsworth, D. C. and Mudawar, I., 1990, "Cooling of Multi-chip Electronic Module by Means of Confined Two-Dimensional Jets of Dielectric Liquid," *ASME J. of Heat Transfer*, Vol. 112, pp. 891~898.
- (7) Willingham, T. C. and Mudawar, I., 1992, "Forced Convective Boiling and Critical Heat Flux From a Linear Array of Discrete Heat Source," *Int. J. of Heat & Mass Transfer*, Vol. 35-11, pp. 2879~2890.
- (8) Womac, D. J., Ramadhyani, S. and Incropera, F. P., 1993, "Correlating Equation for Impingement Cooling of Small Heat Source With Single Circular Liquid Jets," *ASME J. of Heat Transfer*, Vol. 115, pp. 106-115.
- (9) Honda, H., Takamastu, H. and Wei, J. J., 2002, "Enhanced Boiling of FC-72 on Silicon Chips With Micro-Pin-Fins and Submicron-Scale Roughness," *ASME J. of Heat Transfer*, Vol. 124, pp. 383~390.
- (10) Qu, W. and Mudawar, I., 2003, "Flow Boiling Heat Transfer in Two-Phase Micro-Channel Heat Sink," *Int. J. of Heat & Mass Transfer*, Vol. 46, pp. 2755~771.
- (11) Ohkubo, H. and Nishio, S., 1989, "Study on Accurate Prediction of Characteristics of Mist Cooling (1st Report: Effect of Surface Roughness)," *Trans. of the JSME(B)*, Vol. 54-500, pp. 934~937.
- (12) 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. 38-16, pp. 2985~2996.
- (13) Kim, Y. C. 2007, "Study on Boiling Heat Transfer of FC-77 in Spray Cooling," *Journal of ILASS-KOREA*, Vol. 12-4, pp. 179~184.
- (14) Mudawar, I. and Valentine, W. S., 1989, "Determination of the Local Quench Curve for Spray-cooled metallic Surfaces," *J. Heat Treating*, Vol. 7, pp. 107~121.