

## 마이크로다공성 발열체 표면에서의 액체분무 냉각성능 특성

김 윤 호, 최 치 환, 이 규 정\*

고려대학교 기계공학과 대학원, \*고려대학교 기계공학과

### Characteristics on Spray Cooling Performance on the Micro-Porous Coated Surfaces

Yoon-Ho Kim, Chi-Hwan Choi, Kyu-Jung Lee\*

Graduate School of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

\*Department of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

(Received August 17, 2005; revision received February 16, 2006)

**ABSTRACT:** Experiments on evaporative spray cooling on the square plate heaters with plain or micro-porous coated surfaces were performed in this study. Micro-porous coated surfaces were made by using DOM [Diamond particle, Omegabond 101, Methyl-Ethyl-Keton] method. In case of purely air-jet cooling, the micro-porous coating doesn't affect the cooling capacity. In spray cooling three different flow patterns (complete wetting, evaporative wetting, dryout) are observed on both plain and micro-porous coated surfaces. The effects of various operating conditions, such as water flow rate, particle size, and coating thickness were investigated on the micro-porous coated surfaces. It is found that the level of surface wetting is an important factor to determine the performance of spray cooling. It depends on the balance between absorbed liquid amount by capillary force over porosity and the evaporative amount. The micro-porous coated surface has largest cooling capacity, especially in the evaporative wetting zone. It is found that the effects of liquid flow rate and coating thickness are significant in evaporative wetting zone, but are not in complete wetting and dryout zones.

**Key words:** Spray cooling(분무냉각), Micro-porous coating(마이크로다공성 코팅), Heat flux(열 유속), Heat transfer coefficient(열전달계수)

#### 기호설명

- $h$  : 열전달계수 [ $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ]  
 $I$  : 전류(ampere) [A]  
 $k$  : 열전도율 [ $\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$ ]  
 $p$  : 입자 크기 [ $\mu\text{m}$ ]  
 $q''$  : 단위면적당 열유속 [ $\text{kW}/\text{m}^2$ ]

$t$  : 코팅 두께 [ $\mu\text{m}$ ]

$T_s$  : 외기온도 [ $^\circ\text{C}$ ]

$T_w$  : 발열체온도 [ $^\circ\text{C}$ ]

$\Delta T$  : 발열체온도와 외기온도의 차 ( $T_w - T_s$ )

$V$  : 전압(volts) [V]

#### 하첨자

\* Corresponding author

Tel.: +82-2-3290-3359; fax: +82-2-928-9768

E-mail address: kjlee@korea.ac.kr

$s$  : 외기

$w$  : 발열부 벽면

## 1. 서 론

최근 전자장비 및 통신기기의 고성능화 및 고집적화로 인해 전자칩에서 열유속(Heat flux)/발열량이 증대되었고, 이로 인해 장비의 신뢰성 및 내구성에 많은 문제점이 나타나고 있는 실정이다. 따라서, 좁은 공간에서 발생된 고열유속을 효과적으로 외부로 방열시킬 수 있는 기술의 개발이 요구되어지고 있다. 기존에 주로 사용된 공랭식 냉각방법은 고열유속 통신장비의 적용에 한계가 있으며 압력강하 및 소음발생도 문제점으로 제기되고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위한 방법의 하나로, 액체냉각 기술에 대해 많은 연구가 진행되고 있다. 액체냉각은 공기냉각에 비하여 열전도도 및  $Pr$  수가 커서 대류열전달에 유리하고, 밀도 및 비열이 크므로 열용량 측면에서도 장점을 가지고 있다. 그중 작동유체를 가압한 후 노즐분사를 통해 만든 미립화한 액적을 고온면에 충돌시켜 액체의 현열 및 잠열에 의해 고온물체를 냉각시키는 방법인 스프레이 냉각(Spray cooling)이 있다. 스프레이 냉각은 액적의 크기, 유량, 속도 등을 적절히 조절함으로써 냉각속도의 제어가 가능하며, 냉각성능이 우수해서 국부적으로 열전달면의 온도제어를 보다 효과적으로 할 수 있어 고성능 및 고밀도 전자장비 냉각의 산업적 응용이 증가하고 있는 추세이다.

스프레이 냉각에 관한 연구는 분무속도, 노즐 형상 및 크기, 액적의 크기, 노즐과 냉각 표면과의 거리, 작동유체의 압력 및 온도 등 다양한 인자가 비등열전달에 미치는 영향을 고찰하여 왔다. Choi and Yao<sup>(1)</sup>는 수평상태와 수직상태에서 분무에 의한 기본적인 열전달 향상 메카니즘에 대하여 연구를 수행하였다. 막비등 영역 내 수직상태에서 발열부 표면의 액적이 하향수직 흐름으로 인해 열제거 능력이 수평상태보다 높은 열전달성능을 가짐을 제시하였다. Mudawar and Valentine<sup>(2)</sup>은 작동유체인 물을 이용하여 다양한 유동양식의 분무 비등곡선에서 국부적인 냉각 특성을 알기 위해 스프레이 냉각실험을 수행하여 작동유체의 물성 및 분무량에 따른 체적유속이 열전달 향상에 지배적인 영향인지를 제시하였다. Grissom and Wierum<sup>(3)</sup>은 분무 중발냉각이 일어날 수 있는 표면온도에 대한 연구를 하였고, 단위면적당 질량 유량과 분무 중발냉각 사이의 온도관계를 제시하

였다. Fujimoto et al.<sup>(4)</sup>은 고온 평판에서 분무 충돌제트에 관한 실험을 수행하여, 액적 크기, 분사속도, 액적 수밀도(number density)에 관련된 열전달계수를 제시하였다. Oliphant et al.<sup>(5)</sup>은 액체제트와 분무 충돌제트에 의한 냉각을 비등이 일어나지 않는 온도범위 내에서 실험을 실시하여 냉각성능을 제시하였다. 이와 같이 분무냉각에 있어 액적상태 및 분사속도에 의한 열전달 특성에 관한 연구는 많이 이루어져 왔으나 발열체 표면처리를 통한 분무냉각과 열전달성능 향상에 대한 연구는 미흡한 실정이다. O'Connor and You<sup>(6)</sup>는 Dropping을 이용한 ABM [Aluminum particle, Bevcon brushable, Methyl-Ethyl-Ketone(M.E.K)] 방식으로 알루미늄 분말입자를 구리블록 표면에 코팅하여 풀비등 영역에서 실험을 하였고 코팅에 의한 열전달성능 향상을 제시하였다.

본 연구에서는 표면처리에 따른 냉각성능을 살펴보기 위하여 노즐에 의한 분무 직경 및 분사각도 영향보다는 표면처리에 따른 냉각성능 변화에 주안점을 두고 실험하였다. 작동유체로 공기와 물을 사용하여 코팅이 처리되지 않은 평활한 구리블록 평판과 마이크로다공성 표면처리를 한 구리블록 평판을 수직하게 설치하여 서로의 냉각성능을 비교하였다. 마이크로다공성 코팅 표면 실험인 경우, 입자 크기 및 코팅 두께, 노즐의 유량에 따른 냉각 특성을 조사하여 냉각시스템 설계에 필요한 기초자료로 제시하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

본 실험은 외부의 온도영향을 최소하기 위해 비교적 단열이 잘 유지되며 내부 열유동 현상을 관찰할 수 있는 투명한 재질인 P/C(Poly-Carbonate) 실험조를 제작하였고 그 안에 분무장비와 시험부를 설치하였다. Fig. 1에 본 실험장치의 개략도를 나타내었다. 실험조 내에 분무장비인 노즐은 지지대에 단단히 고정되어 압축기로부터 압축공기를 공급받도록 하였다. 노즐은 한 종류로 국한하였다. 노즐의 직경은 0.3 mm이고, 발열체 표면부에 균일한 액적이 분포될 수 있도록 분무노즐과 발열체 사이의 거리, 분무각도(Spray cone angle)는 20°, 250 mm가 되도록 설치하였다. 압축

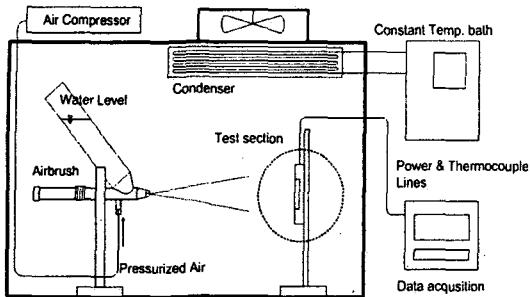


Fig. 1 Schematic of an experimental apparatus.

공기압과 실험조 내 온도는 48.2 kPa, 21°C로 일정하게 유지하였고, 일정량의 유량과 압축공기를 유지하기 위해 공기필터 압력조절계가 사용되었다. 냉각액체로 물을 사용하여 일정유량으로 분무노즐에 공급하였다. 유량은 노즐의 유량조절밸브를 이용하여 조절하였다. 실험조 내 외기온도는 발열체 주위에 4개의 열전대를 설치하여 측정하였고 냉각물의 온도와 같은 21°C를 유지하였다.

Fig. 2은 시험부의 제작 및 구성을 나타내었다. 크기가 20 mm×20 mm×4 mm인 구리블록 밑에 Ni-Cr선을 설치하고 열전도성이 좋은 Omega Bond 200을 사용하여 발열체인 구리블록과 접착시켰고 Teflon substrate에 열이 전달되지 않도록 구리블록을 제외한 주위공간에 에폭시(3M1838-L B/A)를 도포하였다. 구리블록의 온도를 측정하기 위해 각각의 발열부에 대해서 측면에 2개의 홀을 직경 1 mm, 깊이 10 mm로 가공하여 T-type 열전대를 삽입하였다.

발열부인 구리블록 표면은 Dropping을 이용한 DOM [Diamond particle, Omegabond 101, Methyl-Ethyl-Keton(M.E.K)]으로 균일한 다이아몬드 분말입자를 구리블록 표면에 코팅하였다. 코팅한 구리블록을 Oven에서 약 423 K의 온도에서 한 시간 정도 가열하여 M.E.K를 완전히 증발시켰다. 시험부인 구리블록과 다이아몬드 입자에 주요 재원을

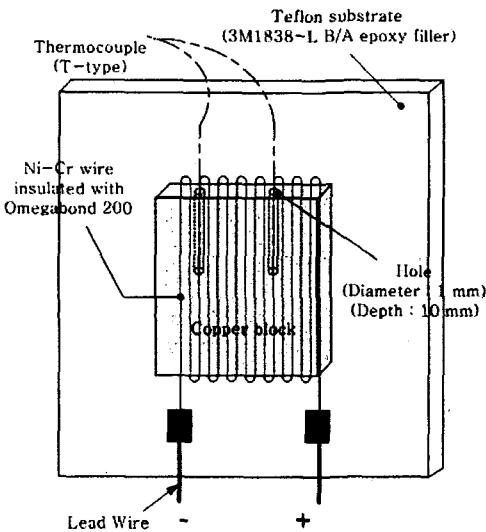


Fig. 2 Schematic of a test section.

Fig. 3 SEM image of a micro-porous coated surface (Particle size:  $6\pm2 \mu\text{m}$ ).

Table 1에 제시하였다. 코팅 두께와 입자 크기는 마이크로미터와 SEM 이미지를 이용하여 확인하였다. Fig. 3은 구리 표면을 DOM으로 코팅한 마이크로다공성 코팅 단면 SEM 이미지를 나타낸다.

Table 1 The specifications and dimensions of test sections

Teflon substrate	80 mm×80 mm×10 mm (W×L×H)
Copper block	20 mm×20 mm×4 mm
Nozzle & Heater distance	L = 250 mm
Ni-Cr wire	$\varphi=0.45 \text{ mm}$
Particle size ( $p$ )	$6\pm2 \mu\text{m}, 13\pm3 \mu\text{m}, 25\pm5 \mu\text{m}$
Coating thickness ( $t$ )	43 $\mu\text{m}, 103 \mu\text{m}, 137 \mu\text{m}, 157 \mu\text{m}, 169 \mu\text{m}$

## 2.2 실험방법

발열부에 가해지는 열유속 및 열전달계수는 발열체 주위의 외기온도와 발열부 내 열전대의 평균 온도를 측정하여 온도차( $T_w - T_s$ )로 평가하였다. 단위면적당 열유속 및 열전달계수는 식(1)과 같다.

$$q'' = IV/A = h \cdot (T_w - T_s) = h \cdot \Delta T \quad (1)$$

$$h = \frac{q''}{(T_w - T_s)} = \frac{q''}{\Delta T}$$

여기서,  $q''$ 는 단위면적당 열유속( $\text{kW}/\text{m}^2$ )이며,  $I$ 는 전류(Ampere),  $V$ 는 전압(Volts), 그리고  $A$ 는 발열부 표면의 전열면적을 나타낸다.

발열부에 공급한 발열량은 Power meter system을 사용하여 측정하였고 모든 온도, 압력 및 전력에 대한 데이터는 Data acquisition system을 이용하여 저장하였다. 열유속은 DC 전원공급기에 의해 단계적으로 전압을 올려가며 조정한다. 이때 발열부와 외기온도의 차가 약 0.2 K에서 균일하다고 판단되면 데이터를 얻은 후 전압을 올려 다음 실험을 수행하였다.

## 2.3 액적 직경측정 및 불확실도

본 실험에서는 액적의 평균 직경측정을 위하여 빔의 회절을 이용하여 액적의 크기를 측정하는 Malvern Particle Sizer를 사용하였으며, 측정 입경범위가 5.8~564  $\mu\text{m}$ 인 300 mm 렌즈를 사용하였다. 공급공기 압력과 실험조 내 온도는 48.2 kPa, 21°C로 일정하게 유지한 상태에서 분무시 측정한 결과값을 가지고 Rosin-Rammler 모델을 이용하여 액적의 평균 직경인 SMD(Sauter Mean Diameter)를 구하였다. 그 결과 본 실험의 분무노즐의 액적의 평균 직경은 약 14  $\mu\text{m}$ 로 측정되어졌다.

실험결과에 대한 열유속의 불확실성은 Kline and McClintock<sup>(7)</sup>가 제안한 오차해석 공식에 의거하여 본 실험의 발열부에서 6% 이내의 결과를 얻었다. 온도의 불확실성은 열전대의 캘리브레이션(Calibration) 오차, 정확성(Accuracy), 그리고 발열체에 측정되어진 온도와 외기온도의 오차를 평가하여  $\pm 0.6$  K로 계산되어졌다.

## 3. 실험결과 및 고찰

본 연구에서는 코팅 표면에 관한 스프레이 냉각성을 평가하기 위해 코팅이 처리되지 않은 구리블록 평판과 DOM 표면처리 평판에 대하여 실험하였다. DOM 표면인 경우, 코팅의 두께 및 코팅분말의 크기, 분무노즐의 유량을 변화시켜 실험을 수행하여 평가하였다. 실험은 같은 조건에서 3번 반복 실험하였으며, 주어진 열유속에서 작동유체와 발열부 표면의 온도차이가 갑자기 증가하는 부분까지 수행하였다.

### 3.1 공기분사 냉각특성

Fig. 4는 분무노즐을 통과한 48.2 kPa의 압축공기만으로 코팅이 처리되지 않은 구리블록 표면과 입자 사이즈와 코팅 두께가 각각  $13 \pm 3 \mu\text{m}$ ,  $137 \mu\text{m}$ 인 DOM 표면을 냉각시켰을 때 열유속과 표면온도와 대기온도의 차( $\Delta T$ )를 나타내었다. 발열부의 열유속이 증가함에 따라 일정하게 온도가 증가하는 것을 볼 수 있으며 평활한 표면과 마이크로다공성 코팅 표면에 대한 공기분사 냉각성능곡선이 일치하는 것은 마이크로다공성 코팅이 냉각성능에 영향을 미치지 않음을 나타낸다. 이로부터 마이크로다공성 코팅된 표면은 이상(Two-phase) 열전달에서는 효율향상에 중요한 인자로 작용하나 단상 공기대류에 의한 열전달에서는 크게 영향이 없음을 알 수 있다. 주어진 발열부에 대한 선형 상관식은 다음과 같다.

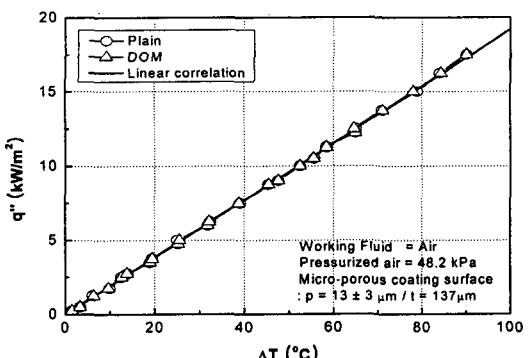


Fig. 4 Comparison of heat flux for the plain and DOM surfaces in case of the air-jet cooling.

$$q'' = 0.1919 \Delta T$$

여기서,  $q''$ 는 단위면적당 열유속( $\text{kW}/\text{m}^2$ )을 나타내고,  $\Delta T(\text{°C})$ 는 발열부 주위의 외기온도와 구리표면의 온도차이이다.

공기분사 냉각에서 얻은 선형상관식을 이용하여 액체분무를 통한 평판과 마이크로다공성 코팅 표면의 증발냉각에 의한 열전달향상 정도를 비교하였다.

### 3.2 평판과 마이크로다공성 코팅 표면의 액체분무 냉각

Fig. 5는 공기분사 및 액체분무 냉각시 구리를 평면과 DOM 표면에서 열유속 변화에 따른 표면온도와 대기온도차( $\Delta T$ )의 관계를 나타내었다. DOM 표면은 발열부 표면적이  $20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ 이고, 다이아몬드 입자 크기  $13\text{ }\mu\text{m}$ , 코팅 두께는 약  $137\text{ }\mu\text{m}$ 이다. 액체분무 냉각은 실선으로 나타난 공기분사 냉각방식에 비하여 월등히 높은 냉각성능을 보여준다. 액체분무 냉각이 공기분사 냉각보다 높은 냉각성능을 나타내는 이유는 저열유속구간( $25\text{ kW}/\text{m}^2$  이하)에서 액체의 직접 발열면 접촉과 고열유속구간( $25\text{ kW}/\text{m}^2$  이상)에서 증발에 의한 잠열로 공기에 의해 표면 열유속을 신속히 제거해 주기 때문이다.

구리블록 표면과 DOM 표면의 액체분무 냉각 결과에서 저열유속( $25\text{ kW}/\text{m}^2$  이하)에서는 두 표면의 경우, 비슷한 냉각특성을 보이나 고열유속

( $25\text{ kW}/\text{m}^2$  이상)에서는 DOM 표면이 보다 우수한 냉각특성을 나타내고 있다. 또한, 고열유속으로 진행함에 따라 발열면의 온도가 상승하여 두 경우 모두 냉각성능이 떨어짐을 보인다. 위의 결과로부터 두 열유속 사이 영역에서 냉각성능을 좌우하는 냉각 메카니즘의 변화를 추측할 수 있다.

발열면에 공급되어지는 액체량과 발열면 접촉 후 증발되어지는 액체량의 비는 본 실험의 냉각성능을 좌우하는 주요 요소이다. 저열유속에서는 발열부 온도가 낮아 증발량보다는 공급량이 많은 영역이다. 따라서, 이 영역에서는 발열면이 액체로 덮여 있고, 수직된 평판을 따라 흘러내리는 액체도 볼 수 있다. 즉, 표면이 액체에 의해 완전 젖음(Wetting)상태에 있는 것이다. 이러한 영역에서는 구리블록 표면과 DOM 표면의 냉각성능의 차이가 없는 것으로 나타난다. 열유속이 높아짐에 따라 발열체 표면의 온도가 올라가며, 증발량이 증가하게 된다. 따라서 공급되어지는 유량과 증발량이 균형을 이루게 됨으로써 표면에서의 액체의 양이 현저히 줄어들게 된다. 즉, 표면에서 액체의 젖음성이 떨어진다. 이러한 현상은 구리블록 표면에서는  $20\sim30\text{ kW}/\text{m}^2$  열유속 구간에서, DOM 표면은  $30\sim40\text{ kW}/\text{m}^2$  열유속 구간에서 발생한다.

고열유속 영역으로 보다 진행하면 발열부의 표면에 공급되어진 액체는 바로 증발하여 표면에 액체가 존재하지 않는, 즉 드라이아웃(Dryout) 현상이 발생한다. 드라이아웃은 비동열전달에서 나타나는 임계열유속(Critical Heat Flux, CHF)과 비슷한 현상으로 작동유체와 표면의 온도차가 급속히 커지면서 냉각성능이 크게 떨어진다. 드라이아웃 이후 액적이 표면에 보이지 않아 냉각성능은 공기분사 냉각특성을 가지며 공기분사 냉각시 나타나는 기울기와 유사한 값을 가지게 된다.

위에서 살펴본 바와 같이, 공급량과 증발량 차이에 따른 액체 젖음성에 의해 냉각특성이 다른 세 가지 구간, 즉 공급유량이 많은 완전젖음 구간, 공급량과 증발량이 균형이 갖는 증발 구간, 액체가 완전히 증발된 드라이아웃 구간이 존재함을 알 수 있다.

완전젖음을 가지고 있는 저열유속에서는 구리블록 표면과 DOM 표면의 차이점이 나타나지 않은 반면, 열유속이 증가하여 증발 구간에 이르면 젖음성이 차이를 보인다. 이는 Fig. 3의 SEM 이

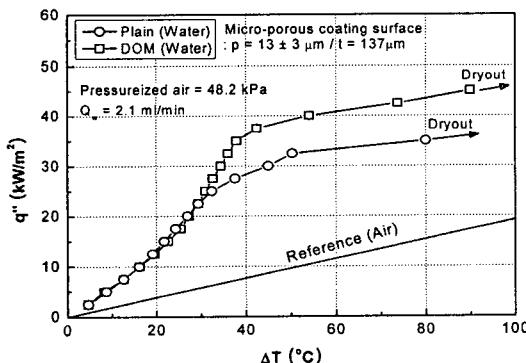


Fig. 5 Comparison of heat flux for the plain and DOM surfaces in case of spray cooling.

미지에서 보여진 바와 같이 표면에 다이아몬드 코팅의 공동 개수의 증가로 인한 다공성 표면구조가 중요 요소로 작용함을 알 수 있다. 액체다공성 표면구조에 접촉하게 되면 모세관 현상으로 다공성에 스며들게 되어 다공표면에 넓고 깊게 분포하게 된다. 이 현상으로 인하여 표면의 젖음성이 좋아지게 된다. 증발 구간인  $20\sim35\text{ kW/m}^2$  구간에서 구리블록보다 DOM 표면이 같은 공급 유량조건에서 다공성에 의한 흡수효과로 보다 높은 젖음성을 유지하여 DOM 표면이 구리블록 표면보다  $10\text{ kW/m}^2$  정도 증발 구간이 연장됨을 볼 수 있다. 이러한 현상이 열전달 향상을 가져오며, 이 후 드라이아웃 구간에서는 비슷한 열전달성능을 나타냄을 보여준다.

Fig. 6은 식(1)을 사용하여 열유속에 대한 열전달계수 변화를 나타내었다. 공기분사 냉각은 열유속에 관계없이 열전달계수가 일정하게 나타나고, 액체분무 냉각의 경우 열유속이 높아짐에 따라 열전달계수가 증가되다가 증발 구간에서 최고점에 이른 후 드라이아웃 구간에서 급격히 낮아짐을 보여준다. 열전달계수가 열유속이 증가함에 따라 조금씩 증가하는 경향은 열유속이 높아짐에 따라 증발잠열의 효과가 증가되어 열전달을 향상시키기 때문이다. 또한, DOM 표면의 경우 구리블록 표면보다  $25\sim35\text{ kW/m}^2$ 에서 높은 열전달계수를 보여주고 있으며, 이는 앞서 언급한 바와 같이 증발 구간에서 액체 젖음성이 좋기 때문이다. 증발 구간  $20\sim35\text{ kW/m}^2$ 에서 DOM 표면의 평균 열전달계수는 구리블록보다 약 130%, 공기분사방식보다는 약 420% 정도 높게 나타났다.

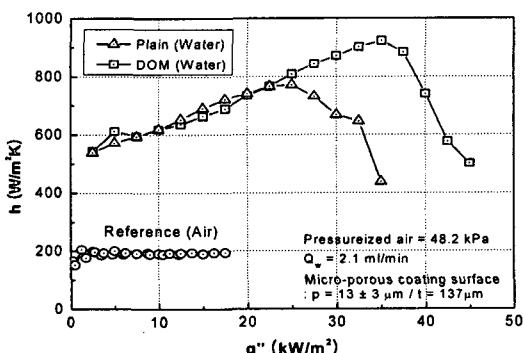


Fig. 6 Heat transfer coefficients with variations in heat flux for plain and DOM surfaces.

### 3.3 분무유량과 코팅상태에 따른 냉각성능

Fig. 7은 48.2 kPa 압축공기로 노즐에서 분무되어지는 유량을  $1.1\sim2.7\text{ ml/min}$ 로 변화시켜 가며 열유속과 표면온도와 대기온도의 차의 관계로 나타내었고, Fig. 8에서는 식(1)로 계산된 열전달계수를 열유속 함수로 나타내었다. 각 유량에서 나타나는 전열량 및 열전달계수의 패턴은 유사한 경향을 나타내고 있다. 공급유량이 다르다 할지라도 완전증발 구간에서는 유량변화 효과가 나타나지 않음을 볼 수 있다. 이 영역에서는 단지 표면온도에 따른 증발유량이 결정되며 이 증발유량이 열유속 제거 메카니즘이기 때문이다. 그러나, 열유속이 증가하면 표면젖음성이 중요한 역할을 하는 증발 구간에 이르게 되고, 이 영역은 공급되는 유량이 중요한 변수가 된다. 공급유량이 증가

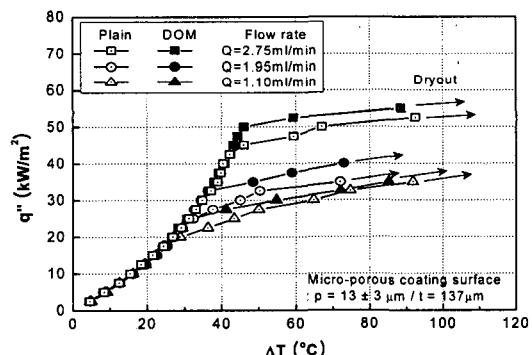


Fig. 7 Effect of water flow rate on heat flux for plain and DOM surfaces.

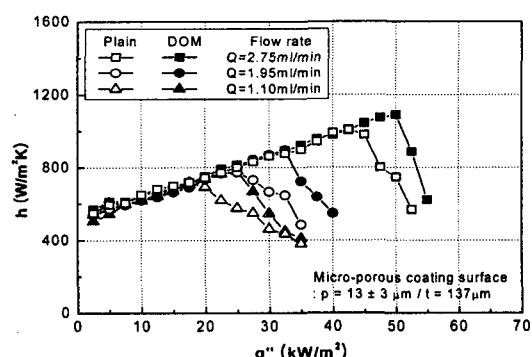


Fig. 8 Heat transfer coefficients with variations in heat flux for three different water flow rates.

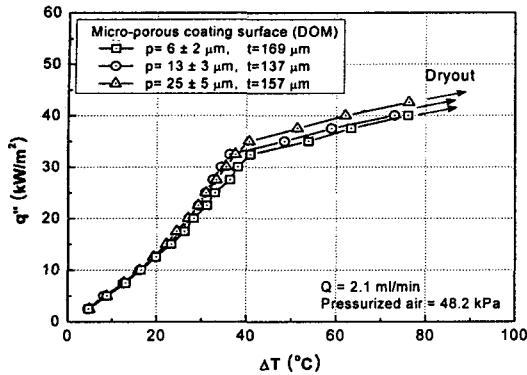


Fig. 9 Effect of micro-porous coating particle sizes on heat flux.

하면 구리블록 표면과 DOM 표면 모두, 표면의 젖음의 영향이 고열유속에도 지속되어 냉각성능이 좋아지며 높은 열전달계수를 갖도록 한다. 또한, DOM 표면인 경우가 구리블록보다 더욱 좋은 성능을 나타낸다.

Fig. 9은 다이아몬드 입자 크기( $6 \mu\text{m} \pm 2$ ,  $13 \mu\text{m} \pm 3$ ,  $25 \mu\text{m} \pm 5$ )에 따른 열전달 변화를 보기 위하여 DOM 표면에 대해 일정한 유량(2.1 ml/min)으로 분무하였을 때의 열유속과 표면온도와 대기온도의 차를 나타내었다. 이때 비교적 균일한 코팅 두께( $137 \mu\text{m}$ ,  $157 \mu\text{m}$ ,  $169 \mu\text{m}$ )를 유지하였다. 본 실험에서 사용한 입자의 크기 차가 크지 않아 결과는 큰 차이를 보이고 있지 않으나, 입자 크기가 클수록 냉각성능이 좋아짐을 보인다. 다이아몬드 입자의 크기가 작아지면 표면적 및 모세관력은 증가하나, 점성에 의한 유동저항의 증가하여 액적의 흡수를 억제함으로써 젖음성이 떨어지게 된다. 서로의 상쇄작용으로 본 실험에서는 입자 크기가 작아질수록 젖음성이 나빠지고 냉각성능이 떨어지는 것으로 나타났다. 그러나, 이러한 상쇄작용은 증발열전달에 대한 다이아몬드 입자 크기 영향을 최소화하리라 판단된다.

Fig. 10은 유량(2.1 ml/min)과 다이아몬드 입자 크기( $13 \mu\text{m} \pm 3$ )가 일정한 조건인 실험에서 코팅 두께를  $43 \mu\text{m}$ ,  $103 \mu\text{m}$ ,  $137 \mu\text{m}$ 로 변화시켜 가며 냉각성능 변화를 살펴보았다. 또한 구리블록 표면 결과와도 비교하였다. 코팅 두께가  $43 \mu\text{m}$ 인 경우, 증발특성은 구리블록의 증발특성과 비슷하였다. 단지, 최고 열전달계수를 갖는 지점이 각각  $30 \text{ kW/m}^2$ ,  $22.5 \text{ kW/m}^2$  위치함을 보여 마이크로

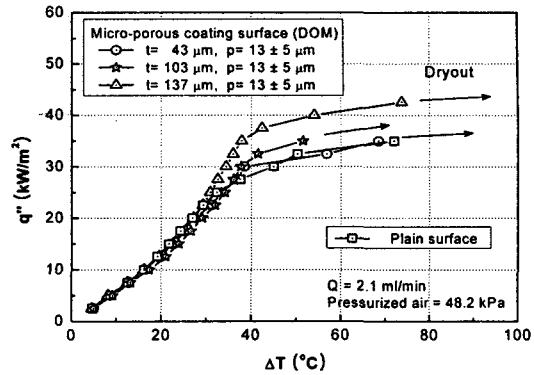


Fig. 10 Effect of micro-porous coating thickness on heat flux.

다공성 효과가 있음을 보여준다. 코팅 두께가 증가하면 앞서 언급한 바와 같이 액체 젖음성이 좋아져 보다 좋은 냉각성능을 가지게 되며 실험 결과에 의해 판명되었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 코팅이 처리되지 않은 구리블록 표면과 마이크로다공성 코팅 표면인 DOM 표면에 대하여 공기분사와 액체분무의 냉각성능 및 분무유량, 입자 크기, 코팅 두께에 따른 냉각성능 변화를 살펴보았다.

(1) 액체분무 냉각은 액체의 증발잠열로 인해 공기분사 냉각에 비하여 우수한 냉각성능 및 높은 열전달계수를 나타내었다.

(2) 공기분사의 경우 마이크로다공성 표면처리에 의한 냉각 열전달향상은 거의 나타나지 않았다.

(3) 마이크로다공성 적용시 발열면 냉각성능의 주요한 인자는 공동 개수의 증가와 함께 모세관에 의한 표면 액체젖음성으로 판명되었으며, 이로 인해 완전젖음 구간, 증발 구간, 드라이아웃 구간이 존재하고 증발 구간에서 최대의 냉각성능을 보였다.

(4) 증발 구간인  $20 \sim 35 \text{ kW/m}^2$  열유속 구간에서 액체분무 냉각시 마이크로다공성 표면인 DOM 표면의 평균 열전달계수는 구리블록보다 약 130%, 공기분사방식보다는 약 420% 정도 높게 나타났다.

(5) 유량, 입자 크기 및 코팅 두께의 영향은 완전젖음 구간과 드라이아웃 구간에서는 크게 나타

나지 않았으나, 증발 구간에서 위의 인자들이 액체 젖음성에 영향을 주어 냉각성능에 영향을 미침이 판명되었다.

## 후 기

본 연구는 2004년도 한국과학재단[특정기초연구 : R01-2002-000-00481-0(2004)]의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- Choi, K. J. and Yao, S. C., 1987, Mechanisms of film boiling heat transfer of normally impacting sprays, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 30, pp. 311-318.
- Mudawar, I. and Valentine, W. S., 1989, Determination of the local quench curve for spray-cooled metallic surfaces, Journal of Heat Treating, Vol. 7, No. 2, pp. 107-121.
- Grissom, W. M. and Wierum, F. A., 1981, Liquid spray cooling of a heated surface, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 24, pp. 261-271.
- Fujimoto, H., Hatta, N., Asakawa, H. and Hashimoto, T., 1997, Predictable modeling of heat transfer coefficient between spraying water and a hot surface above the leidenfrost temperature, ISIJ International, Vol. 37, No. 5, pp. 492-497.
- Olivant, K., Webb, B. W. and McQuay, M. Q., 1998, An experimental comparison of liquid jet array and spray impingement cooling in the non-boiling regime, Experimental Thermal and fluid science, Vol. 18, pp. 1-10.
- O'Connor, J. P. and You, S. M., 1995, A painting technique to enhance pool boiling heat transfer FC-72, ASME Journal of Heat Transfer, Vol. 117, No. 2, pp. 387-393.
- Kline, S. J. and McClintock, F. A., 1953, Describing uncertainties in single-sample experiments, Mech. Eng., Vol. 75, No. 1, pp. 3-12.
- Bar-Cohen, A., 1997, Thermal management of microelectronics in the 21st century, IEEE/CPMT Electronic Packing Technology Conference.
- Fujimoto, H., Hatta, N., Asakawa, H. and Hashimoto, T., 1997, Predictable modeling of heat transfer coefficient between spraying water and a hot surface above the leidenfrost temperature, ISIJ International, Vol. 37, No. 5, pp. 492-497.
- Kim, J. H., You, S. M. and Stephen, U. S. Choi, 2004, Evaporative spray cooling of plain and microporous coated surfaces, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 47, pp. 3307-3315.
- Webb, R. L., 1981, The evolution of enhanced surface geometries for nucleate boiling, Heat Transfer Engineering, Vol. 2, No. 3-4, pp. 46-69.
- Kurihara, H. M. and Myers, J. E., 1960, Effects of superheat and roughness on the boiling coefficients, AIChE J., Vol. 6, No. 1, pp. 83-91.
- Chang, J. Y. and You, S. M., 1997, Boiling heat transfer phenomena from micro-porous and porous surfaces in saturated FC-72, International Journal of Heat Mass Transfer, Vol. 40, No. 18, pp. 4437-4447.