

흡습 냉각 원리를 이용한 소형 냉각 패드에 관한 연구

황 용 신, 이 대 영[†], 김 우 승*

한국과학기술연구원 열·유동제어연구센터, *한양대학교 공과대학 기계공학부

Conceptual Development of a Subminiature Cool Pad Applying Sorption Cooling Effect

Yong-Sheen Hwang, Dae-Young Lee[†], Woo Seung Kim*

Thermal/Flow Control Research Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 130-650, Korea

*Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received October 15, 2003; revision received December 8, 2003)

ABSTRACT: This paper describes conceptual development and idea-verification of a sub-miniature portable cooler which does not necessitate any pre-cooling nor any external energy supply. The basic principle of the cooling mechanism is the vaporization of water and subsequent cooling due to the evaporative latent heat loss. In this work, the vaporization of the water is stimulated by desiccant material to improve the cooling effect. The evaporative cooling caused by the desiccant is modeled and analyzed considering the sorption characteristics of the desiccant. In addition, the portable cooler is fabricated in the shape of a thin pad, and its cooling characteristics are tested and compared with the analytic results.

Key words: Sorption cooling(흡습 냉각), Subminiature portable cooler(소형 휴대용 냉각기), Desiccant(제습제), Evaporative latent heat(증발잠열), Cool pad(냉각 패드)

기 호 설 명

A : 패드의 면적 [m^2]

c : 비열 [$J/g^\circ C$]

h : 열전달계수 [W/m^2K]

i_{fg} : 물의 증발잠열 [J/g]

K : 물질전달계수 [g/sm^2]

M : 질량 [g]

m : 질량분율(mass fraction)

P : 압력 [Pa]

P_o : 대기압력 [Pa]

T : 온도 [$^\circ C$]

t : 시간 [s]

W_d : 제습제 단위질량당 흡습량 [$g/g\ desi$]

그리스 문자

ϕ : 상대습도

하첨자

d : 제습제(desiccant)

s : 포화(saturation)

w : 물(water)

∞ : 냉각 패드의 외부

[†] Corresponding author

Tel.: +82-2-958-5674; fax: +82-2-958-5689

E-mail address: ldy@kist.re.kr

1. 서 론

본 연구는 제습제를 이용하여 물의 증발을 촉진시킴으로써 저온을 얻는 소형 무동력 흡습 냉각기에 관한 것이다.

물 증발에 의한 잠열 열전달을 이용하면 현열 열전달만을 이용하는 경우에 비하여 수배에서 수십 배까지 냉각성능을 향상시킬 수 있다. 이러한 방식은 자연적 자원을 이용한다는 점에서 환경친화적이라는 장점이 있으며, 적용방법이 간단하면서도 매우 효과적인 냉각성능을 제공할 수 있어, 공조시스템, 전자장비 냉각, 인체발열 냉각 등 다양한 분야에 적용되고 있다.⁽¹⁻⁴⁾

Maclaine-Cross and Banks⁽⁵⁾는 평판 사이의 증발 열전달을 일차원 접근방법으로 해석하고, 수증기 포화곡선의 선형적 근사 및 단위 루이스(Lewis) 수 가정을 통하여 간략화된 해석모델을 제시하였다. Song et al.⁽⁶⁾은 다공성 물질에서의 열전달 해석방법을 이용하여 핀으로 채워진 채널에서의 열 및 물질전달에 대한 이차원 모델을 제시하였다. Hall and Mackie⁽⁷⁾는 증발잠열을 이용하여 액체를 응고하는 과정을 해석하여, 주위 습도가 증발과 응고에 미치는 영향을 연구하였다.

증발 냉각은 주위환경이 건조한 경우에서는 매우 효과적이지만, 습도가 높은 경우에는 증발량이 작아지므로 증발에 의하여 얻을 수 있는 냉각효과가 크지 않다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 제습제를 이용하여 증발을 촉진시키는 방법을 고안하였다. 제습제는 습기에 대해 강한 친화력이 있는 물질로 제습제의 이용으로 주위 습도에 관계없이 증발 냉각효과를 얻을 수 있다.

본 연구에서는 제습제와 물 패드(water pad)로 이루어진 흡습 냉각 패드를 제작하고, 냉각효과를 측정한다. 또한 흡습 냉각과정을 이론적으로 분석하여, 흡습 냉각효과를 증대시킬 수 있는 방법을 연구하며, 그 효과를 실험을 통하여 확인한다.

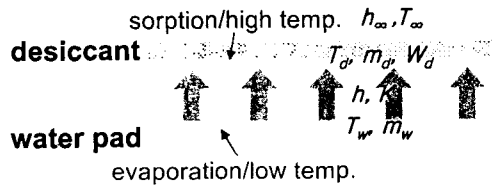


Fig. 1 Schematic of the sorption cool pad.

2. 흡습 냉각 패드의 제작

본 연구에서 고안한 흡습 냉각 패드의 개념적 구조를 Fig.1에 나타내었다. 흡습 냉각 패드는 제습제층과 물층의 두 층으로 구성되어 있으며, 두 층은 직접 접촉되지 않도록 사이에 일정한 간격이 유지되어 있다. 물층 표면과 제습제 표면의 수증기 농도차에 의하여 물 증발이 유도되고, 증발잠열에 의하여 물층의 온도는 낮아지게 된다.

Fig.1에 나타낸 흡습 냉각 패드는 그 구조가 매우 간단하며, 에너지 공급 없이 저온을 얻을 수 있는 장점이 있다. 이 냉각 패드는 제습제에 흡수된 습기의 양이 많아짐에 따라 제습제의 흡습능력이 감소하여 점차 냉각성능이 감소하게 되지만, 제습제를 탈습하고 재생하여 다시 사용할 수 있다.

본 연구에서는 제습제로 LiCl을 적용하였다. LiCl은 수증기를 흡수하여 액체형태의 용액이 되는데,⁽⁸⁾ 제습제가 액상이면 물층과 직접 접촉하게 되어 증발 냉각효과를 얻을 수 없다. 본 연구에서는 LiCl을 종이에 함침시켜 사용하였다. LiCl이 수증기를 흡수하여 액상이 되면, 종이에 흡수되어 흘러내리지 않게 된다. LiCl을 함침시킨 제습지의 무게는 200 g/m²이며, 이 중 LiCl의 무게는 약 30%이다.

제습제의 흡습성능은 상대습도에 따른 흡습량의 변화를 나타내는 등온곡선(isotherm curve)으로 나타내어진다.⁽⁹⁾ 제습지의 등온곡선을 구하기 위하여 온도와 습도를 제어하며 흡습량을 측정하였다. 먼저 측정시료를 80℃로 유지되는 오븐에 10시간 이상 넣어 두어 시료에 흡습되어 있는 수분을 증발시켜 시료를 탈습한 후, 이 시료를 흡습시험조건으로 온도, 습도가 유지되는 항온·항

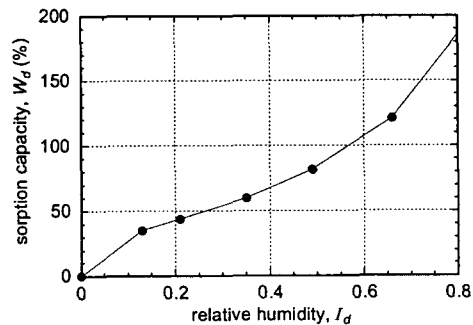


Fig. 2 Sorption isotherm of the desiccant sheet.

습기에 넣고 흡습에 따른 시료의 무게변화를 측정하였다. 본 연구에서 제작한 제습지의 흡습특성에 대한 측정결과를 Fig. 2에 나타내었다.

흡습 냉각 패드는 100×200 mm²의 크기로 제작하였다. 물이 주입되는 저온측에는 얇은 종이 (tissue paper)와 같은 흡수성 패드를 이용하여 물이 균일하게 분포되도록 하였으며, 저온측과 제습지 사이에는 스페이서를 넣어 1 mm의 일정한 간격을 유지하도록 하였다. 완성된 냉각 패드의 두께는 총 3 mm이다.

냉각효과를 측정하기 위하여, T-type 열전대로 제습제층, 물층, 외기의 온도를 측정하였다. 제습제층과 물층의 온도는 각각 3개의 지점에서 측정하였으며, 측정값은 GPIB 보드와 데이터로거(HP 34970A)를 통해 컴퓨터에 저장되도록 하였다.

3. 흡습 냉각 패드의 냉각효과

흡습 냉각 패드의 최대 냉각효과를 파악하기 위하여, 우선 저온부로의 열유입이 없는 경우의 냉각효과를 시험하였다. 외부로부터 저온측으로의 열유입을 방지하기 위하여 20 mm의 단열재를 저온부에 부착하였다.

냉각 패드를 30℃, 상대습도 60%인 조건(습구 온도 23.8℃)으로 유지되는 항온항습기에 넣어 온도가 주위와 같아지도록 한 후, 주사기로 30℃의 물 20 cc를 저온측에 주입하였다.

물 주입 직후 냉각 패드의 제습지와 물층의 온도변화를 Fig. 3에 나타내었다. 물층의 온도가 초기온도 30℃로부터 점차 낮아져, 10여분이 경과하였을 때 최저온도(22℃)에 도달하며, 측정기간인 1시간 내내 주변보다 낮은 온도를 유지하는

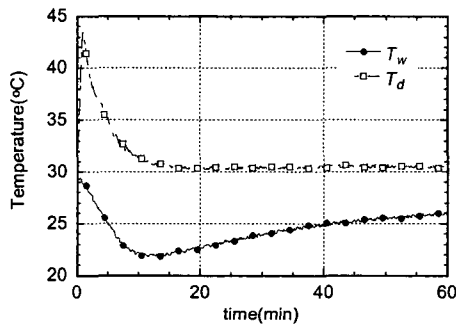


Fig. 3 Temperature variation of the water and desiccant layers ($T_{\infty}=30^{\circ}\text{C}$, $\phi_{\infty}=0.6$).

것을 알 수 있다. 반면 흡습층에서는 물층으로부터 증발된 수증기가 흡습되면서 응축열을 내놓게 되므로, 이 열에 의하여 온도가 상승하게 된다. 초기에는 흡습층의 온도가 급격하게 상승하나, 물층의 온도가 낮아짐에 따라 흡습량이 감소하고 외기로의 열손실이 증가하여 점차 주위 온도까지 떨어지게 된다.

Fig. 3의 결과는 에너지 공급 없이 간단한 구조를 이용하여 1시간 이상 일정 온도 이하의 냉각 효과를 얻을 수 있음으로 보여준다.

4. 흡습 냉각과정의 분석

4.1 흡습 냉각 패드 모델링

냉각 패드에서 일어나는 열 및 물질전달 현상은 다음과 같은 질량 및 에너지 평형관계식을 이용하여 분석할 수 있다.

$$\frac{dM_w}{dt} = -KA(m_w - m_d) \quad (1)$$

$$M_d \frac{dW_d}{dt} = KA(m_w - m_d) \quad (2)$$

$$\frac{d(M_w c_w T_w)}{dt} = hA(T_d - T_w) - KA(m_w - m_d) i_{fg} \quad (3)$$

$$\frac{d(M_d c_d + W_d M_d c_w) T_d}{dt} = -hA(T_d - T_w) + KA(m_w - m_d) i_{fg} - h_{\infty} A(T_d - T_{\infty}) \quad (4)$$

여기서, M 은 질량이고, m 은 질량분율이며, h 는 열전달계수, K 는 물질전달계수, c 는 비열, i_{fg} 는 물의 잠열, W_d 는 제습제 단위질량당 흡습량을 나타낸다. 하첨자 d 는 제습지, w 는 물을 의미한다. 위 식에서 제습지와 물 사이 공기에 포함된 수증기의 질량변화 및 내부 에너지변화는 무시하였다.

위 식에서 변수는 M_w , W_d , T_w , T_d , m_w , m_d 로서 지배방정식을 완성하기 위하여 두 개의 구성방정식이 추가된다. 이들 구성방정식은 물층 표면에서의 수증기 평형농도 관계식⁽⁹⁾

$$m_w = \frac{0.622(P_w/P_o)}{1 - 0.378(P_w/P_o)} \quad (5)$$

$$P_w = P_s(T_w) \quad (6)$$

과, 제습제의 흡습특성 관계식

$$W_d = f(\phi_d) \quad (7)$$

$$\phi_d = \frac{P_d}{P_s(T_d)}, \quad m_d = \frac{0.622(P_d/P_o)}{1 - 0.378(P_d/P_o)} \quad (8)$$

으로 주어진다. 여기서 ϕ 는 상대습도이며, P_o 는 대기압이다. 식(7)의 흡습특성 곡선은 Fig. 2로부터 얻을 수 있다.

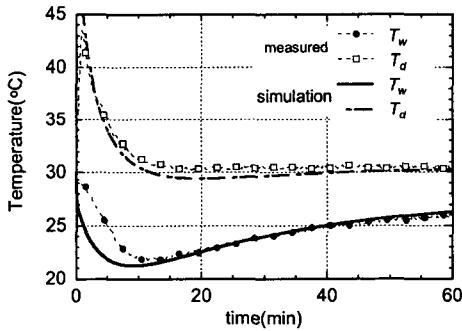
계산에 적용된 변수들의 초기값과 제반 인자들의 값들을 Table 1에 정리하였다. 제습제와 물 사이의 열전달계수 및 물질전달계수는 이 사이 공기를 통한 전달현상이 분자확산에 지배적으로 영향받는다는 가정을 통하여 구하였다. 제습제층과 외기 사이의 열전달계수는 자연대류인 경우의 일반적인 값을 적용하였다.

Table 1 Parameter values

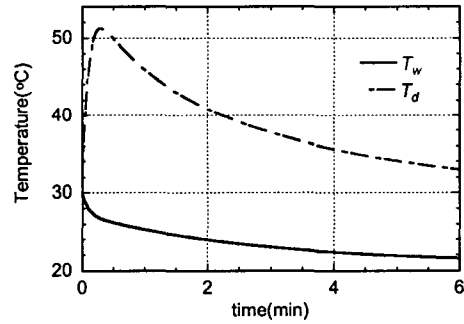
$T_w(0)$	30℃	M_d	4 g
$T_d(0)$	30℃	c_d	1.26 J/gK
T_∞	30℃	h	26.3 W/m ² K
$\phi_d(0)$	0.1	h_∞	10 W/m ² K
$M_w(0)$	20 g	K	30.4 g/sm ²

4.2 냉각 패드에서의 열 및 물질전달

식(1)~(4)를 수치적분하여 제습제와 물층의 온도변화 및 수증기 농도변화를 구하였으며, Fig. 4와 Fig. 5에 각각 나타내었다. Fig. 4(a)에 나타난 측정값과의 비교로부터 수치적분결과가 측정결과와 냉각 초기를 제외하고는 거의 유사하게 일치함을 알 수 있다. 냉각 초기에 물온도의 측정값이 수치적분결과보다 높은 이유는 물층과 접촉한 단열부로부터의 열유입과, 물온도 측정을 위한 열전대의 불확실한 접촉 때문인 것으로 사료된다.

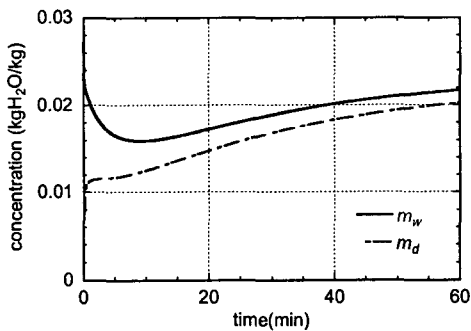


(a) Comparison with the measured data

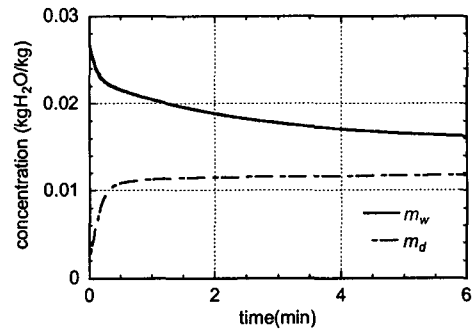


(b) Temperature variation in early stage

Fig. 4 Temperature variation.



(a) Concentration variation for 60 minutes



(b) Concentration variation in early stage

Fig. 5 Concentration variation.

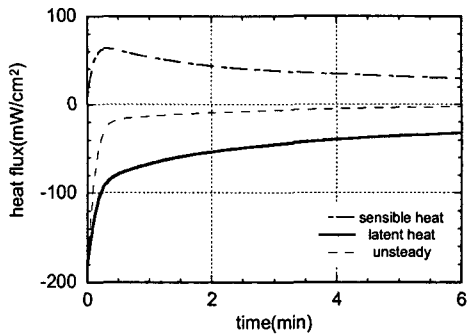


Fig. 6 Energy balance in the water layer.

냉각 초기 6분 동안의 온도 및 습도변화를 나타낸 Fig. 4(b)와 Fig. 5(b)를 보면, 냉각 초기 제습지와 물층 사이의 큰 수증기 농도차로 급격한 물 증발이 일어나 물 온도가 낮아지는 반면, 제습지의 온도는 급격히 상승하는 것을 볼 수 있다. 제습지의 온도상승에 따라 제습지 표면의 수증기 평형농도도 급격히 증가하여 물층과의 수증기 농도차가 감소하고, 물 증발률이 감소하여 물 온도 감소율이 작아진다. 제습지는 물증발률 감소에 따른 응축열량 감소와 물층 및 외부와의 온도차에 의한 열손실로 인하여 점차 온도가 낮아져 10분 이후에는 거의 외기온도와 같아진다.

한편 10분 이후에는 제습지에 흡습된 수증기량이 증가함에 따라 제습지 표면에서의 수증기 평형농도가 증가하며, 이에 따라 물 증발률이 감소하여 물층의 온도가 점차 상승한다.

수치적분 결과를 이용하여 물층에서의 에너지 평형관계를 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서 곡선들은 식(3)의 각 항의 크기를 나타낸다. 냉각 초기에는 물증발에 따른 잠열흡수가 물층의 내부에

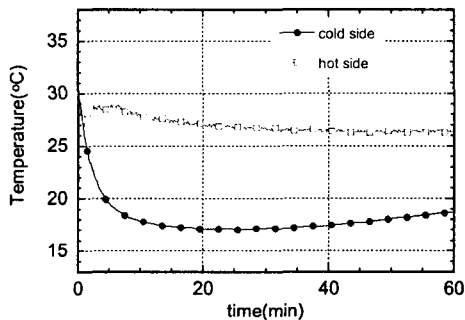
너지 변화와 평형을 이루어, 물층의 온도가 급격히 감소한다. 그러나 1분 정도만 지나면 내부에너지 변화량은 상대적으로 크기가 매우 작아지며, 잠열 흡수량은 온도차에 의한 제습지로부터의 열유입량과 평형을 이루게 된다. 이는 냉각 초기를 제외하고는 냉각 패드 내부의 에너지 평형관계를 준정상 상태로 볼 수 있음을 의미한다.

5. 냉각효과의 향상

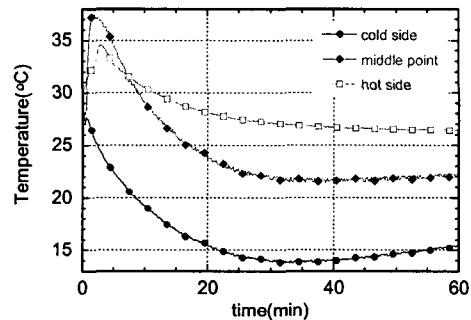
앞에서 분석한 바와 같이, 제습지의 온도가 상승하면 제습지와 물층 사이의 온도차가 커져 물층으로의 열유입량이 커지며, 또한 제습지 표면에서 수증기의 평형농도가 증가하고 물층과의 농도차이가 감소하여 물 증발이 감소하게 된다. 결과적으로 제습지의 온도가 상승하면, 물층의 최저 도달온도가 상승하고, 냉각효과 지속시간이 감소하게 된다. 이러한 특성은 열펌프에서 고온부 온도가 높을수록 열펌프 성능이 저하하는 것과 유사한 결과이다.

따라서 냉각 패드의 성능향상을 위해서는 제습지의 온도상승을 최대한 억제하는 것이 필요하며, 본 연구에서는 이를 위하여 두 가지 방법을 시도하였다. 첫번째 방법은 제습지의 온도를 낮추기 위하여 제습지의 외기측 표면에 불투과막을 부착하고, 이 외부에 별도의 물패드를 부착하여 제습지를 증발 냉각하는 방법이다. 두번째 방법은 제습지를 별도의 냉각 패드로 냉각하고, 이 냉각 패드의 제습지는 증발 냉각하는 방법이다.

Fig. 7에 이 두 가지 방법을 적용하였을 때의 냉각 패드 각 지점의 온도변화를 나타내었다. 제습지를 증발 냉각하는 Fig. 7(a)의 경우 제습지의



(a) Evaporative cooling of the desiccant layer



(b) Double pad

Fig. 7 Enhancement of the cooling effect of the cool pad.

온도가 냉각 초기 급격한 상승 없이 26°C 정도로 거의 일정하게 유지된다. 그 결과 물층의 최저온도가 17°C 정도로, 제습지를 현열냉각하는 경우에 비하여 5°C 정도 더 낮은 온도가 얻어지며, 1시간 내내 20°C 이하로 유지된다.

냉각 패드를 두 층으로 적용한 Fig. 7(b)의 경우, 중간부분 즉 저온측 냉각 패드의 제습지 온도가 냉각 초기에는 Fig. 7(a)의 경우보다 상승하지만, 고온측 냉각 패드가 냉각성능을 발휘함에 따라 점차 온도가 낮아져 20분 후에는 22°C 정도를 유지한다. 그 결과 저온측 물층의 온도가 14°C까지 낮아져, 제습지를 현열냉각하는 경우보다 약 8°C, 증발 냉각하는 경우보다 3°C 정도 낮은 최저온도를 얻을 수 있다.

6. 일정 열유속 조건에서의 냉각성능

지금까지는 냉각 패드의 저온부를 단열한 조건에서 냉각 패드의 냉각효과를 고찰하였으며, 이로부터 냉각 패드로 얻을 수 있는 최저온도 및 냉각 패드 내부에서의 열 및 물질전달 등을 분석하였다. 한편 냉각 패드를 다른 물체의 냉각에 이용하는 경우의 실질적인 냉각성능을 고찰하기 위해서는 저온부에 일정 열량이 유입되는 경우의 냉각특성을 시험하여야 한다.

본 연구에서는 냉각 패드를 인체발열 냉각에 적용하는 경우를 상정하여, 사람이 5 km/h로 걸을 경우의 인체발열량 17 mW/cm^2 를⁽⁹⁾ 냉각 패드의 저온부에 공급할 때의 냉각특성을 시험하였다. Gold-Film을 냉각 패드의 저온부에 부착하여 균일한 열유속이 냉각 패드의 저온부에 유입되도록 하였다.

록 하였다.

Fig. 8의 (a)와 (b)에 각각 냉각 패드를 한 층과 두 층으로 적용한 경우의 온도변화를 나타내었다. 두 경우 모두 고온부의 제습지 냉각에 증발 냉각을 적용하였다. Fig. 7과 비교할 때, 전체적인 온도변화 양상은 단열인 경우와 유사하지만, 각 지점의 온도가 4~7°C 정도 상승한 것을 볼 수 있다. 이는 저온부에 공급된 열량이 최종적으로 고온부를 통하여 외부로 방출되어야 하므로, 이를 위하여 고온부 온도가 외기온도보다 높아져야 하기 때문이다. 한편 저온부의 온도는 한 층인 경우 최저 24°C, 1시간 동안 평균 25.7°C를 유지하였으며, 두 층인 경우에는 최저 22°C, 평균 23.6°C를 유지하였다.

이 실험에서 냉각 패드 고온부의 냉각을 위하여 증발 냉각을 적용하였으므로, 고온부에서의 조건은 인체발열이 외부에 노출된 피부로부터 발생되는 경우와 매우 유사하다. 따라서 온도변화가 급격하고 비정상상이 에너지 평형에 큰 영향을 미치는 냉각 초기를 지난 시점에서의 고온부 온도를, 동일한 외기조건에서 냉각 패드를 적용하지 않은 경우의 인체 피부온도로 생각할 수 있다. 본 실험의 경우 이 온도는 Fig. 8(a)에 나타낸 바와 같이 30.5°C이다. 반면, 냉각 패드의 저온부 온도는 냉각 패드를 인체발열 냉각에 적용하는 경우의 부착부위 피부온도로 볼 수 있다.

따라서 Fig. 8의 결과는 냉각 패드의 적용으로 부착부위 피부온도를 적용하지 않는 경우에 비하여, 한 시간 동안 한 층인 경우 평균 4.8°C, 두 층인 경우 평균 6.9°C 낮게 유지할 수 있음을 나타낸다.

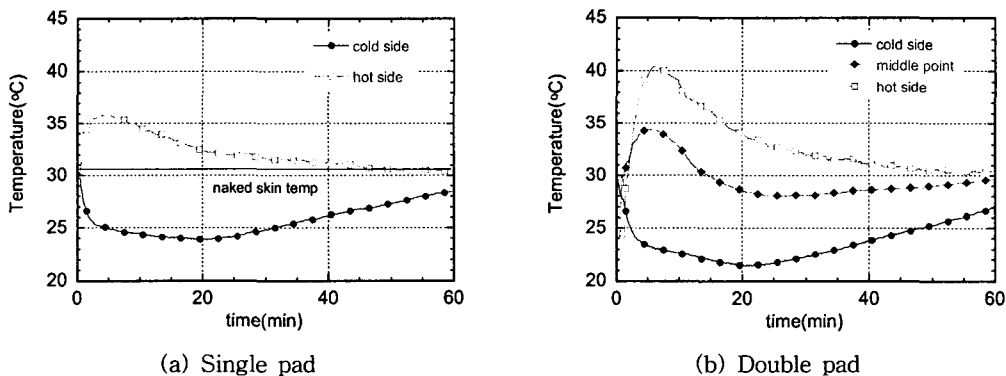


Fig. 8 Cooling performance of the cool pad ($T_{\infty}=30^{\circ}\text{C}$, $\phi_{\infty}=0.6$, $q_{in}=17 \text{ mW/cm}^2$).

7. 결 론

본 연구에서는 구조가 간단하며, 에너지 공급 없이 일정시간 동안 냉각효과를 발휘할 수 있는 냉각 패드를 고안하였다. 이 냉각 패드의 특징은 제습제를 이용하여 물 증발을 촉진시킴으로써 증발잠열 흡수에 의한 냉각효과를 향상시키는 것이다. 이 냉각 패드는 기본적으로 제습지와 물층의 두 층으로 구성되며, 이 두 층의 직접적인 접촉을 막고, 일정 간격을 유지하기 위한 스페이서가 두 층 사이에 삽입된다.

본 연구에서는 넓이 100×200 mm², 두께 3 mm의 냉각 패드를 제작하여 냉각효과를 시험하였으며, 냉각 패드에서의 열 및 물질전달을 이론적으로 해석하여 그 결과를 비교 분석하였다.

제습제의 흡습작용으로 물이 증발하여 물층의 온도는 낮아지지만, 반대로 제습지에서는 흡수되는 수증기의 응축열로 온도가 상승한다. 제습지의 온도가 상승하면 인접한 물층과의 온도차가 커져 제습지로부터 물층으로의 열유입이 증가하며, 제습지 표면에서의 수증기 농도가 증가하여 물증발을 유도하기 위한 구동력이 감소한다. 따라서 냉각 패드의 냉각효과를 향상시키기 위해서는 고온부의 온도상승을 최대한 억제하는 것이 필요하며, 실용적으로는 고온부를 증발 냉각하는 것이 매우 효과적이다.

외기온도 30℃, 상대습도 60%인 조건에서 17 mW/cm²의 발열이 있는 경우, 냉각 패드에 의한 냉각효과를 냉각 패드를 한 층으로 적용하는 경우와 두 층으로 적용하는 경우를 시험하였다. 한 층인 경우 저온부의 온도가 최저 24℃, 1시간 동안 평균 25.7℃를 유지하였으며, 두 층인 경우에는 최저 22℃, 평균 23.6℃를 유지하였다.

참고문헌

1. Joudi, K. A. and Mehdi, S. M., 2000, Application of indirect evaporative cooling to

variable domestic cooling load, *Energy Conversion & Management*, Vol. 41, pp.1931-1951.

2. Lee, D.-Y., Baik, Y.-J. and Kim, Y., 2002, Potential of cooling enhancement in an air-cooled condenser by evaporative cooling, *Proc. of the SAREK '02 Summer Annual Conference*, pp.1360-1365.

3. Bar-Cohen, A., Sherwood, G., Hodes, M. and Solbreken, G., 1995, Gas-assisted evaporative cooling of high density electronic midules, *IEEE Trans. on Components, Packaging, and Manufacturing Technology, Part A*, Vol. 18, pp. 502-509.

4. Liu, X. and Holmer, I., 1995, Evaporative heat transfer characteristics of industrial safety helmets, *Applied Ergonomics*, Vol. 26, pp. 135-140.

5. Maclaine-Cross, I. L. and Banks, P. J., 1981, A general theory of wet surface heat exchangers and its application to regenerative evaporative cooling, *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 103, pp. 579-585.

6. Song, C. H., Lee, D.-Y. and Ro, S. T., 2003, Heat transfer enhancement in an air-cooled heat exchanger by evaporative cooling, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 46, pp. 1241-1249.

7. Hall, C. A. and Mackie, C., 2001, Semi-analytic solutions for freezing induced by evaporative cooling, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 44, pp. 1161-1170.

8. Park, M. S., 1998, R&D Trend in desiccant based dehumidification and hybrid cooling system, *Magazine of the SAREK*, Vol. 27, No. 6, pp. 533-540.

9. ASHRAE 2001, *ASHRAE Handbook 2001 Fundamentals*, Chapters 6, 8, 22.