

# 전기자동차 충전기 쿨링시스템에 적용할 상변화물질의 열적 특성 및 용해 거동에 관한 실험적 연구

최두한<sup>1</sup>, 김태우<sup>1</sup>, 김명준<sup>2</sup>, 유직수<sup>2</sup>, 홍대선<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>창원대학교 메카트로닉스공학부, <sup>2</sup>국립군산대학교 기관공학과, <sup>3</sup>창원대학교 기계공학부

## Experimental Study on the Thermal Characteristics and Melting Behavior of Phase Change Materials Applied to the Cooling System of Electric Vehicle Chargers

Doo-Han Choi<sup>1</sup>, Tae-Woo Kim<sup>1</sup>, Myoung-Jun Kim<sup>2</sup>, Jik-Su Yu<sup>2</sup>, Dae-Sun Hong<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>School of Mechatronics Engineering, Changwon National University

<sup>2</sup>Department of ship engine engineering, Kunsan National University

<sup>3</sup>Department of Mechanical Engineering, Changwon National University

**요약** 상변화물질은 상변화 과정에서 열에너지를 흡수하거나 방출하는 특성과 많은 양의 열에너지를 저장할 수 있는 성질로 인하여 다양한 용도로 많이 사용되고 있다. 또한 상변화물질은 열에너지를 잠열 형태로 저장하므로 현열에 비해 많은 열에너지를 흡수 및 방출할 수 있다. 상변화 온도는 물질마다 다르므로 물질의 선택에 따라 다양한 온도의 열에너지 저장이 가능하다. 본 연구에서는 상변화물질을 전기자동차 급속충전기 쿨링시스템을 대상으로 한 열흡수 장치에 적용하기 위하여 적합한 상변화물질을 선정 및 제작하였다. 선정된 상변화물질은 지방산으로 라우린산(LA), 팔미트산(PA), 스테아르산(SA)이며, 이를 통해 열흡수 장치에 적용할 LA-SA혼합물, PA-SA혼합물을 제작하였다. 선정 및 제작된 상변화물질의 열적 특성 분석을 위해 용해 피크온도와 잠열량을 측정하였으며, 용해 거동 파악을 위해 용해 실험을 진행하였다. 본 실험 결과를 통해 혼합물의 용해 피크온도가 저하되는 현상을 확인하였으며, 용해시 상변화물질의 온도구배 변화를 알 수 있었다. 또한 LA-SA혼합물 및 PA-SA혼합물이 열흡수 장치에 적합함을 확인하였다.

**Abstract** Phase change materials (PCMs) are used widely for various applications because of their ability to absorb or release thermal energy during the phase change process. Phase change materials store thermal energy in the form of latent heat. Hence, they can absorb and release more thermal energy than sensible heat. The phase change temperature varies depending on the material selected, so it is possible to store thermal energy at various temperatures depending on the material. In this study, some suitable PCMs were selected and manufactured to apply them as a heat absorption device targeting the cooling system of an electric vehicle fast charger. The PCMs selected in this study were fatty acids: lauric acid (LA), palmitic acid (PA), and stearic acid (SA). LA-SA mixtures and PA-SA mixtures were produced and applied to a thermal absorption device. The thermal properties of these PCMs were analyzed by measuring the melting peak temperature and latent heat and conducting a melting experiment to identify the melting behavior. Through a series of experiments, the melting peak temperature of the mixture was lowered, and the temperature gradient of the PCMs during melting was identified. In addition, the LA-SA and PA-SA mixture were suitable as thermal absorption devices.

**Keywords** : Cooling System of EV Chargers, DSC, Melting, Mixture, Phase Change Material

\*Corresponding Author : Dae-Sun Hong(Changwon National Univ.)

email: dshong@changwon.ac.kr

Received October 12, 2023

Revised November 30, 2023

Accepted January 5, 2024

Published January 31, 2024

## 1. 서론

상변화물질(Phase change material)은 상변화 과정에서 열에너지를 흡수하거나 방출하는 특성과 많은 양의 열에너지를 저장할 수 있는 성질로 인하여 다양한 용도로 많이 사용되고 있다. 상변화물질은 상이 변화할 때 열에너지를 잠열 형태로 저장하므로 현열에 비해 많은 열에너지를 흡수 및 방출할 수 있으며, 상변화 온도가 물질에 따라 달라 물질의 선택에 따라 다양한 온도의 열에너지 저장이 가능하다. 이와 같은 열에너지 저장이 가능한 특성으로 인하여 상변화물질은 잠열축열시스템, 냉각시스템과 같은 열저장 시스템에 관한 많은 연구가 수행되고 있다. 잠열축열시스템에 대한 연구로써, Nomura 등[1]은 상변화물질을 이용하여 공장에서 발생하는 폐열을 전송하는 시스템에 대해서 연구하였다. Iten 등[2]은 건물의 무료 냉방 및 난방을 위하여 상변화물질을 이용한 열에너지 저장 기술에 대해서 검토하였다. Cunha 등[3]은 캡슐화되지 않은 상변화물질과 시멘트 모르타르를 혼합한 건설 자재를 개발하고 건물의 에너지 효율에 대한 성능을 확인하였다. Wahile 등[4]은 자동차 배기가스로부터 발생하는 열에너지를 상변화물질을 통하여 저장하는 실험을 하였다. 냉각시스템에 대한 연구로써, Li 등[5]은 전기자동차의 리튬 이온 배터리에 상변화물질을 적용하여 배터리의 표면 온도를 낮추는 실험을 하였다. Kim 등[6]은 자동차 엔진을 대상으로 상변화물질을 이용하여 새로운 엔진 냉각 전략의 실행 가능성을 검토하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. Kandasamy 등[7]은 상변화물질 기반의 히트 싱크 사용에 대한 플라스틱 쿼드 플랫 패키지 전자 장치의 열 관리에 대하여 실험 및 수치해석을 수행하였다. Wu 등[8]은 우주선의 열 제어 시스템 결합 방식을 위해 상변화물질을 활용할 수 있음을 확인하였다. Wang 등[9]은 의류 내부 미세 환경의 온도와 습도를 줄이기 위한 상변화물질 사용 방법에 대해 연구하였다. 이와 같이 상변화물질은 열관리를 위하여 다양하게 연구되고 있으며, 전기자동차의 급속충전기 쿨링시스템에 적용함으로써 충전케이블에 발생하는 열 제거에 효과가 있을 것으로 기대된다.

전기자동차의 급속충전기 케이블에서 발생하는 열을 보다 효과적으로 제거하기 위하여 Fig. 1과 같이 쿨링시스템에 상변화물질을 적용한 열흡수 장치를 추가 적용하고자 한다. 본 연구에서는 열흡수 장치에 적용할 상변화물질 개발을 목적으로 다종의 지방산계 유기물을 선정하고 선정된 물질을 혼합하여 열흡수장치에 적용 가능한

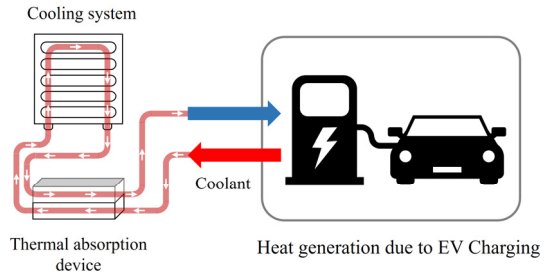


Fig. 1. Schematic diagram of PCMs applied to the cooling system of an electric vehicle charger

약 60 ℃와 40 ℃에서 180 kJ/kg 이상의 잠열량을 가지는 상변화물질을 개발하였다. 또한 시차주사열량측정법(DSC: Differential Scanning Calorimetry)과 기초 용해 실험을 통하여 개발된 혼합 상변화물질이 열흡수 장치에 적합한지 여부를 확인하였다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 상변화물질의 선정

열교환기의 열흡수 장치에 적용할 상변화물질을 선정할 때 용점과 잠열량은 가장 중요한 고려 요소이다. 먼저 열흡수 장치에 적합한 용점을 가진 상변화물질을 선정하고, 선정된 상변화물질 중 잠열량이 큰 물질을 최종 선정한다. 전기자동차 급속충전기 쿨링시스템용 열흡수 장치에 적합한 용점 및 잠열량을 가지는 단일 상변화물질은 조사되지 않아 상변화물질의 혼합을 통하여 적합한 물질을 개발하고자 하였으며, 열적 특성을 고려하여 지방산 계열의 상변화물질에 주목하였다. 지방산은 조화용용, 높은 잠열 및 비열, 비독성, 낮은 부식성, 화학적 및 열적 안정성, 상전이 중 적은 부피 변화, 상온에서의 낮은 증기압 등 좋은 특성을 많이 가지고 있어 열흡수 장치에 적용할 상변화물질로 적합하다고 할 수 있다[10,11]. 지방산은 상변화물질로 연구하는 과정에서 두 개 이상의 지방산을 혼합해 상변화 온도가 더 낮은 공용 혼합물을 형성할 수 있음을 발견했으며, 에스테르화 반응을 통한 지방산 에스테르 합성 및 다양한 방법을 통한 지방산 복합 상변화물질 제조가 가능함이 밝혀졌다[12].

본 연구에서는 지방산계 중에서도 열적 특성을 고려하여 라우린산(Lauric acid), 팔미트산(Palmitic acid), 스테아르산(Stearic acid)을 혼합 상변화물질 개발을 위한 후보 물질로 채택하였다. 열흡수 장치에 적용할 혼합 상

Table 1. Properties of fatty acid Phase change materials

| Properties         | Lauric acid | Palmitic acid | Stearic acid |
|--------------------|-------------|---------------|--------------|
| Melting point [°C] | 42 ~ 44     | 62.49         | 67 ~ 69      |
| Boiling point [°C] | 299         | 351.5         | 361          |
| Flash point [°C]   | 160 ~ 165   | 205           | 196          |
| Specific gravity   | 0.54        | 0.85          | 0.84         |
| Purity [%]         | 99 ~ 100    | 95 ~ 100      | 95 ~ 100     |

Table 2. Composition of fatty acid mixtures

| Mixtures      | Phase change materials       | Composition [wt%] |
|---------------|------------------------------|-------------------|
| LA-SA mixture | Lauric acid - Stearic acid   | 5:5               |
| PA-SA mixture | Palmitic acid - Stearic acid | 5:5               |

변화물질로는 라우린산과 스테아르산의 혼합물(이하 LA-SA혼합물) 및 팔미트산과 스테아르산의 혼합물(이하 PA-SA혼합물)을 검토하였다. 제조사에서 제공하는 지방산 단일 물질의 특성은 Table 1과 같으며, 혼합 상변화물질의 단일 물질 혼합비는 Table 2와 같다.

## 2.2 실험장치 및 방법

### 2.2.1 실험장치의 구성

단일 상변화물질인 라우린산, 팔미트산, 스테아르산과 혼합 상변화물질인 LA-SA혼합물, PA-SA혼합물의 용해 피크온도 및 잠열량 측정을 위하여 TA Instruments사의 DSC 250을 이용하였다.

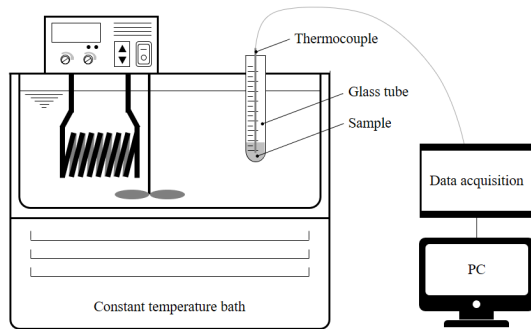


Fig. 2. Schematic diagram of experimental setup

Table 3. Experimental condition in melting experiment

| Phase change materials | Water temperature in bath [°C] | Sample weight [g] |
|------------------------|--------------------------------|-------------------|
| Lauric acid            | 60                             | 10                |
| Palmitic acid          | 76                             | 10                |
| Stearic acid           | 84                             | 10                |
| LA-SA mixture          | 75                             | 10                |
| PA-SA mixture          | 75                             | 10                |

상변화물질의 용해 거동을 파악하기 위한 실험장치는 항온수조, 열전대, 시험관 등으로 Fig. 2와 같이 구성하였으며, 항온수조는 수조, 히터, 냉동기, 순환펌프, 온도 센서 등으로 구성되어 있어 수조 내부의 온도가 균일하게 유지된다.

### 2.2.2 실험 조건 및 방법

본 연구에서는 열적 특성 분석을 위해 상변화물질인 라우린산, 팔미트산, 스테아르산, LA-SA혼합물, PA-SA혼합물의 용해 피크온도 및 잠열량을 측정하였으며, 측정 방법으로는 시차주사열량측정법을 사용하였다. DSC의 분석 조건은 20 °C ~ 90 °C 범위에서 승온속도와 냉각속도를 5 K/min로 설정하여 측정하였다.

용해 실험은 단일 상변화물질과 혼합 상변화물질 시료를 동일한 용량으로 시험관에 넣은 후, 시험관을 수조 내부가 일정한 온도로 유지되는 항온수조에 넣어서 실험을 실시하였다. 시험관 내에는 열전대를 설치하여 시료의 온도를 측정하였다. 항온수조 내의 물 온도는 상변화물질 제조사에서 제공하는 용점을 참고하여 물질의 완전한 용해가 가능하도록 설정하였다. 용해 실험의 환경은 Table 3과 같으며, 상변화물질이 완전하게 용해될 때까지 실험을 진행하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 DSC 측정 결과

단일 상변화물질인 라우린산, 팔미트산, 스테아르산과 혼합 상변화물질인 LA-SA혼합물, PA-SA혼합물의 용해 피크온도(Peak temperature) 및 잠열량(Latent heat)을 DSC를 통해 측정하였으며, 그 결과를 Fig. 3 ~ Fig. 7에 나타냈다.

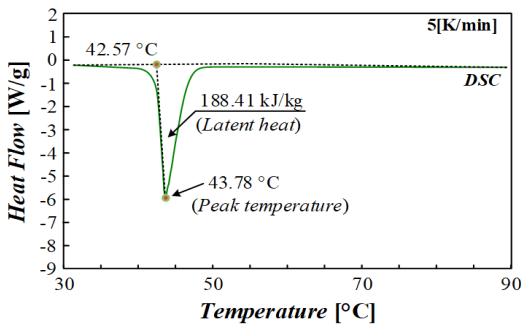


Fig. 3. DSC analysis result for lauric acid

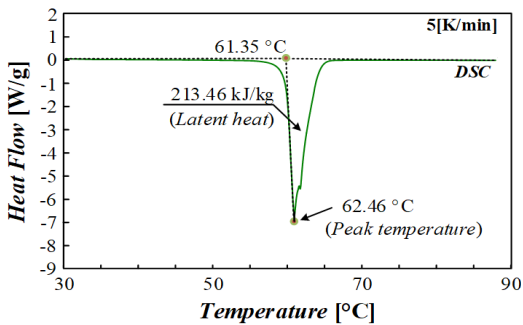


Fig. 4. DSC analysis result for palmitic acid

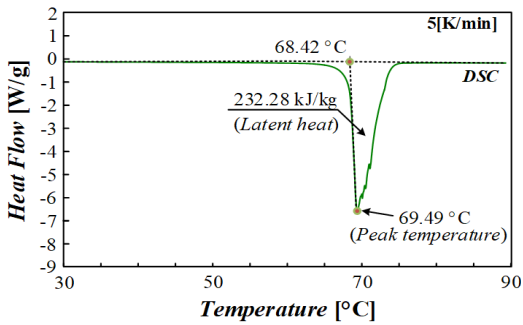


Fig. 5. DSC analysis result for stearic acid

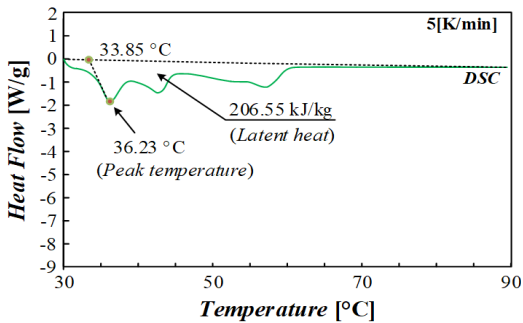


Fig. 6. DSC analysis result for the LA-SA mixture

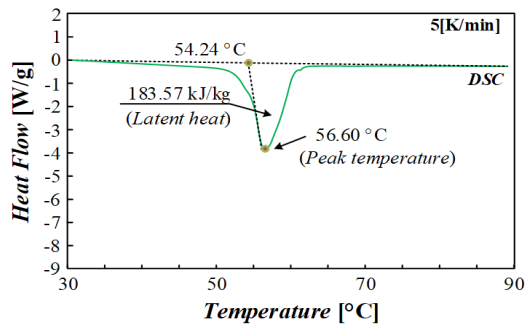


Fig. 7. DSC analysis result for the PA-SA mixture

Fig. 3은 라우린산의 DSC 측정 결과를 나타낸 것으로 용해 피크온도는 43.78 °C, 잠열량은 188.41 kJ/kg으로 나타났다. Fig. 4는 팔미트산의 DSC 측정 결과를 나타낸 것으로 용해 피크온도는 62.46 °C, 잠열량은 213.46 kJ/kg으로 나타났다. Fig. 5는 스테아르산의 DSC 측정 결과를 나타낸 것으로 용해 피크온도는 69.49 °C, 잠열량은 232.28 kJ/kg으로 나타났다.

DSC를 통하여 측정된 용해 피크온도와 Table 1의 제조사에서 제공하는 각 물질별 용점(Melting point)을 비교하여 살펴보면 거의 유사한 것을 확인할 수 있으며, 이는 본 연구에서 실시한 DSC 측정 결과가 신뢰성을 가지고 있다고 판단된다.

Fig. 6은 LA-SA혼합물의 DSC 측정 결과를 나타낸 것으로 총 3개의 피크점을 나타내고 있으며, 용해 피크온도가 36.23 °C로 라우린산보다 약 7 °C 낮은 온도를 보이고 있다. 잠열량은 206.55 kJ/kg으로 라우린산보다 약 18 kJ/kg이 높은 잠열량을 가지고 있는 것을 알 수 있다. Fig. 7은 PA-SA혼합물의 DSC 측정 결과를 나타낸 것으로 용해 피크온도가 56.65 °C로팔미트산보다 약 5 °C 낮은 온도를 보이며, 잠열량은183.57 kJ/kg으로 팔미트산보다 약 29 kJ/kg이 낮은 잠열량을 가지고 있는 것을 알 수 있다.

결과적으로 혼합 상변화물질의 피크온도가 단일 상변화 물질의 용점보다 낮다는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 용점강화현상으로 2종 이상의 순물질을 혼합하면, 순물질의 분자배열 사이에 타 순물질이 들어가 분자 사이에 발생하는 상호작용의 힘을 방해하여 순물질이 가지고 있는 용점보다 낮은 온도에서 피크온도가 발생하는 현상이 나타난 것으로 판단된다[13]. 그리고 LA-SA혼합물 및 PA-SA혼합물의 용해 피크온도가 쿨링시스템의 출구 온도 및 입구 온도 용점 범위에 적합한 것을 확인하였다.

Table 4. Comparison of experimental results with literature data

| Mixtures      | Composition [wt%] | Melting point [°C] | Latent heat [kJ/kg] | Refs.     |
|---------------|-------------------|--------------------|---------------------|-----------|
| LA-SA mixture | 5:5               | 36.23              | 206.55              | this work |
|               | 87.24:12.76       | 37.98              | 181.2               | [14]      |
|               | 86:14             | 37.5               | 199.6               | [15]      |
| PA-SA mixture | 5:5               | 56.65              | 183.57              | this work |
|               | 62.99:37.01       | 53.69              | 204.7               | [14]      |
|               | 61:39             | 54.5               | 207.7               | [16]      |

Table 4는 혼합 상변화물질의 DSC 측정 결과와 기존 연구 결과를 비교한 것으로 혼합 비율의 차이는 있으나 대체적으로 용점 및 잠열량이 유사한 값을 보이고 있다.

### 3.2 용해 실험 결과

실제 전기자동차 급속충전기 쿨링시스템용 열흡수 장치에 적용하기 위한 기초 실험이자 선행된 DSC 측정 결과와의 비교를 위하여 용해 실험을 실시하였다. 용해 실험을 통하여 단일 상변화물질인 라우린산, 팔미트산, 스테아르산과 혼합 상변화물질인 LA-SA 혼합물, PA-SA 혼합물의 용해 거동을 확인하였다.

Fig. 8은 라우린산의 용해 실험 결과를 나타낸 것으로 44.0 °C 지점에서 온도구배의 변화가 일어나고 있음을 보여주며, 용해 피크온도가 43.78 °C로 온도구배 변화 지점과 유사함을 알 수 있다. Fig. 9는 팔미트산의 용해 실험 결과를 나타낸 것으로 62.0 °C 지점에서 온도구배의 변화가 일어나고 있음을 보여주며, 용해 피크온도가 62.46 °C로 온도구배 변화 지점과 유사함을 알 수 있다. Fig. 10은 스테아르산의 용해 실험 결과를 나타낸 것으로 70.2 °C 지점에서 온도구배의 변화가 일어나고 있음을 보여주며, 용해 피크온도가 69.49 °C로 온도구배 변화 지점과 거의 유사함을 알 수 있다. Fig. 11은 LA-SA 혼합물의 용해 실험 결과를 나타낸 것으로 약 33 °C 지점부터 약 52 °C 지점까지 온도변화가 완만하게 일어나고 있음을 보여주며, DSC 측정 결과 1개의 큰 피크온도를 보이지 않고 3개의 용해 피크온도를 보여주고 있어 용해 실험 결과와 유사함을 알 수 있다. Fig. 12는 PA-SA 혼합물의 용해 실험 결과를 나타낸 것으로 56.9 °C 지점에서 온도구배의 변화가 일어나고 있음을 보여주며, 용해 피크온도가 56.65 °C로 온도구배 변화 지점과 유사함을 알 수 있다.

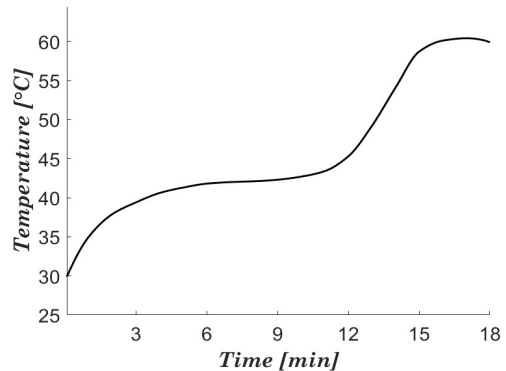


Fig. 8. Result of melting experiment for lauric acid

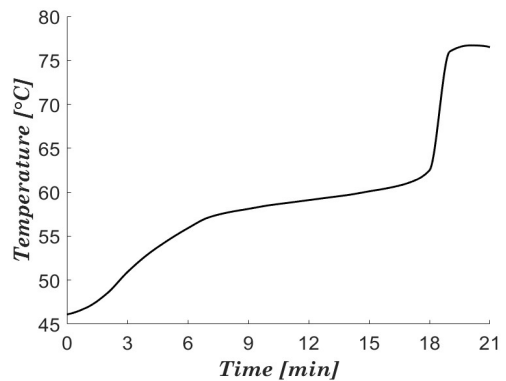


Fig. 9. Result of melting experiment for palmitic acid

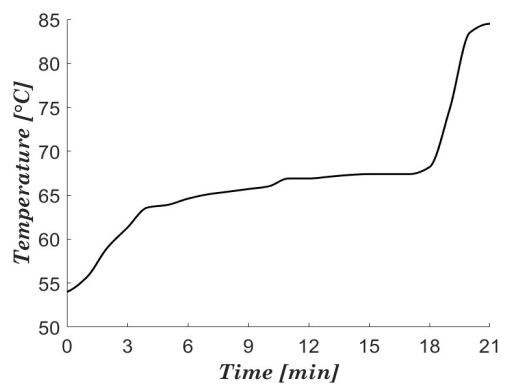


Fig. 10. Result of melting experiment for stearic acid

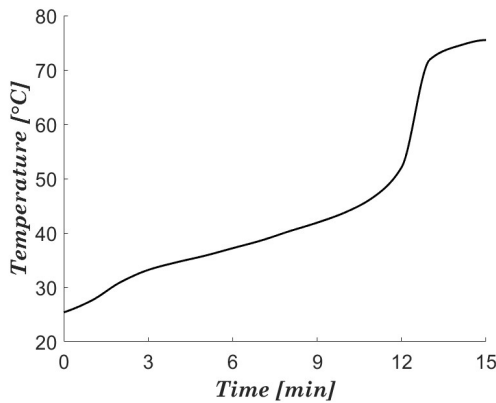


Fig. 11. Result of melting experiment for LA-SA mixture

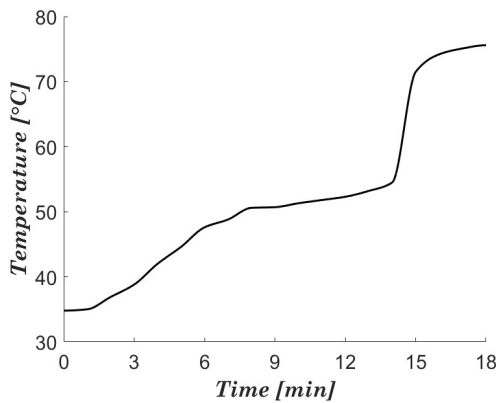


Fig. 12. Result of melting experiment for PA-SA mixture

#### 4. 결론

본 연구에서는 상변화물질인 라우린산, 팔미트산, 스테아르산, LA-SA혼합물, PA-SA혼합물의 용해 피크온도 및 잠열량을 측정하였으며, 용해 거동을 관찰하였다. 본 연구의 실험 결과를 토대로 한 연구 내용을 요약하면 다음과 같다.

- (1) DSC 측정 결과 단일 물질과 혼합물의 용해 피크온도 및 잠열량을 알 수 있었으며, LA-SA혼합물은 총 3개의 피크점을 나타내고 있는 것을 확인하였다.
- (2) DSC를 통하여 측정된 용해 피크온도와 제조사에서 제공하는 용점을 비교하여 살펴보면  $\pm 2$  %의 범위 내에서 유사한 것을 확인할 수 있었다.

- (3) LA-SA혼합물과 PA-SA혼합물은 단일 물질에 스테아르산을 혼합함으로써 단일 물질 보다 낮은 용해 피크온도를 보이는 용점강하현상이 나타남을 확인하였다.
- (4) 상변화물질에 대한 기초 용해 실험의 상변화구간과 DSC 분석 결과의 용점이 거의 일치하는 것을 확인하였으며, LA-SA혼합물 및 PA-SA혼합물의 용해 피크온도가 열흡수 장치에 적합함을 검증하였다.
- (5) 지방산 혼합물의 열적 특성 및 용해 거동에 관한 실험 결과 상변화물질을 쿨링시스템에 적용하면 충전케이블 내부에 발생하는 열을 보다 효과적으로 제거할 수 있을 것으로 기대된다.

#### References

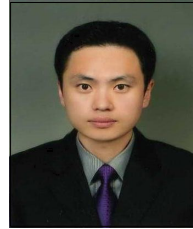
- [1] T. Nomura, N. Okinaka, T. Akiyama, "Waste heat transportation system, using phase change material (PCM) from steelworks to chemical plant", *Resources, Conservation and Recycling*, Vol.54, pp.1000-1006, Sep. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.02.007>
- [2] M. Iten, S. Liu, A. Shukla, "A review on the air-PCM-TES application for free cooling and heating in the buildings", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.61, pp.175-186, Aug. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.007>
- [3] S. Cunha, P. Leite, J. Aguiar, "Characterization of innovative mortars with direct incorporation of phase change materials", *Journal of Energy Storage*, Vol.30, Aug. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101439>
- [4] G. S. Wahile, P. D. Malwe, A. V. Kolhe, "Waste heat recovery from exhaust gas of an engine by using a phase change material", *Materials Today: Proceedings*, Vol.23, pp.2101-2107, July 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.247>
- [5] W. Q. Li, Z. G. Qu, Y. L. He, Y. B. Tao, "Experimental study of a passive thermal management system for high-powered lithium ion batteries using porous metal foam saturated with phase change materials", *Journal of Power Sources*, Vol.255, pp.9-15, June 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.01.006>
- [6] K. B. Kim, K. W. Choi, Y. J. Kim, K. H. Lee, K. S. Lee, "Feasibility study on a novel cooling technique using a phase change material in an automotive engine", *Energy*, Vol.35, pp.478-484, Jan. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.10.015>
- [7] R. Kandasamy, X. Q. Wang, A. S. Mujumdar, "Transient cooling of electronics using phase change

material (PCM)-based heat sinks”, *Applied Thermal Engineering*, Vol.28, pp.1047-1057, June 2008.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.06.010>

- [8] W. F. Wu, N. Liu, W. L. Cheng, Y. Liu, “Study on the effect of shape-stabilized phase change materials on spacecraft thermal control in extreme thermal environment”, *Energy Conversion and Management*, Vol.69, pp.174-180, May 2013.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.01.025>
- [9] F. Wang, D. Pang, X. Liu, M. Liu, W. Du, Y. Zhang, X. Cheng, “Progress in application of phase-change materials to cooling clothing”, *Journal of Energy Storage*, Vol.60, April 2023.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106606>
- [10] D. Rozanna, T. G. Chuah, A. Salmiah, T. S. Y. Choong, M. Sa’ari, “Fatty Acids as Phase Change Materials (PCMs) for Thermal Energy Storage: A Review”, *International Journal of Green Energy*, Vol.1, No.4, pp.495-513, Aug. 2006.  
DOI: <https://doi.org/10.1081/GE-200038722>
- [11] D. Feldman, M. M. Shapiro, D. Banu, C. J. Fuks, “Fatty acids and their mixtures as phase-change materials for thermal energy storage”, *Solar Energy Materials*, Vol.18, pp.201-216, March 1989.  
DOI: [https://doi.org/10.1016/0165-1633\(89\)90054-3](https://doi.org/10.1016/0165-1633(89)90054-3)
- [12] Y. Yuan, N. Zhang, W. Tao, X. Cao, Y. He, “Fatty acids as phase change materials: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.29, pp.482-498, Jan. 2014.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/i.rser.2013.08.107>
- [13] J. S. Yu, A. Horibe, N. Haruki, A. Machida, M. Kato, “Melting and solidification characteristics of a mixture of two types of latent heat storage material in a vessel”, *Heat and Mass Transfer*, Vol.52, pp.482-498, Nov. 2016.  
DOI: <https://doi.org/10.1007/s00231-016-1767-8>
- [14] H. Ke, “Phase diagrams, eutectic mass ratios and thermal energy storage properties of multiple fatty acid eutectics as novel solid-liquid phase change materials for storage and retrieval of thermal energy”, *Applied Thermal Engineering*, Vol.113, pp.1319-1331, Feb. 2017.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.11.158>
- [15] W. Zhang, X. Zhang, X. Zhang, Z. Yin, Y. Liu, M. Fang, X. Wu, X. Min, Z. Huang, “Lauric-stearic acid eutectic mixture/carbonized biomass waste corn cob composite phase change materials: Preparation and thermal characterization”, *Thermochimica Acta*, Vol.674, pp.21-27, April 2019.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2019.01.022>
- [16] H. Nazir, M. Batool, M. Ali, A. M. Kannan, “Fatty acids based eutectic phase change system for thermal energy storage applications”, *Applied Thermal Engineering*, Vol.142, pp.466-475, Sep. 2018.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.07.025>

최 두 한(Doo-Han Choi)

[정회원]



- 2019년 8월 : 부경대학교 기술경영협동과정 (공학석사)
- 2023년 2월 : 창원대학교 메카트로닉스공학부 (박사수료)

<관심분야>

생산자동화, 인공지능응용, 열전달

김 태 우(Tae-Woo Kim)

[준회원]



- 2022년 2월 : 창원대학교 기계공학부 (공학사)
- 2022년 3월 ~ 현재 : 창원대학교 메카트로닉스공학부 (석사과정)

<관심분야>

생산자동화, 인공지능응용

김 명 준(Myoung-Jun Kim)

[정회원]



- 1998년 2월 : 한국해양대학교 대학원 기관공학 (공학석사)
- 2002년 3월 : (일본)오카야마대학교 대학원 열공학전공 (공학박사)
- 2003년 9월 ~ 현재 : 국립군산대학교 기관공학과 교수

<관심분야>

열전달, 축열분야, 열에너지 회수

유 직 수(Jik-Su Yu)

[정회원]



- 2008년 2월 : 국립군산대학교 대학원 해양산업공학전공 (공학석사)
- 2012년 9월 : (일본)오카야마대학 대학원 열공학전공 (공학박사)
- 2016년 10월 ~ 현재 : 국립군산대학교 책임연구원

〈관심분야〉

열전달, 축열분야, 열에너지 회수

---

홍 대 선(Dae-Sun Hong)

[정회원]



- 1986년 2월 : 한국과학기술원 대학원 생산공학 (공학석사)
- 1995년 8월 : 한국과학기술원 대학원 생산공학 (공학박사)
- 1982년 1월 ~ 1997년 2월 : 삼성항공산업(주) 수석연구원
- 1997년 3월 ~ 현재 : 창원대학교 기계공학부 교수

〈관심분야〉

생산자동화, 인공지능응용