

폐플라스틱 활용 잠열축열시스템을 통한 재생에너지화의 기초 연구

유직수, 김명준*
국립군산대학교 기관공학과

Fundamental Study on Renewable Energy through Latent Heat Storage System using Waste Plastic

Jik-Su Yu, Myoung-Jun Kim*
Department of ship engine engineering, Kunsan National University

요약 세계적으로 플라스틱 폐기물로 인한 환경 파괴, 그리고 인간의 생명까지 위협을 받게 되고 있는 시점에 2050년 까지 플라스틱 사용에 제한을 두고 재활용, 에너지화 등 많은 노력을 하고 있는 상황이다. 이런 문제를 해결하기 위한 한가지 방법으로 본 연구는 플라스틱 폐기물로 인한 환경 문제를 해결하고 에너지 회수 등의 목적으로 진행되었다. 특히, 고밀도 폴리에틸렌(High Density Polyethylene, HDPE)을 이용한 잠열축열시스템의 최적화에 초점을 맞추어 실험적 연구가 수행되었다. 본 연구에서는 플라스틱의 상변화 특성을 이용하여 열에너지 저장 효율을 극대화하는 방법을 모색하였다. 실험 결과, HDPE는 120~130 °C의 온도 범위에서 상변화가 일어나며, 이 과정에서 흡열 및 방열이 효과적으로 일어나는 것으로 확인되었다. 또한, 사각용기의 간격을 조절하여 축열 완료 시간과 효율을 최적화하는 실험을 통해, 5 mm 간격에서 축열 시스템의 성능이 가장 우수한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 잠열 축열 시스템의 적용 가능성을 높이며, 플라스틱 폐기물 관리와 에너지 회수 측면에 중요한 기초 데이터를 제공될 것으로 기대된다.

Abstract In light of the global environmental destruction caused by plastic waste, which threatens human life, efforts are being made to limit the use of plastic by 2050 through recycling and energy recovery. This study aimed to resolve environmental problems caused by plastic waste and recover energy by optimizing a latent heat storage system using high-density polyethylene (HDPE). This research explored methods to maximize thermal energy storage efficiency by utilizing the phase change properties of plastics. The experimental results showed that HDPE undergoes phase changes within a temperature range of 120-130 °C, during which heat storage and release occur effectively. In addition, by adjusting the spacing of rectangular chambers, the experiments optimized the completion time and efficiency of heat storage, showing that the best performance of the heat storage system was achieved at a 5 mm spacing. These findings enhance the applicability of latent heat storage systems and are expected to provide essential data for managing plastic waste and recovering energy.

Keywords : High-Density Polyethylene, Latent Heat Storage Systems, Phase Change Materials, Plastic Waste Management, Thermal Energy Storage

*Corresponding Author : Myoung-Jun Kim(Kunsan National Univ.)

email: mjkim@kunsan.ac.kr

Received May 8, 2024

Accepted August 2, 2024

Revised June 14, 2024

Published August 31, 2024

1. 서론

2022년에도 대한민국은 플라스틱 폐기물을 퇴치하고 보다 지속 가능하고 플라스틱 없는 사회를 향해 나아가기 위한 노력을 계속하고 있다. 국가는 카페와 레스토랑에서 일회용 플라스틱 사용을 금지하고, 재활용품 사용을 장려하기 위한 포장 규정, 친환경 포장을 사용하는 생산자에 대한 재정적 인센티브 등 플라스틱 폐기물을 제한하기 위한 조치를 시행하고 있다. 이러한 계획은 2030년까지 플라스틱 사용을 60 % 줄이고 2050년까지 플라스틱 없는 사회를 만들겠다는 대한민국의 광범위한 목표의 일부이다.

매년 전 세계적으로 수백만 톤의 플라스틱 폐기물이 발생하며, 그 중 상당 부분이 매립되거나 자연 서식지의 오염 물질로 처리되고 있고, 플라스틱을 다양한 응용 분야에서 믿을 수 없을 정도로 유용하게 만드는 내구성과 분해에 대한 저항성은 플라스틱을 지속적인 환경적 위협으로 만들게 된다.

플라스틱 폐기물은 여러 면에서 환경에 부정적인 영향을 미칩니다. 첫째, 자연 서식지에 축적되면 야생 동물에 위협이 되며 종종 해양 및 육상 동물의 섭취, 얽힘 및 사망으로 이어지게 된다. 둘째, 플라스틱의 분해는 비스페놀 A(BPA) 및 프탈레이트와 같은 독성 물질을 환경으로 방출하여 토양과 수자원을 오염시키고 잠재적으로 먹이사슬에 유입됩니다. 또한, 플라스틱 폐기물 조각은 대기 오염과 온실가스 배출을 증가시켜 기후변화를 악화시키게 된다. 이와 관련하여 미국 하와이-마노이대 이노우에 해양 미생물학 연구실의 보고에 따르면 플라스틱 종류인 저밀도폴리에틸렌(LDPE) 1.5 g을 일주일간 태양광에 노출시켰을 때, 메탄 4,100 pmol이 배출되고 이밖에 폴리스티렌(PS) 730 pmol, 폴리에틸렌 테레프탈레이트(PET) 500 pmol, 폴리프로필렌(PP) 170 pmol 등 여러 플라스틱에서 메탄이 검출된다고 한다[1]. 또한 대외경제정책연구원(KIEP)에 따르면 전 세계의 플라스틱 생산량은 2000년 2억 3,400만 톤에서 2019년 4억 6,000만 톤으로 크게 늘어났고 같은 기간 플라스틱 폐기물 발생량은 1억 5,600만 톤에서 3억 5,300만 톤으로 두 배 이상 증가했다고 한다. 그리고 전 세계 플라스틱 폐기물의 재활용률은 9 %에 불과하며, 재활용되지 않은 폐플라스틱은 매립(50 %), 무단투기(22 %), 소각(19 %)의 방식으로 처리되고 있는 것으로 조사된다고 발표했다[2].

플라스틱은 크게 열가소성 플라스틱과 열경화성 플라스틱으로 분류할 수 있으며, 일반적으로 폴리에틸렌(PE),

폴리프로필렌(PP), 폴리에틸렌 테레프탈레이트(PET) 등이 있다. 각 유형은 고유한 화학 구조와 특성을 갖고 있어 결과적으로 환경에 영향을 미치게 된다. 예를 들어, 쇼핑백, 포장재 등 일회용 플라스틱은 소비율이 높고 재활용 효율성이 낮기 때문에 플라스틱 오염의 주요 원인입니다. 반면, 내구성이 뛰어난 플라스틱은 장기 제품에 적용할 수 있지만 수명 주기가 끝나면 여전히 폐기 문제가 있다.

이러한 이유들로 인해 폐플라스틱의 재활용을 위해 다양한 방법을 찾고 있고 2020년부터 '자원 순환 경제 구축을 위한 폐플라스틱 가스화 기술 개발'을 위해 1톤/day급 폐플라스틱 가스화 공정 개발을 진행하고 있고, 잠열축열재료의 사용으로 많은 연구가 이루어지고 있다. 가정용 온수 탱크에 고밀도 폴리에틸렌(High density polyethylene, HDPE)을 충전한 구체를 넣어 에너지 효율을 증대시키는 연구가 진행되고 있고[3], 파라핀 성능 향상을 시키기 위해 형성 안정제로 HDPE를 사용하여 순수 파라핀에 비해 과냉각도가 감소하고 축열 및 방열 효율이 더 좋은 것을 발표하였고[4-6], 복합 PCM/HDPE 재료는 순수 PCM보다 안정성과 성능이 향상되고 열전도율이 높고 누설률이 감소하는 것으로 HDPE는 액체 상태에서 PCM 누출을 방지하고 내구성을 향상시켜 잠열 응용 분야에 적합성을 보고하였다[7]. 그리고 PCM/HDPE 복합소재의 기계적 및 열적 특성을 조사하여 복합재 내 PCM의 존재로 인한 열저장 성능 향상과 기계적 강도 감소 간의 절충점을 발표하였다[8]. 또한 HDPE를 왁스와 같은 물질과 혼합하게 되면 축열 및 방열효율이 향상되어 에너지 저장에 유용하다는 결과를 발표하였다[9]. 팽창 흑연 기반의 스테아르산 복합재 및 폴리에틸렌 셀을 이용한 고밀도 잠열 저장 장치 개발에 대한 연구를 진행하여 사용 가능성에 대한 연구 결과를 발표하였고[10], 다양한 상변화물질(Phase Change Material, PCM)/HDPE의 복합재를 개발하여 다양한 열물성치 조사를 실시한 결과, PCM/HDPE 복합재 내의 PCM은 열저장의 이점은 있지만 기계적 특성을 저하 시킨다고 보고하고 있다[11]. 이외에도 폐플라스틱의 재활용 시점에서 폴리에틸렌이 존재하는 상태에서 재활용 폴리프로필렌을 기반으로 한 고분자 복합재에 대해 DSC 분석을 통해 열적 특성에 대한 연구 결과를 발표하였다[12].

혁신적인 폐기물 관리 솔루션에 대한 절박한 요구 속에서 폐플라스틱을 잠열 저장 재료로 활용하는 잠재력은 환경 오염을 완화하고 재생 에너지 기술 개발에 기여한다는 두 가지 이점을 제공할 수 있다. 고-액 상변화 중에

흡수되거나 방출되는 열을 활용하는 잠열 저장 시스템은 열에너지를 저장하는 효율적인 방법으로 제시된다. 본 연구는 잠열 저장 매체로서 폐플라스틱 중 비교적 배출 비율이 높은 고밀도 폴리에틸렌을 적용하여 최적의 잠열 축열시스템을 개발함으로써 플라스틱 폐기물로 인한 환경 문제를 해결할 뿐만 아니라 에너지 저장 시스템의 효율성과 지속 가능성을 향상 시키는 것을 목표로 한다.

2. 연구방법

2.1 실험장치

Fig. 1에 본 실험에서 사용한 실험장치의 계략도를 나타내고 있고, 항온조, 펌프, 버퍼탱크로 구성되어 있고 브라인 순환계와 축열조 시험부로 이루어져 있다.

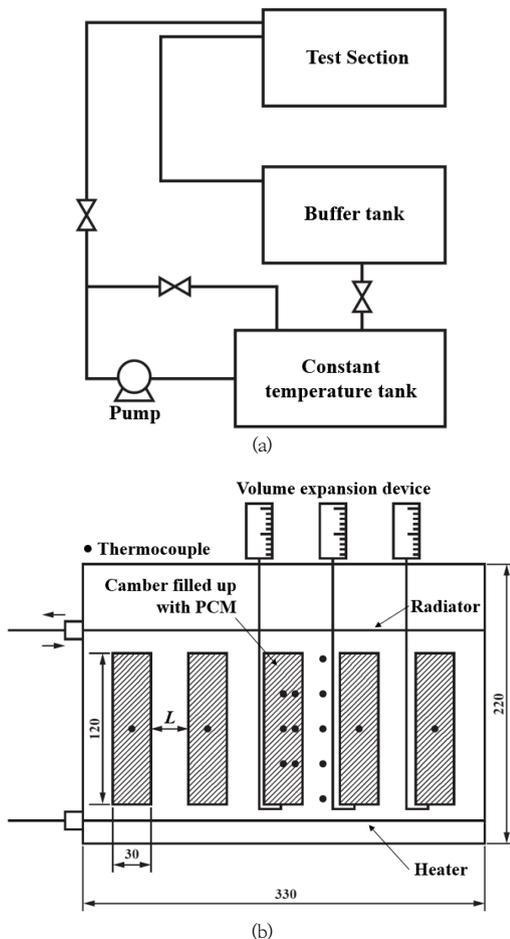


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus
(a) Experimental system diagram (b) Detail of test section

Fig. 2에는 시험부인 축열조의 상세 계략도를 나타낸 것으로 시험부는 스테인레스제 축열조(폭330 mm, 높이 220 mm, 깊이 123 mm)이고, 축열조 내에는 폐플라스틱 축열재를 충전한 스테인레스제 사각용기(폭 30 mm, 높이 120 mm, 깊이 120 mm)를 등간격으로 배치하고 있다. 축열조 하부에는 가열용 히터(출력 4 kW)를 설치해 히터로부터 열을 축열재에 전달시키기 위해 열매체로서 에틸렌글리콜을 축열조 내에 충전시키고 있다.

온도 측정에는 K형 열전대(0.1 mm)를 사용해 축열조 시험부의 에틸렌글리콜의 온도, 방열 시에 냉각관의 입구, 출구 온도를 측정한다. 또한 축열재의 용해비율을 구하기 위해서 체적팽창도 측정 가능하도록 하였다. 방열 실험 시에 실험장치를 순환하는 브라인으로서 비점이 높은 에틸렌글리콜을 사용한다.

2.2 실험방법

축열실험은 초기 조건으로서 축열조 내를 100 °C로 일정하게 유지시켜 PID 컨트롤러를 이용해 가열용 히터를 등온으로 제어하는 것으로 축열을 실시한다. 이 때, 히터에 의해 가열된 열매체가 자연대류에 의해 사각용기 사이를 유동되어 열전달이 일어나는 것으로 축열재를 용해시키게 된다.

방열실험은 축열재가 용해된 상태에서 항온조에서 일정한 온도의 브라인(에틸렌글리콜)을 순환시켜 축열 상부의 냉각관을 통과되면서 축열재와 열교환하여 브라인 온도 상승 및 유량을 측정하는 것으로 방열량을 구한다. 축열실험과 동일하게 열매체인 브라인은 축열재와 자연대류 및 전도에 의해 열교환이 일어나게 된다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 축열조내의 사각용기를 2개 설치해 축열실험을 실시한 결과이다. 축열시간이 1700 sec 이후에 히터 온도가 일정하게 되는 것을 확인할 수 있다. 열매체의 에틸렌글리콜은 온도상승이 완만하게 상승하고 본 실험에서 사용하고 있는 축열재의 용해잠열은 약 200 kJ/kg으로 비교적 높기 때문에 열매체로부터의 입열량은 주로 플라스틱을 상변화시키는 것이 사용되어 진다. 그 결과 사각용기 중심 온도의 상승은 열매체의 온도상승보다 완만하게 된다. 축열 시 시간 3000 sec 이후는 사각용기 중심 온도의 상승이 빨라지고 있다. 이것은 사각용기 내 충전된 플라스틱 전부가 상변화해 열매체로부터의 입열

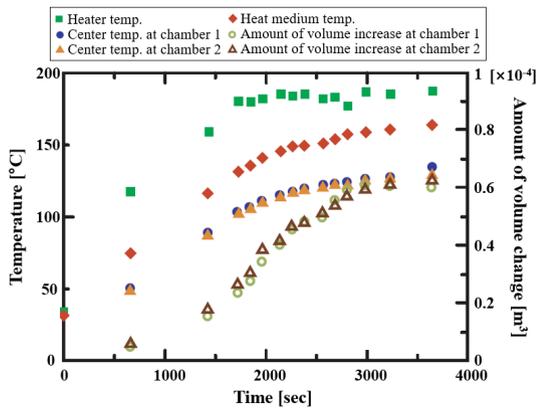


Fig. 2. Results from the heat storage process with two chambers installed in the heat storage tank

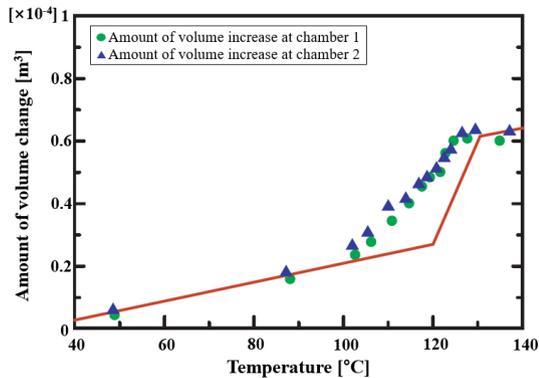


Fig. 3. Measurement results of volume increase

량이 용해잠열에 사용되어지지 않기 때문이다. 이전의 열물성 측정결과 플라스틱의 열전도율은 상변화해 액상 상태가 되면 고상상태의 값의 절반정도로 된다[13]. 또한, 고밀도 폴리에틸렌은 액상에서 자연대류가 발생하지 않기 때문에 열매체로부터 전달된 열은 거의 열전도의 형태로 열전달이 이루어지게 된다. 축열을 한 플라스틱이 고-액상의 상변화가 일어나게 되면 잠열축열에서 현 열축열로 변화하게 된다.

사각용기 내에 충전한 플라스틱의 체적증가량 ΔV 는 축열시간 1500 sec 이전에서 기울기가 변화되고 본 실험에서 사용하는 플라스틱은 약 120 °C에서 상변화해 체적이 크게 증가하는 것을 확인할 수 있고 이러한 온도변화 및 체적변화로부터 고-액 상변화 구간인 것을 알 수 있고, 3000 sec 이후에는 체적증가량 ΔV 의 변화가 완만해지고 있는 것을 확인할 수 있다. 이것으로부터 사각용기 중심의 온도변화부터도 확인 가능한 것처럼 충전되

어 있는 플라스틱 전부가 상변화를 완료했기 때문이다.

Fig. 3에 사각용기 중심온도를 대표로 해 물성치로부터 구한 체적증가량과 측정결과를 나타내고 있다. 실제에는 사각용기내에 온도구배가 있기 때문에 측정결과와 물성치의 차가 발생을 하게 된다. 그러나 본 실험에서의 플라스틱 체적의 변화 측정은 용해비열 및 축열완료구간을 정하는 것이 목적으로 측정의 정확도는 충분하다고 판단된다.

Fig. 4는 등열유속 500 W, 초기온도 100 °C, 사각용기간격 2 mm의 조건의 축열실험 결과이다. 플라스틱온도가 120~130 °C으로 완만하게 온도가 상승하고 있는 것을 확인할 수 있다. 이 구간은 축열재가 상변화가 이루어지는 잠열구간의 기울기를 나타내고 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 등열유속조건으로 간격을 변화시킨 경우의 축열재 중심온도에 있어서 평균 축열완료시간을 나타낸

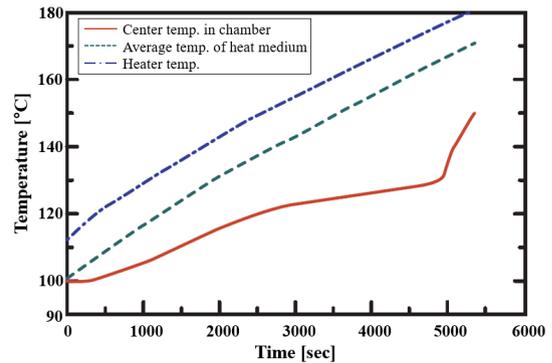


Fig. 4. Temperature changes under constant heat flux conditions

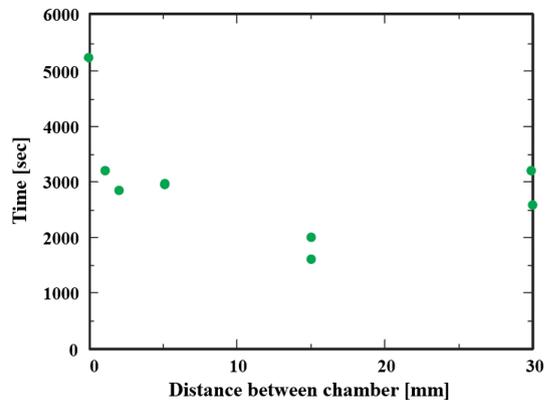


Fig. 5. Heat storage completion time variation under constant heat flux conditions

다. 축열완료는 상변화가 완료하는 130 °C을 넘은 시간으로 정의하고 있다. 간격이 0 mm에서는 용기 사이에 자연대류는 일어나지 않고 주로 열의 흐름이 전도가 지배적으로 영향을 받기 때문에 축열완료시간이 늦어지고 있는 것을 알 수 있다. 또한 간격이 커지면 커질수록 축열완료시간은 빨라지게 된다. 이것은 열매체의 자연대류에 의해 대류현상이 더해지는 원인으로 판단된다.

Fig. 6은 히터 온도 152 °C의 등온조건으로 초기온도 100 °C, 간격 2 mm의 경우에서의 축열실험의 결과를 나타낸다. Fig. 5의 결과와 유사하게 120~130 °C에서 상변화 구간을 확인할 수 있다. 그러나 등온조건이기 때문에 실험 개시에서부터의 열매체 온도 상승과 함께 축열재 중심온도의 상승이 커지게 되고, 이런 영향에 의해 등열유속조건과 비교해 축열개시, 완료시간이 빨라지게 된다.

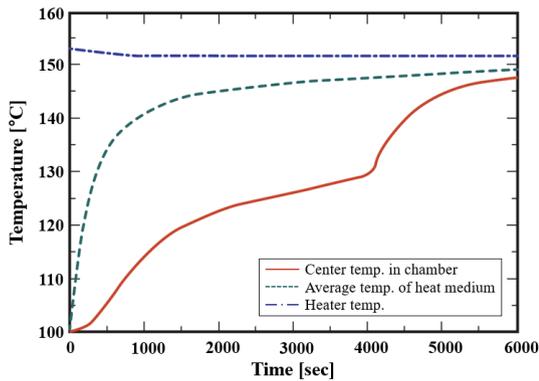


Fig. 6. Temperature changes under isothermal conditions

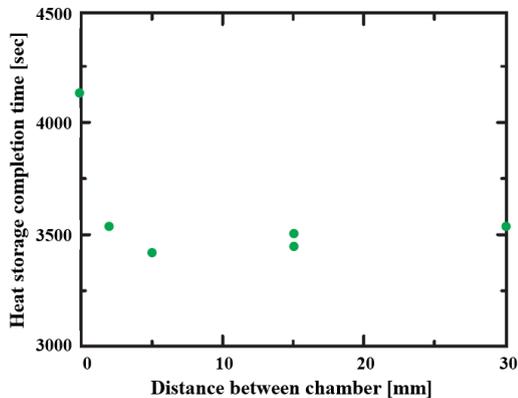


Fig. 7. Heat storage completion time variation under isothermal conditions

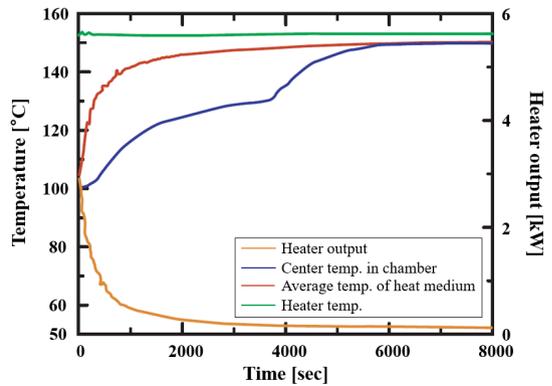


Fig. 8. Time changes of each temperature and heater output

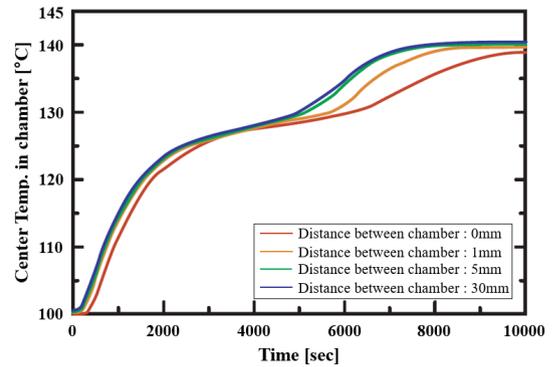


Fig. 9. Temperature change at the center of the PCM according to the change in distance between chambers

Fig. 7은 등온조건에서 용기 간격을 변화시킨 경우의 축열완료시간을 나타내고 있다. 간격이 0 mm에서 등열 유속조건과 같이 축열완료시간이 최대로 나타나고 간격이 커질수록 자연대류의 영향에 의해 축열이 빠르게 완료되는 것을 알 수 있다.

Fig. 8는 실험조건으로 히터 가열면 온도를 152 °C, 사각용기간격을 30 mm, 용기 개수 5개의 각 온도, 히터 출력의 경시변화를 나타내고 있다. 실험개시 직후에 히터 온도는 설정온도에 도달해 열매체 온도가 급상승하게 된다. 또한 열매체 온도의 상하방향에 온도 분포는 거의 발생되지 않고 축열조 내의 열매체가 거의 균일하게 일정한 온도를 나타내고 있는 것으로부터 축열조 내의 자연대류가 충분히 발달 되어 있다는 것을 알 수 있다. 축열재 중심온도는 열매체로부터 열이 전달되기 때문에 온도 상승이 이루어지지만 1500~4000 sec에서 온도 상승이 완만하게 되어 있는 것을 확인할 수 있다. 이 구간은 축열재가 상변화가 일어나는 구간으로 축열재의 용점이

120~130 °C인 것을 확인할 수 있다.

Fig. 9에 히터 가열온도 142 °C, 사각용기 수 5개의 사각 용기 간격을 변화시킨 경우에 있어서의 축열재의 온도 변화를 나타내고 있다. 또한 사각 용기 간격이 0 mm에서는 사각 용기 사이에 열매체 유로가 존재하지 않는 경우이지만 사각 용기 자체에 의한 열전도에 의해 측면으로부터도 축열재가 가열되고 있다. 이 결과로부터 0 mm, 1 mm가 다른 간격보다 완만하게 온도가 상승하고 있는 것을 확인할 수 있다. 이것은 열매체 유로가 감소한 것에 의해 축열재로의 열전달 저하가 원인인 것으로 판단된다.

Fig. 10은 사각 용기 5개에서 간격을 변화시킨 경우의 축열완료시간을 나타낸 것이다. 본 연구에서는 축열 완료를 축열재 중심 온도가 상변화를 완료한 130 °C에 초과한 시간으로 정의하고 있다. 간격을 5~30 mm의 구간에서는 축열완료시간이 일정값을 나타내고 5 mm이하

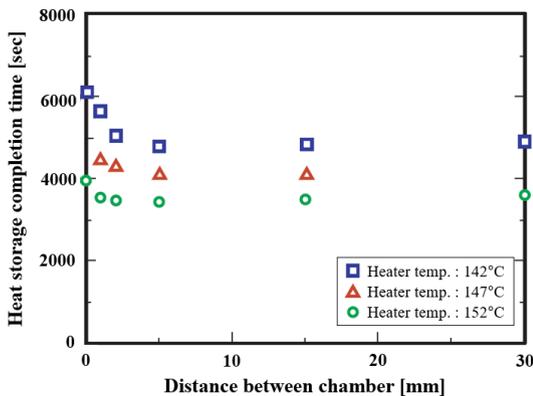


Fig. 10. Heat storage completion time when chamber is 5 in the heat storage tank

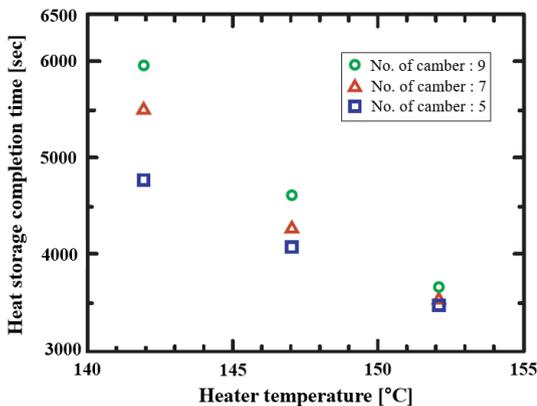


Fig. 11. Heat storage completion time when the distance between chamber is 5 mm in the heat storage tank

에서는 축열완료시간이 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 이것은 전술한 바와 같이 열전달 저하의 영향이고, 사각용기 간격의 감소에 의한 축열완료시간의 증가는 히터 가열면 온도를 낮게 설정할 수록 명확하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이 결과로부터 사각 용기 간격은 축열조 내에서의 축열재의 충전 및 축열완료시간을 고려하여 5 mm가 최적의 사각 용기 간격으로 판단된다.

Fig. 11은 사각 용기 간격 5 mm에서 축열조 내에 충전하는 사각 용기 수를 5, 7, 9로 변화시킨 경우의 축열 완료시간을 나타내고 있다. 용기 수가 증가할수록 히터 가열면 온도가 낮을수록 축열완료시간은 증가하는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 플라스틱 폐기물로 인한 환경 문제를 해결하고 에너지를 회수하여 활용하는 것을 목적으로 폐플라스틱 중 비교적 배출 비율이 높은 고밀도 폴리에틸렌을 적용하여 잠열축열시스템의 최적의 구조에 대해 실험적 검토를 실시하였고, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 본 연구에서는 폐플라스틱의 열회수를 목적으로 고밀도 폴리에틸렌(HDPE)을 사용하고 있고 상변화 구간이 120~130 °C에서 나타나는 것을 확인하였다.
- (2) 축열 시 등열유속조건에 비해 등온조건이 축열 개시 및 완료시간이 빨라지는 것을 확인하였다.
- (3) 축열조로 사용되고 있는 사각용기의 최적 간격은 5 mm로 실험적으로 검토 되어졌다.
- (4) 본 실험을 통해 도출된 결과를 기반으로 최적화된 잠열축열시스템을 고안하여 추가적으로 연구 결과를 발표할 예정이다.

References

- [1] Takahiro Nomura, Noriyuki Okinaka, Tomohiro 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] Muriel Iten, Shuli Liu, Ashish 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] Ganesh S. Wahile, Prateek D. Malwe, Ajay 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>

[4] 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>

[5] Ki-bum Kim, Kyung-wook Choi, Young-jin Kim, Ki-hyung Lee, Kwan-soo 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>

[6] D. Rahmalina, R. A. Rahman, Ismail, “Increasing the rating performance of paraffin up to 5000 cycles for active latent heat storage by adding high-density polyethylene to form shape-stabilized phase change material”, *Journal of Energy Storage*, Vol. 46, pp.103762, Feb. 2022.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103762>

[7] R. Senthil, B. M. S. Punniakodi, D. Balasubramanian, X. P. Nguyen, A. T. Hoang, V. N. Nguyen, “Numerical investigation on melting and energy storedensity enhancement of phase change material in ahorizontal cylindrical container”, *International Journal of Energy Research*, Vol. 46, pp.19138-19158, June 2022.
DOI: <https://doi.org/10.1002/er.8228>

[8] M. A. Messenger, C. J. Troxler, I. Melendez, T. B. Freeman, N. Reed, R. M. Rodriguez, S. K. S. Boetcher, “Mechanical and Thermal Characterization of Phase-Change Material and High-Density Polyethylene Functional Composites for Thermal Energy Storage”, *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 145, pp.061006, Dec. 2023.
DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4062197>

[9] Ravi Kandasamy, Xiang-Qi Wang, Arun 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>

[10] V. Kapsalis, D. Karamanis, “Solar thermal energy storage and heat pumps with phase change materials”, *Applied Thermal Engineering*, Vol.99, pp.1212-1224, April 2016.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.01.071>

[11] Giulia Fredi, Andrea Dorigato, Luca Fambri, Alessandro Pegoretti, “Multifunctional structural composites for thermal energy storage”, *Multifunctional Materials*, Vol.3, pp.1-34, Nov. 2020.
DOI: <https://doi.org/10.1088/2399-7532/abc60c>

[12] D. Rozanna, T. G. Chuah, A. Salmiah, Thomas 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>

[13] A.U. Chaudhry, A. Mabrouk, A. Abdala, “Thermally enhanced pristine polyolefins: fundamentals, progress and prospective”, *Journal of Materials Research and Technology*, Vol.9, No.5, pp.10796-10806, July 2020.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.07.101>

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

김 명 준(Myoung-Jun Kim)

[정회원]



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

<관심분야>

열전달, 축열분야, 열에너지 회수