

구형 PCM 입자의 제조 및 캡슐화에 관한 연구

김종국[†] · 윤우석* · 정경택* · 설용건* · 주현규** · 전명석** · 이태규**

전양대학교 화학공학과

*연세대학교 화학공학과

**한국에너지기술연구소

(1998년 4월 29일 접수, 1998년 12월 1일 채택)

A Study on the Preparation of Spherical PCM Particle and Its Encapsulation

Jong Kuk Kim[†], Woo Seok Yoon, Kyeong Taek Jung*, Yong Gun Shul*,
Hyun Ku Joo, Myung Seok Jeon** and Tae Kyu Lee**

Dept. of Chemical Engineering, Konyang University

*Dept. of Chemical Engineering, Yonsei University

**Korea Institute of Energy Research, Taejeon

(Received 29 April 1998; accepted 1 December 1998)

요 약

잠열 저장물질로서 sodium acetate trihydrate를 사용하여 구형의 PCM 입자를 제조한 후 PMMA와 wax를 이용하여 캡슐화하였다. 상분리 현상 및 과냉각 현상을 최소화하는 점증제(gelatin)와 조핵제(sodium pyrophosphate decahydrate)의 최적 조성은 점증제 2 wt%와 조핵제 2 wt%로 나타났다. 이 조성의 용융 PCM을 이용하여 1.3-1.8 ml/min의 방출속도에 서 지름 3-3.5 mm의 구형 PCM 입자를 연속적으로 제조할 수 있었다. PCM의 결정수 누출방지 및 기계적 강도를 높이기 위하여 제조한 PCM 입자를 1차로 코팅한 PMMA의 평균두께는 0.03 mm, 2차로 코팅한 wax의 평균두께는 0.25 mm, 그리고 마지막으로 코팅한 PMMA의 평균두께는 0.4 mm였다. 전열 매체로서 dodecane을 사용한 용융-동결 실험 및 DSC를 이용한 코팅후 PCM 입자의 용융-동결 cycle 실험을 수행하였다.

Abstract—Spherical shape of phase change materials(PCM) were prepared by using sodium acetate trihydrate as a latent heat storage medium and then encapsulated with PMMA and wax. Gelatin was used as an effective thickener to prevent undesirable phase separation and sodium pyrophosphate decahydrate was used as nucleator to decrease the degree of supercooling in the thickened PCM. The optimal composition of PCM was 2 wt% thickener and 2 wt% nucleator. Spherical shape of PCM particles of 3-3.5 mm in diameter were continuously manufactured varying the effluent velocity of molten PCM from 1.3 to 1.8 ml/min. Tertiary coatings of PMMA-wax-PMMA onto the PCM particles obtained were performed to prevent the leakage of crystalline water and to improve the mechanical strength. Thickness of each layers were 0.03 mm, 0.25 mm, and 0.4 mm. Freezing-thaw cycle test of the coated PCM particle was done using dodecane as heat transfer medium by the experimental apparatus and DSC.

Key words : PCM, Sodium Acetate Trihydrate, Particle, Encapsulation

1. 서 론

사회 경제적인 생산활동의 증가로 에너지 수요의 폭발적인 증가 문제뿐만 아니라 사용하는 에너지 소비의 시간·장소적 불일치를 해결하기 위하여 에너지 저장에 관한 연구가 시급한 문제로 대두되고 있다. 이를 해결하기 위한 여러 방법 중에 물질의 상(phase)이 변할 때 등온에서 흡수 또는 방출하는 열, 즉 잠열을 이용한 축열방법은 축열밀도가 크기 때문에 최근 많은 연구가 진행되고 있다[1-9]. PCM(phase change material) 중 무기염 수화물은 높은 열저장 밀도

와 낮은 증기압에 의한 연소 위험성이 없는 장점을 갖고 있지만 바람직 하지 못한 상분리 및 심각한 과냉각의 문제점을 갖고 있다[10]. 반조화(semicongruent)와 비조화(incongruent)의 용융점을 갖는 축열재는 상분리 현상을 피할 수 없기 때문에 조화(congruent) 용융점을 갖는 축열재를 선택하는 것이 좋은 방법이나 원하는 온도 범위와 경제적인 면을 고려할 때 조화 용융점을 갖는 축열재의 선택이 어려운 경우 반조화, 비조화 용융점을 갖는 축열재에 적당한 증점제(thickener)를 첨가하여 용융시 생성된 무수염을 균일하게 분산시킴으로써 물과 무수염이 재수화될 수 있도록 접촉기회를 향상시키는 방법으로 안정화시키고 있다[11]. 상전이시에 발생하는 과냉각 현상은 결정형성시 결정핵 역할을 하는 조핵제(nucleator)의 사용을 통하여 과

[†]E-mail : kjkkim@kytis.konyang.ac.kr

냉각 온도의 폭을 줄일 수 있다. 따라서 무기염수화물을 이용한 PCM을 보다 효율적으로 상용화하기 위해 적당한 증점제 및 조핵제의 종류 및 그 최적 조성 등에 대한 많은 실험과 정확한 이론적인 연구가 선행되어야 한다[12, 13]. PCM 물질의 형태(morphology) 또한 상용화시 영향을 미친다고 알려져 있는데 일반적으로 구형의 PCM 입자들은 벌크한 PCM 보다 상전이에 필요한 특성인 빠른 열전달 속도와 가역성(reversibility)을 응용하기에 효과적이다[13]. 하지만 구형의 PCM 입자를 제조하여 실용화하는데는 기계적인 강도와 결정수의 누출 등의 문제가 남게 된다. 특히 입자의 유동화시에 입자끼리의 충돌 등으로 인하여 입자의 파괴가 일어나 제조된 구형 입자의 장점을 활용하기가 어려워진다. 그리고 온도가 상승함에 따라서 축열제로 사용하는 $\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 의 결정수가 손실되는 결정수 누출현상은 축열재료의 적절한 사용을 불가능하게 만든다. 최근 이러한 것을 방지하기 위하여 계면중합, 용매증발, 그리고 spray coating법 등을 이용하여 결정수 누출 방지 및 기계적인 강도를 증가시키는 방법을 적용하고 있다[12, 13].

따라서 본 연구에서는 상온 축열 물질로서 원하는 온도범위 및 비용면에서 가장 적절한 비조화형 축열제인 $\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 를 이용하여 연속적으로 구형의 PCM을 제조하고 조성에 따라 상분리 현상 및 과냉각 현상을 측정하였다. 그리고 제조한 구형 PCM의 결정수 누출 방지 및 기계적 강도의 강화를 위하여 PMMA 및 wax 코팅 실험을 수행하여 이를 특성화하였다.

2. 이론적 배경

마이크로 캡슐 형성 방법은 기계적인 방법, 계면 중합법, 고분자상 분리법, 공침전법 등이 있고 각 제조방법은 다음 3단계를 포함한다. 첫 단계는 분산 혹은 유화시켜 내부충진물인 입자 또는 액적을 제조하는 단계이다. 요구하는 입자 혹은 액적의 크기가 형성된 후 두 번째 단계가 캡슐벽면의 침적 단계이다. 세 번째 단계는 캡슐을 분리하는 단계이다. 무기염 수화물과 같은 PCM의 경우에 적용할 수 있는 마이크로 캡슐과정은 원심력 또는 단순 중력을 이용, 노즐을 통해 용융 무기염 수화물을 분산시키는 기계적 방법이 경제적으로 유용한 입자의 대량생산이 가능하여 가장 좋다. 또한 이 방법은 입자 형성 및 캡슐벽면 침적 단계를 한 공정에서 수행할 수도 있다. Table 1에 마이크로 캡슐 기술을 이용한 입자 형성의 발전과정을 나타내었다[14].

3. 실험

적절한 구형의 PCM 입자를 제조하고 기계적인 강도를 증가시키기 위한 캡슐화는 축열제인 sodium acetate trihydrate(SAT)에 증점제인 gelatin(Sigma, Type B, Bloom #225)과 조핵제인 sodium pyrophosphate decahydrate(SPD)를 조성별로 섞어 제조한 PCM의 상분리 현상 및 과냉각 현상을 관찰하였고 결정된 최적 조성의 PCM 용융액을 이용하여 연속적으로 PCM 입자를 제조하였으며 마지막으로 제조한 PCM 입자의 코팅 실험을 수행하여 비교하였다.

Table 1. Chronological history of drop formation microcapsule technology

Time	Technology	Early developer
1930's	Spray drying	Flavor enhancement and protection
1939-1942	Centrifugal extrusion	Vitamin protection
1950's	Wurster(Fluidized bed)	Pharmaceutical coatings
1960's	Centrifugal orifice	General encapsulation
1980's	Spinning disk	General encapsulation

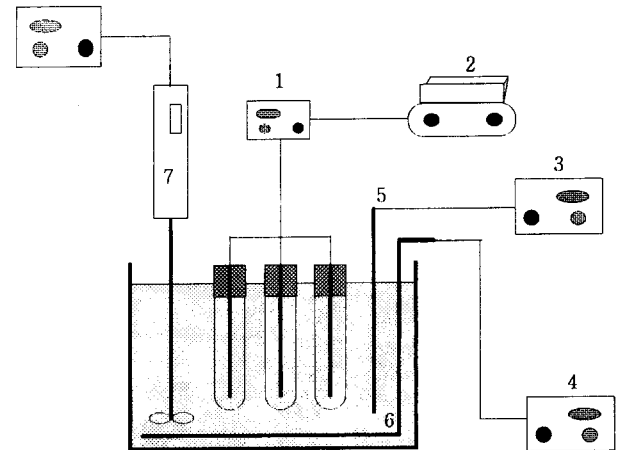


Fig. 1. Experimental apparatus for measuring phase separation and supercooling.

1. Multiple temperature detector
2. Recorder
3. Temperature programmable controller
4. Relay
5. Thermocouple
6. Heating element
7. Stirrer

3-1. 실험장치 및 방법

3-1-1. 구형의 PCM 입자 제조 및 용융-동결 사이클 실험

상분리현상 및 과냉각현상을 측정하기 위하여 반응기 온도를 75 °C를 유지시키면서 SAT를 용융시키고 SAT에 wt% 별로 점증제인 gelatine(Sigma, Type B, Bloom #225)과 조핵제인 SPD를 첨가하여 용융시킨다. 이때 조핵제는 침전방지와 균일한 혼합을 위해 미세하게 갈아서 첨가하고 전체 혼합물이 균일한 콜로이드 용액이 될 때까지 교반한다. Fig. 1에는 눈금이 새겨진 시험병을 이용하여 제조된 PCM 용융액을 정량한 후 용융-동결시키면서 상분리 현상 및 과냉각 현상을 측정하는 장치를 나타내었다. 항온조내의 시험병에 각각 Pt 온도 센서를 설치하여 다중온도기록계에 온도를 기록할 수 있게 제조하였고 축열제의 상전이 온도인 58 °C를 기준으로 38 °C에서 78 °C로 자동 온도사이클 조절이 가능한 온도조절기를 항온조에 설치하였다. 연속적인 PCM의 구형입자 제조[15]는 가열판을 이용하여 용융상태의 PCM이 일정온도를 유지하도록 하였으며 정량 펌프를 사용하여 용융된 PCM을 테플론 재질의 노즐을 통해 방출하여 구형의 PCM 입자를 형성시키면서 액체 질소로 겔화하였다. 타이곤 튜브를 통한 용융 PCM의 동결을 방지하기 위하여 용융 PCM이 이동하는 모든 튜브에는 열전대를 설치하였다. 또한 정량 펌프에는 유속을 정밀하게 조절하기 위하여 stroke rate controller를 설치하였으며 노즐에서의 용융 PCM의 동결을 방지하기 위하여 노즐을 유리관으로 싼후 열전대를 설치하였다.

3-1-2. 구형의 PCM 입자 캡슐화

용융과 동결시 PCM의 결정수 누출 방지 및 기계적 강도를 향상시키기 위한 캡슐화는 Fig. 2의 Rotor-Tangential Spray Coater를 이용하였다. Table 2에는 코팅장치의 조작조건을 나타내었다. Product container에 코팅하고자 하는 PCM 입자를 일정량 넣고 spray 노즐을 통해서 코팅물질을 함유한 용매를 주입하고 variable speed disc 하부에서 상부로 압축공기를 공급하였다. Variable speed disc를 회전시키면서 PMMA, wax, PMMA 순으로 3차 코팅실험을 행하였다. 제조한 구형입자의 형태학적 관찰은 광학현미경(optical microscopy, Nikon, SMZ-2T)으로 행하였고 열저거동을 Fig. 1의 실험장치 및 시차주사열량계(differential scanning calorimeter, Rheometric Scientific Co., DSC 1500)로 용융-동결 사이클 실험을 수행하였다.

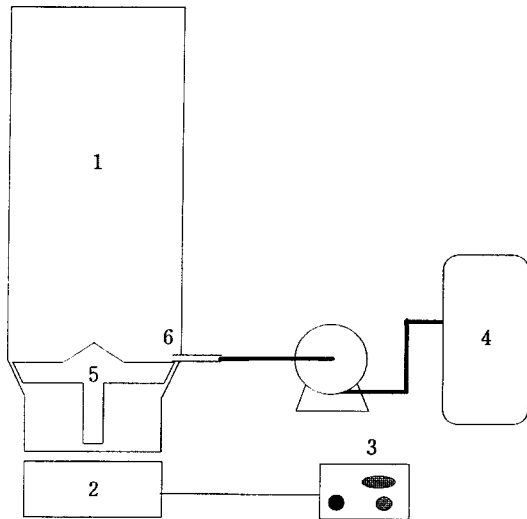


Fig. 2. Experimental apparatus for coating of PCM.

- | | |
|-----------------|-----------|
| 1. Chamber | 4. Tank |
| 2. Lower plenum | 5. Disc |
| 3. Compressor | 6. Nozzle |

Table 2. Experimental conditions of PCM coater

Coater	Rotor-tangential spray coater
Capacity of one batch	2 kg
PCM particle size	2-3 mm
Air velocity	9-10 m/sec
Product pressure	1 Kpa
Nozzle pressure	15 psi
Coating solution	PMMA 10 % solution wax 10 % solution PMMA 10 % solution

4. 결과 및 고찰

4-1. PCM 입자제조 및 상분리 현상

점증제와 조핵제의 함량을 변화시키면서 용융-동결 cycle 실험을 통한 PCM의 상분리 냉각매체로서 공기와 물을 이용하여 현상을 관찰하였다. 냉각매체로서 공기를 이용한 경우의 상분리 현상은 가열판을 이용하여 용융시킨 PCM을 대기 중에 방치하여 동결시켜 관찰하였다. Fig. 3은 조핵제의 함량을 2 wt%로 고정시키고 점증제의 함량에 따른 상분리 실험결과를 나타내었다. 비조화성 PCM인 SAT의 경우는 용융-동결 실험 14회만에 40 vol%의 상분리현상을 나타내었다. 이에 비하여 점증제를 2 wt%이상 첨가했을 경우 30회 이상에서도 안정한 상태를 유지하였다. 점증제 이외에 조핵제에 대한 영향을 알아보기 위하여 조핵제를 넣어서 조성을 변화시켜 실험을 행한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 점증제와 조핵제의 변화에 따른 상분리 실험으로 점증제의 함량이 1.5-2 wt%, 조핵제의 함량 1.5-2 wt%가 30회 정도의 용융-동결 cycle 실험에서 안정성을 유지하는 것을 알 수 있었다.

냉각 매체로서 물을 이용한 경우의 상분리 실험결과는 Fig. 5, 6에 나타내었다. Fig. 5는 조핵제의 함량을 2 wt%로 고정시키고 점증제의 함량에 따른 상분리 실험결과를 나타내었다. 냉각매체로서 공기를 사용했을 경우보다 상분리 현상이 빨리 발생되는 것을 관측할 수 있었고 점증제 2 wt% 이상에서 상분리가 일어나지 않고 안정한 것으로 나타났다. Fig. 6은 점증제의 함량을 2 wt%로 고정시키고 조핵제의 함량에 따른 상분리 실험을 행한 결과로서 조핵제가 1 또는 2

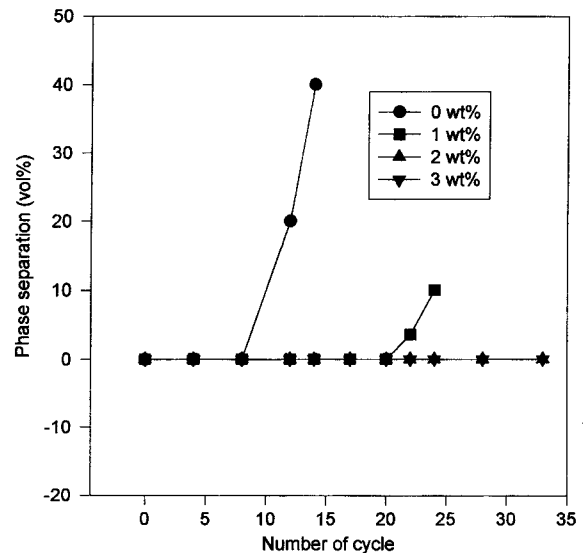


Fig. 3. Change of phase separation with number of cycle as a function of the concentration of thickener (cooling media=air, nucleator 2 wt%).

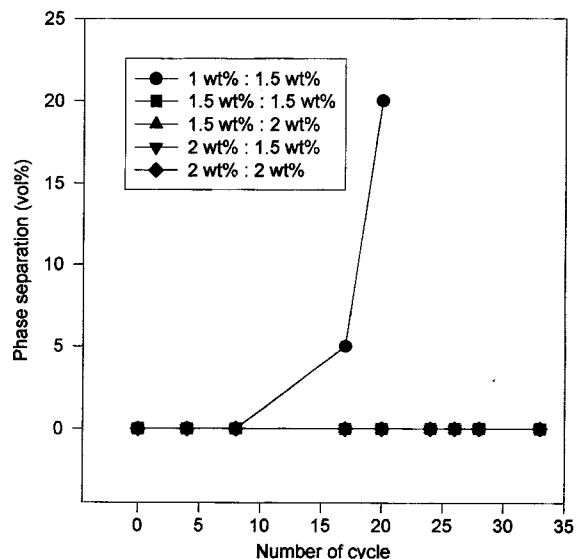


Fig. 4. Change of phase separation with number of cycle as a function of the concentration of thickener and nucleator (cooling media=air, thickener : nucleator).

wt%일 경우는 상분리없이 안정한 것으로 나타났으나 그 이상의 경우는 상분리가 일어났는 바 조핵제의 과다한 첨가로 인하여 침전현상이 증가하였고 이에 따라 상분리 현상도 심하게 일어나는 것으로 관측되었다. 실제로 조핵제의 함량을 1에서 3 wt%로 증가시키기에 따라 용융-동결 싸이클 실험용 PCM 시료 25 ml 중 침전량은 1에서 3 ml로 증가하였다.

4-2. 과냉각 현상

Fig. 1에 나타난 과냉각을 측정할 수 있는 장치를 이용하여 용융-동결 온도를 조절하면서 과냉각 현상 실험을 행한 결과를 Table 3과 4에 나타내었다. Table 3은 조핵제의 함량을 2 wt%로 고정시키고 점증제의 함량에 따른 과냉각 현상 실험결과를 나타내었다. 점증제의 함량이 1과 2 wt%에서 7.5-7.9 °C의 일정한 과냉각 현상을 보이고 있

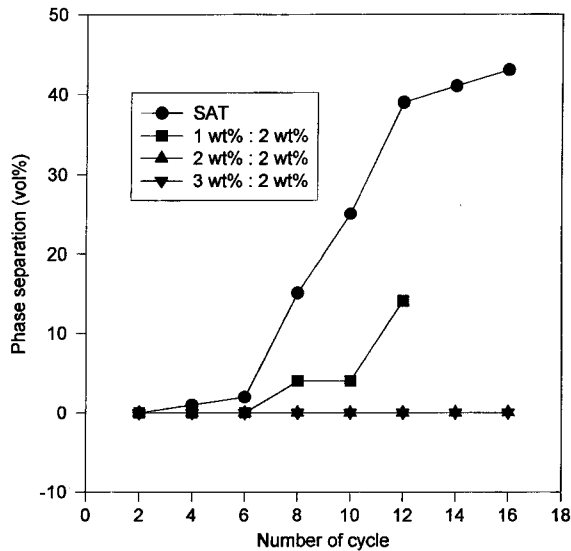


Fig. 5. Change of phase separation with number of cycle as a function of the concentration of thickener (cooling media=water, nucleator 2 wt%).

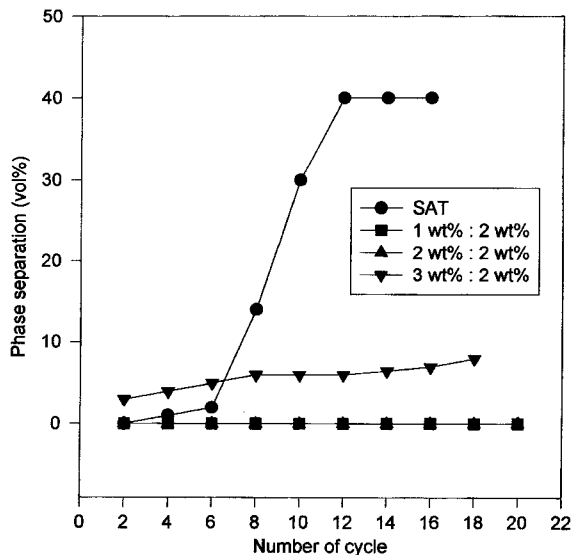


Fig. 6. Change of phase separation with number of cycle as a function of the concentration of nucleator (cooling media=water, thickener 2 wt%).

다. 그러나 점증제가 3 wt%로 증가하면서 과냉각 온도의 분산도(r^2)가 크게 나타남으로서 용융-동결 cycle에 따른 과냉각 온도가 불균일한 현상을 보이고 있다. 한편 순수한 SAT의 경우는 8 cycle에서 11 °C까지 과냉각이 증가하다 용융 동결에 의한 발열 및 흡열 피익이 나타나지 않았다. Table 4는 점증제의 함량을 2 wt%로 고정시키고 조핵제의 함량에 따른 과냉각 현상 실험결과를 나타내었다. 조핵제의 함량이 적거나(1 wt%) 크면(3 wt%) 용융-동결 cycle에 따른 과냉각 온도의 분산도가 증가함으로서 불균일한 과냉각 현상을 보이고 있다. 조핵제 2 wt%일 경우가 보다 일정한 과냉각 현상을 보이고 있다. 따라서 증점제와 조핵제의 조성은 모두 2 wt%인 경우에 과냉각에 효과적임을 알 수 있다.

4-3. PCM 조성에 따른 발열, 흡열 특성

Table 3. Effect of thickener concentration on supercooling temperature with thermal cycle

Number of cycle	Sodium acetate trihydrate	Composition[thickener : nucleator(wt% : wt%)]		
		1 : 2	2 : 2	3 : 2
1	NA			
2	NA	7.9	6.2	
3	NA	7.9	7.7	7.9
4	NA	7.5	7.2	8.8
5	NA	7.5	7.8	8.0
6	NA	7.8	7.2	8.5
7	9	7.8	7.2	9.2
8	11	7.5	7.5	10.5
9		7.7	7.5	
10		7.8	7.6	11.2
11		7.5	8.0	6.8
12		7.9	7.2	9.4
13		7.8	6.4	8.2
14		7.8	6.8	9.2
15		7.6	6.3	8.0
16		7.7	7.9	7.4
17		7.7	6.9	7.9
18		7.7	7.4	8
19		7.8	7.4	11.8
20		7.6	7.7	9.9
		Standard deviation(r^2)		
		0.0049	0.014	0.0205

Table 4. Effect of nucleator concentration on supercooling temperature with thermal cycle

Number of cycle	Sodium acetate trihydrate	Composition[thickener : nucleator(wt% : wt%)]		
		1 : 2	2 : 2	3 : 2
1	NA			
2	NA	4.2	6.2	6.8
3	NA	7.0	7.7	7.2
4	NA	7.3	7.2	6.9
5	NA	6.7	7.8	6.1
6	NA	6.8	7.2	6.1
7	9	6.8	7.2	6.1
8	11	6.2	7.5	6.1
9		7.9	7.5	5.3
10		6.9	7.6	5.3
11		7.5	8.0	5.5
12		8.3	7.2	7.6
13		7.5	6.4	7.2
14		7.8	6.8	6.5
15		7.0	6.3	9.4
16		6.2	7.9	7.9
17		7.7	6.9	9.0
18		9.5	7.4	8.2
19		8.0	7.4	7.2
20		8.7	7.7	8.2
		Standard deviation(r^2)		
		0.4196	0.014	0.3239

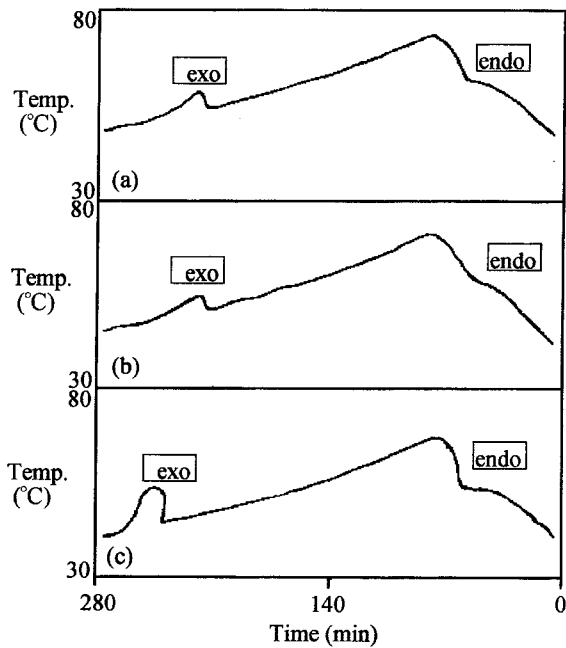


Fig. 7. Endothermic and exothermic characteristics of PCM vs. thickener concentration [thickener : nucleator = (a) 1 : 2, (b) 2 : 2, (c) 3 : 2].

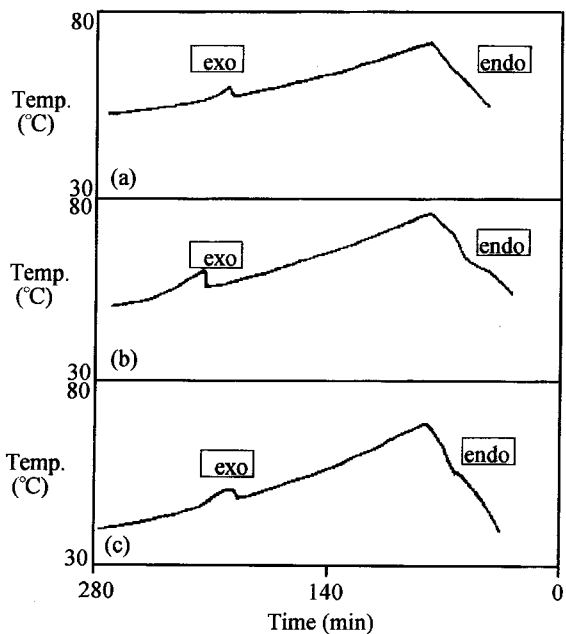
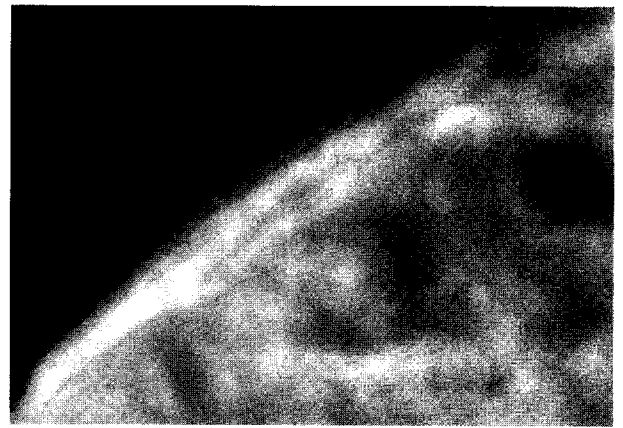


Fig. 8. Endothermic and exothermic characteristics of PCM vs. nucleator concentration [thickener : nucleator = (a) 2 : 1, (b) 2 : 2, (c) 2 : 3].

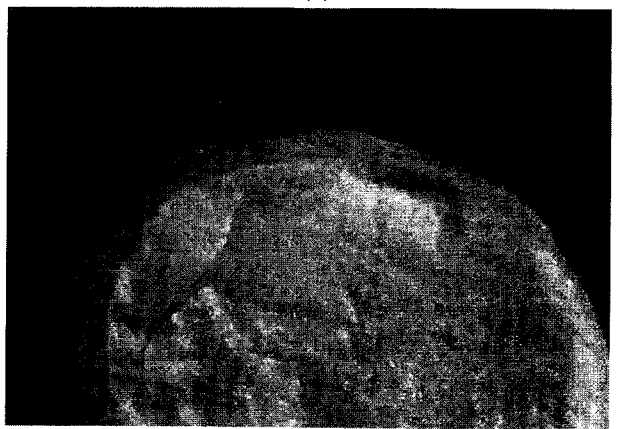
Fig. 7과 8에 PCM 조성에 따른 특정 cycle의 발열, 흡열 피크를 나타내었다. Fig. 7은 조핵제를 2 wt%로 고정시키고 점증제를 증가시키면서 발열과 흡열 피크를 관측하였다. 점증제가 1-2 wt%에서는 발열량이 비슷한 것으로 나타났으나 3 wt%인 경우 발열량이 월등히 높은 것으로 나타났다. 이는 침전량이 점증제 함량의 증가에 따라 감소하기 때문으로 사료된다. 한편 Fig. 8에는 점증제를 고정하고 조핵제를 증가시키면서 발열과 흡열 피크를 관측한 결과이다. 용융-동결 cycle 초반에는 3 wt%가 크게 나타나나 용융-동결 cycle이 지날수록 발열



(a)



(b)



(c)

Fig. 9. Optical microphotograph of PCM core coated with PMMA, $\times 100$ (a), PMMA+wax, $\times 20$ (b), PMMA+wax+PMMA, $\times 20$ (c).

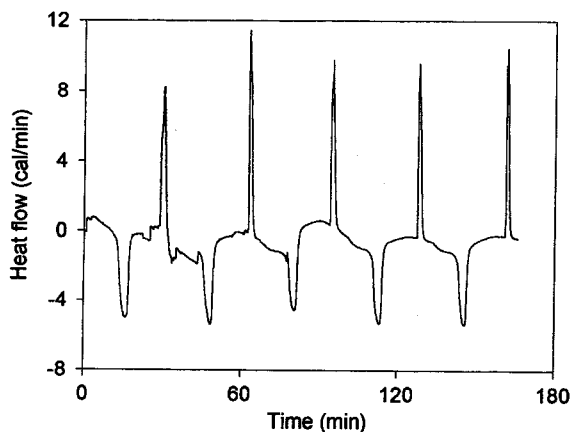
량이 비슷해 지는 현상을 관측하였다. 순수한 SAT의 경우는 8 cycle에서 발열과 흡열 피크가 중단되었지만 점증제 1-3 wt%, 조핵제 1-3 wt%의 모든 조성에서 20 cycle까지는 발열과 흡열 피크가 나타났다.

4-4. 연속적인 PCM 입자 제조

상분리와 과냉각 현상의 실험 및 용융-동결 cycle 실험으로부터 최적 조성으로 나타난 점증제 2 wt% 및 조핵제 2 wt%의 용융 PCM을 만들고 PCM 입자 연속 제조 장치를 이용하여 용융 PCM의 방출속도를 1.3에서 1.8 ml/min으로 변화시키면서 PCM 입자를 제조하였다. 용

Table 5. Effect of number of cycle on the supercooling temperature of spherical PCM coated with PMMA, wax and PMMA

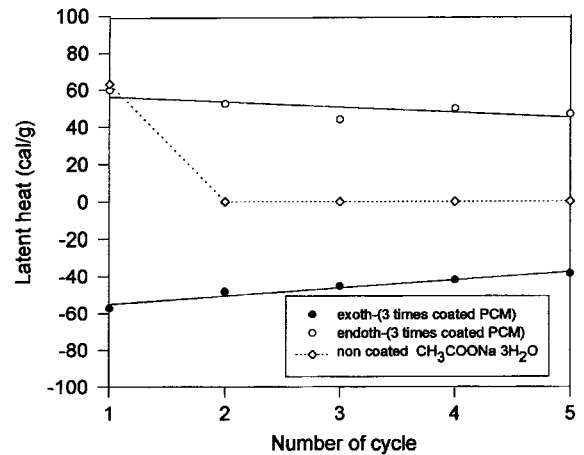
Number of cycle	Supercooling temperature(°C)
1	5.0
2	6.8
3	7.2
4	5.5
5	5.6
6	6.3
7	5.9
8	5.9
9	6.5
10	7.0
11	7.9
12	7.2
13	7.2
14	7.3
15	8.0
16	7.4
17	7.4
18	8.8
19	7.3
20	7.2
21	7.4
Standard deviation(r^2)	
0.5121	

**Fig. 10. DSC freeze-thaw cycle test of 3 times coated PCM.**

용 PCM의 방출속도에 따른 입자의 크기를 측정하였는데 용융 PCM의 방출속도에 관계없이 지름이 3-3.5 mm 정도로 거의 일정한 입자를 제조할 수 있었다.

4-5. 제조한 PCM 입자의 코팅

Fig. 2의 PCM 코팅 장치를 이용하여 1차적으로 PMMA코팅을 하고 2차적으로 wax코팅, 마지막으로 다시 PMMA코팅을 행하였다. Fig. 11과 같이 평균적으로 1차 PMMA 코팅 두께는 0.03 mm, 2차 wax 코팅한 입자의 전체 코팅층 두께는 0.25 mm, 그리고 3차 PMMA 코팅 입자의 전체 코팅층 두께가 0.4 mm로 측정되었다. 하지만 제조한 PCM 입자의 구형도가 완벽하지 않아서 코팅이 불균일하게 되었다. 전열 매체로서 dodecane을 사용하여 코팅후 PCM 입자의 용융-동결 cycle 실험을 수행하였다. 그 결과 Table 5와 같이 21cycle까지 흡열-발열 피크가 계속되었으나 코팅 PCM 입자의 과냉각은 불균일한

**Fig. 11. Variation of latent heat according to freeze-thaw cycle.**

코팅에 의해서 용융-동결 cycle에 따른 과냉각 온도의 분산도가 크게 나타남으로서 불균일한 과냉각 현상을 보이고 있다. 그리고 5 cycle 이후부터 PMMA의 코팅 속으로 용매인 dodecane의 침투현상으로 인한 일부 입자들의 팽윤현상이 관찰되었다. Fig. 10에는 3차 코팅한 SAT의 DSC 용융-동결 사이클 실험결과를 나타내었고 Fig. 11에는 용융-동결 사이클에 따른 DSC에 의한 잠열 변화량을 나타내었다. 코팅을 하지 않은 순수 SAT의 경우 1회의 흡열 피크를 나타낸 후 잠열 특성을 상실하였고 3차 코팅을 한 경우에는 불균일한 코팅에 의해 결정수 손실이 일어나 용융-동결 사이클에 따라 점차적으로 잠열이 감소해 가는 것을 볼 수가 있다.

5. 결 론

구형의 PCM 입자 제조 및 캡슐화 후 용융-동결 사이클 실험을 통해 상분리 현상, 과냉각 현상 및 열적 특성을 관찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 최적조성(점증제:조해제=2 wt%:2 wt%)의 용융 PCM을 이용하여 방출속도 1.3-1.8 ml/min의 범위에서 평균크기 3-3.5 mm, 잠열량 58 cal/g인 구형입자를 얻었다.

(2) 제조된 구형의 PCM에 결정수 누출 방지 및 기계적 강도 증가를 위해 1차 PMMA(평균두께:0.03 mm), 2차 wax(평균두께:0.25 mm), 3차로 PMMA(평균두께:0.4 mm) 코팅을 행하였다. 코팅된 구형의 PCM 입자는 20여회의 사이클 테스트에 안정성을 나타내었으나 결정수의 손실로 점진적으로 잠열 특성이 감소해 가는 현상이 관측되었다.

감 사

본 연구는 통상산업부에서 시행한 대체에너지 기술개발사업의 지원에 의해 연구되었기에 이에 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

1. Lorsch, H. G., Kauffman, K. W. and Denton, J. C.: *Energy Convers.*, **15**, 1(1975).
2. Schroder, J. and Gawron, K.: *Energy Res.*, **5**, 103(1981).
3. Feldman, D., Banu, M. M. and Fuks, C. J.: *Solar Energy Mater.*, **18**, 201(1989).

4. Ryu, H. W., Woo, S. W., Shin, B. C. and Kim, S. D.: *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **27**, 161(1992).
5. Lane, G. A.: "Solar Heat Storage: Latent Heat Materials", CRC Press, Boca Raton, **1**(1983).
6. Telkes, M.: *ASHRAE J.*, **16**, 38(1974).
7. Lane, G. A.: *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **27**, 135 (1992).
8. Kimura, H. and Kai, J.: *Solar Energy*, **35**, 527(1985).
9. Lan, G. A.: "Solar Heat Storage: Latent Heat Materials", CRC Press, Boca Raton, **1**(1983).
10. Telkes, M.: *ASHRAE J.*, **16**, 38(1974).
11. Lane, G. A.: *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **27**, 135(1992).
12. Saitoh, T. S. and Moon, J. H.: ENERGEX '93-The 5th International Energy Conference, 18, Oct.(1993).
13. Mangold, D. J.: "Southwest Research Institute", San Antonio, Texas, USA.
14. Curt Thies, "How to Make Microcapsules Combined Lecture and Laboratory Manual", Thies Technology, St. Louis, Missouri, July (1995).
15. Kim, J. K., Jung, K. T., Shul, Y. G., Kim, D. H. and Lee, T. K.: *Solar Energy*, **17**(2), 67(1997).