KOREAN JOURNAL OF PACKAGING SCIENCE & TECHNOLOGY
Vol. 31, No. 1 37~42 (2025)
https://doi.org/10.20909/kopast.2025.31.1.37

재생 종이펄프를 이용한 물의 상변화 지속시간 증가에 관한 연구

박주영[1] · 박기태[1] · 서종철[1]* · 최석[2] · 이창형[2]

[1]연세대학교 패키징 및 물류학과
[2]Thermolab Korea

Study on Increasing Phase Change Duration of Water Using recycled Paper Pulp

Jooyoung Park[1], Kitae Park[1], Jongchul Seo[1]*, Seok Choi[2], and Changhyeong Lee[2]

[1]Department of Packaging & Logistics, Yonsei University, 1 Yonseidae-gil, Wonju, Gangwon-do, 26493, South Korea
[2] Thermolab Korea, Dongtansunhwan-daero, Hwaseong, Gyeonggi-do, 18471, South Korea

Abstract Conventional phase change materials (PCMs) are typically composed of pure water combined with super-absorbent polymers (SAPs), raising concerns regarding environmental sustainability, complex synthesis processes, and high material costs. In this study, we propose a pulp-water composite as an eco-friendly and cost-effective alternative to traditional PCMs. Recycled paper pulp (1-5 wt%) was incorporated into water-based PCMs to investigate its effects on thermal retention and phase transition behavior. The use of pulp offers advantages over SAP-based PCMs, including simpler synthesis, lower production costs, and easier material availability. Thermal and chemical properties were analyzed using differential scanning calorimetry (DSC), Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR), and data loggers. The results indicate that a 3 wt% pulp-water mixture extends temperature retention by 70 minutes compared to pure water. These findings suggest that pulp-enhanced water-based PCMs can serve as a sustainable, biodegradable, and economically viable alternative to conventional SAP-based PCMs, providing improved thermal performance while minimizing environmental impact.

Keywords: Thermal energy storage, Phase change materials, Recycled paper pulp, Cold chain system, Eco friendly

서 론

최근 기후 변화 및 에너지 절감에 대한 관심이 증대됨에 따라, 지속 가능한 자원 사용과 에너지 효율 증대 방안이 중요시되고 있다. 그 중에서도 상변화 물질(Phase change material, PCM)은 에너지 저장 시스템의 열 저장 및 방출 과정에서의 높은 잠열 특성으로 인해 주목받고 있다. 특히, 0°C 부근에서의 냉열 저장을 위한 PCM은 냉장, 냉동 시스템 등 다양한 분야에서 폭넓게 활용되고 있다. 현재 0°C의 상변화온도를 가지는 PCM으로 주로 순수 물, 고흡수성 수지(Super absorbent polymer, SAP)를 포함하는 물 등이 주로 사용되고 있다. 이러한 PCM은 높은 잠열을 가지고 있으며, 비교적 쉽게 구할 수 있다는 장점이 있다. 그러나, SAP의 경우 재사용성, 난분해 등으로 인해 문제점이 제기되고 있다. 현재 사용되고 있는 0°C 유지 PCM으로 사용되는 주요 물질의 특징은 다음과 같다.

첫번째, 물은 가장 널리 사용되는 PCM으로, 0°C에서 상변화 하며, 약 300 J/g의 높은 잠열을 가지고 있다. 물은 친환경적이며 쉽게 구할 수 있어 냉열 저장에 매우 유리하지만, 상변화 시 부피의 변화가 커서 장기 사용 시 용기의 내구성 문제가 발생할 수 있다.

두번째, SAP는 물을 흡수하여 하이드로겔화 하는 특성을 가지며, 이로 인해 PCM으로 사용될 때 부피 변화 문제를 해소할 수 있다. SAP 기반 PCM은 약 200-250 J/g의 잠열을 가지며, 장기간 사용 시에도 높은 안정성을 유지할 수 있는 장점이 있다. 그러나, SAP는 합성 고분자 물질로, 제조와 폐기 과정에서의 탄소 배출 및 난분해로 인해 환경

*Corresponding Author: Jongchul Seo, Ph.D.
Yonsei University, Department of Packaging & Logistics, 1 Yonseidae-gil, Gangwon-do 26493, South Korea
Tel: +82-33-760-2697, Fax: +82-33-760-2954
E-mail:jcseo@yonsei.ac.kr

오염을 유발하는 문제점을 가지고 있다.[1] 이로 인해 SAP를 대체하며 보다 지속 가능하고, 환경 친화적인 PCM 소재의 필요성이 대두되고 있다.[2-4]

이에 따라 재활용 종이펄프의 활용 가능성에 대한 연구를 진행하였다. 재활용 종이펄프는 저비용의 친환경 소재로, 물 등의 PCM과 상호작용하여 상변화 과정에서의 열 저장 성능을 향상시킬 수 있다.[5,6] 본 연구에서는 재생 종이펄프를 사용하여 물 기반의 PCM의 상변화 지속시간을 증가시키는 방안을 모색하고자 한다. 이는 기존 PCM과 비교했을 때, 자원의 효율적인 재활용 및 폐기물 감소를 통한 환경적 이점을 제공할 수 있을 뿐만 아니라, PCM의 열적 특성을 개선함으로써 효율적인 냉열 저장이 가능하도록 하는 데 기여할 수 있다. 따라서 본 연구는 재생 종이펄프를 활용한 PCM의 열적 특성과 상변화 지속시간을 분석하고, 기존의 0°C PCM과 비교하여 차별점을 도출하는 것을 목적으로 한다. 이러한 접근은 지속 가능한 소재 활용을 통한 PCM 성능 향상에 대한 새로운 가능성을 제시하며, 다양한 응용 분야에서의 활용성을 높이는 데 기여할 것으로 기대된다.

재료 및 방법

1. 실험재료

본 연구에서 사용된 재생 종이펄프는 Thermolab Korea (Hwaseong, South Korea)에서 제공받았으며, 물은 증류수를 사용하였다. 제공받은 재생 종이펄프는 폐박스를 사용하여 물을 첨가해 초지기에 1시간동안 분쇄한 후, 100 °C 오븐에서 2시간 동안 건조시켜 펄프 형태로 제조하였으며, 제조된 재생 종이펄프는 Fig. 1에 나타내었다.

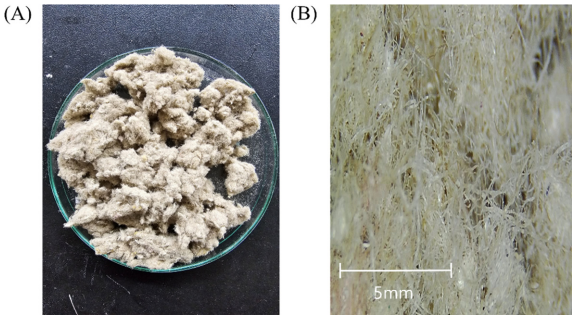

Fig. 1. (A) Recycled paper pulp and (B) microscopically magnified recycled paper pulp.

2. 물-재생 종이펄프 혼합물 제조

정밀 전자 저울 (AL204, Mettler Toledo, USA)을 사용하여 1~5 wt% 재생 종이펄프를 증류수에 넣어 혼합액 100 g을 제조하였다. 물-재생 종이펄프의 균일한 혼합을 위해 시료가 들어 있는 비커를 자기 교반기를 이용하여 상온에서 2시간 동안 교반 하였다. 본 실험에서 제조한 물-재생 종이펄프 혼합물의 조성과 혼합액 외관은 Table 1에 나타내었다. 본 연구에서는 물의 질량 대비 재생 종이펄프의 질량을 1~5 wt%로 설정하여 연구를 진행하였으며, 샘플명은 재생 종이펄프 질량에 따라 각각 S1~S5로 명명하였다. S1과 S2에서, 교반 첫날의 샘플과 비교하였을 때, 3일 후의 샘플은 재생 종이펄프가 침전되어 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 펄프의 분산효과를 하락시켜 물성의 변화가 나타날 것으로 판단된다. S3~S5의 경우 물 대비 펄프의 양이 많아 침전이 이루어지지 않는 것으로 확인되었다.

3. 특성분석

제조된 물-재생 종이펄프 혼합물의 화학적 결합 또는 상호작용 특성은 푸리에변환 적외선분광법 (FT-IR, PerkinElmer, Waltham, MA, USA)을 사용하여 측정하였다. 4000-400 cm^{-1}에서 Attenuated total reflection(ATR) 방식으로 측정하였으며, 이때 FT-IR은 4 cm^{-1}로 분해되어 32 scan으로 기록하였다. 물-재생 종이펄프 혼합물의 열적 특성은 혼합물의 녹는점, 용융 엔탈피, 재사용성 및 녹는점 유지 시간을 측정하였다. 혼합물의 녹는점 및 용융 엔탈피는 시차주사 열량계 (DSC, TA Instrument Q10, New Castle, USA)를 이용하여 측정하였다. 측정 온도 범위는 −50에서 50°C, 승온속도 10°C/min 로 질소분위기 하에서 진행하였다. 혼합

Table 1. Solution stability of water-pulp mixtures with different composition of 1-5 wt%

Sample	S1	S2	S3	S4	S5
First day					
After 3 days					

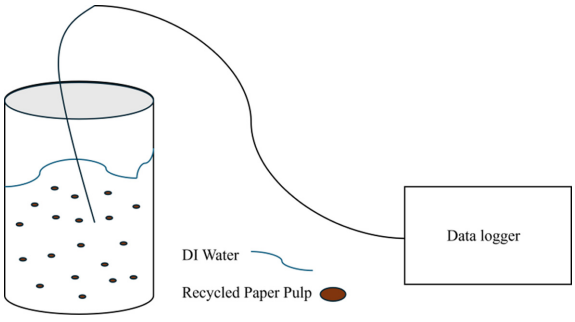

Fig. 2. Temperature measurement using a Data logger.

물의 재사용성은 1~100회까지 반복 3회 측정하였다. 측정 온도 범위는 −50에서 50°C, 승온속도 10°C/min로 질소분위기 하에서 측정하여 결정되었다. 제조된 혼합물의 온도 지속시간을 나타내는 온도-시간 그래프는 온도계(Data logger, 176T4, Testo, Japan)를 사용하였으며, 24시간 냉각 후 외부 온도를 25°C로 유지하며 혼합물을 융해시켜 온도 지속시간을 측정하였고 이는 Fig. 2에 나타내었다.

결과 및 고찰

물-재생 종이펄프를 혼합하여 PCM을 제조할 때 펄프의 비율은 매우 중요한 요소이다. 펄프는 셀룰로오스가 주성분으로 이루어져 있어, 셀룰로오스가 가지고 있는 하이드록실 그룹(-OH)이 물과 상호작용하여 수소 결합을 형성한다. 이러한 상호작용은 PCM의 상변화 특성을 조절하며, 에너지 저장 및 방출 과정을 느리게 만들어 온도 지속 시간을 늘리게 된다.[7] 하지만 펄프의 비율이 적절하지 않을 경우, 물과의 수소 결합이 균일하게 이루어지지 않아 열 저장 및 방출 성능이 저하될 수 있다. 펄프의 비율이 너무 낮으면, 물의 결정화에 미치는 펄프의 역할이 충분하지 않아 PCM의 전체적인 성능 향상을 기대하기 어렵다. 반면, 펄프의 비율이 너무 높으면 물의 잠열 기여도가 감소하여 전체 PCM의 잠열이 낮아질 수 있다. 따라서, 적절한 펄프 비율을 설정함으로써 물의 높은 잠열 특성과 펄프로 인한 물의 결정화도를 최적화하여 PCM의 성능을 극대화하는 것이 중요하다. 물과 펄프 간의 비율을 맞추는 것은 PCM의 장기적인 안정성과 재사용성을 확보하는 데 중요한 역할을 한다.

물-재생 종이펄프 혼합물에서의 분자 간 상호작용을 조사하기 위해 FT-IR 분석을 진행하였으며, 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 물은 O-H bond (3300 cm^{-1}), H-O-H bond (1600 cm^{-1}), 재생 종이펄프는 O-H bond (3300 cm^{-1}), C=O bond (1730 cm^{-1}), C-O-C 및 C-O bond(1100 cm^{-1}) 피크가 확인되었다. 물-재생 종이펄프에서는 물과 재생 종이펄프에서 기인한 O-H bond (3300 cm^{-1}), C=O bond, H-O-H bond (1600-1730 cm^{-1}), C-O-C 및 C-O bond(1100 cm^{-1}) 피크가 확인되었다.

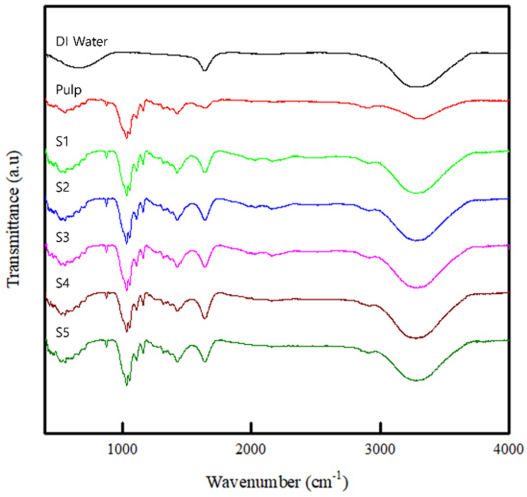

Fig. 3. FT-IR spectra of water-pulp mixtures.

S3에서 셀룰로오스와 결합 되지 않은 물과 결합된 물의 비율은 균형을 이루며, 이는 펄프의 셀룰로오스와 물 분자 간의 상호작용을 최적화하는 데 기여한다. 결합된 물은 펄프 표면에 고정되어 강한 수소 결합을 형성하며, O-H 피크의 강도를 증가시킨다.[8] 동시에, 결합되지 않은 물은 펄프 주변에서 높은 이동성을 가지며 O-H 피크의 분포를 넓히는 데 기여한다. 이러한 균형 상태는 3300 cm^{-1} 대역에서 강하면서도 넓은 피크를 형성하는 주요 원인으로 판단된다.[9-11] 펄프의 혼합 비율에 따른 피크의 변화는 크게 관찰 되지 않는데, 이는 물과 혼합 된 펄프 비율에 따른 혼합물의 화학적 구조 변화가 이루어지지 않아 나타나는 현상으로 보여진다.

물-재생 종이펄프 혼합물의 비율에 따른 용융온도와 잠열값을 구하기 위해 DSC분석을 실시하였으며, 그 결과를 Fig. 4와 Table 2에 나타내었다. 모든 샘플에서 0°C 근처에서 열 흡수 피크가 관찰되며, 이는 물의 융해와 관련된 상변화를 나타낸다. 펄프의 농도가 증가함에 따라 열 흡수 피크의 크기가 변하는 것을 확인할 수 있다. S3에서는 다른 샘플에 비해 피크가 넓게 퍼지는 현상을 확인할 수 있다. 이는 펄프의 존재가 물의 상변화 과정에 영향을 미치며, 특히 펄프가 물의 결정화 과정에 물리적 방해를 일으켜 상변화 온도와 잠열에 영향을 줄 수 있음을 시사한다.[12]

셀룰로오스는 본질적으로 결정성과 비결정성 영역을 모두 가지는 구조이지만 물을 첨가하였을 때, 셀룰로오스 내부의 비결정성 영역에서 더 많은 상호작용이 발생하게 된다. 이는 셀룰로오스가 결정성 영역에서 -OH기의 강한 결합을 가지고 있기 때문에 셀룰로오스 분자들이 불규칙하게 배열되어 있는 비결정성 영역보다 셀룰로오스와 물 분자의 상호작용이 이루어 지지 않기 때문이다. 따라서 전체적인

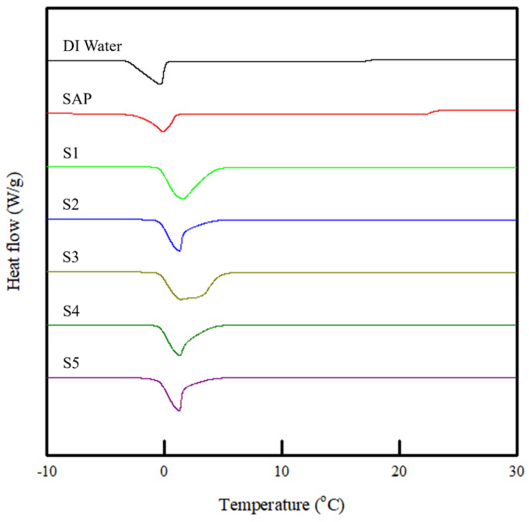

Fig. 4. DSC of water-pulp mixtures.

구조에서 비결정성 영역의 비율이 상대적으로 증가하게 된다. 이는 물 분자가 주로 셀룰로오스의 비결정성 영역에서 상호작용하여 비결정성 영역의 비율이 증가하는 현상이다. 비결정성 영역에서는 수소 결합이 형성되지만, 이 영역은 결정성 영역에 비해 열 안정성과 에너지 저장 능력이 낮아 잠열 감소로 이어진다.[13-14] 이는 셀룰로오스로 이루어진 펄프의 비율이 많아질 수록 물-재생 종이펄프 PCM의 성능이 떨어짐을 의미한다.

펄프가 물 내에 분산됨에 따라, 큰 결정보다 작은 결정의 형성이 증가한다. 펄프 섬유는 물 속에서 이물질로 작용하여 결정화 과정을 방해하고, 이는 물 분자의 이동성을 제한하여 작은 결정의 형성을 촉진한다.[15] 물의 양이 동일하다면, 혼합물이 가지는 잠열의 총량은 같지만, 펄프가 혼합될 경우 얼음 결정의 크기가 작아지고 결정화가 불균일하게 진행되어 상변화가 한 번에 일어나지 않고, 점진적으로 진행될 가능성이 증가한다. 이는 열 전달 성능에 일부 긍정적인 영향을 미칠 수 있으나, 펄프의 총량이 증가하면서 물 분자 일부가 펄프 섬유 사이에 갇혀 고체 상태의 PCM을 형성하지 못하고, 상변화에 영향을 끼치지 못할 가능성이 있다. 따라서 물의 부피 농도가 저하됨에 따라 전체적인 잠열 용량은 감소하는 경향을 보인다. 따라서 펄프의 농도를 조절하여 물의 잠열 기여도와 열 전달 성능 간의 균형을 최적화하는 것이 PCM 설계에 중요하다.

본 연구는 PCM 시스템에서 펄프 함량 최적화의 중요성을 강조한다. S3가 가장 높은 잠열 용량을 나타내는 최적의 비율로 확인되었으며, 이는 물 내 펄프의 분산이 가장 효과적으로 이루어졌기 때문이다. 이 결과는 PCM 설계에서 물-재생 종이펄프 비율을 신중하게 고려해야 함을 시사한다. S3에서 열전이 피크가 넓어진 현상은 농도 특이적 상호작용, 그리고 물 분자와의 복합적 상호작용에 기인한 것으로 분석된다. 농도 특이적 상호작용으로 인해 셀룰로오스 섬유와 물 간의 수소 결합이 강화되며, 열전이가 단계별로 발생하여 넓은 피크를 형성하는 것으로 판단된다. 또한, 물 분자의 결합 및 분포가 셀룰로오스와 물리적으로 결합된 물과 결합되지 않은 물 사이의 균형을 이루면서 복합적 상호작용을 하며, 이는 피크의 넓어짐 현상을 더욱 촉진하는 것으로 사료된다.[16-17]

기존 0°C PCM과 비교 평가를 위해 물(DI Water), 물-SAP(SAP), 물-재생 종이펄프 혼합물(S1~S5)의 온도 지속시간을 측정하였다. 물질은 24시간 동결 후, 해동하며 온도 지속 시간을 측정하였으며, 그 결과를 Fig. 5와 Table 3에 나타내었다. DI Water의 경우 약 225분의 온도 지속시간을 보였고, SAP의 경우 물보다 약 30분이 길어진 온도 지속시간을 보였다. 물-재생 종이펄프의 S3이 약 306분으로 가

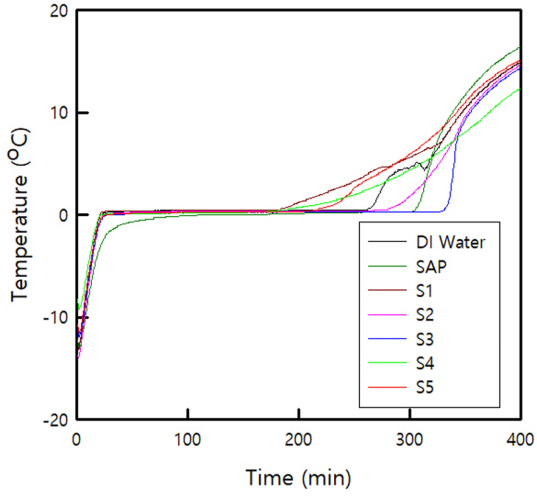

Fig. 5. Temperature-time curves for water, SAP and water-pulp mixtures.

Table 2. Latent heat depends on the concentration of recycled paper pulp in water-pulp mixtures

Sample	DI Water	SAP	S1	S2	S3	S4	S5
$\triangle H_m$ (J/g)	291.9±1.25	256.3±1.06	321.2±1.4	293.0±1.46	327.6±0.95	302.8±1.32	313.4±1.42
T_m (°C)	0	1.04	1.3	1.03	1.17	1.07	1.07

Table 3. Temperature-time for water, SAP and water-pulp mixtures.

Sample	DI Water	SAP	S1	S2	S3	S4	S5
Time (min)	224.9±2.3	258.8±2.4	155.4±2.5	255.5±2.5	305.9±2.9	162.9±2.6	187.7±2.6

장 긴 온도 지속시간을 보였다. 이는 DSC 결과와 비교해 봤을 때, S3이 높은 잠열을 가지게 되어 온도 지속시간이 늘어난 것으로 사료된다.

하지만 3% 펄프를 함유한 물 보다, 낮거나 높은 펄프의 비율을 가진 물은 온도 지속시간이 줄어들었는데, 이는 물과 펄프 혼합 시 펄프는 물의 결정화 속도를 늦추어 PCM으로써의 온도지속시간을 늘릴 수 있게 하지만 펄프의 비율이 낮을 경우, 결정화 속도를 늦추는 현상이 충분히 형성되지 않아 PCM의 상변화 과정에서 온도지속시간 증가의 성능이 저하되기 때문이다. 또한, 펄프의 비율이 높을 경우, 잠열에 기여하는 물의 부피가 줄어드므로 상변화에 기여할 수 있는 열용량이 줄어들게 된다. [18] 이는 결과적으로 PCM의 잠열 감소를 초래하며, 상변화 과정에서 저장할 수 있는 에너지가 줄어드는 결과를 낳게 된다. 물은 높은 잠열을 가지므로 상변화 시 에너지 저장에 중요한 역할을 하지만, 펄프의 비율이 높아지면 물의 기여도가 감소하게 되어 PCM의 총열 저장 용량이 저하하는 것으로 사료된다.[19]

재사용 테스트를 위해 DSC 분석을 진행하였으며, 그 결과를 Fig. 6과 Table 4에 나타내었다. 녹는점은 0ºC 보다 높게 나타났는데, 이는 시료의 농도, 혼합 균질성, 열 용량의 차이 등이 물의 상변화 온도에 영향을 미친 것으로 판단된다. 물-재생 종이펄프 혼합물이 완전히 균질하지 않을 경우, 일부 물 분자는 상변화를 일으키지 못할 수 있다.[20]

첫 번째 사이클과 50번째 사이클, 100번째 사이클의 DSC 그래프를 비교했을 때, 재사용 횟수가 증가하면서 열용량이 미세하게 감소하는 것이 확인되었다. 이러한 열용량의 감소는 재사용 횟수가 증가하며 펄프의 물에 대한 분산이 줄어드는 것이 원인인 것으로 판단된다.[21] 하지만 PCM으로 사용됨에 있어서 큰 차이를 보이지 않는다.[22] 이는 펄프와 물로 이루어진 PCM이 반복적인 상변화 과정에서도

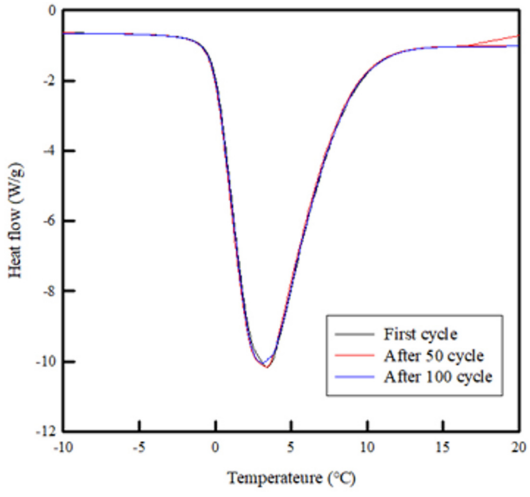

Fig. 6. Thermal cycling test of water-pulp mixtures.

Table 4. The latent heat of water-pulp mixtures during thermal cycling

Cycle	1	50	100
$\triangle H_m$ (J/g)	327.6	326.6	325.8

안정적인 열 저장 및 방출 성능을 유지하고 있음을 의미한다. 즉, PCM이 여러 번의 재사용 과정에서도 초기의 잠열 특성을 유지하고 있음을 보여준다. 이러한 결과는 물-재사용 종이펄프 혼합물 PCM이 높은 재사용성을 가지며, 열적 안정성이 우수하다는 것을 의미한다. 물과 재사용 종이펄프를 혼합한 PCM이 자연 친화적이고, 재사용성에서 현재 사용되고 있는 PCM보다 효과적으로 사용될 수 있음을 보여준다. 하지만 Fig. 4와 Fig. 6의 S3 데이터에서 상이한 그래프의 모습을 보였는데, 이는 DSC 데이터 측정 시, 단일 사이클과 연속적인 사이클 차이에 따른 변화와, 동일한 시기에 샘플측정이 이루어지지 않아 펄프의 분산 효과가 상대적으로 낮아져 열적 특성의 변화가 나타난 것으로 판단된다. 이에 따라 같은 조건에서 추가 연구가 필요할 것으로 보인다.[20]

요 약

본 연구에서는 물과 재생 종이펄프를 혼합하여 PCM을 제조하고, FT-IR, DSC, Data logger, 재사용 테스트를 통해 물질의 열적 특성과 재사용성을 분석하였다. 이 연구는 물-재생 종이펄프의 혼합물을 통해 상변화 지속시간을 증가시키는 방안을 모색하며, PCM의 환경적 이점과 열적 성능을 개선하는 것을 목표로 하였다. FT-IR분석을 통해 물-재생 종이펄프 혼합물에서의 주요 작용기 진동을 확인하였다. 다양한 농도의 펄프 혼합물에 대한 FT-IR 스펙트럼에서, 물-재생 종이펄프 간의 명확한 화학적 상호작용이 관찰되지 않았다. 이는 물과 재생 종이펄프가 단순히 물리적으로 혼합된 상태로 존재하며, 화학적 결합 없이 물리적 혼합만 이루어졌음을 시사한다. DSC 분석에서는 물-재생 종이펄프의 상변화 특성을 평가하였다. 모든 샘플에서 약 0 ºC 근처에서 열 흡수 피크가 확인되었으며, 이는 물의 융해와 관련된 상변화를 나타낸다. 일정 비율의 펄프가 물 분자의 이동을 방해하여 상변화 온도에서 잠열값이 높아지고 지속시간이 길어지는 특성이 확인되었다. Data logger를 사용하여 PCM의 열적 특성을 측정하였는데, 펄프를 혼합한 PCM은 상변화 과정에서 보다 오랜 시간 동안 일정한 온도를 유지할 수 있음을 보여주었다. 이는 물과 펄프의 수소결합을 통해 열을 저장하고 서서히 방출하는 역할을 하여, PCM의 상변화 지속 시간을 증가시키는 데 기여함을 의미한다. 이러한 특성은 냉열 저장 시스템에서 온도 변동을 최소화하고, 효율적인 에너지 관리를 가능하게 한다. 마지막

으로 물-재생 종이펄프 PCM의 재사용성을 평가하기 위해 100회 반복하여 열적 특성을 분석하였다. 잠열값과 온도지속시간이 가장 우수했던 S3을 이용해 평가하였으며, DSC 결과에서 첫 번째 사이클과 100번째 사이클의 열 흐름 곡선이 유사하게 나타났다. 이는 물-재생 종이펄프 PCM이 높은 재사용성을 가지고 있음을 시사한다. 이는 PCM의 열적 안정성이 우수하다는 것을 의미하며, 재사용이 가능하여 환경적 이점을 제공할 수 있다. 본 연구에서 개발한 PCM은 현재 사용되고 있는 폴리머 기반의 PCM을 대체할 수 있을 것으로 판단되지만, 이를 위해 펄프 생산의 표준화, 펄프 처리 공정의 최적화 등의 추가 연구가 필요할 것으로 보인다.

감사의 글

이 논문은 2023년 정부 (과학기술통신부)의 재원으로 한국연구재단(RS202300208596), 2021년 정부 (국토교통부)의 재원으로 국토교통과학기술진흥원(RS2021KA163041)의 지원을 받아 수행된 기초연구 사업 연구임.

참고문헌

1. Arunraj, A., Ariharasudhan, R., Ramesh Babus, V., Sundaresan, S. 2024. Environmental impact of superabsorbent polymers - a comprehensive review. Man-Made Fibers International. 74(1): 24-26.
2. Zhang, X., Shi, Q., Luo, L., Fan, Y., Wang, Q., Jia, G. 2021. Research progress on the phase change materials for cold thermal energy storage. Energies. 14(24):8233.
3. Raut, D., Tiwari, A.K., Kalamkar, V.R. 2022. A comprehensive review of latent heat energy storage for various applications: an alternate to store solar thermal energy. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 44:446.
4. Enkateswarlu, K., Ramakrishna, K. 2022. Recent advances in phase change materials for thermal energy storage-a review. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 44:6.
5. Amberkar, T.; Mahanwar, P. 2021. Study and characterization of phase change material-recycled paperboard composite for thermoregulated packaging applications. Materials Proceedings. 7(1):17.
6. Park, J., Park, K., Seo, J., 2024. A Study on the thermal properties of binary eutectic mixed PCM using polyethylene glycol and 1,4-butanediol. Korean Journal of Packaging Science and Technology. 30(2):101-106.
7. Jarvis, M.C. 2023. Hydrogen bonding and other non-covalent interactions at the surfaces of cellulose microfibrils. Cellulose 30:667-687.
8. Lommerse, J.P., Price, S.L., Taylor, R. 1998. Hydrogen bonding of carbonyl, ether, and ester oxygen atoms with alkanol hydroxyl groups. Journal of Computational Chemistry. 18(6):757-774.
9. Lee, Y. 2017. Studies on phase transition behavior of cellulose/ionic liquid/cosolvent system and their applications. Ph.D. Dissertation, Yeungman University, Gyeongsan, South Korea.
10. Lee, S., Jeon, S., Do, G., Lee, S., Kim, B., Min, K., Kim, S., Heo, Y. 2011. Preparation of cellulose nanofibrils and their applications: High strength nanopapers and polymer composite films**.** Journal of the Korean Wood Science and Technology. 39(3):197-205.
11. Leskinen, M., Kilpeläinen, I., Hietala, S. 2024. Interaction of cellulose and water upon drying and swelling by ^{13}C CP/MAS NMR. Cellulose. 31:10745-10769.
12. Parandi, E., Pero, M., Kiani, H. 2022. Phase change and crystallization behavior of water in biological systems and innovative freezing processes and methods for evaluating crystallization. Discover Food. 2:6.
13. Son, Y. 2020. Structural control and properties of cellulose-based nanoparticles, flexible/transparent films, and 3-D interlinked fibrous membrane. Ph.D. Dissertation, Konkuk University, Seoul, South Korea.
14. O'Neill, H., Pingali, S.V., Petridis, L., He, J., Mamontove E., Hong, L., Urban, V., Evans, B., Langan, P., Smith, J.C., Dvison, B.H. 2017. Dynamics of water bound to crystalline cellulose. Scientific Reports7. 11840.
15. Kwon, J., Yoon, B., Cho, S., Lee, S.K., Kim, H., Kim, D., Suhr, J. 2017. A Study on Heat Dissipation characteristics of PMMA composite films with phase change material. Composites Research. 30(5):288-296.
16. Kim, D. Physicochemical surface modification of cellulose nanofibril and its application study. 2020. Master's Dissertation. Sejong University. Seoul, South Korea.
17. An, J., Youn, H., Joung, Y., Kim, T. 2012. Determination of crystallinity index of cellulose depending on sample preparation and analysis instruments. Journal of Korea TAPPI. 44(4): 43-50.
18. Eletskii, A.V. 2022. Phase change materials with enhanced thermal conductivity and heat propagation. Materials Chemistry and Physics. 2(1):18-42.
19. Han, D., Yang, L., Wang, S., Zeng, X., Tang, L., Liu, K., Liang, K., Shen-Tu, H., Guo, L., Bai, L., Huang, Y. 2022. Thermally conductive composite phase change materials with excellent thermal management capability for electronic devices. Journal of Materials Science: Materials in Electronics. 33(2): 1008-1020.
20. Choi, S. 2021. Analysis of rubber material using differential scanning calorimetry (DSC). Rubber technology. 22(1):15-18.
21. Anant Shukla, Buddhi, D., Sawhney, R.L. 2008. Thermal cycling test of few selected inorganic and organic phase change materials. Renewable Energy. 33(12):2606-2614.
22. Chami Khazraji, A., Robert, S. 2013. Interaction effects between cellulose and water in nanocrystalline and amorphous regions: A novel approach using molecular modeling. Journal of Nanomaterials. 2013(1):409675.

투고: 2025.01.09 / 심사완료: 2025.03.07 / 게재확정: 2025.03.19