

# FC-77의 분무냉각 비등열전달 특성에 관한 연구

김 영 찬<sup>†</sup>

## Study on Boiling Heat Transfer of FC-77 in Spray Cooling

Yeung-Chan Kim

**Key Words :** Spray cooling(분무냉각), Boiling heat transfer(비등열전달), Cooling technique(냉각기술), Full cone spray (원추형분무)

### Abstract

The boiling heat transfer was experimentally investigated for the FC-77 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  $Q=3.32 \times 10^{-6} \sim 2.30 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $\Delta T_{\text{sub}}=20 \sim 70^\circ\text{C}$ . 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 FC-77.

### 기호설명

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 [ $\text{W}/\text{m } ^\circ\text{C}$ ]  
 $Nu_d$  : Nusselt수,  $(hd_m)/k_d$   
 $Pr_f$  : 분무액체의 Prandtl수  
 Q : 분무액체유량 [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]  
 $q''$  : 표면 열유속 [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]  
 $Re_d$  : Reynolds수,  $(\rho D d_m)/\mu_d$   
 $T_f$  : 분무액체의 온도 [ $^\circ\text{C}$ ]  
 $T_s$  : 전열면의 표면온도 [ $^\circ\text{C}$ ]  
 $T_{\text{sat}}$  : 분무액체의 포화온도 [ $^\circ\text{C}$ ]  
 $\rho$  : 액체의 밀도 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$\mu_d$  : 액체의 점성계수 [ $\text{kg}/\text{ms}$ ]  
 $\Delta T_f$  : 전열면의 표면온도,  $T_s - T_f$   
 $\Delta T_{\text{sat}}$  : 전열면의 과열온도,  $T_s - T_{\text{sat}}$   
 $\Delta T_{\text{sub}}$  : 액체의 과냉도,  $T_{\text{sat}} - T_f$

### 1. 서 론

최근 고성능 컴퓨터, 통신기기와 같은 전자장비의 성능은 빠르게 향상되고 있으나 이와는 반대로 장비의 부피와 크기는 점차 작아지고 있다. 전자장비의 실장(electronic packaging) 밀도의 증가에 비례하여 장치에서의 발열량 및 열유속은 큰 폭으로 증가하고 있으며 이들 장비에 대한 냉각기술의 개발이 절실히 요구되고 있는 실정이다. 일반적으로 전자장치는 사용온도가 증가할수록 그 신뢰성이 큰 폭으로 감소하기 때문에 적절한 전자장비의 냉각이 필수적이다. 기존의 전자장비에서는 고발열 전자 부품에 방열핀을 부착하여 이를 단순히 강제대류에 의해 냉각시키는 방법이 주종을 이루고 있었으나, 위에서 언

(2007년 10월 10일 접수 ~ 2007년 11월 27일 심사완료)

<sup>†</sup>책임저자, 회원, 안동대학교 기계공학부

E-mail : yeung@andong.ac.kr

TEL : (054)820-6013 FAX : (054)820-5092

급한 바와 같이 전자장비의 실장밀도와 발열량의 증가로 인해 보다 효율적이고 강력한 냉각기술의 개발이 절실히 요구되고 있는 상황이다. 이러한 전자장비의 냉각문제를 해결하기 위하여 절연성이 우수하고 화학적으로 안정된 FC(fluoro-carbon) 냉매에 의한 보다 적극적인 냉각기술의 개발이 활발히 진행되고 있다<sup>(1)</sup>. FC 냉매를 이용한 냉각 기술은 주로 반도체 칩을 모사한 발열체에 대한 풀비등(pool boiling)열전달 또는 강제대류비등(forced convective boiling)열전달<sup>(2-4)</sup>에 대한 연구를 중심으로 수행되어 왔다. 특히 최근에는 열전달을 향상시키기 위해 마이크로핀(micro-fin)<sup>(5-6)</sup> 또는 마이크로 채널(micro-channel)<sup>(7)</sup>이 가공된 냉각면을 대상으로 비등열전달에 대한 연구를 수행하거나, 미립화한 액체를 냉각면에 분사하여 열전달 촉진효과에 대한 연구결과들을 보고하였다<sup>(8-9)</sup>. 액체를 미립화하여 고온의 물체를 냉각시키는 분무냉각기술은 액적의 유량밀도, 크기, 충돌속도 등을 적절히 조절함으로써 냉각속도의 제어가 가능하며 또한 냉각능력이 우수하여 금속재료의 열처리, 고밀도 전자부품의 냉각, 경수로의 긴급 냉각장치 등 광범위한 산업분야에 활발히 이용되고 있으며 이와 관련된 많은 연구가 진행되고 있다<sup>(10-14)</sup>. 그러나 분무냉각 열전달은 현상이 매우 복잡하고 열전달에 영향을 미치는 요소가 너무 많아 현재까지도 분무냉각 열전달의 메커니즘을 잘 이해하고 적용하는데 있어서 많은 어려움이 있는 실정이다.

본 연구에서는 FC냉매를 이용한 기존의 연구가 주로 풀비등 또는 강제대류비등에 치중된 것과는 다르게 전자장치의 효율적인 냉각을 위해 액적의 크기를 200  $\mu\text{m}$  이하로 미립화하여 발열체를 냉각시키는 분무냉각 비등열전달에 대하여 실험적 연구를 수행하였다. 분무냉각 열전달특성은 액체의 비등곡선과 마찬가지로 N자형 곡선을 나타내고 있는 것으로 알려져 있다. 즉 분무냉각 열전달특성은 ① 대류영역, ② 핵비등영역, ③ 천이영역, ④ 막비등영역으로 구분될 수 있으며, 핵비등영역과 천이영역의 경계에 임계열유속(Critical Heat Flux, CHF)점, 그리고 천이영역과 막비등영역의 경계에 최소열유속(Minimum Heat Flux)점이 각각 존재하는 것으로 알려져 있다. 각각의 영역은 냉각 대상물의 온도와 요구되는 열유속 등에 따라 중요한 의미를 가지고 있다. 예를 들면 막비등영역의 분무냉각 열전달특성과 MHF점은 금속재료의 가공열처리에 있어서 매우 중요하다. 일반적으로 강재의 가공 열처리는 강재의 온도가 약 400°C 이상의 온도영역에서 이루어지고 있으며 이는 막비등영역과 MHF점 온도를 포함하는 영역에 해당되기 때문인 것

으로 판단된다. 그러나 전자장비의 경우 사용온도가 그리 높지 않으며 비교적 높은 열유속의 제거가 요구되기 때문에 대류영역 또는 핵비등영역의 열전달특성이 매우 중요한 의미를 가지는 것으로 판단된다. 본 연구에서는 주로 대류 및 핵비등영역의 분무냉각 열전달특성을 실험적으로 파악하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

Figure 1에 실험장치의 개략도를 나타내었다. 분무노즐은 유량범위가 서로 다른 3종류의 가압식 원추형(Full cone) 노즐을 사용하여 실험을 수행하였다. 3종류 노즐의 오리피스직경은 각각 0.8, 1.2, 1.7 mm이며 분사각은 46~55°이다. 노즐의 분무유량이 증가할수록 분무각이 작아지는 특성이 있다.

본 실험에서 분무액체는 FC-77 냉매를 사용하였으며, 분무노즐을 통과하는 분무 액체유량은  $Q=3.32 \times 10^{-6} \sim 2.30 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ 의 범위에서 실험을 수행하였다. 저장용기에서 일정온도로 가열된 냉매는 펌프, 필터, 압력조절기, 유량계 등을 경유하여 분사노즐에 공급된다. FC-77 냉매의 비등점은 대기압에서 97°C이며, 포화상태에서 냉매의 주요 물성치는 각각  $\rho_f=1600 \text{ kg/m}^3$ ,  $k=0.0057 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ ,  $\mu_f=0.000454 \text{ kg/ms}$ ,  $\sigma_f=0.0823 \text{ N/m}$ ,  $C_{p,f}=1.16 \text{ kJ/kg}$ 이다. 또한 전열면에 분사된 냉매는 열교환기 등을 경유하여 용기에 저장되며 일정온도로 가열된 후 전열

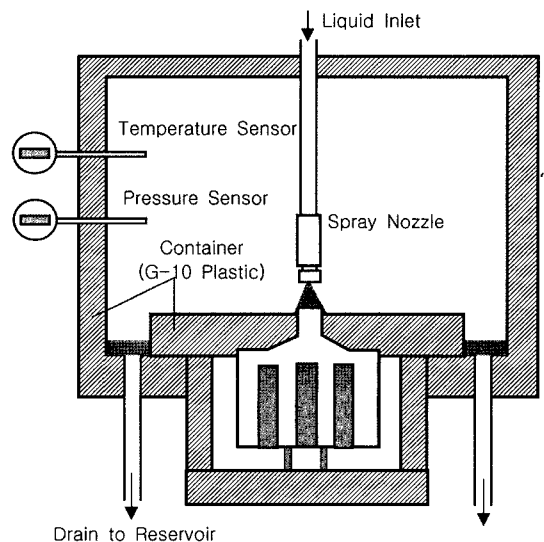
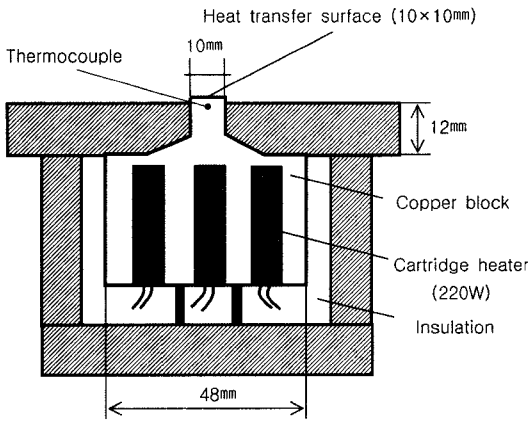
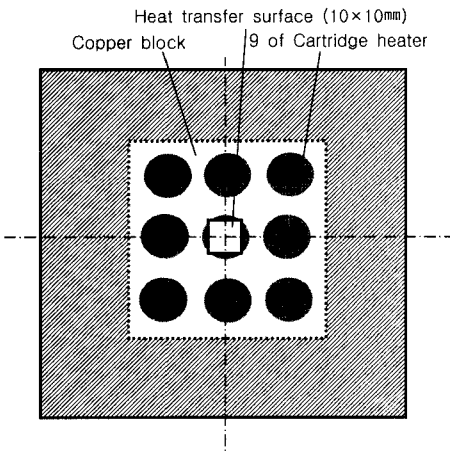


Fig. 1 Schematic of spray chamber



(a) Longitudinal section of copper block



(b) Top view of copper block

Fig. 2 Schematic of copper block

면에 재분사할 수 있도록 시스템을 구성하였다. 냉매의 온도는 25~75°C로 변화 시켜 액체의 온도변화가 비등 열전달에 미치는 영향 등을 고찰하였다.

Figure 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 220Watt인 카트리지 히터를 9개 삽입하여 전열면에 인가되는 열유속을 조절할 수 있도록 하였다. 구리 블록은 G-10 플라스틱으로 제작된 용기와 단열재 등을 이용하여 열손실을 최소화 하였다. 전열면 표면으로부터 약 1 mm 지점에 열전대를 설치하여 이 지점의 온도를 측정하였다. 전열면의 표면온도는 이 지점에서 측정된 온도에 기초하여 열전도

방정식을 이용하여 계산하였다. 본 실험에서의 열손실은 카트리지 히터에 인가된 전력의 5% 미만이며 표면 열유속 산출시 이러한 열손실을 고려하여 열유속을 계산하였다. 분무노즐과 전열면의 거리는 10 mm로 설정하였으며 노즐을 통과하는 액체유량의 대부분이 전열면에 충돌하도록 장치를 구성하였다. 실험방법은 우선 구리 블록에 최초 10Watt 정도의 낮은 열유속을 인가하여 전열면의 온도가 정상상태에 도달한 시점에서의 전열면 온도를 측정하였으며, 이후 점차적으로 열유속을 상승시켜 최대 열유속점(CHF) 부근에 도달할 때까지 실험을 반복적으로 수행하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

Figure 3, 4에는 액체의 과냉도,  $\Delta T_{sub} \approx 70^\circ\text{C}$ 로 설정하고 분무유량을  $3.32 \times 10^{-6} \sim 2.30 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ 의 범위에서 변화시켜 분무냉각 열전달 실험을 수행한 결과를 나타내었다. Fig. 3에는 표면 열유속과  $\Delta T_f (=T_s - T_f)$ 의 관계를 나타내었으며, Fig. 4에는 표면 열유속과  $\Delta T_{sat} (=T_s - T_{sat})$ 의 관계를 나타내었다. 또한 Fig. 4에는 Rohsenow가 제안한 풀비등 열전달 상관식<sup>(15)</sup>을 이용한 포화상태 물에 대한 열유속 계산결과를 함께 나타내었다. Fig. 3, 4에서 알 수 있듯이 분무액체의 과냉도를 거의 일정하게 유지한 상태에서 액체의 유량이 증가할수록 열유속이 점차 증가하고 있다.

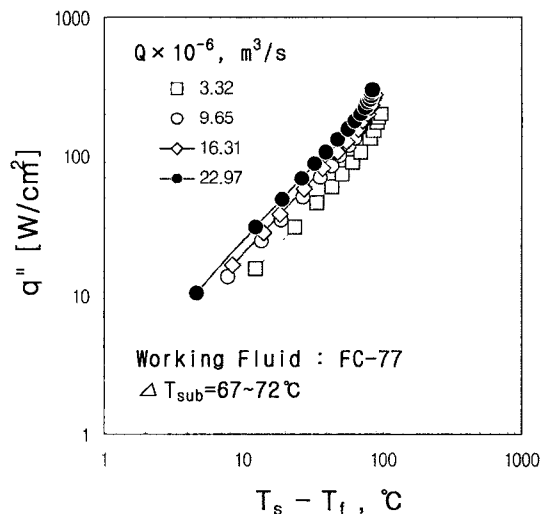


Fig. 3 Spray boiling curves for different flow rate at  $\Delta T_{sub} = 67 \sim 72^\circ\text{C}$

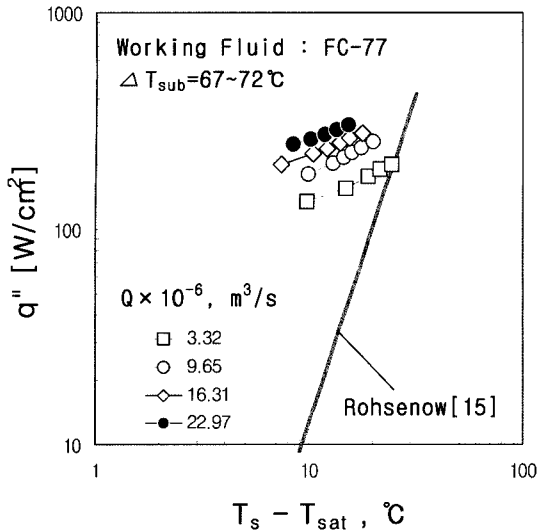


Fig. 4 Spray boiling curves for different flow rate at  $\Delta T_{sub} = 67\sim 72^{\circ}C$

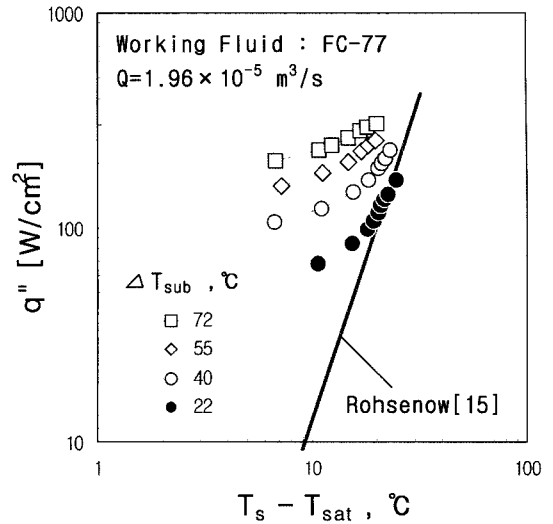


Fig. 6 Spray boiling curves for different subcooling at  $Q = 1.96 \times 10^{-5} m^3/s$

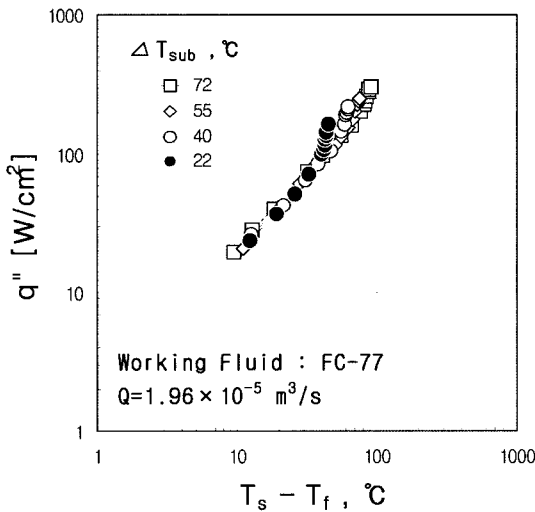


Fig. 5 Spray boiling curves for different subcooling at  $Q = 1.96 \times 10^{-5} m^3/s$

이러한 경향은 Fig. 4에 나타낸 표면 열유속과 표면 과열도와 관계에서 더욱 명확히 나타나고 있으며, Rohsenow의 포화상태 물에 대한 풀비등 열유속보다 분무냉각에 의한 열유속이 비교적 큰 폭으로 증가하였음을 알 수 있다. Fig. 5, 6에는 분무유량,  $Q = 1.96 \times 10^{-5} m^3/s$ 로 설정하고 액체의 과냉도를 변화시켜 분무냉각 열전달 실험을 수행한 결과를 나타내었다.

Figure 5에서 알 수 있듯이 표면온도와 액체온도의 차이,  $\Delta T_f$ 가 비교적 작은 영역에서는 액체의 과냉도에

상관없이 거의 동일한 열유속을 나타내고 있다. 그러나  $\Delta T_f$ 가 큰 영역에서는 동일한  $\Delta T_f$ 조건에서 과냉도가 작을수록 열유속이 조금 증가하는 경향이 있음을 알 수 있다. 이는 과냉도가 작은 액체에서는 동일한  $\Delta T_f$ 에서 비등이 먼저 시작되기 때문에 열유속이 약간 증가하는 것으로 판단된다. Fig. 6에는 비등이 시작되는 것으로 추정되는 과열영역, 즉 전열면의 표면온도가 액체의 포화온도 이상으로 가열된 영역을 대상으로 실험결과를 정리하여 나타내었다. Fig. 4와 마찬가지로 Fig. 6에는  $q''$ 와  $\Delta T_{sub}$ 의 관계를 나타내었으며, Rohsenow가 제안한 풀비등 열전달 상관식<sup>[15]</sup>을 이용한 포화상태 물에 대한 열유속 계산결과를 함께 나타내었다. 앞서 설명한 바와 같이 Fig. 6으로부터 표면온도가 액체의 포화온도 이상으로 과열된 영역에서는 액체의 과냉도가 작을수록 열유속이 감소하며, Rohsenow의 포화상태 풀비등 곡선에 근접하고 있음을 알 수 있다.

일반적으로 강제대류 열전달에서는 액체의 유동상태와 열전달과의 관계를 아래와 같은 식을 이용하여 나타내고 있다.

$$Nu = C \cdot Re^a \cdot Pr^b \tag{1}$$

본 연구에서는 이와 유사한 방법으로 분무액적의 평균크기와 액적유량밀도에 기초한 무차원수  $Nu_d$ 와  $Re_d$ 를 이용하여 실험결과를 정리하였으며, 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7에 나타낸 무차원수  $Nu_d$ 와  $Re_d$ 의 정의는 다음과 같다.

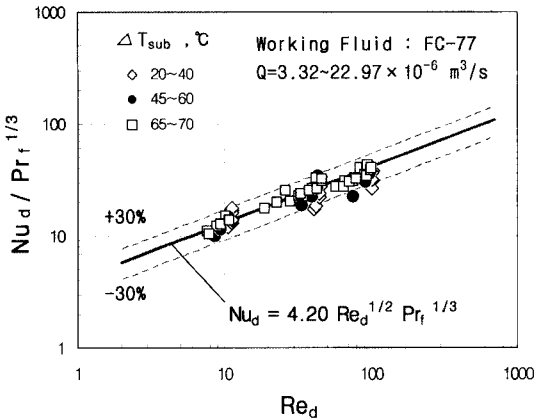


Fig. 7 Correlation of  $Nu_d$  and  $Re_d$  in spray cooling

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

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

위 식에  $D$ 는 액적유량밀도이며 분무유량,  $Q$ 를 액적이 충돌하는 전열면의 면적으로 나눈 값이다. 그리고  $d_m$ 은 액적의 SMD이며 참고문헌의 관계식<sup>(8)</sup>을 이용하여 이론적으로 계산한 값을 사용하였다. 본 실험에서 분무액적의 평균직경은 노즐의 종류, 유량 등에 따라 100~200  $\mu m$ 의 범위의 값을 나타내고 있음을 계산결과로부터 알 수 있었다. Fig. 7에 나타난 바와 같이 본 연구의 실험결과는 다음의 상관식을 이용하여  $\pm 30\%$ 의 오차 범위 내에서 비교적 잘 정리될 수 있음을 알 수 있다.

$$Nu_d = 4.20 \cdot Re_d^{1/2} \cdot Pr_f^{1/3} \quad (4)$$

단, Fig. 7에는 전열면의 온도가 액체의 포화온도 이하인 영역에서의 실험결과만을 나타내었다. 현재의 연구단계에서 전열면의 표면온도가 액체의

포화온도 이상인 과열영역에서는 식(4)와 같은 간단한 열전달 상관식을 이용하여 실험결과 전체를 잘 정리할 수 없었으며, 이 온도영역에서는 열전달 메카니즘이 매우 복잡한 핵비등이 본격적으로 시작되는 것으로 판단된다. 이 영역에 있어서는 지속적인 연구를 통하여 분무냉각에 의한 핵비등 열전달을 예측할 수 있는 상관식의 개발이 필요할 것으로 생각된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 FC-77 냉매를 사용하여 분무유량,

$Q=3.32 \times 10^{-6} \sim 2.30 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ 의 범위에서 발열체를 냉각시키는 분무냉각 비등열전달 실험을 수행하였다. 분무노즐은 유량범위가 서로 다른 3종류의 가압식 원추형(Full cone) 노즐을 사용하였으며, 실험결과 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 분무냉각 열전달 실험결과로부터 분무액체의 과냉도를 거의 일정하게 유지한 상태에서 액체의 유량이 증가할수록 열유속은 점차 증가하고 있음을 알 수 있었다. 또한 분무유량을 일정하게 유지하고 액체의 과냉도를 변화시킬 경우,  $\Delta T_f$ 가 비교적 작은 영역에서는 액체의 과냉도에 상관없이 거의 동일한 열유속을 나타내고 있으나,  $\Delta T_f$ 가 큰 영역에서는 동일한  $\Delta T_f$  조건에서 과냉도가 작을수록 열유속이 약간 증가하는 경향이 있음을 알 수 있었다. 또한 이러한 사실은  $q''$ 와  $\Delta T_{sat}$ 의 관계를 나타낸 그림으로부터 더욱 명확히 알 수 있었다.

(2) 본 연구에서 전열면의 표면온도가 액체의 포화온도 이하인 영역에서 획득한 실험결과들은 분무액적의 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. 그러나 전열면의 표면온도가 액체의 포화온도 이상인 과열영역에서는 이러한 열전달 상관식을 얻을 수 없었으며 이 영역 대한 지속적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

#### 후 기

이 논문은 2006년도 안동대학교 특성화 추진 지원 사업에 의하여 연구되었음.

#### 참고문헌

- (1) A. Bar-Cohen, "Thermal management of electronic Components with Dielectric Liquids," JSME Int. Journal, Series B-36, 1993, pp.1~25.
- (2) D. C. Wadsworth, and I. Mudawar, "Cooling of Multi-chip Electronic Module by Means of Confined Two-Dimensional Jets of Dielectric Liquid," ASME J. of Heat Transfer, Vol. 112, 1990, pp.891~898.
- (3) T. C. Willingham and I. Mudawar, "Forced Convective Boiling and Critical Heat Flux From a Linear Array of Discrete Heat Source," Int. J. of Heat & Mass

- Transfer, Vol. 35-11, 1992, pp.2879~2890.
- (4) D. J. Womac, S. Ramadhyani and F. P. Incropera, "Correlating Equation for Impingement Cooling of Small Heat Source With Single Circular Liquid Jets," ASME J. of Heat Transfer, Vol. 115, 1993, pp.106~115.
- (5) H. Honda, H. Takamastu and J. J. Wei, "Enhanced Boiling of FC-72 on Silicon Chips With Micro-Pin-Fins and Submicron-Scale Roughness," ASME J. of Heat Transfer, Vol. 124, 2002, pp.383~390.
- (6) T. M. Anderson and I. Mudawar, "Micro-Electronic Cooling by Enhanced Pool Boiling of a Dielectric Fluorocarbon Liquid," ASME J. of Heat Transfer, Vol. 111, 1989, pp.752~759.
- (7) W. Qu and I. Mudawar, "Flow Boiling Heat Transfer in Two-Phase Micro-Channel Heat Sink," Int. J. of Heat & Mass Transfer, Vol. 46, 2003, pp.2755~771.
- (8) K. A. Estes and I. Mudawar, "Correlation of Sauter Mean Diameter and Critical Heat Flux for Spray Cooling of Small Surfaces," Int. J. of Heat & Mass Transfer, Vol. 38-16, 1995, pp. 2985~2996.
- (9) Jon R. Rybicki and I. Mudawar, "Single-phase and Two-phase Cooling Characteristics of Upward-facing and Downward-facing Sprays," Int. J. of Heat & Mass Transfer, Vol. 46, 2006, pp. 5~16.
- (10) L. Bolle and J. C. Moureau, "Spray Cooling of Hot Surface," Two-Phase Flow and Heat Transfer Proc. NATO Advanced Study Institute, Vol. 3, 1977, pp. 1327~1346.
- (11) Y. C. Kim, S. Nishio and H. Ohkubo, "Spray Cooling with Formation of Liquid Film Flow: Distribution of Heat Transfer Coefficient in High Temperature Region," Trans. of the JSME, Vol. 60-574, 1994, pp.2158~2164.
- (12) Y. C. Kim, S. Nishio and H. Ohkubo, "Spray Cooling with Formation of Liquid Film :Film Boiling Heat Transfer of Liquid Film Flow," Trans. of the JSME, Vol. 62-594, 1995, pp.734-739.
- (13) Y. C. Kim, S. Nishio and H. Ohkubo, "Heat Transfer in High Temperature Region of Spray Cooling Interacting with Liquid Film Flow," Trans.of the JSME, Vol. 62-597, 1996, pp.1991~1997.
- (14) S. Nishio and Y. C. Kim, "Heat Transfer of Dilute Spray Impinging on Hot Surface," Int. J. of Heat & Mass Transfer, Vol. 41, 1998, pp.4113~4119.
- (15) W. M., Rohsenow, "A Method of Correlating Heat Transfer Data for Surface Boiling Liquids," Trans. ASME, Vol. 74, 1952, pp.969.