

잠열물질을 이용한 열저장 기술에 관한 연구

김 정 열 · 정 동 열 · 박 동 호 · 백 중 현*

한국생산기술연구원 충청권지역본부 에너지융합기술센터

Study of Thermal Storage Technology using Phase Change Material

Jeong-Yeol Kim · Dong-Yeol Chung · Dongho Park · Jong-Hyeon Peck*

Energy Conversions Technology Center, Korea Institute of Industrial Technology, 89 Yangdaegiro-gil, ipjang-myeon, Seobuk-gu, Cheonan-si, Chungnam 331-822, Korea

(Received 2012. 04. 02. / Accepted 2012. 05. 07.)

Abstract : The cold chain system in South-East Asia is requiring to maintain freshness of refrigerated or frozen food. In this study, Thermal storage system using Phase change material (PCM) was developed and evaluated its performance about temperature and cold keeping time . For various application of cold chain system, we developed portable cold box, cold roll container and freezing station. Keeping time on laboratory tests of portable cold box in case of refrigeration and freezing were 6 hours and 4 hours, respectively. Cold container was developed to 2.5 ton scale. Evaluation in Indonesia, it was showed to keep the setting temperature of -10°C over 40 hours at 30 °C of ambient air. Freezing station using PCM was kept over 24 hours under -20°C.

Key words : Latent heat material(잠열물질), Phase change material(상변화 물질), 열저장(Thermal storage), 이동형 저온 박스(portable cold box), 저온 컨테이너(cold container), 냉동 창고 (freezing station)

1. 서 론

최근 농수산물 수입자유화에 따른 시장개방 확대 및 대형 유통업체 성장 등으로 신선식품의 유통량이 급격하게 증가하고 있다. 이러한 신선식품 유통을 위해 냉동/냉장 창고 및 수·배송용 차량 등의 저온유통 시스템(cold chain system)에 대한 필요성이 부각되고 있으나, 저온물류시스템을 구축하기 위한 산지유통센터, 예냉설비, 저온저장고 및 저온차량 등의 막대한 투자비용 및 운영비 등 추가적 비용의 발생으로 물류비용의 상승이 동반되는 문제점이 있다.

또한 연 평균기온이 30°C 내외인 동남아시아에서는 기후특성뿐만 전기 공급이 불규칙하여 냉동기를 상시 사용할 수 없으며, 이에 따라 장시간 저온 상태를 유지할 수 있는 잠열물질(phase change material, PCM)을 이용한

저온 열저장 시스템의 개발이 요구되고 있다.

미국, 유럽 및 일본 등의 주요 선진국에서는 이미 체계적인 저온유통이 이루어지고 있으며, 잠열물질을 이용한 축냉식 저온유통시스템을 수·배송에 적용하여 활용을 확대하고 있다. 이러한 잠열물질을 냉동박스 및 저온 컨테이너 등에 이용하기 위하여, 최근 온도대별 잠열물질 개발, 잠열물질이 충전된 축냉모듈의 열전달 해석 등 많은 연구가 진행되고 있다.¹⁻³⁾

본 연구에서는 동남아시아 중 인도네시아의 기후 조건 및 저온유통시스템을 고려하여 현지 실정에 맞는 축냉식 저온 시스템을 개발하고, 현지 실증 시험을 통한 적용 가능성을 고찰하고자 한다.

2. 잠열물질을 이용한 축냉식 저온 시스템

저온유통시스템은 생산지에서 소비자까지 적절한 온도로 지속적으로 유지하는 것이 중요하며, 잠열물

*Corresponding author, E-mail: pjh6260@kitech.re.kr

질을 이용한 냉장/냉동 시스템에 적용할 경우 내부 열 전달을 고려하여 잠열물질의 상변화온도를 내부 사용 온도(고내온도)보다 5~10°C 정도 낮게 선정되어야 한다. 이에 따른 저온 잠열물질, 축냉모듈을 개발하여 사용 온도 조건의 부합정도를 평가를 하였다.

2.1 잠열물질 개발

잠열물질을 일반적으로 두가지 이상의 혼합 또는 화합물질로 제조되며, 다음과 같은 조건을 만족해야 한다.⁴⁾

- 사용온도에 적합한 온도를 가진 용액
- 잠열량 및 기타 열적 물성이 우수한 용액
- 과냉각(super cooling) 현상이 적은 용액
- 장기간의 상변화 과정에서 변형이 없는 물질
- 가격이 저렴하고 독성이 적은 물질
- 환경 친화적인 물질
- 부식성이 작고, 화학적으로 안정된 물질

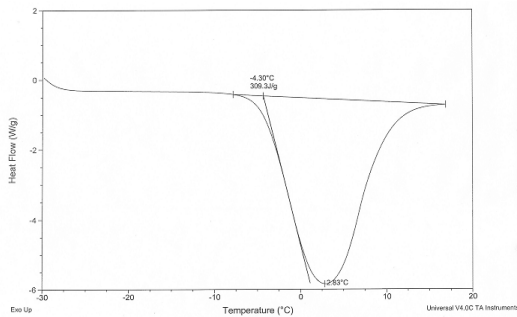
이상의 조건들을 기준으로 최종 대상 잠열물질을 선정하였으며, Fig. 1에 냉장 및 냉동용 저온 잠열물질의 DSC 분석결과를 각각 나타내었다. 온도 조건별 잠열량 및 밀도는 Table 1과 같다.

2.2 축냉모듈 해석

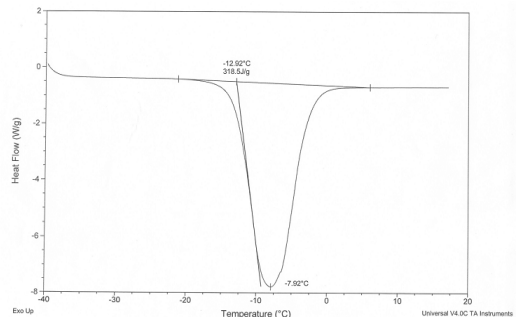
축냉모듈 내부 냉매배관을 통해 잠열물질을 축냉 할 때 상변화에 따른 열전도 저항에 의한 영향을 고려해야 한다. Fig. 2는 잠열물질을 물로 사용하였을 때,

Table 1 저온 잠열물질의 잠열량과 밀도

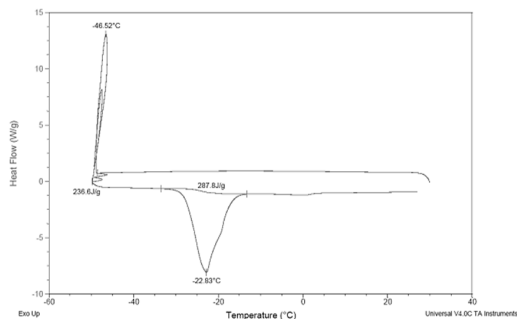
	상변화온도(°C)	잠열량(kJ/kg)	밀도(g/cm ³)
냉장용	-4.5	309.3	0.99
	-12	318.5	1.08
	-16	294.5	-
냉동용	-21	330.7	1.23
	-26	287.8	1.17
	-29	280.8	-



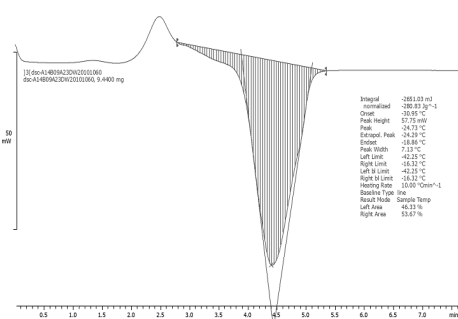
(a) -4.5°C급 저온잠열제



(b) -12°C급 저온잠열제



(c) -26°C급 저온잠열제



(d) -29°C급 저온잠열제

Fig. 1 저온 잠열물질 DSC 분석 결과

원통형 관에서 시간에 따른 응고과정의 수치해석 결과이며, 초기 총 액체면적 대비 응고면적을 그래프로 나타내었다. 수치해석은 FLUENT 6.3 소프트웨어를 사용하였으며, VOF(Volume-of-fluid) model과 응고 model을 적용하였다.⁵⁾ 용기의 외부 직경 80mm, 냉매 배관 직경 10mm 구조에서 초기 잠열물질 온도 300K, 냉매배관 온도 253K 조건으로 계산되었다. Fig. 2에서 보는 바와 같이, 시간에 따라 냉매배관 주위에 응고 면적이 증가됨을 알 수 있다. 이러한 응고 면적 증가는 냉매배관과 액상 잠열물질 사이의 열저항을 증가시켜 열전달 속도를 낮추게 되며, 축냉에 필요한 열에너지보다 과도한 열에너지를 장시간 공급해야하는 원인이 된다. 이에 총 응고시간 및 소비 에너지를 줄일 수 있는 냉매배관과 축냉모듈의 접합구조 및 축냉모듈 형상 등에 관한 설계가 필요하다.

2.3 축냉모듈 설계

현재 축냉을 이용한 냉동/냉장분야에서는 축냉판 또는 냉각판과 같은 축 모듈이 일반적으로 사용되고 있다. 일반적으로 축냉모듈의 용기 외부는 0.5~2mm 정도의 얇은 금속재질을 사용하며, 내부는 냉매배관을 설치한 구조를 갖는다.

하지만 금속용기를 사용한 축냉모듈은 과도한 하중, 잠열물질에 의한 부식 및 상변화시 발생하는 부피변화(모듈내부의 압력변화)에 따른 모듈의 변형 또는 파손 등의 문제점이 있다. 본 연구에서는 폴리에틸렌(polyethylene: PE) 재질을 축냉모듈 용기에 적용함으로써 이러한 문제들을 해결하고자 하였으며, blowing 성형을

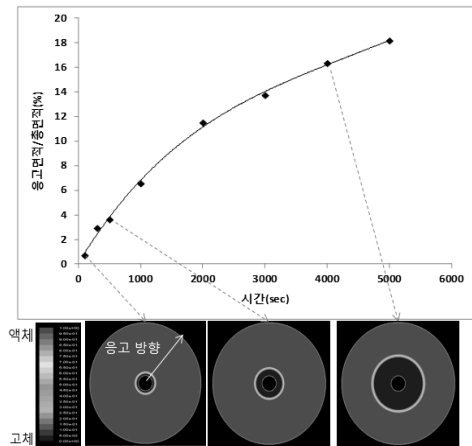


Fig. 2 저온 축냉모듈 내부 응고 형상

통한 대량 생산이 가능하도록 하였다. 또한, 본 연구에서는 축냉모듈이 적용되는 장치에 따라 다양한 형태로 제작하였으며, Fig. 3에 축냉모듈 설계 모습을 나타내었다.

3. 성능시험 및 결과

본 연구에서는 개발된 잠열소재 및 축냉모듈을 저온 물류시스템에 적용하기 위해 각 장치별로 제작 및 성능 시험을 수행하였다. 제작 및 성능시험 장치는 이동형 저온 박스(portable cold box), 차량형 저온 컨테이너(cold container), 축냉식 냉동 창고(freezing station) 이다.

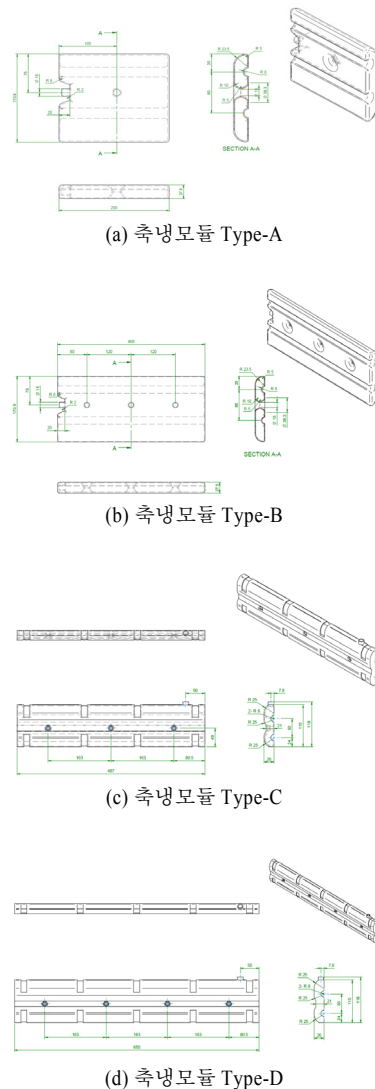


Fig. 3 저온 축냉모듈 형상

3.1 이동형 저온 박스

Fig. 4는 이동형 저온 박스의 시제품 제작 모습이다. 저온 상자의 외형 크기는 539mm × 416mm 이다.

저온 잠열소재를 3kg 충전하였으며, 인도네시아 현지의 기후조건을 고려하여 외기 온도 조건을 약 35°C 에서 일정하게 유지하여 실험 하였다. T-type 열전대를 이용하여 내·외부 온도를 측정하였으며, 온도대 별 저온 잠열소재 시험 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 냉장용 -4.5°C급과 -12°C급 잠열소재의 경우 냉장 온도 +5°C 이하를 각각 약 6시간과 8시간을 일정하게 유지 시키는 것을 확인하였다. 그리고 냉동용 -26°C급과 -

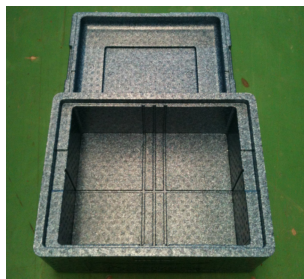


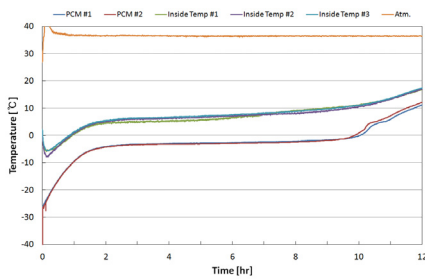
Fig. 4 이동형 저온 상자 제작품

29°C급 잠열소재의 경우 -5°C이하를 각각 약 4시간과 5시간을 일정하게 유지시키는 것을 확인하였다.

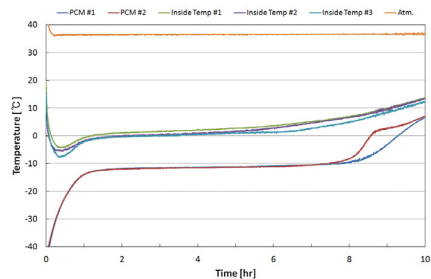
3.2 차량형 저온 컨테이너

차량형 저온 컨테이너 성능 시험을 위하여 인도네시아 현지에서 2.5ton급 시스템을 구축하였으며, Fig. 6에 제작 모습을 나타내었다. 컨테이너의 외형 크기는 4,200mm × 2,000mm 이며, 축냉모듈은 컨테이너 내부의 상부와 앞면에 설치하였다.

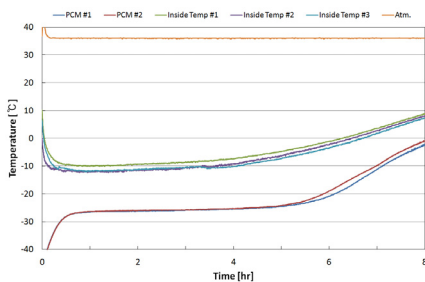
차량형 저온 컨테이너 성능 시험은 1일간 운전시험과 6일간 실증 시험 결과를 통해 평가하였다. 1일간 운전 시험은 외기 조건 30°C 이상에서 축냉과 방냉 시의 내·외부 온도를 측정하여 평가하였으며, Fig. 7에 1일간 운전 시험의 결과를 나타내었다. 축냉 시 총 16시간이 소요되었으며, 방냉 시 온도조건 -10°C 이하를 총 40시간 유지할 수 있음을 확인하였다. Fig. 8은 총 6일간 축냉과 방냉을 인도네시아 현지에서 연속적으로 반복 실험한 결과이다. 현지 전기 사정으로 72시간째 축냉이 불안전하였으나, 방냉 시 온도조건 -10°C 이하를 모두 만족하였음을 확인하였다.



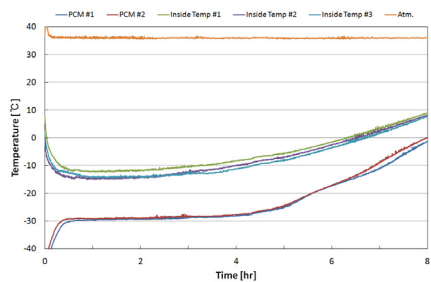
(a) -4.5°C급 저온잠열재



(b) -12°C급 저온잠열재

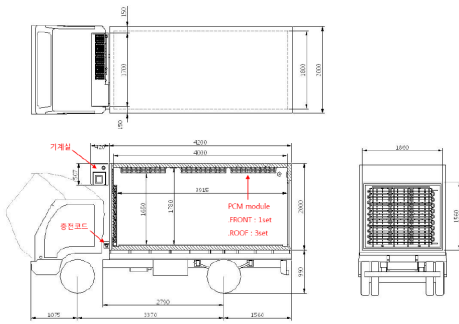


(c) -26°C급 저온잠열재



(d) -29°C급 저온잠열재

Fig. 5 이동형 저온 상자 성능평가 결과



(a) 2.5 ton급 차량형 저온 컨테이너 구성도



(b) 2.5 ton급 차량형 저온 컨테이너 제작 모습

Fig. 6 2.5 ton급 차량형 저온 컨테이너

3.3 축냉식 냉동 창고

축냉식 냉동 창고의 인도네시아 현지 구축을 통한 실증 평가를 수행하였다 인도네시아 현지의 전력공급은 전력 공급 사정으로 하루에 12~15 시간만 공급되어 기존 전기 냉동기 방식을 사용하기 어렵다.

이에 본 연구에서는 잠열소재를 적용한 축냉식 냉동 창고를 이용하여 전력공급시간 내에 축냉을 완료하고 온도조건 -20°C 이하를 유지시키고자 하였다.

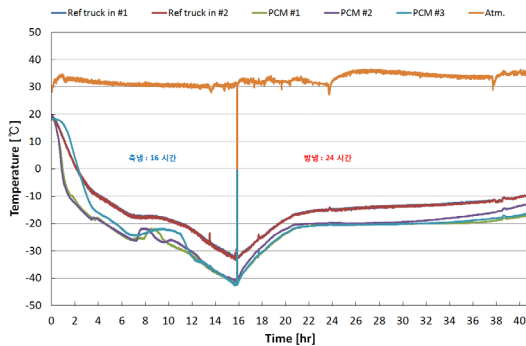


Fig. 7 2.5 ton급 차량형 저온 컨테이너 1일 운전 패턴

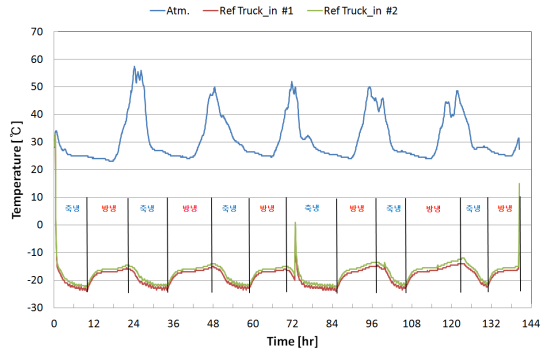


Fig. 8 2.5 ton급 차량형 저온 컨테이너 6일 운전 패턴



Fig. 9 축냉식 냉동 창고 모습

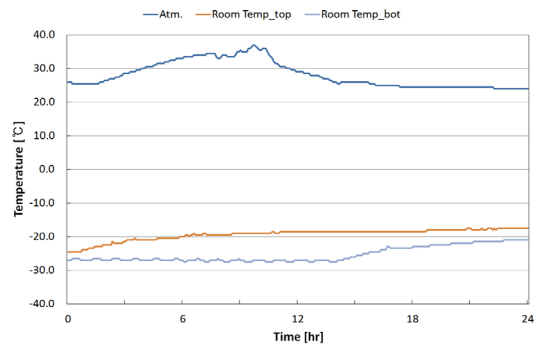


Fig. 10 축냉식 저온 냉동 창고 1일 운전 패턴

Fig. 9는 인도네시아 현지 구축한 축냉식 냉동 창고 모습이다.

Fig. 10은 1일간 축냉된 잠열소재에 의한 냉동 창고 내·외부 온도변화를 나타내었다. 외기온도가 최대 35°C 외기조건에서도 내부 평균온도가 -20°C 이하로 유지됨을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 인도네시아의 기후조건 및 저온유통시스템을 고려하여 현지 실정에 맞는 축냉식 저온시스템의 개발하였으며, 현지 실증 시험을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 이동형 저온 박스(portable cold box)를 개발하였으며, 최소 냉장/냉동 유지시간은 각각 약 6시간과 약 4시간이었다.
- 2) 차량형 저온 컨테이너(cold container)를 개발하여 현지 시험 평가를 수행하였으며, 축냉 소요시간은 총 16시간, 방냉 시 온도조건 -10°C 이하를 총 40시간 유지할 수 있었다.
- 3) 축냉식 냉동 창고(freezing station)를 개발하여 현지 시험 평가를 수행하였으며, 외기온도가 최대 35°C 외기조건에서도 24시간 이상 내부 평균온도가 -20°C 이하로 유지됨을 확인하였다.

한국-인도네시아간 저온 유통 시스템에 관해 공동연구가 지속되고 있으며, 향후 잠열물질을 이용한 축냉식 냉동시스템의 에너지 효율 향상 관한 추가 연구를 수행할 예정이다.

Acknowledgement

본 연구는 한국생산기술연구원 연구개발적립금사업을 통해 지원되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- 1) A. O. Nayak, G. Ramkumar T. Manoj, and R. Vinod, "Comparative study between experimental analysis and CFD software analysis of PCM material in thermal energy storage System", *Int. J. Chem. Eng. & App.*, 2 (6), pp. 400-407, 2011
- 2) A. Sharma, V. V. Tygai, C. R. Chen, and D. Buddhi, "Review on thermal energy storage with phase change materials and applications", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, pp.318-345, 2009
- 3) R. Akhilesh, A. Narasimhan, and C. Balaji, "Method to improve geometry for heat transfer enhancement in PCM composite heat sinks", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 48, pp. 2759-2770, 2005
- 4) J. H. Peck and S. S. Park, "Development of hold-over truck system using PCM", *The 2nd Korea Congress of Refrigeration*, pp. 77-80, 2008
- 5) E. Assis, L. Katsman, G. Ziskind, and R. Letan, "Numerical and experimental study of melting in a spherical shell", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 50, pp. 1790-1804, 2007