

마이크로 흰 표면의 분무냉각 열전달에 관한 실험적 연구

김 영 찬*

Experimental Study on Spray Cooling Heat Transfer of Micro-Fins Surfaces

Yeung-Chan Kim

Key Words: Spray cooling(분무냉각), Micro-fin(마이크로 흰), Boiling(비등), Heat transfer(열전달), Cooling technique(냉각기술), Full cone spray(원추형분무)

Abstract

Spray cooling heat transfer was experimentally investigated for water sprays impacting on micro-fins structured surfaces in the single phase and nucleate boiling regions. The heat transfer surfaces consist of cubic fins and triangular grooved fins. The spray produced using full cone spray nozzles, and experiments were made under the test condition of $Q=4.92 \times 10^{-6} \sim 15.83 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, $T_f=35 \sim 55^\circ\text{C}$. From the experimental results, it was found that cubic fins surface had the largest heat flux enhancement relative to the smooth surface.

기호설명

k_f : 분무액체의 열전도계수 [$\text{W/m } ^\circ\text{C}$]
 L : 액막의 두께 [m]
 Q : 분무액체의 유량 [m^3/s]
 q'' : 표면 열유속 [W/m^2]
 T_f : 분무액체의 온도 [$^\circ\text{C}$]
 T_s : 전열면의 표면온도 [$^\circ\text{C}$]
 T_{sat} : 분무액체의 포화온도 [$^\circ\text{C}$]
 ΔT_f : 전열표면과 액체의 온도차이, $T_s - T_f$
 ΔT_{sub} : 액체의 과냉도, $T_{\text{sat}} - T_f$

1. 서 론

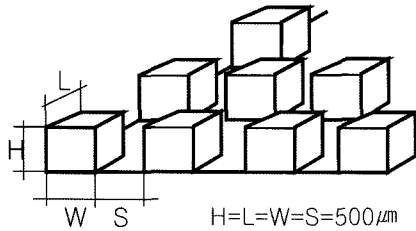
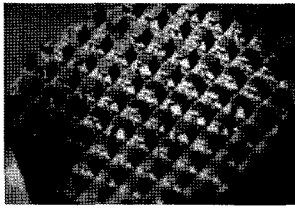
전자장비의 성능향상과 함께 장치에서의 발열량이 큰 폭으로 증가함에 따라 이에 대한 효율적이고 강력한 냉각기술의 개발이 절실히 요구되고 있다. 분무냉각은 액체를 미립화하여 고온의 물체에 충돌시켜 물체를 냉각시키는 냉각기술의 일종으로 예로부터 주로 금속재료의 열처리⁽¹⁻⁴⁾에 사용되었으나, 최근 고밀도 전자장비의 냉각시스템에의 적용을 목표로 활발히 연구가 진행되고 있다. 특히 분무냉각에 있어서 증발 또는 비등과 같은 액체의 상변화(phase change)를 동반할 경우 비교적 작은 액체유량으로도 높은 열 유속을 제거할 수 있어 고밀도 전자장비에 대한 효율적이고 강력한 냉각수단으로 활용될 수 있다. 따라서 고밀도 전자장비의 냉각기술은 기존의 공기 강제대류 방식에서 점차 탈피하여 액체의 상변화를 동반하는 냉각기술의 적용이 점차 확대되고 있는 추세이다. Mudawar et al.⁽⁵⁻⁸⁾은 반도체 칩을 모사한 발열체를 대상으로 풀 비등(pool boiling), 강제대류 비등(forced convection boiling), 분무냉각(spray cooling)

(2009년 11월 24일 접수 ~ 2009년 12월 16일 심사완료)

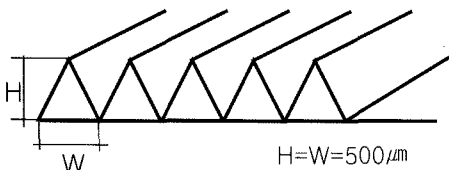
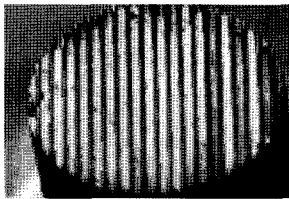
* 책임저자, 회원, 안동대학교 기계공학부

E-mail : yeung@andong.ac.kr

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



(a) Cubic fins surface



(b) Triangular grooved surface

Fig. 1 View and geometry of micro structure

등 다양한 냉각수단을 이용하여 열전달 촉진에 대해 연구하였으며, Honda et al.⁽⁹⁾은 마이크로 핀(micro-fin)이 가공된 발열체 표면에서의 풀 비등 열전달에 대해 FC 냉매를 이용하여 실험적으로 연구하였다. 또한 최근에는 미세다공질(microporous) 표면층⁽¹⁰⁾과 마이크로 스케일(micro scale)의 구조물이 가공된 표면⁽¹¹⁻¹³⁾을 대상으로 분무냉각 열전달 실험을 수행한 연구결과도 몇 건 보고되고 있다. 이들 대부분의 연구결과로부터 표면 구조물에 의한 열전달 촉진효과가 확인되고는 있으나 열전달 촉진효과를 정량적으로 명확히 설명하기 위해서는 다양한 조건에 대한 더 많은 연구가 필요할 것으로 생각된다.

본 연구에서는 냉각면의 표면온도가 비교적 낮은 강제대류 및 핵 비등영역(냉각면 표면온도가 130°C 이하)

에서 Fig. 1에 나타난 마이크로 핀이 가공된 냉각면 표면의 분무냉각 열전달에 대해 실험적으로 연구하였다. Fig. 1(a)에는 한 변의 길이가 약 500 μm인 정육면체 형상의 핀을 나타내었으며, (b)에는 밑면과 높이가 각 500 μm인 삼각형 그루브(groove)가 가공된 냉각면의 사진과 개략도를 나타내었다. 본 연구에서는 위에서 언급한 2 종류의 냉각면과 마이크로 핀이 가공되어 있지 않은 편평한 냉각면을 이용하여 이들 표면 형상이 분무냉각 열전달에 미치는 영향을 실험적으로 연구하였다. 분무노즐은 가압식 원추형 노즐을 사용하였으며, 분무액체의 유량은 $4.92 \times 10^{-6} \sim 15.83 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, 분무액체의 온도는 35~55°C, 분무액체의 SMD는 100~200 μm의 범위에서 실험을 수행하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에서는 물을 작동유체로 사용하여 분무냉각 실험을 수행하였다. 실험장치의 구성 및 실험방법은 선행 연구⁽¹⁴⁾와 유사하지만 냉각면, 분사노즐을 비롯한 모든 실험장치를 새롭게 제작하여 실험을 수행하였다. 본 실험에서는 Fig. 1에 나타난 직경이 약 9.8 mm인 원통형의 냉각면 표면에 2종류의 마이크로 핀을 가공하여 실험에 사용하였다. 작동유체는 저장탱크에서 적절한 온도로 가열된 후 펌프, 유량계, 열교환기, 스트레이너를 경유하여 여 분무노즐에 공급된다. 액체의 온도는 분무노즐에 공급되기 직전에 측정된 온도 값을 사용하였으며 35~55°C의 온도범위에서 실험을 수행하여 분무액체의 온도가 열전달에 미치는 영향을 파악하였다. 분무노즐은 유량범위가 서로 다른 3종류의 가압식 원추형(Full cone) 노즐을 사용하였다. 3종류 노즐의 오리피스직경은 각각 0.4, 0.5, 0.8 mm이며 분무각은 2기압에서 60°~70°이다.

분무노즐과 냉각면과의 거리는 노즐을 통과하는 액체 유량의 대부분이 냉각면에 충돌할 수 있도록 분사각에 따라 7~8 mm의 범위에서 높이를 조절하였으며 분무액체의 유량, $Q=4.92 \times 10^{-6} \sim 15.83 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 의 범위에서 실험을 수행하였다.

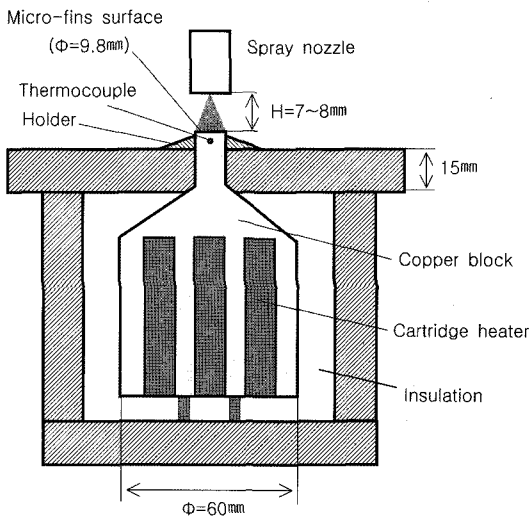
Figure 2에는 본 실험에서 사용한 냉각면의 개략도를 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 냉각면은 직경이 약 9.8 mm인 원통형 구리 블록을 가공하여 실험에 사용하였다. 냉각면과 반대쪽에는 직경이 60 mm인 원통형 구리 블록에 용량이 220 Watt인 카트리지 히터를 9

개 삽입하여 전원조절기를 이용하여 냉각면에 인가되는 열 유속을 조절하였다. 구리 블록은 베이클라이트(baklite)로 제작된 용기와 단열재를 이용하여 열손실을 최소로 하였다. 냉각면 표면으로부터 약 1.5 mm 아래 위치에 직경 0.5 mm의 K Type 열전대를 삽입하여 온도를 측정하였다. 냉각면의 표면온도는 이 지점에서 측정된 온도에 기초하여 열전도 방정식을 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 W/cm² 정도의 낮은 열유속을 인가하여

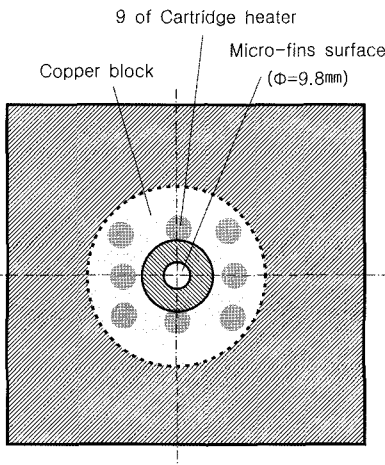
냉각면의 온도가 정상상태에 도달한 시점에서의 냉각면 온도를 측정하였으며, 이후 점차적으로 열유속을 상승시켜 최대 열 유속점(CHF) 부근에 도달할 때까지 실험을 반복적으로 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Figure 3에는 분무액체의 온도를 약 35°C로 설정하고 분무유량을 4.92×10⁻⁶~15.83×10⁻⁶ m³/s의 범위에서 변화시켜 표면 열 유속을 측정된 결과를 나타내었다. 또한 Fig. 3의 (a)에는 환이 가공되어 있지 않은 편평한 냉각

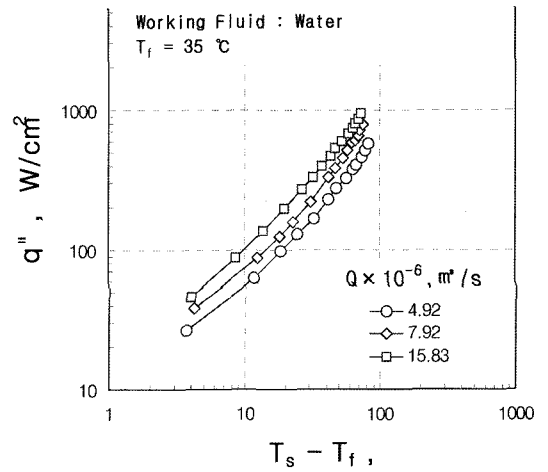


(a) Longitudinal section of copper block

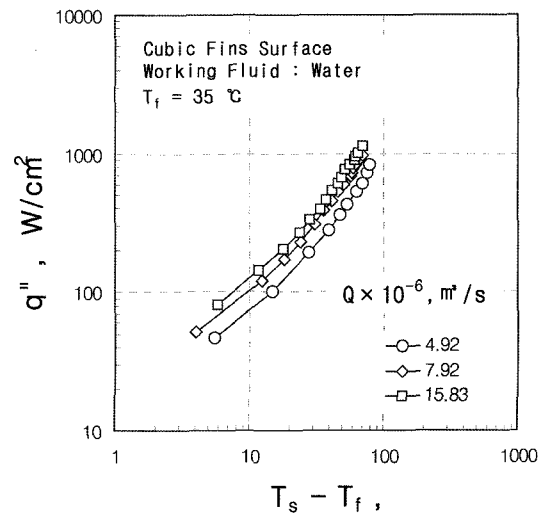


(b) Top view of copper block

Fig. 2 Schematic of experimental apparatus



(a) Smooth surface



(b) Cubic fins surface

Fig. 3 Spray cooling heat transfer for different droplet flow rate ($Q=4.92 \times 10^{-6} \sim 15.83 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$)

면에 대한 실험결과를 나타내었으며, (b)에는 정육면체 환이 가공된 냉각면의 실험결과를 나타내었다. 단, 그림에 나타난 실험값들은 모두 냉각면의 투영면적 0.75 cm^2 에 대해 열 유속을 계산한 값을 밝혀준다. 그림들로부터 분무액체의 온도를 거의 일정하게 유지한 상태에서 분무액체의 유량이 증가할수록 양쪽 모두 열유속이 점차 증가하고 있음을 알 수 있다. 본 실험에서는 물을 작동유체로 사용할 경우 카트리지 히터용량의 문제로 임계 열 유속(Critical heat flux)에 도달하기 전에 실험을 중단하였으므로 Fig. 3에 나타난 실험결과에는 임

계 열 유속이 포함되어 있지 않음을 밝혀준다. Fig. 4에는 분무액체의 유량, $Q=4.92 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 로 일정하게 설정하고 분무액체의 온도를 변화시켜 표면 열 유속을 측정 한 결과를 나타내었다. Fig. 3과 마찬가지로 (a)에는 편평한 표면에 대한 실험결과를 나타내었으며 (b)에는 정육면체 환이 가공된 냉각면의 실험결과를 나타내었다. Fig. 4의 (a), (b)에서 알 수 있듯이 $\Delta T_f (=T_s - T_f)$ 에 대한 표면 열 유속은 액체의 온도가 변화하여도 거의 일정한 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 다만 ΔT_f 가 높은 영역에서는 아주 미세한 차이이지만 액체의 온도가 증가

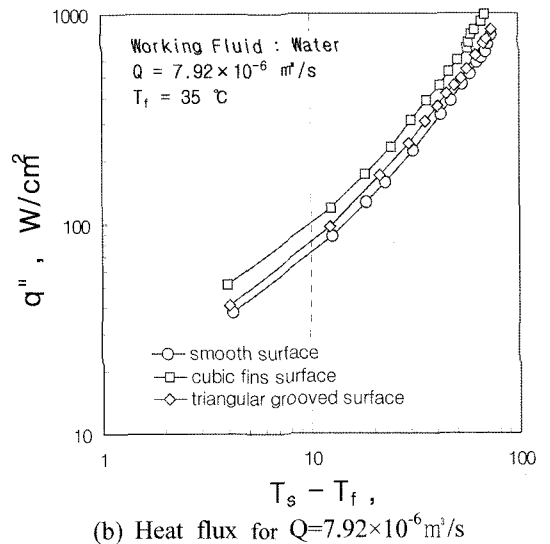
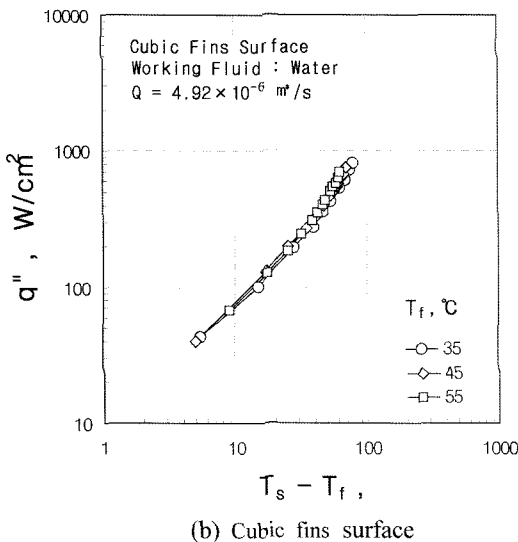
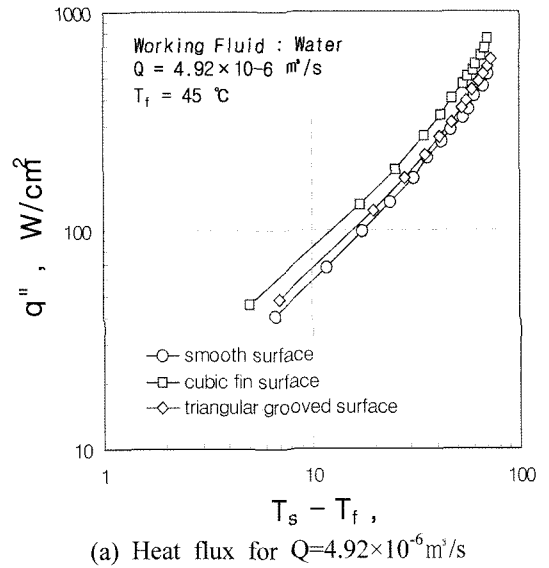
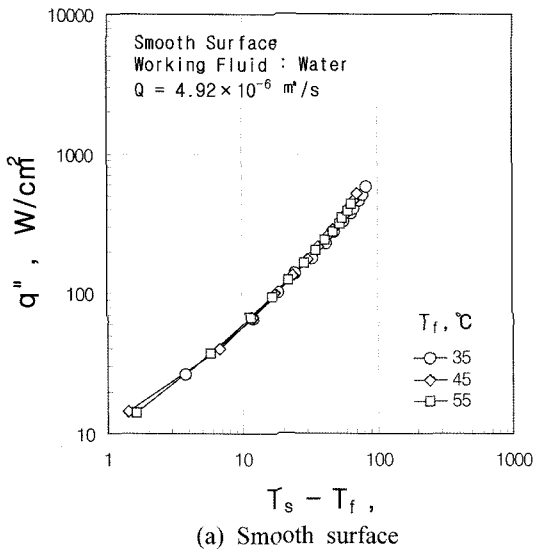


Fig. 4 Spray boiling curves for different subcooling

Fig. 5 Effect of surface structure on heat flux

할수록 표면 열 유속이 약간 증가하고 있음을 알 수 있으며, 이는 동일한 표면온도에서 액체의 온도가 높을수록 비등이 빨리 시작되기 때문인 것으로 판단된다.

Figure 5에는 3종류의 냉각면에 대한 실험결과를 비교하여 나타내었다. 그림으로부터 알 수 있듯이 동일한 분무유량, 액체온도에서 정육면체 환이 가공된 냉각면, 삼각형 그루브가 가공된 냉각면, 편평한 냉각면의 순으로 열 유속이 높게 나타나고 있다. 편평한 냉각면에 비해 마이크로 환이 가공된 냉각면에서 분무냉각 열전달 향상의 원인으로 여러 가지 요인들을 추정할 수 있지만 일반적으로 표면적 증가의 효과를 가장 먼저 생각할 수 있다. 본 실험에서 사용한 정육면체 환 냉각면은 편평한 냉각면에 비해 표면적이 약 2배, 삼각형 그루브 환의 경우 약 2.2배 증가하였음을 기하학적 계산으로부터 알 수 있다. 그러나 Fig. 5에 나타난 실험결과로부터 정육면체 환 냉각면의 경우 열전달이 크게 향상되었으나 삼각형 그루브 환 냉각면의 경우 편평한 냉각면에 비해 열전달 촉진효과가 그리 크지 않음을 알 수 있다. 이러한 실험 결과로부터 분무냉각 열전달이 단순히 표면적에 비례하여 증가하지 않고 있음을 분명히 파악할 수 있다.

일반적으로 고온의 물체에 액체를 분무할 경우 열전달은 액체 충돌에 의한 전도열전달(q_d), 복사열전달(q_r), 기류에 의한 대류열전달(q_a)이 각각 발생하며 실험에서 얻은 분무냉각 열전달은 다음의 식을 이용하여 나타낼 수 있다.

$$q = q_d + q_r + q_a \quad (1)$$

Figure 6의 (a)에 나타난 바와 같이 충돌에 의해 얇게 퍼진 액적으로 열전도에 의해 전달된 열(q_d)은 액체의 온도를 상승(sensible heat)시키거나 또는 액적의 증발

(evaporative heat)에 소비된다. 이 때 열전도에 의해 액적 또는 액체에 전달되는 열은 아래의 열전도식을 이용하여 추정할 수 있다.

$$q = k_f (T_s - T_f) / L \quad (2)$$

여기서 L 은 액막의 두께이며 형성되는 액막의 두께가 얇을수록 전도열전달이 증가하는 것으로 알려져 있다. 일반적으로 마이크로 환이 가공된 냉각면의 경우 Fig. 6의 (b)에 나타난 바와 같이 냉각면 표면에 매우 얇은 액막이 형성되는 것을 가정할 수 있으며, 본 실험에서는 이러한 얇은 액막형성이 분무냉각 열전달의 촉진에 상당히 기여하는 것으로 추정하고 있다. 그러나 이러한 액막형성에 의한 열전달 촉진을 명확히 파악하기 위해서는 얇은 액막이 형성될 수 있는 분무유량조건, 환의 형상 및 치수 등에 대해 더 많은 연구가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 냉각면의 표면온도가 비교적 낮은 강제대류 및 핵 비등영역에서 마이크로 환이 가공된 냉각면 표면의 분무냉각 열전달에 대해 실험적으로 연구하였다. 실험에는 편평한 냉각면과 편평한 냉각면에 비해 표면적이 약 2배인 정육면체 환, 그리고 표면적이 약 2.2배인 삼각형 그루브 환이 가공된 3종류의 냉각면을 이용하였다. 실험결과, 정육면체 환 냉각면의 분무냉각 열전달이 가장 크게 향상되었으며 이러한 실험결과로부터 분무냉각 열전달이 단순히 표면적에 비례하여 증가하지 않고 있음을 분명히 파악할 수 있었다. 본 실험에서는 마이크로 환이 가공된 냉각면 표면에 얇게 형성된 액막이 분무냉각 열전달의 촉진에 기여하는 것으로 추정하고 있지만, 이러한 액막형성에 의한 열전달 촉진을 명확히 파악하기 위해서는 향후 얇은 액막이 형성될 수 있는 분무유량조건, 환의 형상 및 치수 등에 대해 더 많은 연구가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

후 기

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

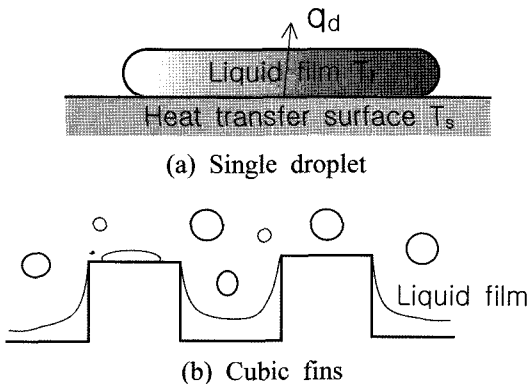


Fig. 6 Formation of liquid film in spray cooling

참고문헌

- (1) S. Toda, "A Study of Mist Cooling (1st Report : Investigation of Mist Cooling)", Heat Transfer Japanese Research, Vol. 1, 1972, pp.39~52.
- (2) Müller, H. and Jescher, R., "Investigation of the Heat Transfer in a Simulated Secondary Cooling Zone in the Continuous Casting Process", Arch Eisenhüttenwes, Vol.44-8, 1973, pp. 589~594.
- (3) 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.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (6) 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.
- (7) 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.
- (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) 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.
- (10) J. H. Kim, S. M. You and Stephen U. S. Choi, "Evaporative Spray Cooling of Plain and Microporous Coated Surfaces", Int. J. of Heat & Mass Transfer, Vol.47, 2004, pp.3307~3315.
- (11) C. C. Hsieh and S. C. Yao, "Evaporative Heat Transfer Characteristics of a Water Spray on Micro-Structured Silicon Surfaces", Int. J. of Heat & Mass Transfer, Vol.49, 2006, pp.962~974.
- (12) Eric C. Silk, J. Kim and K. Kiger, "Spray Cooling of Enhanced Surfaces (Impact of Structured Surface Geometry and Spray Axis Inclination)", Int. J. of Heat & Mass Transfer, Vol.49, 2006, pp.4910~49~20.
- (13) C. Sodtke and P. Stephan, "Spray Cooling on Micro Structured Surfaces", Int. J. of Heat & Mass Transfer, Vol.49, 2007, pp.4089~4097.
- (14) Y. C. Kim, "Study on Boiling Heat Transfer of FC-77 in Spray Cooling", J. of ILASS-KOREA, Vol.12-4, 2007, pp.179~184.