

[논문] 태양에너지
Solar Energy
Vol.17. No.3. 1997

농산물 저온 저장을 위한 H₂O-NaCl 혼합물의 축열 특성

송현갑*, 유영선**, 박종길*, 노정근*

* 충북대학교 농업기계공학과

** 농업기계화연구소 농업에너지연구실

Thermal Storage Characteristics of H₂O-NaCl Mixtures for the Low Temperature Storage of Agricultural Products

H. K. Song*, Y. S. Ryou**, J. G. Ro*, J. K. Park*

* *Chungbuk National University, Dept. of Agricultural Machinery Engineering*

** *National Agricultural Mechanization Research Institute, Agricultural Energy Lab*

요 약

본 연구에서는 잠열온도 조절에 관한 이론과 상변화 잠열재의 결정핵형성이론 그리고 PCM 결정화 모델을 정립하고, 농산물 저온 저장에 이용할 수 있는 냉축열 잠열재로 H₂O를 선정하여 NaCl을 온도 조절제로 잠열온도를 조절하였으며, 상변화 사이클에 의한 열특성 변화 추이와 물성의 안정성을 실험적으로 분석하였다.

Abstract

The theory on phase change temperature control and nucleation of PCM was suggested in this research. The crystallization model of PCM was established. And H₂O-NaCl mixtures were selected as cold storage materials for agricultural products and thermo-physical properties of the PCM were analyzed with experimental processes including freeze-thaw cycles.

1. 서론

현재 국내에 보급되고 있는 냉축열 시스템의 열저장 매체로 이용되고 있는 얼음을 비롯한 대부분의 상변화 물질들은 기초 연구가 이루어지지 않아 장기간 사용하는 경우에 열특성 및 물리적 특성이 변화하여 축열재로서의 기능이 저하될 가능성이 있다.

그러므로 본 연구에서는 현재 냉축열재로 이용되고 있는 H₂O의 내구성을 확보하기 위한 실험적 분석을 수행하였으며, H₂O-NaCl 혼합물의 물성을 안정시켜 0°C 이하의 저온 축열재로서 이용할 수 있는 방법을 이론적으로 정립하고, 실험적인 분석을 수행하였다.

본 연구의 구체적인 연구 범위를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 잠열량이 크고 상변화 온도가 0°C인 물을 저온 잠열재로 선택하여 상변화 온도를 -8°C에서 0°C까지 조절하려 하였고,
- (2) 결정화 과정에서의 잠열량이 최대가 되는 이론을 정리하므로서 상변화 사이클 반복에 따른 잠열량 감소 현상을 막을 수 있는 방법을 제시하려 하였으며,
- (3) 물질 혼합에 의한 상변화 온도 조절 방법을 이론적으로 정립하려 하였다.
- (4) 선택된 잠열재의 상변화 온도, 비열과 잠열량을 상변화 사이클 반복 횟수에 따라 분석하므로서 실용화에 접근할 수 있도록 하려 하였다.

2. 이론분석

2-1. 잠열온도 조절에 대한 이론적 고찰

순수 잠열재 A에 용질 B가 용해되지 않고, mole fraction a_B 가 A에 혼합되어 있는 경우, 혼합물의 melting point에서 two phase의 chemical potential이 같게 되므로 다음과 같은 평형식을 쓸 수 있다.

$$\mu_A^*(S) = \mu_A(l) \quad (1)$$

$$\mu_A^*(l) = \mu_A^*(l) + RT \ln(a_A) \quad (2)$$

식 (2)를 식 (1)에 대입하면,

$$\mu_A^*(S) = \mu_A^*(l) + RT \ln(a_A) \quad (3)$$

식 (3)을 RT로 나누면,

$$\begin{aligned} \frac{\mu_A^*(l) - \mu_A^*(S)}{RT} &= -\ln(a_A) \\ &= -\ln(1 - a_B) \end{aligned} \quad (4)$$

$a_B = 0$ 일 때 $T = T^*$ (순수 잠열재 상변화 온도)

$$\frac{\Delta G_{\text{melting}, m}(T)}{RT} = -\ln(1 - a_B) \quad (5)$$

$$\frac{\Delta G_{\text{melting}, m}(T^*)}{RT} = -\ln 1 \quad (6)$$

a_B 가 작은 값을 갖는 경우

$\ln(1-a_B) = -a_B$ 이므로 식 (5)를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\Delta G_{\text{melting},m}(T)}{RT} = a_B \quad (7)$$

Energy balance equation $T\Delta S = \Delta H - \Delta G$ (8)

식 (8)을 RT 로 나누고, 식 (7)에 대입하면 다음 식을 얻는다.

$$\left. \begin{aligned} \frac{\Delta G_{\text{melting},m}(T)}{RT} &= \frac{\Delta H_{\text{melting},m}(T)}{RT} \\ &- \frac{\Delta S_{\text{melting},m}}{R} = a_B \\ \frac{\Delta G_{\text{melting},m}(T^*)}{RT^*} &= \frac{\Delta H_{\text{melting},m}(T^*)}{RT^*} \\ &- \frac{\Delta S_{\text{melting},m}}{R} = a_B \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

식 (5)-(6)을 하면, 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} &\frac{\Delta G_{\text{melting},m}(T)}{RT} - \frac{\Delta G_{\text{melting},m}(T^*)}{RT^*} \\ &= -\ln(1-a_B) + \ln 1 = a_B \end{aligned} \quad (10)$$

식 (9)를 식 (10)에 대입하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} &\frac{\Delta H_{\text{melting},m}(T)}{RT} - \frac{\Delta S_{\text{melting},m}}{R} \\ &- \left[\frac{\Delta H_{\text{melting},m}(T^*)}{RT^*} - \frac{\Delta S_{\text{melting},m}}{R} \right] \end{aligned}$$

$$= a_B$$

$$\left[\frac{1}{T} - \frac{1}{T^*} \right] = \frac{R \cdot a_B}{\Delta H_{\text{melting},m}} > 0$$

이어야 하므로,

$$\therefore \frac{1}{T} > \frac{1}{T^*}, \quad T^* > T$$

이와 같은 결과로 순수한 상변화 물질에 작은 양의 불순물이 녹지 않은 상태에서 혼합되는 경우, 순수한 경우의 melting point T^* 는 혼합된 경우의 melting point T 보다 높게 나타나게 됨을 알 수 있다. 다시 말해서 순수 잠열재보다 상변화 온도가 높은 제 2의 물질을 혼합하므로써 상변화 온도를 조절할 수 있게 된다.

여기서,

A : 순수한 상변화 물질

B : 불순물

a_A : A의 mole fraction

a_B : B의 mole fraction

$\mu_A(l)$: Solution A의 chemical potential

$\mu_A^*(l)$: Pure liquid A의 chemical potential

$\mu_A^*(S)$: Pure solid A의 chemical potential

T^* : Pure A의 melting point

T : A와 B가 혼합된 상태에서의 melting point

R : Gas constant

$\Delta G_{\text{melting},m}(T)$: A와 B가 혼합된 상태에서 액체와 고체간의 chemical potential 차

$\Delta G_{\text{melting},m}(T^*)$: A의 액체와 고체간의 chemical potential 차

$\Delta H_{\text{melting},m}(T)$: A와 B가 혼합된 상태에서 액체-고체간의 엔탈피 차

$\Delta H_{\text{melting},m}(T^*)$: 순수 상변화 물질의 고체-액체간의 엔탈피 차

$\Delta S_{\text{melting},m}$: 상변화 물질의 고체-액체간의 엔트로피 차

2-2. PCM 결정핵(結晶核) 이론

PCM이 가열 과정에서 열을 많이 흡수 저장하였다가, 냉각 과정에서, 흡수·저장했던 열을 가능한 한 많이 방출하기 위해서는 냉각 과정에서 PCM의 결정화 작용이 치밀하게 잘 이루어져야 한다. 이를 위해서는 PCM내에 적정 크기의 결정핵이 충분히 분포되어 있어야 하는데, 이렇게 되기 위해서는 PCM자체 내에 결정핵 형성 능력이 있거나, 그렇지 못하면 외부에서 적정한 조핵제를 첨가하여야 한다.

이상과 같은 PCM의 결정핵에 관한 이론을 정리하고, 이를 실용화의 기초 자료로 활용하려 한다.

(1) 자연적 결정핵 형성 이론

PCM 자체 내에서 결정핵이 형성되는 과정을 결정핵 형성 에너지 차원에서 분석하면 다음과 같다. 안정된 결정핵을 형성하는데 필요한 일은 결정핵 경계표면을 형성하는데 필요한 일과 새로운 결정핵 입자의 질량을 형성하는데 필요한 일의 합으로 표현할 수 있다.

$$W = W_s + W_v \quad (11)$$

식 (11)에서, W_s는 표면 형성에서 일어나는 에너지 변화, ΔF로 공급되며, W_v는 상변화에서 얻어지는 free energy에 의하여 공급된다. 그러므로 식 (11)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta F = 4\pi r^2 \cdot \sigma - \frac{4}{3}\pi r^3 \cdot \Delta F_v \quad (12)$$

식 (12)을 미분하고, ΔF' = 0로 하면 PCM 결정핵의 임계반경, r_k을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta F' = 8\pi r \cdot \sigma - 4\pi r^2 \cdot \Delta F_v = 0$$

$$\therefore r_k = \frac{2\sigma}{\Delta F_v} \quad (13)$$

열역학적 비유동과정에서의 에너지 평형식을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$T dS = dH - V dP = dH - dF, \\ \Delta F = \Delta H - T\Delta S \quad (14)$$

(13)식과 (14)식과의 관계로부터 PCM의 결정핵 임계반경, r_k을 상변화 잠열량 ΔH_v로 표현할 수 있다.

$$r_k = \frac{2T_m}{(T_m - T)} \cdot \frac{\sigma}{\Delta H_v} = \frac{2\sigma}{\eta \cdot \Delta H_v} \quad (15)$$

이 식에서 보는 바와 같이 임계반경, r_k보다 결정핵 반경이 적을수록 잠열량, ΔH_v는 커지지만 결정핵 반경이 r_k보다 적으면 녹아 버리기 쉽고, r_k보다 크면 미립자는 계속해서 성장하기 때문에 ΔH_v는 작아진다. 그러므로 가능한 한 결정핵 반경이 r_k에 접근하는 것이 바람직하다.

여기서,

- W : 안정된 결정핵을 형성하는 데 필요한 일.
- W_s : PCM액체 속에서 새로운 결정체의 경계 표면을 형성하는데 필요한 일
- W_v : 새로운 결정핵의 mass을 형성하는데 필요한 일
- ΔF : 결정화 작용에서 생기는 Free energy change
- ΔF_v : 상변화시 단위 체적당의 Free energy change
- r : 미립자 반경
- σ : 단위 면적당 표면 형성 에너지

r_k : 미립자의 임계반경

ΔH : 엔탈피 변화

ΔS : 엔트로피 변화

T_m : 상변화 온도

$$\eta = \frac{T_m - T}{T_m} : \text{상대 과냉도 (Relative supercooling)}$$

ΔH_v : 단위 체적당 잠열량 변화

3. 실험장치 및 방법

앞에서 정립한 상변화 온도 조절과 핵결정 이론에 근거하여 H₂O-NaCl 혼합물의 상변화 온도 조절과 상변화 사이클 반복에 따른 열특성을 분석하기 위하여 상변화 사이클 실험 장치와 잠열 특성 분석 장치를 구성하였으며, 변수 구성에서는 온도 조절제 함량 변화와 상변화 사이클 반복수를 주된 변수로 하여 실험분석을 수행하였다.

3-1. 실험 장치

(1) 상변화 실험 장치

상변화 사이클 실험 장치는 냉축열 물질의 상변화 온도를 중심으로 일정 영상 온도 수준으로 가열하고, 이 온도에서 일정 시간을 유지한 후에 다시 일정 영하 온도 수준으로 냉각한 다음, 이 온도 수준에서 일정 시간을 유지할 수 있도록 공기를 열매체로 하여 완전 자동 조절할 수 있는 시스템을 구성하였다.

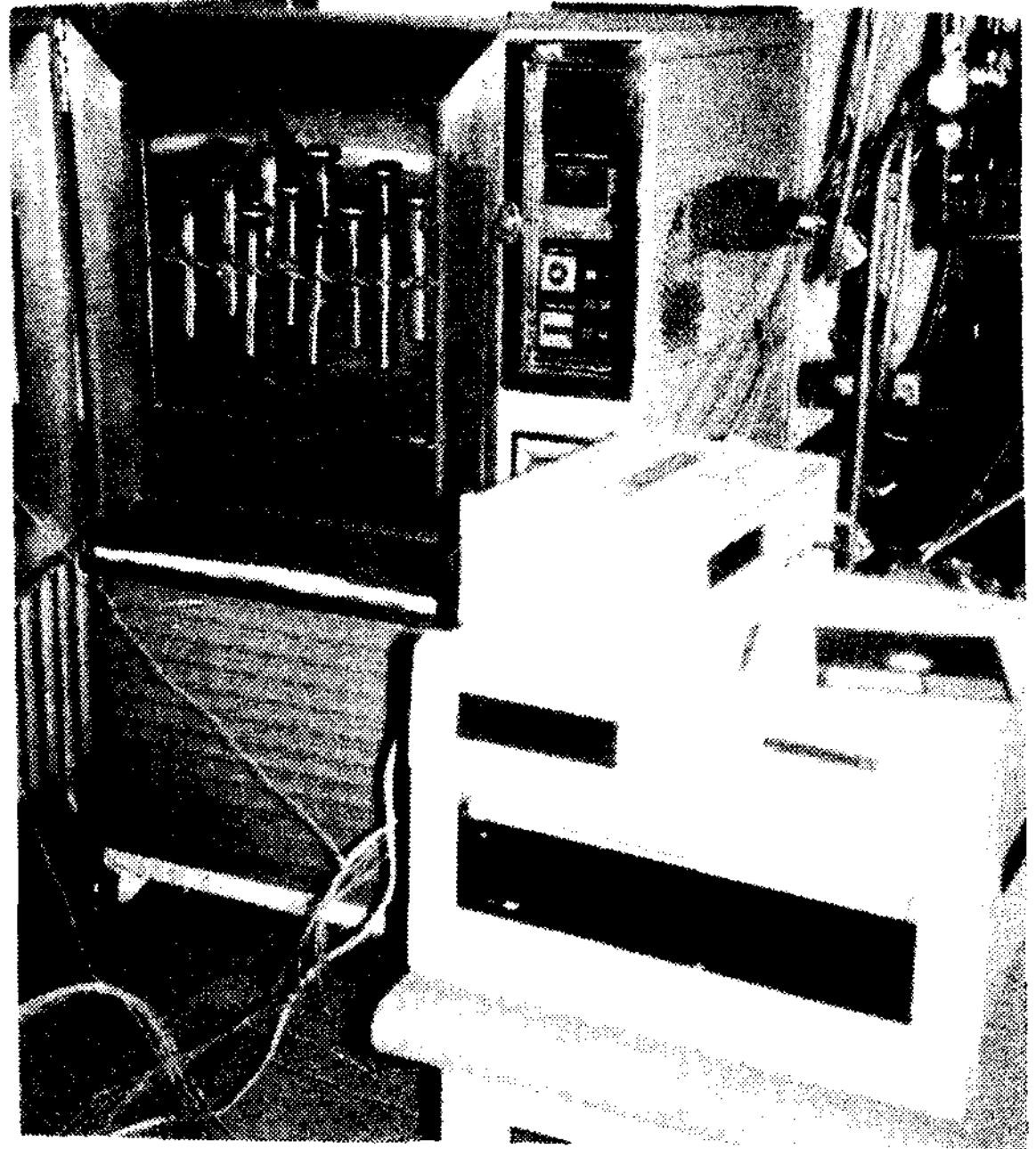


Fig. 1. Phase change cycle tester and hybrid recorder.

냉축열재는 stainless tube에 처리별로 주입·밀봉하고, 가열·냉각될 때 냉축열 물질의 온도 변화를 측정하기 위하여 thermocouple을 tube중 앙에 삽입하였으며, hybrid recorder에 연결하여 온도 변화가 자동 측정 되도록 하였다.(그림 1참고)

(2) 열특성 분석 장치 (DSC-92)

본 연구에서 선택한 냉축열재에 상변화 온도를 조절하고, phase change cycle tester에서 상변화 처리를 계속하면서, 온도 조절과 상변화 사이클 반복에 따른 잠열량, 비열과 상변화 온도 변화 추이를 알아내기 위하여 일정 상변화 사이클마다 잠열량, 비열, 상변화 온도를 그림 2와 같은 DSC-92를 사용하여 분석하였다.

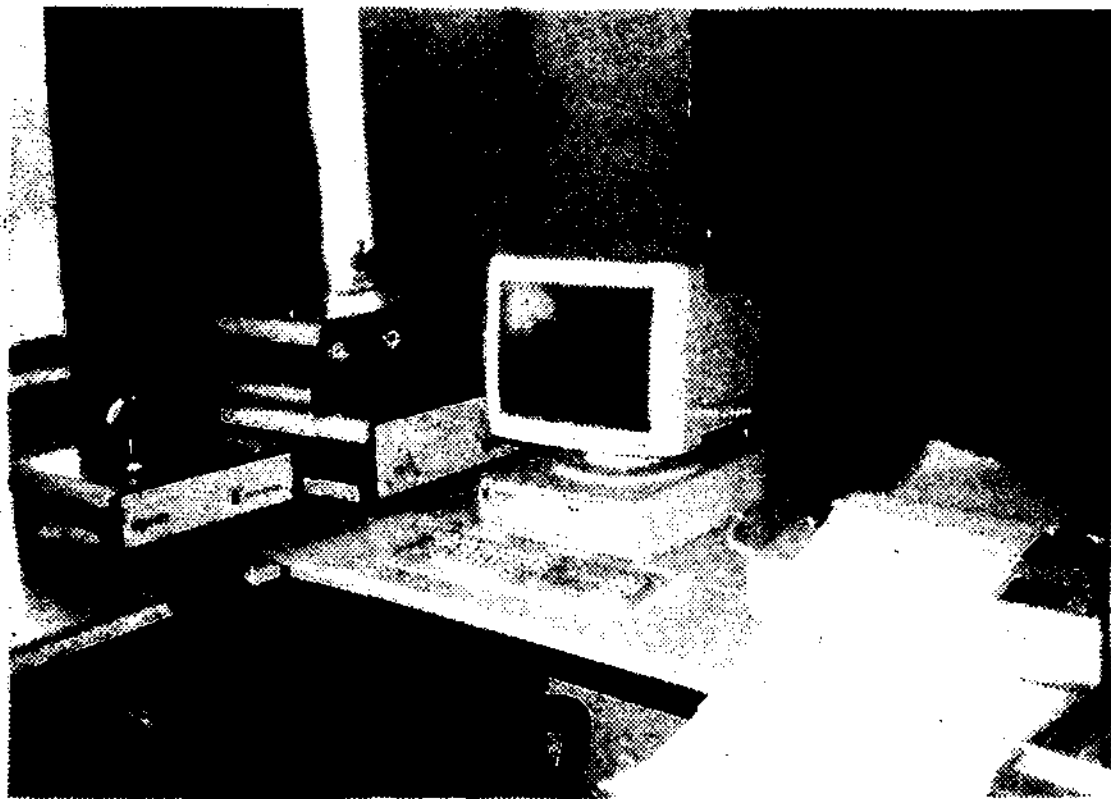


Fig. 2. DSC-92(Differential Scanning Calorimeter).

3-2. 실험 방법

상변화 온도 조절제를 단계별로 첨가하여 가능한 한 다양한 축열 온도 수준을 얻으려 하였으며, 온도 조절된 잠열재의 축열특성 변화를 분석하기 위하여 표 1과 같은 실험 변수 조합을 구성하였다.

Table 1. Combination of experimental variables

Phase change materials	Phase change temperature control material [NaCl(mol)]	Phase change cycle test condition	Number of phase change cycles	Analysis items (DSC-92, hybrid record)
H ₂ O	0.0	Heating temp. : 30°	0	• Latent heat
	0.5	Cooling temp. :-15°	400	• Specific heat
	1.0	Time interval	600	• Phase change
	1.5			temperature
	2.0	90min		

4. 결과 및 고찰

본 연구에서 선택한 상변화 냉축열재 H₂O+NaCl의 열특성을 실험·분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

4-1. DSC 잠열량분석 곡선

(1) H₂O+NaCl (1.5mol)

그림 3은 염도가 1.5 mol인 소금물을 결빙했다가 녹이면서 잠열량을 분석한 time-temperature-heat flow 곡선이다. 그림 3에서 보여주고 있는 1.5 mol 소금물의 경우에는 작은 잠열곡선 면적과 큰 잠열곡선 면적이 유사한 모양을 하고 있다. 이들 곡선에서 먼저 나타난 작은 잠열곡선 면적은 NaCl 농도가 0.0 mol에서 1.5 mol로 커짐에 따른 것으로 염분에 의하여 상변화 온도와 잠열량이 변화된 것으로 판단된다. 이와 같은 현상은 얼음보다 소금이 더 낮은 온도에서 상이 변하기 때문에 얼음과 염분이 분리되어 나타난 것으로 판단된다.

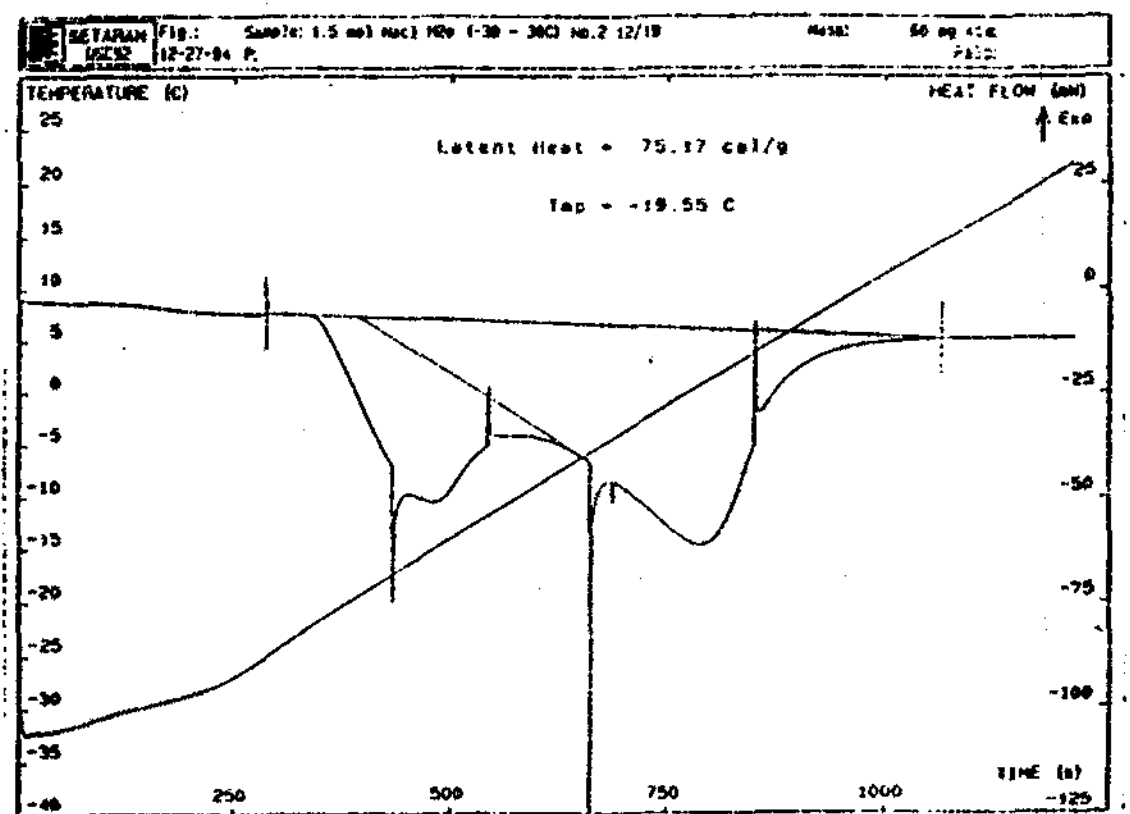


Fig. 3. DSC analysis curve for latent heat of H₂O+NaCl(1.5mol).

(2) H₂O+NaCl (2.0mol)

그림 4는 염도 2.0 mol 소금물을 결빙한 후 녹이면서 잠열량을 분석한 time-temperature- heat flow 곡선이다. 이 경우에는 염도가 1.5 mol의 경우와는 달리 잠열곡선이 하나로 나타났으며, 잠열량이 크게 감소하였다. 염분의 함량이 많기 때문에 물과 염분이 분리되어 상변화가 일어나지 않았기 때문인 것으로 판단된다.

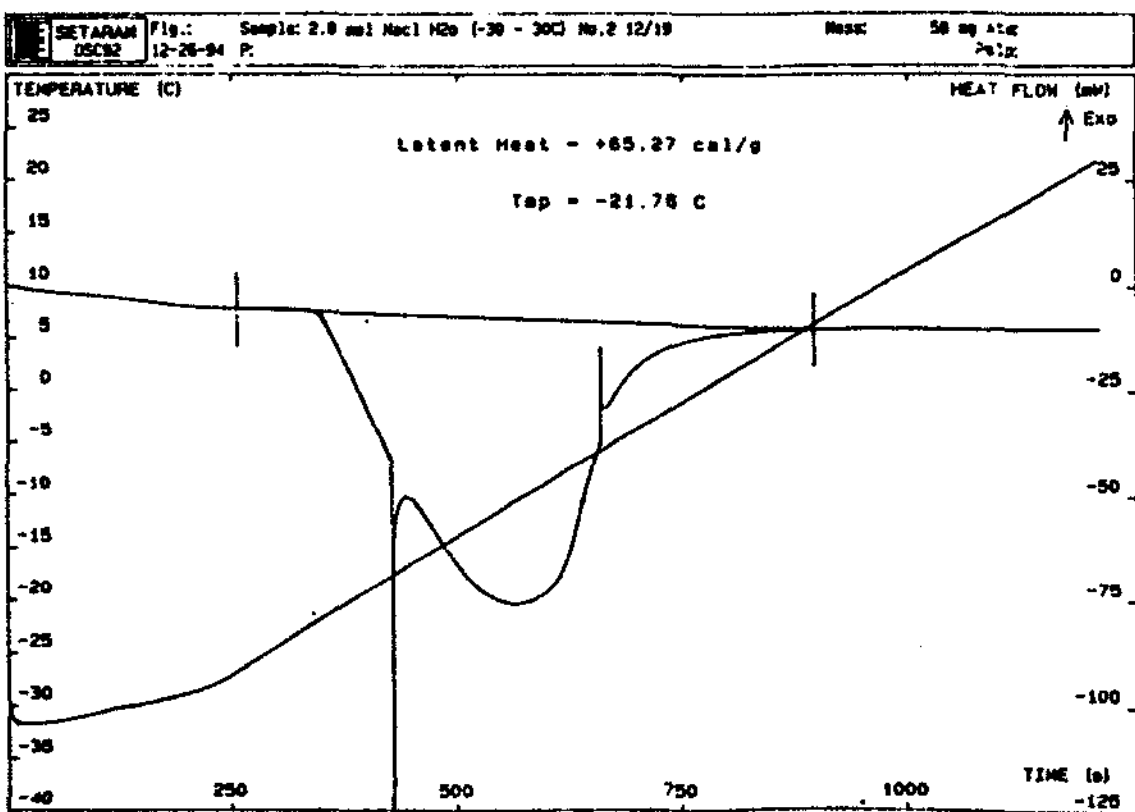


Fig. 4. DSC analysis curve for latent heat of H₂O+NaCl(2.0mol).

4-2. 물과 소금물(H₂O, H₂O+NaCl)의 열특성 분석 비교

물과 소금물의 상변화(액상⇌고상) 구간을 필요한 냉축열 온도수준에 따라 0°C ~ -7°C로 변화시켜 활용하기 위하여 NaCl을 온도 조절제로 사용하였다. 상변화 온도 조절제인 NaCl을 H₂O에 첨가하여 상변화 사이클을 3번 반복한 후에 mol 농도별로 열특성을 DSC-92와 Hybrid recorder(그림 1, 2 참고)로 분석한 결과를 정리하면 표 2와 같다.

표 2에 정리된 H₂O+NaCl의 염분의 mol 변화에 따른 열특성값의 변화를 그림으로 나타내면 다음과 같다(그림 5 참고).

Table 2. Phase change temperature, and latent heat and specific heat of H₂O+NaCl according to NaCl mol variation after 3 phase change cyc

Materials	Phase Change Temp.(°C)	Latent Heat (kcal/kg)	Specific Heat(kcal/kg°C)	
			Solid	Liquid
H ₂ O (Distilled Water)	0.0	77.88	0.574	1.053
H ₂ O (City Water)	-0.1	80.05	0.598	1.100
H ₂ O+NaCl (0.5 mol)	-1.5	76.07	0.471	0.952
H ₂ O+NaCl (1.0 mol)	-2.8	76.10	0.507	0.990
H ₂ O+NaCl (1.5 mol)	-6.2	76.30	0.470	0.895
H ₂ O+NaCl (2.0 mol)	-7.7	62.98	0.462	0.842

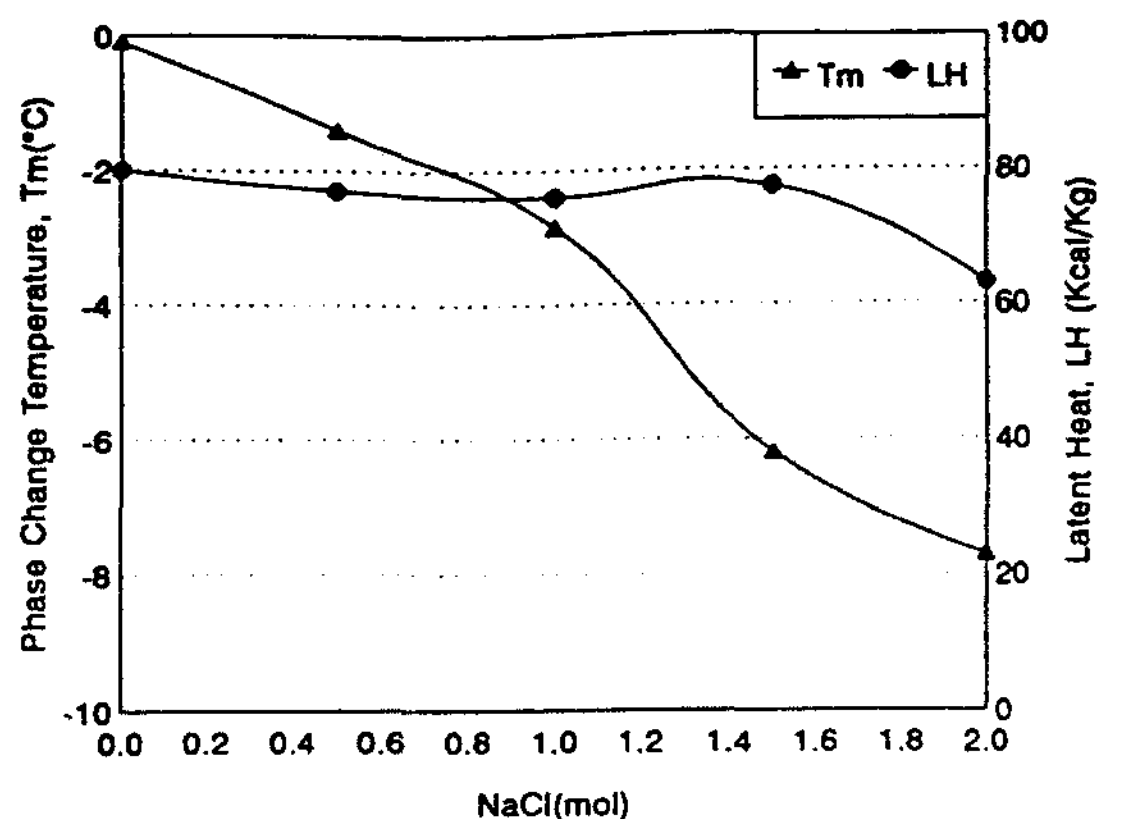


Fig. 5. Variation of phase change temperature(T_m) and latent heat of H₂O+NaCl according to NaCl mol variation

그림 5에서 보는 바와 같이 염분의 mol수가 0.0에서 1.0으로 증가할 때 상변화 온도는 -0.1℃에서 -2.8℃로 약간 감소하였으나, 염분 mol수가 0.1에서 2.0까지 증가함에 따라 상변화 온도가 급격히 낮아지는 경향이 있다.

그리고 잠열량의 경우에는 염분용액 mol수가 0.0에서 1.5로 증가할 때는 잠열량이 80Kcal/Kg에서 76Kcal/Kg까지 큰 변화가 없었으나 염분용액 mol수가 1.5에서 2.0으로 증가할 때는 잠열량이 76.3Kcal/Kg에서 62.98Kcal/Kg으로 급격히 감소하는 현상을 보였다.

이와 같은 현상은 자연적인 PCM결정핵형성 이론식 (15)에서 임계 결정핵 반경, r_k 가 1.5mol 이상 염수에서는 급격히 증가하기 때문인 것으로 사료된다.

4-3. 상변화 사이클이 냉축열재 H₂O+NaCl의 열특성에 미치는 영향

본 연구에서 선택한 냉축열재에 증점제와 조핵제를 첨가하여 물성을 안정시켰고, 온도 조절제를 사용하여 상변화 온도를 조절하여 냉축열매체로 사용할 수 있는 온도 수준을 얻을 수 있었다.

이와 같이 물성을 안정시키고 상변화 온도를 조절한 냉축열 잠열재의 상변화 사이클에 따른 물성의 안정성과 축열특성의 변화를 그림 1와 그림 2에 표시한 실험 장치와 표 1에서 제시하고 있는 실험 방법으로 실험한 결과를 다음과 같이 정리하였다.

(1) 상변화 사이클이 H₂O+NaCl의 축열특성에 미치는 영향

Table 3. Influence of phase change cycle on the phase change temperature, T_m, latent heat, LH, and specific heat of H₂O+NaCl.

NaCl Addition (mol)	Number of Phase change Cycle	T _m (°C)	LH (Kcal/Kg)	Cp(S) (Kcal/Kg °C)	Cp(L) (Kcal/Kg °C)	Remark
0.0	0	0.0	77.9	0.574	1.053	DSC Measurement
	400	-0.1	79.6	0.536	1.032	
	600	0.0	80.2	0.502	1.016	
0.5	0	-1.6	77.2	0.471	0.952	
	400	-1.1	76.0	0.543	1.009	
	600	-1.5	78.0	0.465	0.980	
1.0	0	-3.7	76.1	0.507	0.990	
	400	-2.8	74.2	0.344	0.739	
	600	-2.8	75.2	0.468	0.854	
1.5	0	-6.7	75.2	0.470	0.895	
	400	-6.7	72.6	0.478	0.794	
	600	-6.2	73.6	0.465	0.899	
2.0	0	-8.4	65.3	0.432	0.842	
	400	-7.9	66.6	0.517	0.864	
	600	-7.7	66.8	0.330	0.658	

상변화 사이클이 H₂O+NaCl의 잠열온도, 잠열량, 고상과 액상에서의 비열에 미치는 영향을 실험분석한 결과를 정리하면 표 3과 같다.

1) 상변화 사이클이 H₂O+NaCl의 잠열온도, T_m에 미친 영향

표 3에 정리된 염분 농도와 상변화 사이클에 따른 상변화 온도(잠열 온도)와의 관계를 그림으로 표시하면 그림 6와 같다.

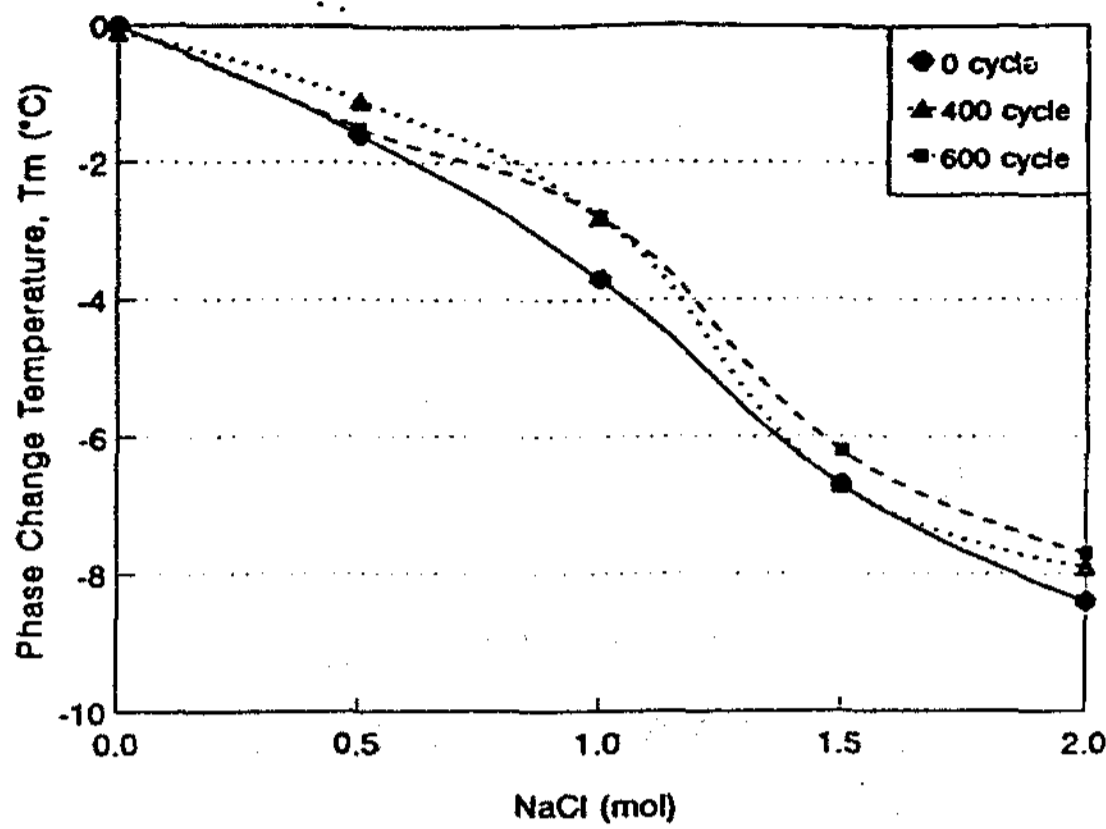


Fig. 6. Influence of phase change cycle on the phase change temperature of H₂O+NaCl in accordance with NaCl mol.

그림 6에서 보는 바와 같이 NaCl의 mol수가 증가함에 따라 H₂O+NaCl의 상변화 온도는 0°C에서 -8.4°C까지 곡선적으로 감소하였으며, 상변화가 0에서 600사이클까지 증가함에 따라 상변화 온도가 약간 증가하는 경향을 보였으나, 상변화 온도가 상변화 사이클에 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 부분적이지만 상변화 사이클 반복이 H₂O+NaCl의 열특성에 큰 영향을 주지 않고 있음을 시사하는 것으로 판단된다.

2) 상변화 사이클이 H₂O+NaCl의 잠열량에 미치는 영향

상변화 사이클 반복과 NaCl mol수 증가에 따른 잠열량 변화를 그림으로 나타내면 그림 7과 같다.

그림 7에서 보는 바와 같이 NaCl mol수 0.0인 순수물의 경우는 상변화(물⇌얼음) 잠열량이 80Kcal/Kg이었으며, NaCl mol수 1.5인 염수에서는 잠열량이 74Kcal/Kg이었다가, NaCl mol수가

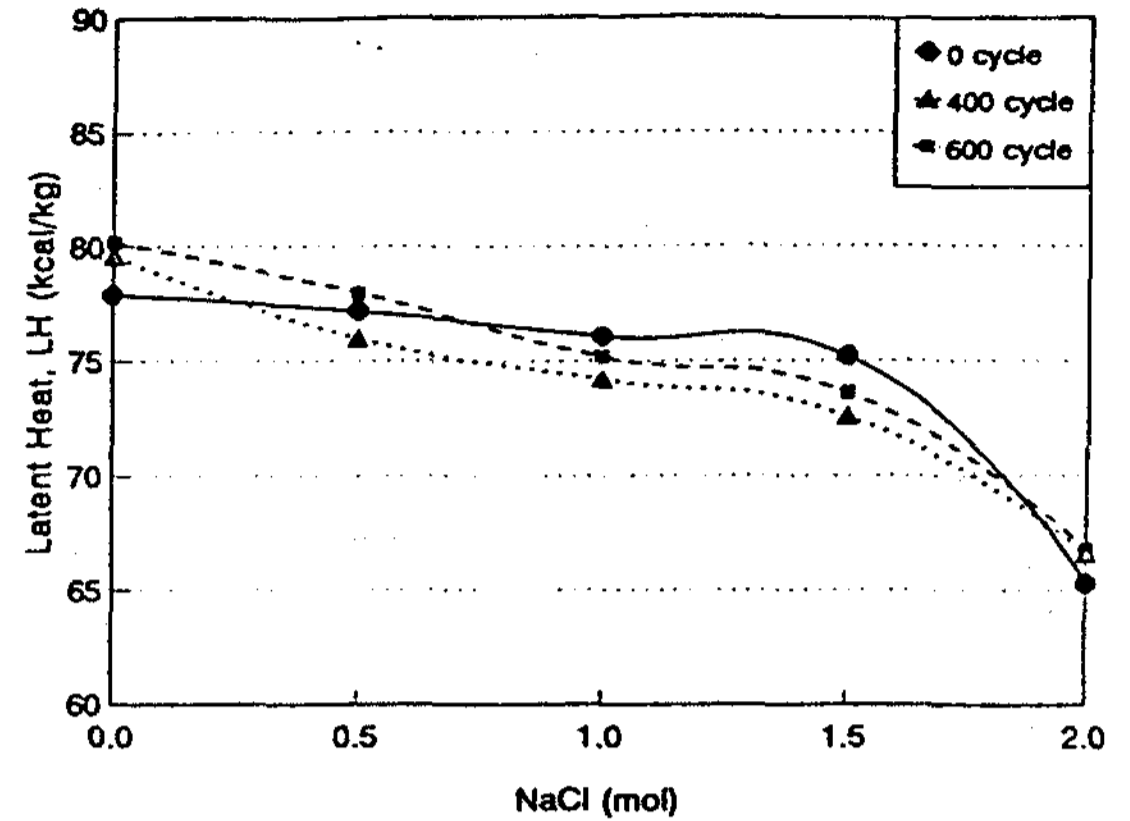


Fig. 7. Influence of phase change cycle on the latent heat of H₂O+NaCl in accordance with NaCl mol.

2.0으로 증가함에 따라 잠열량이 급격히 감소하여 66.8Kcal/Kg이 되었다. 이와 같이 NaCl mol수가 0.0에서 1.5까지 증가할 때까지는 잠열량이 크게 감소하지 않았으나 1.5 mol에서 2.0 mol까지 증가할 때는 잠열량이 크게 감소하는 경향을 보였다.

이와 같은 현상은 가능한 한 NaCl mol수를 1.5 이상으로 한 온도 조절은 하지 않는 것이 축열 용량을 크게 유지할 수 있는 것임을 시사해 주는 것이다. 그리고 이 그림에서 보여주고 있는 바와 같이 상변화 사이클 증가에 따른 잠열량 감소 현상은 나타나지 않고 있다. 이런 결과는 H₂O+NaCl 냉축열재의 물성이 안정되어 있음을 말해 주는 것이다.

3) 상변화 600사이클 후 NaCl mol수가 비열과 잠열량에 미치는 영향

H₂O+NaCl의 상변화를 600사이클 반복한 후 NaCl mol수가 냉축열재의 열특성에 미치는 영향을 그림으로 나타내면 다음과 같다 (그림 8 참고).

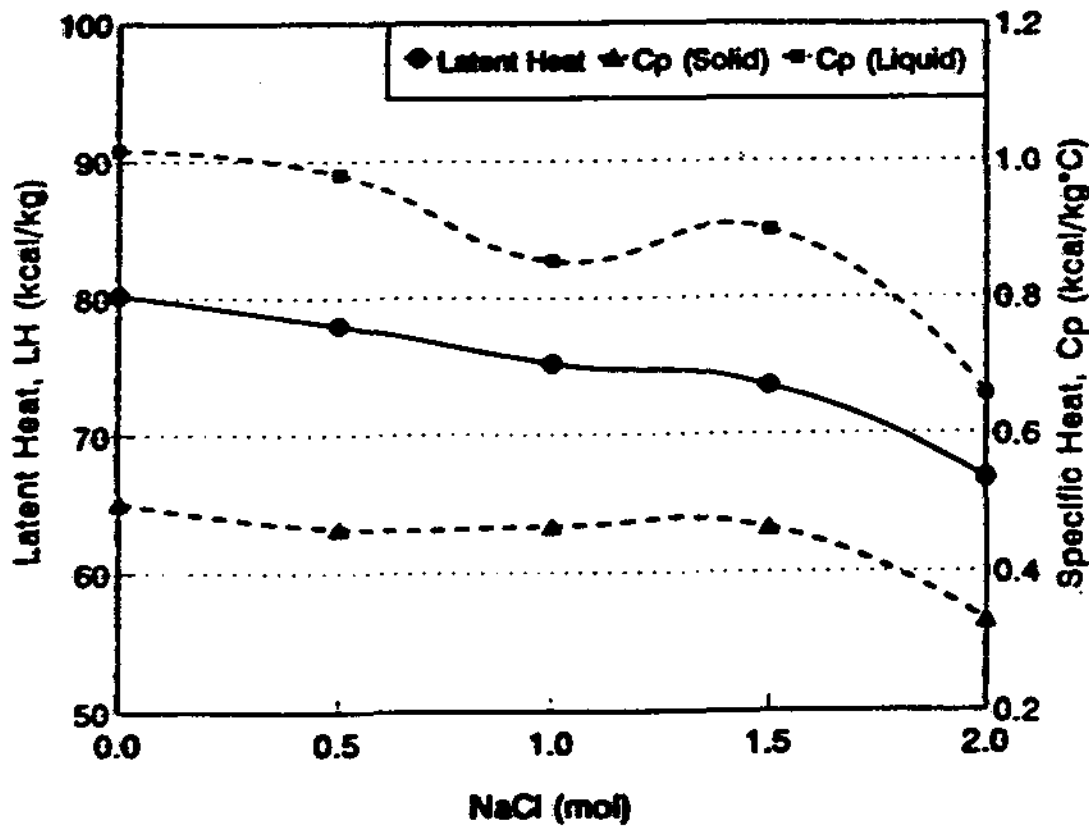


Fig. 8. Influence of NaCl mol number on the specific heat and latent heat of H₂O+NaCl after 600 phase change cycles.

그림 8과 같이 염분 농도인 NaCl mol수가 0.0에서 2.0까지 증가함에 따라 H₂O+NaCl의 액상 비열은 1Kcal/Kg°C에서 0.658Kcal/Kg°C까지 감소하였으며, 고상 비열은 0.5Kcal/Kg°C에서 0.33Kcal/Kg°C까지 감소하였고, NaCl 0.1mol에서 액상 비열은 상대적으로 낮은 값을 보였다. 그리고 NaCl이 0.0 mol에서 2.0 mol까지 증가함에 따라 잠열량은 80 Kcal/Kg에서 66.8 Kcal/Kg으로 감소하였으며, NaCl이 0.0 mol에서 1.5 mol까지 증가하는 동안에는 80~74 Kcal/Kg으로 잠열량 감소가 적었으나, NaCl이 1.5 mol에서 2.0 mol로 증가하는 구간에서는 잠열량이 급격히 감소하는 경향을 보였다.

5. 결론

잠열온도 조절에 관한 이론과 상변화 잠열재의 결정핵형성이론을 정립하고 실제로 냉축열 잠열재로 H₂O를 선정하여 냉축열 온도 수준에 맞도록 NaCl을 온도 조절제로 하여 잠열온도를 조절하였으며, 상변화 사이클에 의한 열특성 변

화 추어와 물성의 안정성을 실험 분석하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. PCM의 결정핵형성이론과 잠열온도 조절에 관한 이론을 정립하므로써 PCM의 물성 안정과 상변화 온도를 폭넓게 조절할 수 있었다.

2. 냉축열재로 선정된 H₂O에 NaCl을 첨가함으로써 NaCl은 조핵제와 상변화 온도 조절제 역할을 동시에 하므로써 물성의 안정성과 상변화 온도를 조절할 수 있었다.

3. 냉축열 잠열재 H₂O+NaCl에서 NaCl mol수를 0~2.0으로 증가함에 따라 잠열온도는 0~5°C로 조절할 수 있었으며, 잠열량은 80~66.8kcal/kg으로 감소하였고, 상변화 사이클에 의한 잠열량 감소는 비교적 작은 값을 나타내었다.

참고 문헌

1. Christopher M. Laddry and Craig D. Noble, "Making ice thermal storage first-cost competitive", ASHRAE Journal, Vol.33, No.5, pp. 19~22, 1991.
2. 국내 빙축열 제조업체 기술자료.
3. 空氣調和・衛生工學, "特集/氷蓄熱システム(1)", 空氣調和・衛生工學會, 제64권 제 6호, pp.1~35, 1990.
4. 空氣調和・衛生工學, "特集/氷蓄熱システム(1)", 空氣調和・衛生工學會, 제64권 제 17호, pp.21~59, 1990.
5. 井上良則外, "氷蓄熱の最新技術と導入事例", 設備と管理, Vol.26, No.6, pp.41~47, 1992.
6. 김영인, 김운동, "심야 전력을 이용한 빙축열 기술개발" 1차년도 최종 보고서, 한전기술 연구원/생산기술 연구원, 1991. 4.
7. "빙축열 냉방 시스템 종합 기술자료", 한국

- 전력공사 영업처, 1991. 10.
8. 스스끼외 1인, "에너지 저장 시스템", 일본 에너지자원학회, 1992. 2.
 9. "빙축열세미나 자료", 한국전력공사 영업처, 1992. 12.
 10. 빙축설비제조업체 기술자료, 대우케리어외 4 개사.
 11. George A. Lane, "Solar heat storage latent heat material", Co:CRC Press, Vol. I, pp. 115~152, 1983.
 12. Turnbull, D., Phase change, solid state phys, 3, 225, 1956.
 13. Reiss, H., Theory of the liquid drop model, Ind, Eng. Chem., 44, 1284, 1952.
 14. Reiss, H., The statistical mechanical theory of irreversible condensation. I, J. Chem. phys, 20, 1216, 1952.

Thermal Storage Characteristics of H₂O-NaCl Mixtures for the Low Temperature Storage of Agricultural Products

H. K. Song^{*}, Y. S. Ryou^{}, J. G. Ro^{*}, J. K. Park^{*}**

** Chungbuk National University, Dept. of Agricultural Machinery Engineering*

*** National Agricultural Mechanization Research Institute, Agricultural Energy Lab*

Abstract

The theory on phase change temperature control and nucleation of PCM was suggested in this research. The crystallization model of PCM was established. And H₂O-NaCl mixtures were selected as cold storage materials for agricultural products and thermo-physical properties of the PCM were analyzed with experimental processes including freeze-thaw cycles.