

열저장을 위한 sodium acetate trihydrate 및 stearic acid의 core 제조와 캡슐화

윤우석 · 실용건 · 김종국^{*†} · 주현규^{**} · 전명석^{**} · 이태규^{**}

연세대학교 화학공학과

*건양대학교 화학공학과

**한국에너지기술연구소

(1999년 8월 30일 접수, 2000년 6월 12일 채택)

Encapsulation of Sodium Acetate Trihydrate and Stearic Acid for Thermal Energy Storage

Woo Sug Yoon, Young Gun Shul, Jong Kuk Kim^{*†}, Hyunku Joo^{**}, Myung Seok Jeon^{**} and Tai Kyu Lee^{**}

Dept. of Chem. Eng., Yonsei University

*Dept. of Chem. Eng., Konyang University

**Korea Institute of Energy Research

(Received 30 August 1999; accepted 12 June 2000)

요 약

50-60 °C에서 녹는점을 갖는 잠열저장물질 중 무기염 수화물로는 비조화 축열제인 sodium acetate trihydrate(SAT)와 유기물로는 stearic acid(SA)를 1 mm이하의 구형입자로 제조한 후 코팅을 수행하였다. SAT의 상분리 및 과냉각 현상을 방지하기 위하여 gelatin과 sodium pyrophosphate decahydrate($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)를 첨가하여 poly methyl methacrylate(PMMA)와 wax로 이중코팅하였고, SA는 PMMA, polyurethane(PU), silicon으로 각각 단일코팅하였다. 광학현미경, Scanning Electron Microscopy(SEM), Thermogravimetry(TG), Differential Scanning Calorimetry(DSC)로 입자의 구형도, morphology, 코팅층의 두께 및 내열성 그리고 용융-동결 사이클 진행에 따른 흡열-발열 및 과냉각 정도를 확인하였다. 그 결과 10-20 μm 두께로 균일하게 코팅된 구형의 Phase Change Material(PCM) 입자 SEM분석을 통해서 관찰되었으며 코팅후 SAT의 경우 12회 사이클 진행에 따른 잠열량은 50-60 cal/g으로 일정하나 과냉각은 10 °C 정도가 되는 것을 확인하였다. 반면 SA입자 코팅층의 내열적 안정성은 $\text{PU} > \text{PMMA} > \text{silicon}$ 순으로 나타났으며 PU코팅의 경우 잠열량은 약 35 cal/g으로 일정하였고 과냉각 없이 용융-동결 반복 후에도 코팅층이 안정된 것으로 확인하였다.

Abstract – Cores(< 1 mm diameter) of organic stearic acid(SA) and inorganic sodium acetate trihydrate(SAT) as phase change material(PCM) with a melting point in the range of 50-60 °C were manufactured. Single-layer coating was performed for SA cores with poly urethane(PU), poly methyl methacrylate(PMMA), and silicon, respectively, while tertiary-layer coating was performed for SAT cores with PMMA and Wax. In case of SAT, gelatin as thickener and sodium pyrophosphate decahydrate($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) as nucleator were added to prevent the phase separation and the supercooling respectively. Coated PCMs were analyzed by optical microscopy, scanning electron microscopy(SEM), thermogravimetry(TG), and differential scanning calorimetry(DSC) to investigate their morphology, coating thickness, thermal stability. As a result, we obtained the ball-shaped PCM cores with the uniform coating thickness of 10-20 μm , constant latent heat of 50-60 cal/g and 35 cal/g in case of SAT and SA respectively. But 10 °C of supercooling was observed for SAT after 12th cycle of thaw-freezing test, while no supercooling was observed for the SA coated with PU. Thermal stability of the coating polymers used in SA decreased in the order of PU, PMMA and silicon.

Key words: Phase Change Material, Encapsulation, Thermal Energy, Storage

1. 서 론

태양에너지의 공급과 소비의 시간적, 장소적 불일치를 해소하고 효율적 이용을 위해서는 에너지 저장에 대한 연구가 필요하다. 이들 저장

방법중 물질의 상태가 변할 때 등온에서 흡수 또는 방출하는 잠열을 이용한 축열방법이 축열밀도가 크기 때문에 많이 연구되고 있다. 그중 무기염이나 여러 유기물이 잠열 저장물질로서 널리 연구되어 왔다[1-5]. PCM 중 무기염 수화물은 열전도도와 용융잠열이 크고 가격이 싸다는 장점을 갖고 있으며 유기물은 취급이 쉽고 과냉각이나 상분리 현상이 없는 장점이 있다. 따라서 본 실험에서는 상온 축열 물질로서 작동 온

[†]E-mail: jk kim@cyris.konyang.ac.kr

Table 1. Thermophysical properties of PCM[2]

	Material	Specific heat(cal/g °C)	Density(g/cm ³)	Melting point	Latent heat	Volume change
		Solid(liquid)	Solid(liquid)	(°C)	(cal/g)	ΔV
Salt hydrate	Sodium acetate trihydrate	0.7	1.45	58	63	-9.3%
Fatty acid	Stearic acid			56	38	-14.5%

도 범위 및 비용면에서 가장 적절한 무기염 수화물 중 비조화형 축열재인 SAT와 유기물인 SA를 사용하였다. Saitoh 등은 원통형 캡슐, 나선형 코일 또는 평판형 캡슐보다 구형 캡슐 형태가 가장 좋은 축열효과를 나타내며, 현재 존재하는 축열 시스템에 이용하기 제일 쉽고, 또한 축열시스템 설계가 간단하고 구형이 아닌 경우는 모든 방향으로의 고른 코팅이 힘들고, 열전달이 고르지 않으며, 상전이시 발생하는 부피변화에 의한 압력이 표면에 고르게 작용하지 않는 단점이 있다고 보고하였다[6]. 또한 축열물질은 Table 1에 나타난 바와 같이 상변화시 10% 이상의 부피변화를 수반하고 이 변화는 단단한 캡슐재의 파손을 야기시킬 수 있으므로, 상변화 및 열팽창에 의한 부피변화를 축열제 자체에서 완충시킬 수 있는 구형의 core제조방법이 요구된다[2]. 그리고 미세캡슐 형태가 상품으로서 가치와 활용도를 높일 수 있다. 이와 같은 캡슐화된 PCM을 이용한 축열 방법은 에너지 저장밀도가 크기 때문에 축열기의 부피를 크게 줄일 수 있으며 거의 일정한 온도에서 열에너지를 저장하고 회수할 수 있으므로 균일한 수준의 에너지를 얻을 수 있는 장점이 있다. 따라서 이러한 캡슐화된 PCM이 태양열시스템 및 난방시스템에 활용할 수 있는 최적 축열 시스템이라고 할 수 있다. Powder 형태의 무기염 수화물 및 지방산류를 구형의 core로 제조하기 위한 방법은 균형을 이용한 압축성형법, 용융된 구형 액적을 고체화하는 법, emulsion을 이용한 제조법을 들 수 있는데[7-11], 본 실험에서는 Fig. 1과 같이 조작이 간단하면서 대량생산이 가능한 용융된 구형액적을 고체화하는 방법을 사용하였다. 축열 캡슐의 제조 및 코팅 방법을 Table 2에 나타내었다. 직경 1 mm의 캡슐 제조방법으로는 extrusion[12], air suspension[13] 및 solvent evaporation법[14] 등이 있는데 본 실험에서는 매우 좋은 film 특성을 나타내는 air suspension법 중 tangential spray (rotor process) coater를 택하여 코팅을 수행하였다. 축열제의 보호막으로 이용되는 코팅 물질은 polymer가 주종을 이룬다. 일본 송분유지 제약(주)에서 제조된 축열캡슐의 코팅재는 열경화성수지인 melamine 수지였고, 일본 capsule products는 EVA(Ethylene Vinyl Acetate) 또는 ge-

Table 2. Encapsulation method and size range[13, 14]

Encapsulation method	Fill materials	Size range(μm)
Physical methods		
Stationary extrusion	Liquid/Solid/Gas	1000-6000
Submerged nozzle	Liquid/Solid/Gas	850-6000
Centrifugal extrusion	Liquid/Solid/Gas	125-3000
Vibrating nozzle	Liquid/Solid/Gas	1000±2%
Spray drying	Liquid/Solid	5-150
Rotating disk	Liquid/Solid	5-1000
Pan coating	Solid	>500
Air suspension	Solid	50-10000
Chemical methods		
Coacervation/phase separation	Liquid/Solid	1-500
Interfacial polymerization	Liquid/Solid	1-500
Solvent evaporation	Liquid/Solid	1-5000
In situ polymerization	Liquid/Solid	1-500

latin을 코팅재로 하여 Coacervation/Phase Separation법으로 축열 캡슐을 제조하였다[7]. 축열제를 감싸서 외부환경으로부터 축열제의 특성변화를 방지시키기 위한 코팅재의 요건은 film 형성 성질이 우수해야 하고 사용조건에 맞는 열적, 기계적 특성을 갖고 물리화학적으로 안정해야 한다[15-20]. 특히 무기수화염인 경우, H₂O 증기투과도가 낮아야 하나 상기의 요구특성 조건을 모두 충족시키는 코팅재질을 찾는 것은 매우 어려운 일이다. 코팅재질로 선정된 polymer들은 비교적 높은 H₂O 증기투과도를 가지고 있음으로써, 무기염 수화물에 코팅시켰을 때, 상전리와 함께 생성되는 결정수를 점차 capsule내에서 보유하지 못하고 잃어버림으로써, 축열 capsule의 열적 특성이 계속해서 악화된다[21-27]. 이러한 단점을 보완하기 위하여 본 연구에서는 무기염 수화물 SAT를 구형화 한 후 이의 코팅을 위해 H₂O 증기 투과도가 극히 낮고 소수성인 wax로 polymer코팅 중간에 코팅시키는 방법이 고안되었고 유기산 SA의 경우는 결정수의 누출이 없으므로 polymer(PMMA, PU, silicon)층만의 코팅으로 기계적 강도를 강화하였다. 상기 두 캡슐화된 PCM의 물성을 TG, SEM 및 DSC를 이용하여 측정함으로써 축열조 및 바닥장식재료의 응용을 위한 기초자료를 제시하였다.

2. 실험

2-1. 연속적인 PCM 입자(core) 제조

Table 1에 물성을 나타낸 SAT(Junsei, Co)와 SA(Oriental, Co)를 Fig. 1의 core 제조장치를 이용하여 PCM core를 제조하였다. Fig. 1에서 볼 수 있듯이 core의 연속적인 제조를 위하여 hot plate위에서 용융상태의 PCM이 일정온도를 유지하도록 하였다. 용융상태의 PCM은 정량 metering 펌프(Fluid metering, Inc)를 통해 이송되고 최종적으로 직경 1 mm인 spray nozzle을 통해 구형 PCM core 형태로 액체질소에 의해 급속 고형화가 이루어 진다. 액적의 고형화를 위해서 생성된 액적이 노즐 tip에서 액체질소로 떨어뜨리면, PCM 상변화에 필요한 잠열은 액체질소의 기화열로 소모되면서 고형화된 구형의 core가 제조된다. 무기염 수화물을 이용한 구형의 core 제조시에 액체냉매가 효과적인데, 이는 액적이 최외각 부분부터 상전이(액체→고체)가 용이하고 열전도면에 병

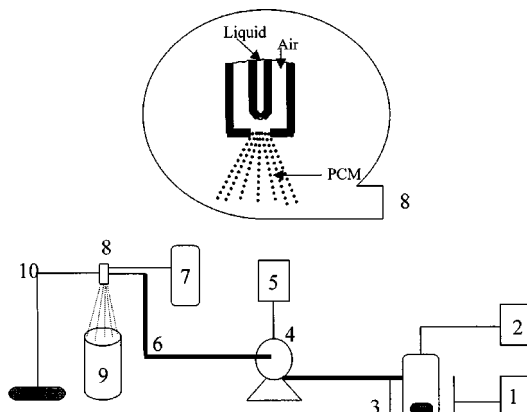


Fig. 1. Schematic diagram for the continuous production of PCM core.

- | | |
|---------------------------|--------------------|
| 1. Temperature controller | 6. Heating belt |
| 2. Viscometer | 7. Air tank |
| 3. Hot plate | 8. Nozzle |
| 4. Metering pump | 9. Liquid nitrogen |
| 5. Stroke rate controller | 10. Stand |

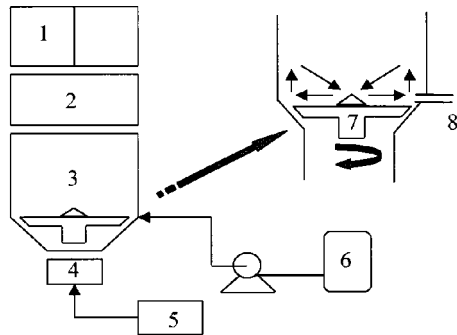


Fig. 2. Coating apparatus of PCM core.

1. Filter housing
2. Expansion chamber
3. Product container
4. Lower plenum
5. Air compressor
6. Solvent tank (PMMA, wax, poly-urethane)
7. Variable speed disc
8. Spray nozzle

매의 순환으로 계속 새로운 냉매가 공급되기 때문이다. 그리고 액체질소와 같은 냉매는 ether 또는 hexane 등의 유기용매를 dry ice 또는 immersion chiller 등으로 0 °C 이하로 냉각시켜 대체될 수 있다. 무기염 수화물은 40-60 wt%의 결정수를 함유하고 있어 물의 빙점인 0 °C 이하에서는 단단한 ice 결정을 이룬다. Teflon튜브를 통하여 이송되는 용융 PCM이 튜브내에서 고화되는 것을 방지하기 위하여 모든 튜브는 열전대를 이용하여 일정온도로 유지하였으며 정량펌프에는 stroke rate controller를 이용하여 유속을 1.8 ml/min으로 정밀하게 조절하여 연속적으로 직경 1 mm이하의 구형 PCM core를 생산하였다.

2.2. PCM입자 코팅실험

제조된 구형 PCM core의 코팅장치는 Fig. 2에 나타난 Rotor-tangential spray coater(Glatt, Co)를 이용하여 SAT입자와 SA입자를 코팅하였다. 전자의 경우 1차적으로는 PMMA(LG Co, IH830) 코팅을 한 후 2차적으로는 wax(Aldrich Co, 64742-43-4)코팅, 다시 최종적으로 3차 PMMA 코팅을 함으로서 용융-동결시 PCM의 결정수 누출을 방지하고 기계적 강도를 향상시키고자 하였다. 한편 SA 경우는 결정수의 누출이 없으므로 polymer(PMMA, PU, silicon)층만의 코팅으로 기계적 강도를 강화하였다. 코팅제는 PMMA, wax, silicon(SILES KX)은 chloroform(Junsei, Co)과 Toluene(Junsei, Co) 용매에 polymer resin 10 wt% 첨가하였고 PU는 xylene, toluene, ethyle acetate를 용매로 사용하였다. PCM core 코팅장치의 실험조건은 Table 3에 나타내었고 본 장치의 운전 방법은 다음과 같다.

- (1) Filter housing에 filter를 고정시킨다.
- (2) 본 장치는 유압식 기기이므로 동력을 공급하기 위하여 air 밸브를 열고 동력 스위치를 on 시킨다.
- (3) Product container에 PCM 입자를 2 kg 정도 충전시키고 spray nozzle을 연결한다.

Table 3. Experimental condition of PCM coater

Coater	Rotor-tangential spray coater
Capacity of one batch	2 kg
Air velocity	9-10 m/sec
Product pressure	1 Kpa
Nozzle pressure	15 psi
Solvent for coating	PMMA 10% in CHCl ₃ : Toluene=1 : 1 wax 10% in CHCl ₃ : Toluene=1 : 1
Particle size of PCM core	1-3 mm

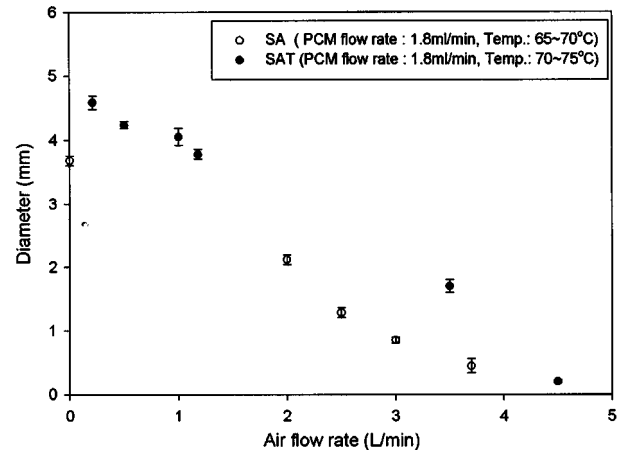


Fig. 3. Effect of air flow rate on the diameter of PCM core.

- (4) Spray nozzle 즉 이중노즐의 환상부로 공기를 공급하고 또한 Variable speed disc 하부에서 상부로 공기를 공기압축기에 의해 공급한다.
- (5) Variable speed disc를 회전시키면서 코팅용액을 주입한다.
- (6) 한 싸이클 코팅에는 약 3-4시간이 소요된다.

3. 결과 및 검토

3-1. 연속적 PCM core 제조

Fig. 3은 PCM유속을 1.8 ml/min으로 유지하였을 때 노즐 공기의 유속에 따른 SAT와 SA의 core size를 나타내있는 바 공기 유속이 빠를수록 미세입자를 얻을 수 있었고 SAT는 공기 유속 4 L/min, SA는 3 L/min에서 약 1 mm의 구형입자를 제조할 수 있었다. 그리고 구형입자의 모양을 광학현미경으로 관찰해본 결과 Fig. 4와 같이 이상적인 구형으로

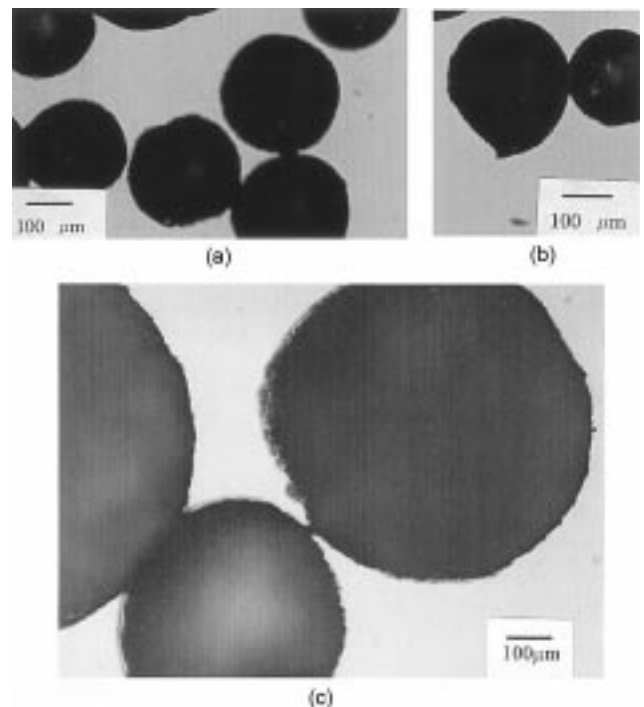


Fig. 4. Optical micrographs of PCM(SAT, SA).

- (a) SAT, PCM flow rate=1.8 ml/min, air flow rate=4.5 L/min, 75 °C,
- (b) SAT, PCM flow rate=1.8 ml/min, air flow rate=4.5 L/min, 63 °C,
- and (c) SA, PCM flow rate=1.8 ml/min air flow rate=3.5 L/min, 65 °C

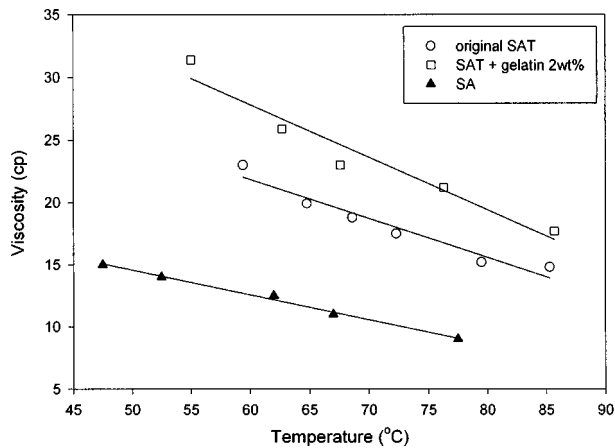


Fig. 5. Effect of temperature on the viscosity of PCMs.

확인되었다. 그리고 Fig. 4(b)는 SAT의 core 제조공정 온도를 80-60°C까지 변화시키면서 morphology를 관찰한 결과 65°C 이하가 되면서 core 들 중 일부 돌출부위가 생겨 구형에서 벗어남이 확인되었다. 반면 SA는 60°C까지 이상적인 구형이 관찰되었는데, 이는 Fig. 5에서 나타낸 온도에 따른 점도의 영향으로 SAT가 SA에 비하여 상대적으로 점도가 높아 노즐 tip부분에서 나타난 core의 모양이 표면장력에 의해서 다시 구형이 되어야하나 높은 점도의 영향으로 이상적인 구형이 되지 못하고 돌출부위가 생겨나는 것으로 사료된다. 이와 같이 제조된 구형 core는 급속냉각에 의한 부피감소로 core 내부에 미세한 공극이 생겨있어 축열재로 이용할 때, 용융시의 부피팽창에 대한 영향이 자체 흡수될 수 있는 장점이 있다.

4-2. PCM core의 코팅

Fig. 6은 Fig. 2의 코팅장치 내에서 입구 공기온도의 변화에 따른 PCM 온도와 배출 공기온도의 변화를 살펴보았다. 배출 공기온도는 PCM 온도보다 약간 낮는데 그 이유는 유기용매의 휘발로 인한 증발잠열 때문이다. Fig. 7(a)는 입구 공기온도가 45°C일 때 생성된 캡슐의 SEM 사진이다. 이보다 낮은 온도에서는 agglomeration을 유발시키고 코팅시간도 2배 이상 오래 걸린다. 그리고 높은 온도(50°C)에서는 Fig. 7(b)의 SEM 사진에서 보는 바와 같이 코팅액이 입자에 충분히 묻은 후 용매가 휘발되어야 하나 코팅액이 입자에 묻기 전에 바로 휘발되므로 코팅층이 얇고 치밀하지 못한 결과를 가져와 본 실험에서는 입구 공기 온도를 45°C로 유지하여 코팅을 수행하였다.

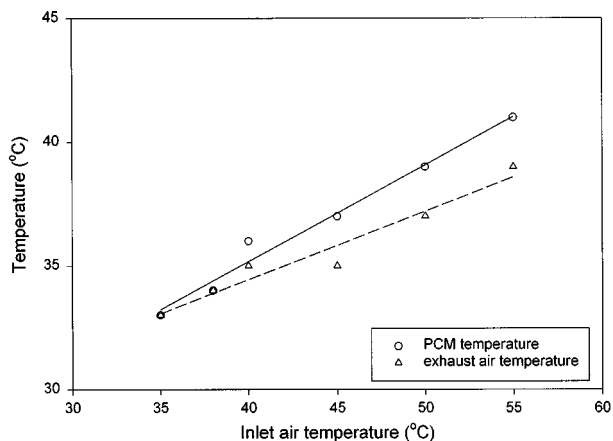


Fig. 6. Temperature profile in the coater.

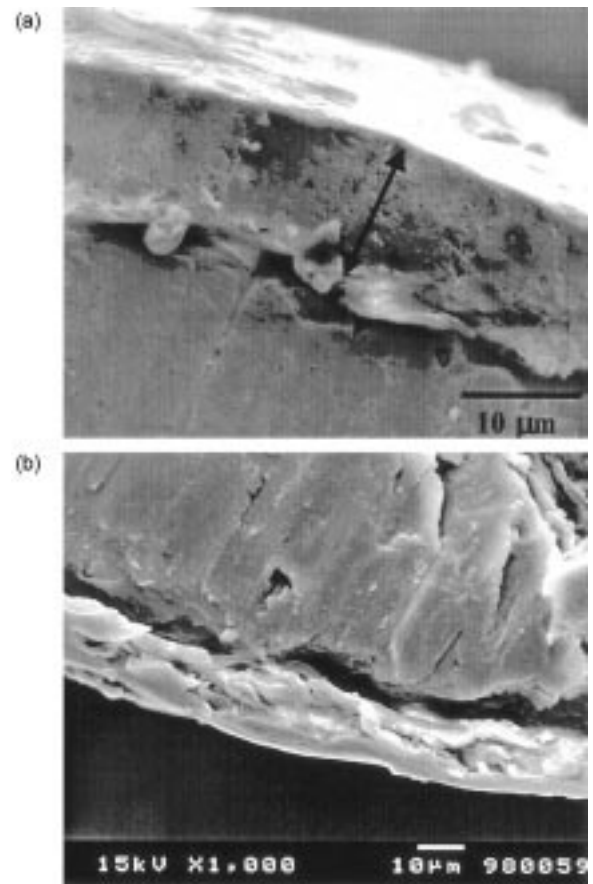


Fig. 7. SEM image of the stearic acid core coated with PU at the coater temperatures of 45°C(a) and 50°C(b).

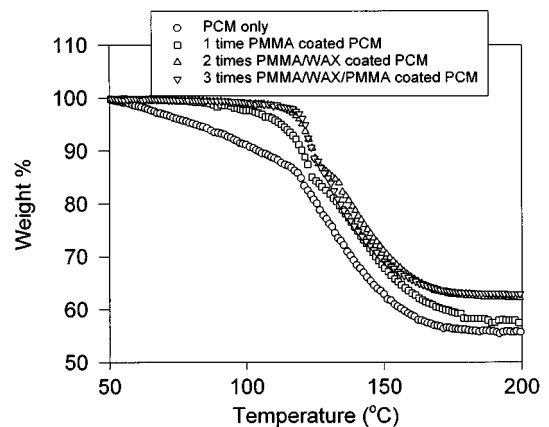


Fig. 8. TG analysis of PCM(SAT).

4-3. PCM 캡슐의 물성 측정

4-3-1. TG 및 SEM

Fig. 8은 SAT의 코팅전과 다중코팅에 따른 TG 측정결과를 나타낸다. 그 결과 코팅전에는 50°C부터 결정수 이탈 현상이 나타나고 1차 PMMA 코팅 후는 80°C, 2차 wax코팅 후와 3차 PMMA 코팅 후에는 120°C 이상까지 안정성을 보이고 있으나, wax층의 고경화 및 캡슐 외부의 기계적 강도를 위하여 3차 PMMA코팅이 필요하다. Fig. 9는 PMMA+wax+PMMA로 3층 코팅된 SAT의 단면을 SEM 사진으로 나타내었다. Fig. 7(a)는 PU로 코팅된 SA의 단면을 SEM 사진으로 분석한 사진으로 코팅층의 두께가 10-20 μm로 균일한 코팅층을 형성하고 있음을 관측하였

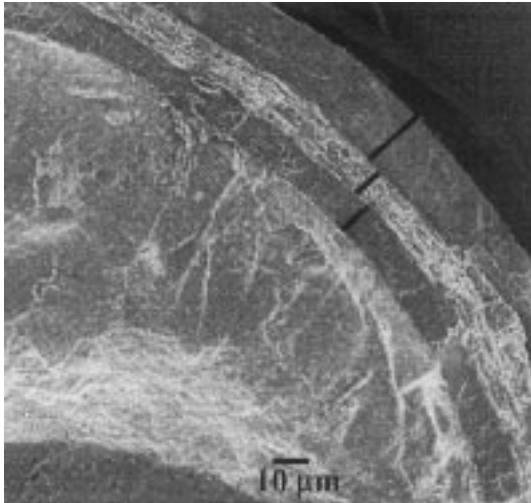


Fig. 9. SEM image of the tertiary coated PCM with PMMA/WAX/PMMA (SAT).

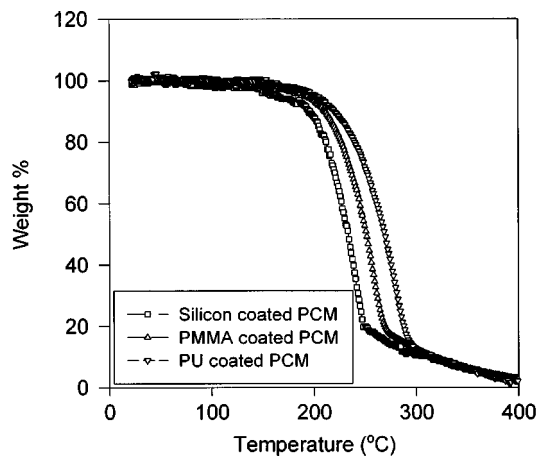


Fig. 10. TG analysis of PCM(SA).

다. 한편 Fig. 10은 같은 두께로 3가지 다른 종류의 고분자로 SA를 코팅한 후 TG를 측정한 결과 PU>PMMA>silicon 순으로 코팅된 층의 내열성 및 상전으로 인한 PCM의 부피팽창에 대한 코팅층의 안정성이 강한 것으로 나타났고 Fig. 7(a) 및 Fig. 11의 SEM 분석결과도 silicon 보다 PU이 상대적으로 더 치밀한 형태를 형성하고 있음이 확인되었다.

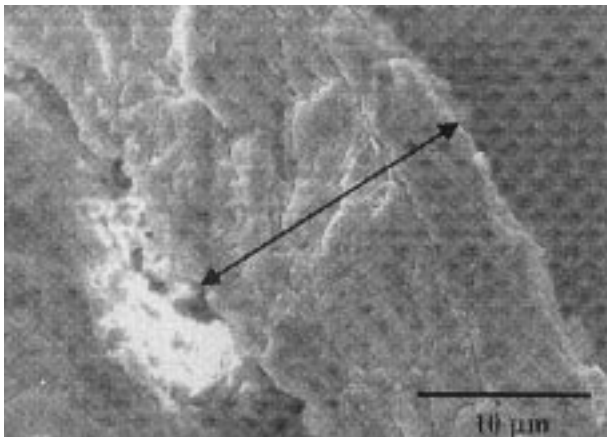


Fig. 11. SEM image of the silicon coated PCM(SA).

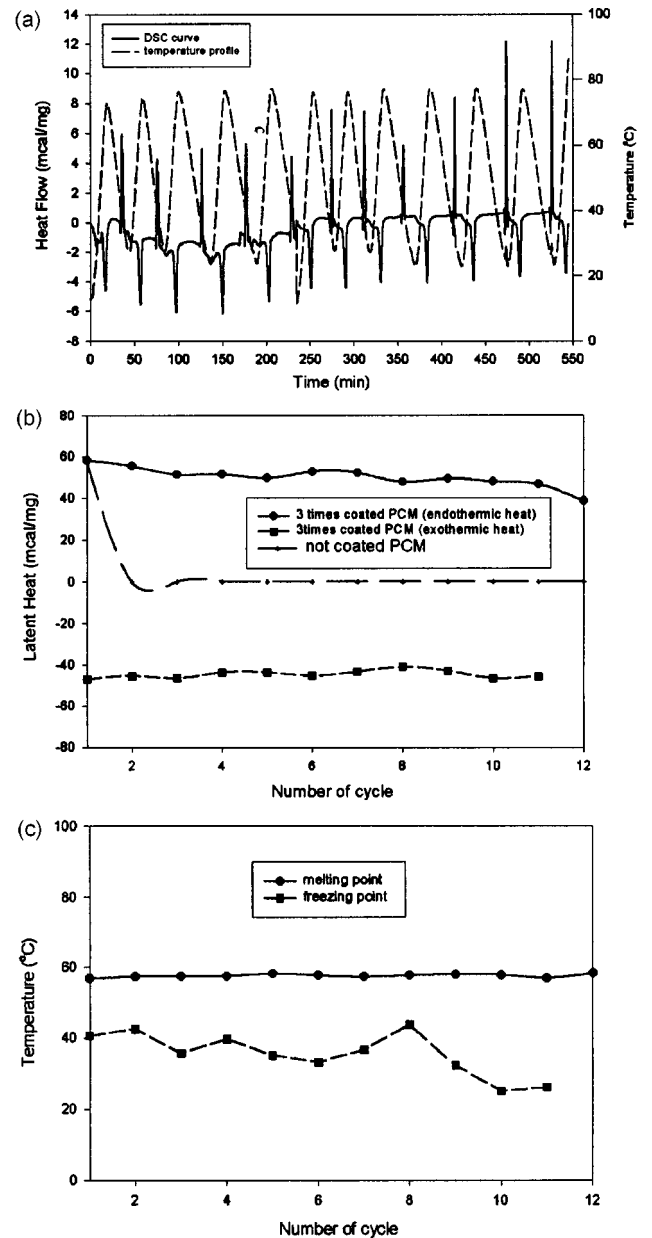


Fig. 12. DSC analysis of the tertiary coated PCM with PMMA/WAX/PMMA(SAT).

(a) Heat flow profile of endothermic-exothermic heat peak, (b) Latent heat profile of PCM and (c) Melting and freezing point of PCM.

이는 동일 두께의 코팅층을 형성하였다하더라도 코팅물질의 종류에 따라 다른 경향을 보이는데, 본 코팅실험 조건에서 사용된 PU가 다른 코팅 물질 보다 PCM의 부피팽창에 대한 안정성이 높고 film 형성이 우수하다는 것이 TG와 SEM을 통하여 확인되었다.

4-3-2. DSC

Fig. 12(b) 및 Fig. 13에서 보듯 DSC를 이용한 SAT의 3차코팅, SA의 PU 단일코팅 전과 후의 잠열량 변화는 각각 60.8 cal/g과 38 cal/g에서 58.15 cal/g과 37.44 cal/g으로 줄었는데, 이는 코팅된 층의 중량이 DSC에 투입한 PCM 무게에 포함되어 있으므로 전체 무게당 잠열량이 줄어 들었기 때문이다. 용융-동결 사이클 테스트를 정량적으로 분석한 결과 코팅전 SAT의 경우 Fig. 12(b)에서 보는 바와 같이 코팅전은 첫

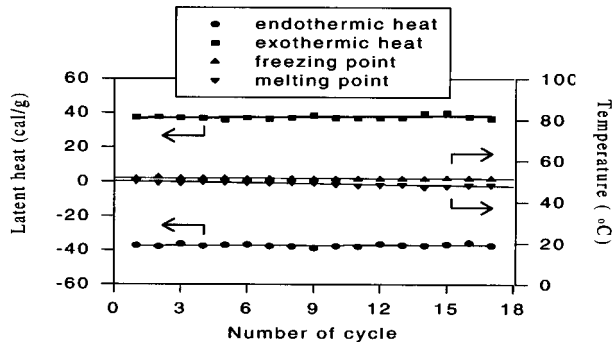


Fig. 13. Melting point, freezing point and latent heat of PCM by cycle test(SA).

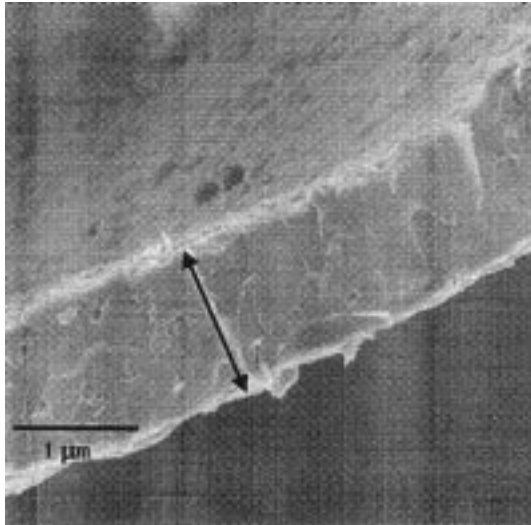


Fig. 14. SEM image of PCM(SA) after 20 cycles of the melting and freezing.

번째 사이클에서 용융열이 60.8 cal/g으로 문헌상의 63 cal/g과 유사한 잠열량의 흡열피크를 나타내고 있으나 두 번째 사이클 이후는 잠열피크가 나타나지 않았다. 또한 3차 코팅한 SAT는 사이클이 진행되면서 50-60 cal/g의 일정한 잠열량을 보이고 있고 Fig. 12(c)에서 보듯 55°C 부근에서 일정한 용융점을 갖고 45°C 부근의 동결점은 변화가 심한 것으로 나타나 조핵제의 역할이 불충분한 것으로 사료된다. Fig. 12(a)에서는 일정한 사이클의 흡열-발열피크가 나타나나 과냉각이 10°C 이상 나타나는 것이 확인되었다. 조핵제의 첨가에도 불구하고 반복적인 용융-동결 사이클이 진행되면서 과냉각 현상이 점차 나타났는데 이러한 과냉온도가 증가함에 따라 열역학적 추진력(driving force)인 ΔG (differential Gibbs Free Energy)가 계속 증가하여 결정핵 형성과 성장에 필요한 활성화 에너지를 극복할 수 있다면 T_m (melting temp.)보다 낮은 T_s (solidification temp.)에서 결정이 성장하나 ΔG 의 변화가 아무리 큰 과냉온도에 대하여도 활성화 에너지를 능가하지 못하면 계속 과냉되어 유리상태로 되므로 용융잠열의 활용이 불가능하게 된다. 결국 코팅된 PCM은 용융-동결시 결정수 누출이 방지되므로 안정적인 상변화를 하는 것으로 사료된다. SA의 경우 Fig. 13과 같이 사이클 진행시 잠열량이 매 사이클마다 약 35 cal/g으로 거의 동일한 경향을 보이며 용융점도 약 50°C에서 거의 일정하게 나타나고 Fig. 14의 SEM 사진에서와 같이 사이클 테스트 후에도 코팅층이 안정되어 있는 것을 확인하였으므로 캡슐내에서 매우 안정적인 상변화를 하는 것으로 판단된다.

5. 결 론

- (1) 이중노즐에서 공기와 PCM유속이 각각 4 l/min과 1.8 ml/min일 때 SAT의 경우 지름이 1 mm인 구형의 core가 제조되었고, SA가 SAT보다 더 이상적인 구형모양이 형성됨을 확인하였다.
- (2) 유기용매에 polymer resin 10 wt%를 첨가하여 코팅을 수행하였을 때 10-20 μm의 코팅두께를 얻었다.
- (3) 코팅재로 사용한 polymer들 중 내열성 및 PCM부피팽창에 대한 안정성은 PU>PMMA>silicon 순으로 나타났다.
- (4) 3차 코팅한 SAT는 사이클이 진행되면서 50-60 cal/g의 일정한 잠열량과 55°C 부근에서 일정한 용융점을 갖고 45°C 부근의 동결점의 변화가 심하게 나타나나 과냉각이 10°C 정도로 나타나는 것이 확인되었다. SA를 PU으로 코팅한 경우 잠열량은 사이클 진행에 따라 약 35 cal/g으로 거의 동일한 경향을 보이며 용융점도 약 50°C에서 거의 일정하게 나타나고 사이클 테스트 후에도 코팅층이 안정되어 있는 것으로부터 캡슐내에서 매우 안정적인 상변화를 하는 것으로 판단된다.

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.: *Sol. 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 Energy Materials and Solar Cells*, **27**, 135(1992).
6. Saitoh and Hirose: *Chem. Eng. Commun.*, **41**, 39(1986).
7. Japan Capsule Products, JP 63217196(1988).
8. Abhat, A.: *Solar Energy*, **30**(4), 313(1983).
9. Lane, G.A.: "Solar Heat Storage: Latent Heat Materials," CRC Press, Boca Raton, 1(1983).
10. Hiroshi, K. and Junjiro, K.: *Solar Energy*, **35**(6), 527(1985).
11. Kim, S. D. and Kim, J. D.: *Energy R&D*, **6**(2), 100(1984).
12. Sundberg, D. C.: *J of Applied Polymer Science*, **41**, 1425(1990).
13. Mangold, D. J.: "A Capability Statement for Microencapsulation," Southwest Research Institute, San Antonio, Texas, U.S.A.(1974).
14. Sohn, Y. T.: "Solid Drug Dosage Forms & Microencapsulation," Symposium 91, KIST(1991).
15. Ings, J. B. and Brown, P. W.: Factors Affecting the Service Lives of Phase Change Systems, National Bureau of Standards Report #NBSIR 81-2422(1982).
16. Kimura, H.: *Ind. Eng. Fund.*, **19**, 251(1980).
17. Schroder, J. and Gawron, K.: *Energy Research*, **5**, 103(1981).
18. Marks, S.: *Solar Energy*, **25**, 255(1980).
19. Stunic, Z.: *Solar Energy*, **33**(6), 593(1984).
20. Neine, D. and Abhat, A.: "Investigation of Physical and Chemical Properties of Phase Change Material for Space Heating/Cooling Applications," 500(1985).
21. Wada, T., Yamamoto, K. and Matsuo, Y.: *Solar Energy*, **33**, 373(1984).
22. Ulman, A. and Balentin, B.: *Solar Energy Material*, **7**, 177(1983).
23. Saitoh, T. S. and Moon, J. N.: ENERGEX'93-The 5th International Energy Conference 18-22 October, Seoul, Korea(1993).
24. Barrio, M., Font, J., Lopez, D. O., Muntasell, J. and Tamarit, J. L.: *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **27**, 127(1992).
25. Gong, Z. H. and Mujumdar, A. S.: *Int. Heat Mass Transfer*, **39**(4),

- 725(1996).
26. Kim, J. K., Jung, K. T., Shul, Y. K., Kim, D. H. and Lee, T. K.: *Solar Energy*, **17**(2), 67(1997).
27. Kim, J. K., Yoon, W. S., Jung, K. T., Shul, Y. K., Joo, H. K., Jeon, M. S. and Lee, T. K.: *HWAHAK KONGHAK*, **37**, 151(1999).