

단열용기의 잠열재 배치에 따른 내부 온도 균일성에 대한 영향

지형용^{1,2*} · 정동열^{1,2} · 최석천¹ · 김정열¹

¹한국생산기술연구원 청정기술연구소

²전북대학교 기계공학과

Effect of Latent Heat Material Placement on Inside Temperature Uniformity of Insulated Transfer Boxes

HyungYong Ji^{1,2*}, Dong-Yeol Chung^{1,2}, Seuk Cheun Choi¹, and Joeng-Yeol Kim¹

¹Research Institute of Clean Manufacturing System, Korea Institute of Industrial Technology

²Department of Mechanical Engineering, Jeonbuk National University

Abstract An optimized design of the transportation insulated box must be considered to control the thermal damage in order to maintain the fresh condition for temperature-sensitive medicine and frozen food safety. The inside temperature of the insulated box is a natural convection enclosure state, thermal stratification naturally occurs as time passes in case of with outside heat load. The latent heat material (LHM) placement inside the box maintains the target temperature of the product for temperature fluctuations during transport, and LHM application is a common and efficient method. In this work, inside temperature stratification in an insulated box depending on the LHM pack position is numerically simulated and experimented. The insulated box is made up of vacuum insulation panel (VIP), and LHM modules are placed over six faces inside the box, with the same weight. The temperature curves for 72 hrs as experiment results clearly show the temperature stratification in the upper, middle, and lower at the LHM melting time region. However, the temperature stratification state is uniformly changed in accordance with the condition of the upper and lower placement weight of the LHM pack. And also, the temperature uniformity by changed placement weight of LHM has an effect on maintaining time for target air temperature inside the box. These results provide information on the optimized design of the insulated box with LHM.

Keywords Cold chain system, Insulated box, Latent heat material, Temperature stratification

서론

콜드체인시스템은 제품의 저장 및 운송과정에서 상온보다 낮은 저온 상태에서 제품의 적정온도를 일정하게 유지하여 수송하는 시스템으로, 제품은 농수산물, 가공식품, 하위, 의약품 등을 말하여, 적정온도는 생물학적 반응을 억제하여 제품의 신선도를 유지하는 것을 의미한다. 콜드체인시스템에서 고려되어야 하는 사항으로 온도의 변화가 최소화될 수 있는 보관조건, 제품의 적재와 하역과정에서 온도변

화의 위험성 최소화, 보관/저장고의 높은 단열성능, 유통제품마다의 필요한 온도 조건 등을 들 수 있다. 요구사항을 충족시키기 위해 저온 LHM(Latent heat material)을 적용한 저장 및 운송 시스템은 매우 효과적인 구성이라고 볼 수 있다^{1,2)}. 저온 LHM이 가지고 있는 두 가지의 중요한 특성은 일정한 상변화온도를 갖는 것과 냉동기에 의한 축냉 과정이 완료된 후 특정 시간 동안에 열흡수와 동시에 보냉유지가 가능하다는 것이다. 이러한 이유로, LHM은 저온 냉동창고, 냉장/냉동 박스 및 냉동탑차 등 콜드체인시스템에 통합적으로 이용되고 있고, 단열구조와 복합구성으로 많은 연구가 수행되었다. 최근 음식 배달 시장의 급성장과 새벽 배송 서비스의 등장에 맞춰 신선식품 및 의약품용 저온물류 용기는 특히 고성능의 보냉 효과를 요구하고 있다^{2,4)}. 하지만 저온물류 용기의 정밀한 보냉 효과를 구현하기에,

*Corresponding Author: HyungYong Ji
Research Institute of Clean Manufacturing System, Korea Institute of Industrial Technology
Tel: +82-41-589-8357
E-mail: jhyong@kitech.re.kr

LHM의 적용은 두 가지 문제점을 해결할 필요가 있다. 먼저, 단열용기의 자체 온도에 따라 LHM의 용해 시간에 큰 영향을 보이며 온도 유지시간을 제어하기 어렵다. 외부 부하에 따라 보냉 효과를 목표 시간까지 지속하기 위해 열관류율이 낮은 단열재가 개발되고 있지만, 단열용기 자체 초기온도에 따른 LHM의 예상 용해 시간은 차이가 크다. 그리고 단열용기 내부에서 LHM에 근접한 위치와 더 떨어진 위치에서 온도 차이가 발생한다. 단열용기 내부는 밀폐공간의 자연대류 상태로 LHM의 상변화시 대류에 의한 내부공기의 온도변화가 발생하고, 이때 위치에 따른 온도차이가 발생하는 현상을 보인다.⁵⁾ 이 문제는 대상제품의 동결에 의한 세포손상 및 적정온도보다 다소 높은 온도에 의한 박테리아 성장과 같은 제품 품질 저하를 초래할 수 있고⁶⁾, 이를 개선하기 위하여 LHM이 있는 단열용기의 온도분포 및 유체현상에 대하여 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)을 바탕으로 국내 대비 해외에서 많은 연구와 실험이 수행되었다. Du et al.⁷⁾은 이송용기의 내부에 상부, 하부, 측면에 LHM 배치조건을 달리하여 유지온도 시간에 대하여 실험하였고, 상부와 하부에 단독으로 LHM을 배치하는 것보다 측면을 함께 배치하는 것이 월등히 오랜 시간 유지되는 것을 발표하였다. Laguerre et al.⁸⁾은 LHM의 위치에 따라 용해정도가 달라진다고 얘기하였고, Jevnikar et al.⁹⁾은 LHM을 사용한 단열용기의 내벽에 인접한 LHM의 용해과정에서 불규칙한 자연대류에 현상에 대해 서술하였다.

일반적으로 식품 및 의약품용 냉장제품에 대한 단열 이송용기는 2~8°C의 온도 범위에서 이송 거리 및 시간을 고

려하여 온도범위를 유지하는 시간을 설정하고, 5°C의 상변화온도를 갖는 LHM을 사용한다. 이와 함께, 장시간 외부 부하에 대응하는 단열용기의 크기 및 LHM 투입량과 용이한 운송을 위한 경량화 설계는 주요 고려사항이다. 본 연구에서는 LHM을 적용한 냉장용 단열용기의 최적 설계를 위하여 5°C급 LHM을 이용하여 저온 보냉 성능을 파악하고, 동일한 무게에서 LHM의 배치 비중에 따른 내부 온도분포 및 균일성에 관하여 수치해석과 검증실험을 수행하였다.

실험 및 해석 방법

본 실험에서 사용한 단열용기는 외경 390×390×390 mm에 두께 20 mm의 PET (Polyethylene terephthalate) 기반 글라스울(glasswool) 심재를 활용한 진공단열재(Vacuum insulation panel, VIP)로 구성되어 있다. 평판형 VIP 판을 상/하부, 측면부로 구분 제작하고, 절곡 및 조립하였고 외부충격에 보호하기 위하여 외피재로 마감된 형태이다. Fig. 1은 실험에서 사용한 5°C급 LHM의 동결상태(a)와 VIP 단열용기에 LHM팩을 배치한 사진(b), LHM의 DSC (Differential Scanning Calorimeter) 측정값(c)에 대한 것이다. DSC는 Perkin Elmer사의 DSC6000을 이용하였고, 잠열량은 202.6 J/g이며, 동결 및 용해 구간은 5~7°C임을 확인하였다. LHM팩은 14.4 kg의 LHM을 17의 팩으로 나눠 제작하였고 -5°C로 설정된 항온챔버에서 약 48시간 동안 냉동하여 높은 동결상태를 보였다. Fig. 1(b)에서 보는 바와 같이 4.8 kg의 LHM을 내부에 배치한 단열용기 3개를 각각 준비하여, 용기의 외기부하 조건을 환경챔버에서 72시간 동

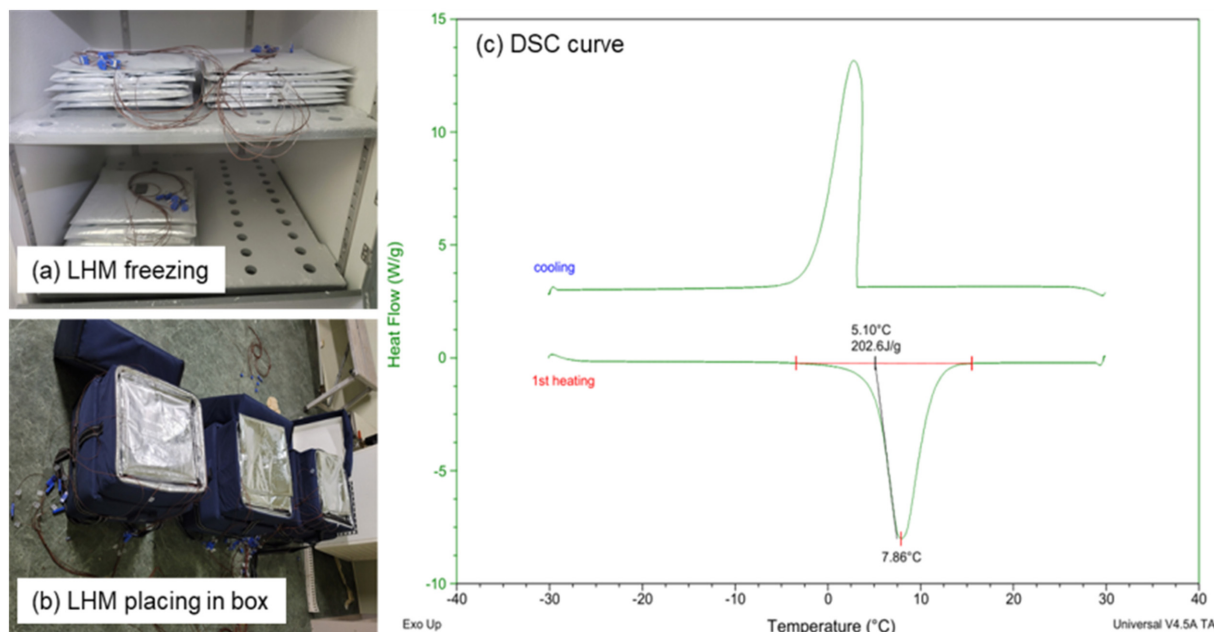


Fig. 1. Experimental photographic images and DSC curve.

Table 1. Experiment and simulation condition, and the properties of VIP and LHM

Experiment Condition			
3-type Box	Box_1 (ID: LHM 6_1)	Box_2 (ID: LHM 6_2)	Box_3 (ID: LHM 5)
5°C LHM Module Placement	800 g, 6ea / Six side	1,200 g 1ea / Upper	1,600 g 1ea / Upper
		800 g 4ea / Side	800 g 4ea / Side
		400 g 1ea / Lower	not placing at lower
Simulation condition			
5 case for LHM Position	Change of Upper(Top) and Lower(Bottom) design thickness(mm) = ID: (1)T10/B10, (2)T15/B5, (3)T20/B0		
Properties of VIP and LHM			
Parameter	VIP	LHM	Unit
Specific heat	134	2,200	J/(kg·K)
Heat of fusion	-	202.6	kJ/kg
Density	170	765	kg/m ³
Thermal conductivity	0.004	0.1363	W/(m·K)
Outside Temp.	35°C		

안 35°C에 노출하는 것으로 설정하였다. 이때 Table 1의 실험조건으로, LHM팩의 배치조건을 (1)800 g의 LHM 6개를 6면에, (2)상부 LHM 1,200 g 1개, 측면 800 g 4개, 하부 400 g 1개, (3)상부 1,600 g 1개, 측면 4개로 구분하여 LHM 배치 비중을 달리하였다.

LHM 배치조건에 따른 단열용기 내부 온도특성에 대한 실험조건과 유사한 조건으로 해석을 수행하였다. LHM 배치에 대한 해석조건은 LHM의 모델링 설계두께를 변화하여 상/하부의 비중조건을 구분하였다. VIP로 구성된 단열용기 내부에 5°C의 상변화를 갖는 10 mm 두께(기준)의 LHM이 배치되어 있다. LHM 모델링 설계두께는 상/하부 20 mm를 기준으로 (1)10:10, (2)15:5, (3)20:0으로 구분하였고 물성치는 측정값과 문헌을 참고하였다.^{7,12)} 내부온도의 자연대류를 고려하고 단열용기 내부 공기와 LHM의 초기 온도 5°C와 외부 침입 부하 35°C에서 노출되는 조건으로

설정하여 해석을 수행하였다.

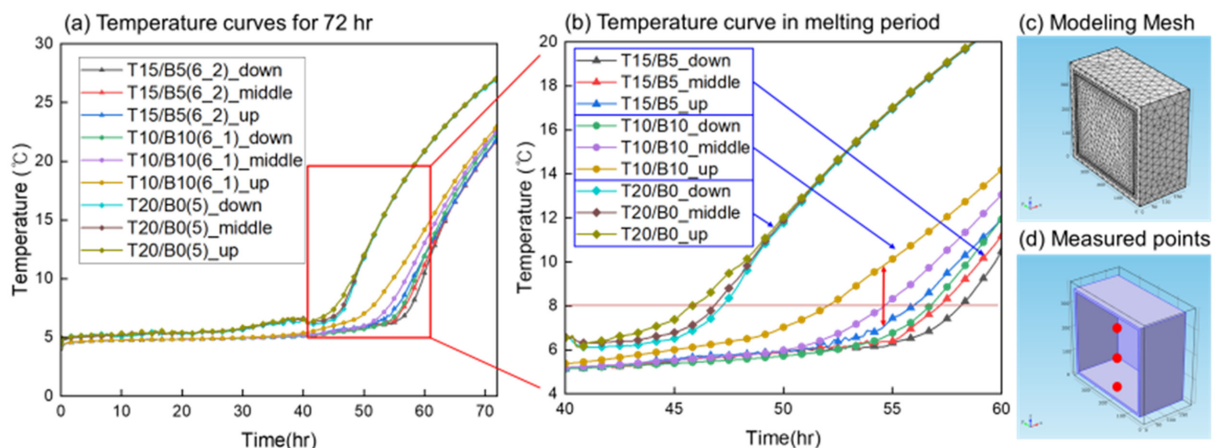
본 연구에서 단열용기 내부의 온도분포 현상을 확인하기 위하여 COMSOL Multiphysics의 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD) 열유동 모델을 활용하였고, 유동 및 대류 열전달 편미분방정식을 기반으로 비정상상태의 열전달 과정에서의 열유동 지배방정식은 아래 식(1)~(3)으로 나타내었다.

a. 연속방정식 (Continuity equation)

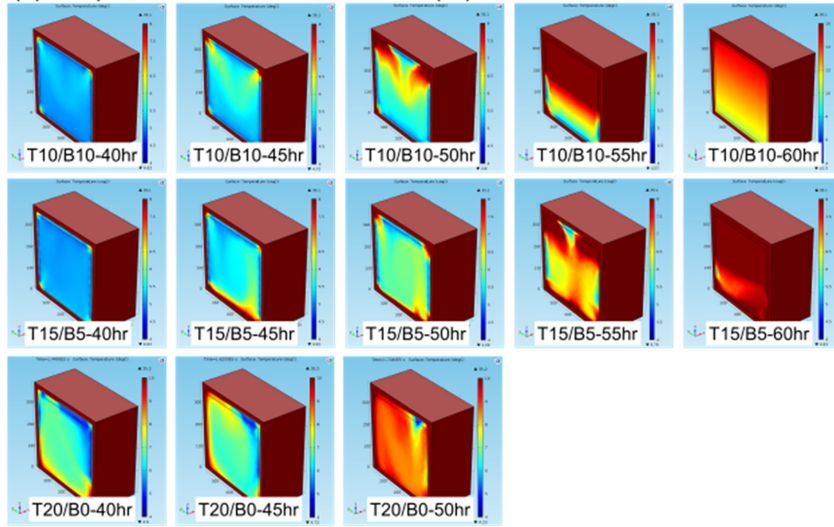
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

b. 운동방정식 (Momentum equation)

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho \mathbf{u} \cdot \nabla (\mathbf{u}) = -\nabla_p + \nabla \cdot (\mu (\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T)) + \mathbf{F} \quad (2)$$

**Fig. 2.** Temperature curves of simulated result for the inside air of insulated box with LHM.

(a) Temperature distribution, inside air (°C)



(b) Temperature distribution, LHM inside surface (°C)



(c) Velocity magnitude (m/s)

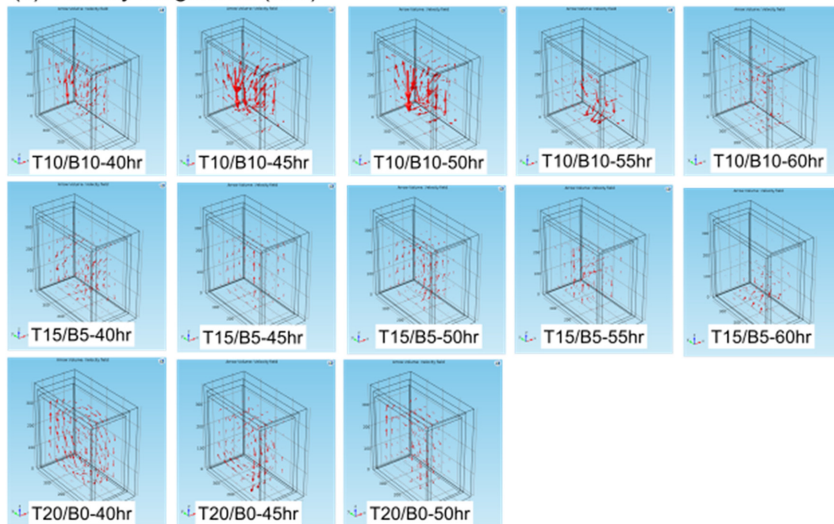


Fig. 3. Temperature properties of inside air(a) and LHM surface(b), and air flow distribution(c) for the insulated box in period of LHM melting.

c. 에너지방정식 (Energy equation)

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad (3)$$

여기서, t 는 시간, $\mathbf{u}$ 는 유속장, ρ 는 밀도(kg/m^3), p 는 압력, μ 는 점성계수, k 는 열전도계수(W/mK), C_p 는 비열용량, T 는 온도, Q 는 대류에 의한 열량(W)을 나타내고, 식 (3)의 좌변은 비정상상태를 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 단열용기 내부 CFD 열유동 특성

단열용기 내부 공기는 서론에서 언급한 바와 같이 밀폐된 자연대류 상태로, 외기 침입온도 부하가 존재하고 정대칭 단열구조의 용기 내부온도는 시간이 지남에 따라 상/하부 성층화가 발생한다. 따라서 단열용기 내부에 LHM을 배치할 때 상부 보안을 위하여 LHM 모듈의 상/하부 배치조건을 변경하는 것을 해석 및 실험의 기본 주안점으로 생각하였다. Fig. 2는 해석 결과로 단열용기(Mesh consists: 143,521, Boundary : 14,500, Edge : 681) 내부의 온도 곡선을 보여준다. 내부온도는 Fig. 2(d)에서와 같이 중앙 상/중/하부의 위치를 측정하였고 LHM 배치에 따른 온도편차를 확인하였다. 약 40시간이 지나면서 내부온도가 상승하기 시작하였고 60시간 이전에 모든 위치에서 목표 유지온도인 8°C 이내 범위를 이탈하였다. 약 48시간대에서 T20/B0 조건이 가장 빠르게 온도가 상승하였고, 이어서 T10/B10, T15/B5 순으로 목표 범위를 이탈하였다. 이때 조건별 상/중/하부의 온도편차를 확인할 수 있고, T10/B10 조건은 동일 시간에 약 3.5°C 의 온도편차를 보였지만 T20/B0과 T15/B5 조건은 2°C 이내의 편차를 보였다.

Fig. 3은 단열용기 내부 공기온도의 상승구간에서 LHM 배치조건에 따른 온도분포 특성을 보여준다. LHM이 용해되고 내부온도가 상승하는 40~60시간 구간에서 5시간 간격으로 내부공기(a) 및 LHM표면(b)의 온도분포($4\sim 8^\circ\text{C}$), 공기 유속(c)에 관한 해석 결과 이미지이다. Fig. 3(a)의 내부공기 온도분포에서, T10/B10 조건의 단열용기는 상부 가장자리 부분에서 침입부하에 의한 온도상승이 시작하면서 하부로 온도가 상승 전파하였고, 55시간에서는 내부공기 상/하부 온도성층화를 보인다. 유사하게 T15/B5 조건의 단열용기도 상부 가장자리에서 초기 침입부하가 발생하였지만, T10/B10 조건에 비해 온도 성층화 현상이 약하게 나타나고, T20/B0 조건에서는 온도편차가 상대적으로 균일한 현상을 볼 수 있다. Fig 3(b)의 LHM 표면의 온도분포에서 외부 침입부하에 의한 LHM의 용해 구간과 순서를 확인할 수 있다. T10/B10, T15/B5 조건의 LHM 가장자리에서 용해가 시작되고 차츰 벽면의 중앙부로 확산한다. 단일격자 상태에서 벽면보다 외부 부하에 노출되는 면적이 넓은 가장자리 영역에서 먼저 온도상승이 시작되고 내부공기와 열류에 의해 상/하부 LHM의 용해 구간 차이를 확인할 수 있다.¹⁰⁻¹¹⁾ Fig. 3(c)는 내부공기의 유속에 대한 것으로, 화살표의 굵기가 두꺼울수록 유속이 크다. T10/B10 조건의 45, 50시간 온도분포와 같이, 성층화가 보이는 구간에서 상부에서 하부로 빠르게 유속이 발생하지만, 온도분포가 상대적으로 균일한 T15/B5와 T20/B0 조건에서 유속은 약한 와류현상을 볼 수 있다. 특히 T20/B0 조건의 40시간에서 하부의 높은 온도와 상부의 낮은 온도의 밀도차에 의해 발생하는 대류의 회전 상태를 확인할 수 있다.

단열용기 내부의 공기흐름은 LHM 벽면의 온도상승으로 인한 고온측에서 저온측으로 밀도변화에 의한 부력의 영향으로 유동이 발생한다. LHM의 용해 순서에 따라 상부에서

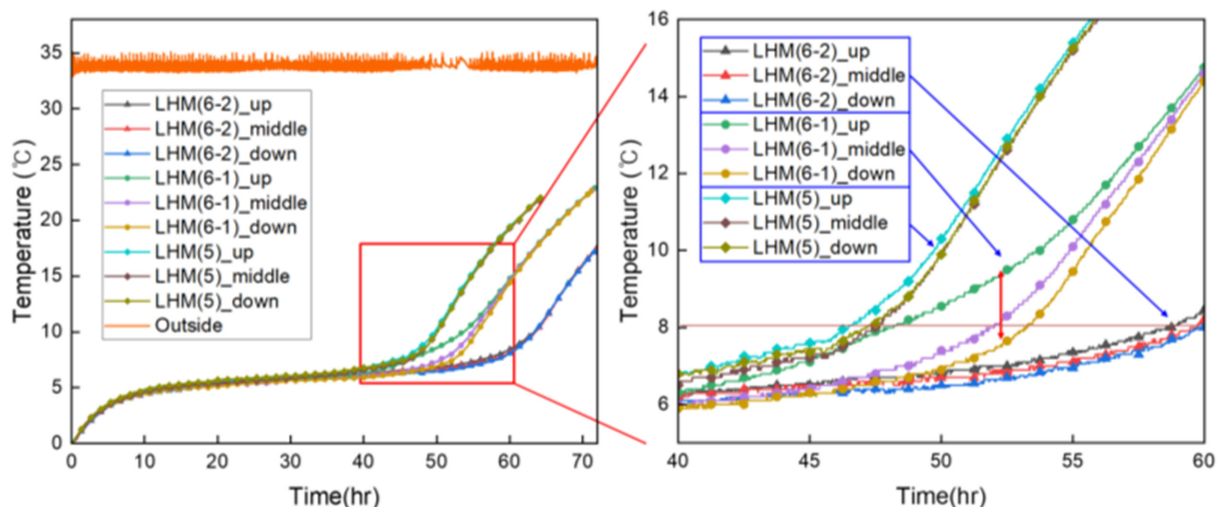


Fig. 4. Temperature curves of experimented result for the inside air of insulated box with LHM.

Table 2. Maintenance time and temperature properties for experiment and simulation

Simulation	T10/B10			T15/B5			T20/B0		
Maintenance time within 8°C (hr)	up	middle	down	up	middle	down	up	middle	down
	52	54	57	56	57	58	45	46	47
Max. temperature difference (°C)	3.5			2.1			1.2		
Experiment	LHM6_1			LHM6_2			LHM5		
Maintenance time within 8°C (hr)	up	middle	down	up	middle	down	up	middle	down
	47	51	53	58	59	59	46	47	47
Max. temperature difference (°C)	2.3			0.8			0.7		

먼저 녹으면 T10/B10 조건과 같이 중앙에서 하강 유동이 발생하고, T20/B0 조건과 같이 하부에서 먼저 녹으면 상승과 하강 유동이 충돌하며 고르게 분포하는 현상을 보인다.¹²⁻¹⁴⁾ 하지만, T20/B0 조건은 다른 조건에 비해 8°C 이내 유지 시간을 빠르게 벗어나며 알맞은 구성으로 보기 어렵다.

3.2. 단열용기 내부온도 측정실험 결과

Fig. 4는 LHM 배치조건에 따른 단열용기 내부 온도측정 실험결과이다. Table 1의 실험조건과 같이 LHM 배치조건이 다른 3개의 단열용기는 환경챔버 35°C에서 72시간 동안 노출되고, 수치해석 (Fig. 2)의 측정 위치와 같이 단열용기 내부 중앙의 상/중/하부 온도를 측정하였다. T-type 열전대로 온도를 측정하고 MV1000 (Yokogawa) Logger를 통해 데이터를 확보하였다. 5°C의 온도 범위에서 등온을 유지하는 온도는 40시간이 지나면서 상승곡선이 발생하고, 50시간이 지나면서 상/하부 LHM 용량이 동일한 LHM6_1 (T10/B10) 조건은 상/하부 온도편차를 보인다. 반면, 상부에 LHM 배치 비중이 많은 LHM6_2(T15/B5)와 LHM5(T20/B0) 조건은 낮은 온도 차이를 보이며 해석 결과와 유사한 현상을 확인할 수 있다. Table 2는 8°C 이내 온도 범위 유지 시간과 같은 시간대 상/하부 최대 온도 차이에 관한 해석과 실험의 결과이다. 앞선 해석 결과에 비교하여 실험 결과는 LHM 3가지 배치조건 모두 작은 온도편차와 8°C 이내 유지 시간도 다소 차이를 보이지만, 조건에 따른 내부 온도 성층화 현상 및 범위의 순서는 같은 결과를 보인다. LHM의 동결상태는 유지 시간에 영향을 미치는데, 초기 온도 기준으로 실험 결과의 해빙 시간이 해석 결과에 비해 빠른 이유는 단열용기의 열 손실과 LHM팩 내에서 해빙되는 LHM의 높은 열전달에 의한 것이며, 이에 따라 실험에서 상대적으로 내부 공기의 강한 대류가 형성되며 내부 공기 온도는 해석 대비 작은 편차 결과를 보인다.^{7,15,16)}

요 약

본 연구에서는 저온물류 시스템의 단열용기의 온도유지 성능에 대하여 5°C급 저온 LHM을 배치하였을 때 배치구

성 조건에 따른 온도특성을 확인하였다. LHM을 단열용기 내부에 배치하였을 때 6면과 5면에 상/하부 배치 비중에 차이를 두고 외기부하에 따른 내부 공기 온도균일도 및 목표 온도 유지시간을 분석하였다. 단열용기 내부 공기는 상부의 상승온도와 이때 발생하는 밀도차에 의한 공기 대류 현상이 온도 성층화를 발생시키고, 균일도를 확보하기 위해 LHM의 상부 배치 비중이 하부보다 컸을 때 균일성이 높고 유지 시간이 오래 지속되는 것을 확인하였다. 다만, 상부 배치 비중을 높이기 위해 하부 배치를 제외한 조건에서 높은 균일성을 보이지만 짧은 유지 시간으로 보여 적정조건으로 알맞지 않다. 결과적으로 단열용기의 단열재 대칭구성과 LHM의 동일한 중량을 배치하여 보냉용기를 제작할 경우, LHM의 전면 배치를 바탕으로 하부에 비해 상부 배치 비중을 늘렸을 때 내부 공기 온도의 분포 균일도와 유지시간 성능을 높이는데 효율적인 방안이라고 판단된다. 저온물류 보냉용기 성능분석에 있어, 본 연구를 기반으로 다른 조건의 상변화 온도와 잠열량을 갖는 다양한 저온영역대의 LHM을 적용한 수치해석을 수행하여 성능 예측 결과를 확보할 수 있고 온도 균일도를 위한 단열 및 잠열 복합 구성 이송 용기의 최적 설계조건 수립에 기여할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 청정생산기반산업공생기술 개발사업 “친환경 환경부하 저감형 단열재를 적용한 냉장·냉동용 단열포장용기 개발”의 지원으로 수행되었음.(No. 20015687)

References

1. Sha, Y., Hua, W., Cao, H. and Zhang, X., 2022. properties and encapsulation forms of phase change material and various types of cold storage box for cold chain logistics: A review, *Journal of Energy Storage*, 55(1): 105426.
2. Faraj, K., Khaled, M., Garaj, J., Hachem, F., and Castelain, C. 2020. Phase change material thermal energy storage

- systems for cooling applications in buildings: A Review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119(3): 109579.
3. Korakot, C., Kim, S.Y., Shin, Y.J., Jung, H.M., and Park, J.M. 2022. Measurement of delivery service environment for cold chain eps packaging system of fresh food, *Korean Journal of Packaging Science and Technology*, 28(1): 67-73.
 4. Yoo, S., Kwon, S. and Park, S., 2019. Status of Packaging Materials for Frozen Foods and Analysis of Temperature Changes inside Packaging Materials during Frozen Process, *Korean journal of packaging science and technology*, 25(1): 11-16.
 5. Leungtongkum, T., Flick, D., Hoang, H.M., Steven, D., Delahaye, A. and Laguerre, O. 2022. Insulated box and refrigerated equipment with PCM for food preservation: State of the art, *Journal of Food Engineering*, 317(3): 110874.
 6. Qi, T., Ji, J., Zhang, X., Liu, L., Xu, X., Ma, K., and Gao, Y. 2022. Research progress of cold chain transport technology for storage fruits and vegetables, *Journal of Energy Storage*, 56(10): 105958.
 7. Du, J., Niw, B., Zhan, Y., Du, Z., Wang and I., Ding, Y., 2022. Cooling performance of a thermal energy storage-based portable box for cold chain applications, *Journal of Energy Storage* 28(4): 101238.
 8. Laguerre, O., Ben Aissa, M.F. and Flick, D. 2008. Methodology of temperature prediction in an insulated container equipped with PCM, *International Journal of Refrigeration*, 31(6): 1063-1072.
 9. Jevnikar, S. and Siddiqui, K., 2019. Investigation of the influence of heat source orientation on the transient flow behavior during PCM melting using particle image velocimetry, *Journal of Energy Storage*, 25(10): 100825.
 10. Berdja, M., Hamid, A. and Sari, O. 2019. Characteristics and thickness effect of phase change material and frost on heat transfer and thermal performance of conventional refrigerator: Theoretical and experimental investigation, *International Journal of Refrigeration*, 97(1): 108-123.
 11. Kozak, Y., Farid, M. and Ziskind, G. 2017. Experimental and comprehensive theoretical study of cold storage packages containing PCM, *Applied Thermal Engineering*, 115(25): 899-912.
 12. Mao, S., Kan, A. and Wang, N. 2020. Numerical analysis and experimental investigation on thermal bridge effect of vacuum insulation panel, *Applied Thermal Engineering*, 169(25): 114980.
 13. Nie, B., Chen, J., Du, Z., Li, T., Zhang, T., Cong, L., Zou, B. and Ding, Y. 2021. Thermal performance enhancement of a phase change material (PCM) based portable box for cold chain applications, *Journal of Energy Storage*, 40(8): 102707.
 14. Xiaofeng, X. and Xuelai, Z. 2021. Simulation and experimental investigation of a multi-temperature insulation box with phase change materials for cold storage, *Journal of Food Engineering*, 292(4): 110286.
 15. Li, C., Li, Y. and He, Y. L. 2023. Optimization of super water-retention phase change gels for cold energy storage in cold chain transportation, *Journal of Energy Storage*, 61(5): 106719.
 16. Calati, M., Hooman, K. and Mancin, S. 2022. Thermal storage based on phase change materials (PCMs) for refrigerated transport and distribution applications along the cold chain, 16(11): 100224.
- 투고: 2023.03.17 / 심사완료: 2023.03.31 / 게재확정: 2023.04.05