

백신 수송용 포장재 내부에서 열 전달의 모델링 및 시뮬레이션

다오 반 둥 · 최호석[†] · 이성찬* · 배윤성*

충남대학교 화학공학과
305-764 대전광역시 유성구 궁동 220
*(주)탭스인터네셔널
경기도 시흥시 정왕동 1255-6 시화공단 2나 107
(2008년 2월 19일 접수, 2008년 3월 19일 채택)

Modeling and Simulation of Heat Transfer inside the Packaging Box for Vaccine Shipping

Dao Van Duong, Ho-Suk Choi[†], Sung-Chan Lee* and Yoon-Sung Bae*

Department of Chemical Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea
*Taps International Co., 2na 107, Siwha Industrial Complex, Gyeonggi-do, Korea
(Received 19 February 2008; accepted 19 March 2008)

요 약

본 연구에서는 세계보건기구의 기준을 만족시키기 위한 포장재 개발을 목적으로 백신 수송용 장방형 포장재 내부 열 전달에 대한 모델링 및 시뮬레이션을 수행하고 이를 실험결과와 비교하였다. 장방형의 박스를 구형 박스로 전환하여 구상한 1차원 모델은 냉각공정의 경우에는 실험 결과와 비교적 잘 일치하는 결과를 보였으나, 가열공정에서는 실험결과와 상당한 차이를 보여주었다. 이는 가열공정을 계산할 때, 포장재 외부에서의 경계조건을 적절히 고려해주시지 못한 결과로 사료된다. 그러나, 본 연구를 통하여 상전이 물질을 함유한 다층 벽을 통한 열 전달의 문제를 전산 모사할 수 있는 기본적인 알고리즘을 성공적으로 개발할 수 있었다.

Abstract – This study is about the modeling and simulation of heat transfer in the box for packaging and shipping of vaccines. Comparison of the simulation results with experimental data revealed that a one-dimensional model (a spherical model of using a radius equivalent to the rectangular geometry of box) showed good agreement with experimental data during cooling process but did not successfully simulate heating process. It is considered that a rigorous boundary condition is not properly applied for outer surface of the box. However, we could successfully develop a basic algorithm for simulating heat transfer through multi-slabs combined with different materials including phase change material.

Key words: Cold Chain, Modeling, Simulation, Heat Transfer

1. 서 론

최근 국가 간 자유무역협정의 체결로 인하여 다양한 상품들을 수송하는 물류산업의 중요성이 부각되고 있고, 상품의 종류에 따라서는 상품의 안정적인 수송을 위해 다양한 지침서들이 만들어지고 있다. 특히, 온도에 민감한 백신류 의약품들의 경우, 세계보건기구(WHO)에서는 “Guidelines on the international packaging and shipping of vaccines”을 만들어 이를 기술명세서 및 요구사항에 포함시킬 것을 권고하고 있다. 특히, 세계보건기구는 백신을 각 영역 별로 분류하여 적어도 48시간의 국제물류 수송시간 동안 노출될 수 있는 최소 및 최대 허용가능온도들을 명시하였다. 따라서, 모든 백신 생산업체들은 사용하는 포장재들이 다음의 기준을 충족시킴을 보증하여야 한다[1].

- A급 포장: 포장에 앞서서 백신들은 제조업체가 요청한 저장온도 범위 내에서 유지되어야 하고, 포장 후 수송 시, 적어도 48시간 동안 외부온도 +43 °C에 노출되어도 내부의 백신이 +8 °C 이상으로 올라가지 못하도록 하는 단열포장
- B급 포장: 포장에 앞서서 백신들은 제조업체가 요청한 저장온도 범위 내에서 유지되어야 하고, 포장 후 수송 시, 적어도 48시간 동안 외부온도 +43 °C에 노출되어도 내부의 백신이 +30 °C 이상으로 올라가지 못하도록 하는 단열포장
- C급 포장: 포장에 앞서서 백신들은 제조업체가 요청한 저장온도 범위 내에서 유지되어야 하고, 포장 후 수송 시, 외부온도 +43 °C에 노출되는 경우, 적어도 48시간 동안 내부의 백신이 +30 °C 이상으로 올라가지 못하며, 외부온도 -5 °C에 노출되는 경우, 적어도 48시간 동안 내부의 백신이 +2 °C이하로 내려가지 못하도록 하는 단열포장

따라서, 본 연구에서는 앞서의 기준을 만족시키기 위한 포장재 개

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: hchoi@cnu.ac.kr

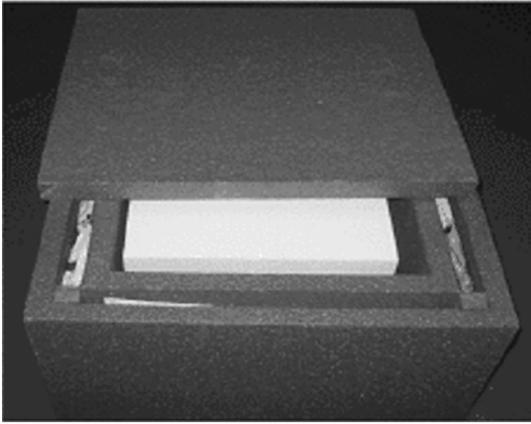


Fig. 1. Model packaging box for modeling and simulation.

발을 목적으로 백신 수송용 포장재 내부 온도 변화에 대한 모델링 및 시뮬레이션을 수행하고 이를 실험결과와 비교하였다. 본 연구에서 해석하고자 하는 시스템은 다음의 Fig. 1과 같은 장방형의 백신 수송용 포장재이다

본 연구의 시스템은 상 전이를 수반하는 열 전달 문제이기 때문에 상용 프로그램을 사용하기가 어려운 단점이 있다. 이러한 열 전달 문제는 1890년대에 Stefan이 처음 연구한 이래 많은 연구가 이루어 졌지만 상전이 경계 면이 비선형이며 시간에 따라서 움직이는 문제이므로 어려운 문제로 간주되어 왔다. 따라서, 수치해석 기법들이 많이 사용되었는데, Crank와 Gupta[2], Gupta[3], Patanker[4], Gupta와 Kumar[5], Crank[6], Pham[7], Tacke[8], Poirier[9], Ozisik [10], Ketkar[11] 등의 연구 결과들이 보고되었고, FDM, FEM, control volume 및 boundary element 접근 법 등이 사용되어왔다. 본 연구에서는 앞서 제기된 문제점을 효과적으로 해결할 수 있는 에너지 방법[12]을 사용하고자 한다. 즉, 열 전달 방정식을 Fig. 2와 같이 에너지와 온도를 두 개의 변수로 사용하여 계산하는 방법이다. 물질의 내부에너지와 온도는 서로 다음의 관계를 갖고 있고, DSC 등을 이용하면 실험을 통하여 결정할 수 있다.

$$T(e) = \begin{cases} T_m + \frac{1}{C_{p,l}}(e - e_0 - \lambda), & e > e_0 + \lambda \\ T_m, & e_0 \leq e \leq e_0 + \lambda \\ T_m + \frac{1}{C_{p,s}}(e - e_0), & e < e_0 \end{cases} \quad (1)$$

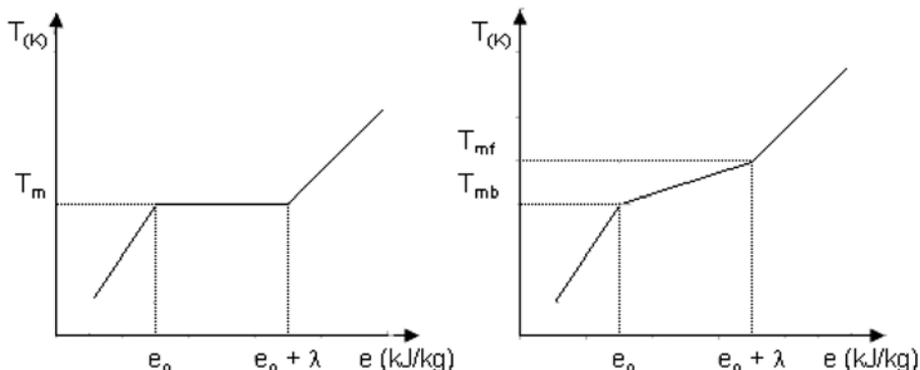


Fig. 2. Relationship between energy and temperature. (a) Pure substance, (b) Mixture

식 (1)을 한 식으로 표현하면, 다음과 같다.

$$T(e) = T_m + \frac{1}{C_{p,s}}(e - e_0)H[e - e_0] + \frac{1}{C_{p,l}}(e - e_0 - \lambda)H[e - e_0 - \lambda] \quad (2)$$

여기서, T는 온도, T_m 은 녹는점, e는 에너지, $C_{p,s}$ 는 고체의 열 용량, $C_{p,l}$ 은 액체의 열 용량, λ 는 잠열이고, H는 계단함수를 나타낸다. 전산모사는 PC에서 손쉽게 사용할 수 있도록 MS-Fortran Power Station에 내장된 IMSL subroutine을 사용하였다.

2. 수학적 모델링

상기에서 기술한 장방형 모델의 해석을 위해서는 공간변수가 3차원인 문제를 해결하여야 한다. 그러나 이 경우 해석하는데 필요한 방정식이 복잡해지고, 계산에 소요되는 시간 또한 많이 걸릴 것으로 예상되어 본 연구에서는 장방형 포장재의 구조를 이에 상당하는 구형의 구조로 가정하여 반경방향으로 서로 대칭인 단순화된 1차원 모델을 해석하였다. 즉, Fig. 3에서 보는 바와 같이 상당부피를 계산하여 3차원 장방형 좌표 계를 1차원 구형 좌표 계로 변형하여 계산의 노력과 시간을 줄이면서도 결과의 신뢰성을 높이고자 하였다. 상당부피를 계산하여 상당반경을 구하는 방법은 아래의 수식을 사용하였다.

$$\frac{4}{3}\pi r^3 = \text{box volume} \Rightarrow r = \left[\frac{3}{4\pi} \times (\text{box volume}) \right]^{1/3} \quad (3)$$

한편, 본 모델링의 기본 가정은 다음 세 가지로 요약할 수 있다.

- 가정 1) 장방형의 박스를 이에 상당하는 구형 박스로 가정한다.
- 가정 2) 내부 공간(inner space air)에서의 열 전달은 전도에 의해서 전달되는 것으로 가정한다.



Fig. 3. Calculation of the Equivalent Radius

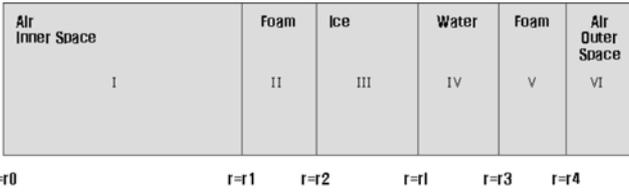


Fig. 4. One-dimensional model for heat transfer simulation.

가정 3) 계산에 사용된 물성 치들(열전도도, 열 용량, 밀도)은 온도의 함수이지만 본 계산에서는 일정한 값으로 가정한다.

위의 가정에 근거한 단순한 모델의 scheme은 Fig. 4와 같다.

구에서의 열 전달은 다음의 식으로 쓸 수 있다. 예를 들어 단열재 Foam을 소재로 사용하고 있는 부분의 열 전달 수치 식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_{FoamI} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad \text{where} \quad \alpha_{FoamI} = \frac{k_{FoamI}}{\rho_{FoamI} C_{p, Foaml}} \quad (4)$$

위의 식처럼 각 영역별로 열 전달 방정식들을 정리하면 다음과 같이 정리할 수 있다.

Inner Space Air

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_{air} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad \text{where} \quad \alpha_{air} = \frac{k_{air}}{\rho_{air} C_{p, air}}$$

Foam I

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_{FoamI} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad \text{where} \quad \alpha_{FoamI} = \frac{k_{FoamI}}{\rho_{FoamI} C_{p, Foaml}}$$

PCM

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_{ice} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad \text{where} \quad \alpha_{ice} = \frac{k_{FoamI}}{\rho_{ice} C_{p, ice}} \quad \text{at } T < T_{mb}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_{PCM} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad \text{where} \quad \alpha_{PCM} = \frac{k_{PCM}}{\rho_{PCM} \left[\frac{\lambda}{T_{mf} - T_{mb}} \right]}$$

at $T_{mb} \leq T \leq T_{mf}$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_{water} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad \text{where} \quad \alpha_{water} = \frac{k_{water}}{\rho_{water} C_{p, water}} \quad \text{at } T_{mf} < T$$

Foam II

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_{FoamII} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad \text{where} \quad \alpha_{FoamII} = \frac{k_{FoamII}}{\rho_{FoamII} C_{p, Foaml}}$$

위 식에서 PCM은 상전이 상태의 물질을 말하며 본 계산에서는 얼음→물 또는 물→얼음으로의 상 전이를 고려하였고, 상 전이가 일어남에 따라 각 온도 영역별로 세 영역으로 나누어 방정식을 세운 것이다. 특히, α_{PCM} 은 상전이 시 잠열을 고려한 열 용량의 변화를 나타내고 있다. 즉, 식 (1)과 (2)의 내부에너지의 변화를 온도의 함수로 다시 전개함으로써 상전이 시 잠열의 교환을 수식으로 전개한

것이다.

위의 방정식을 풀기 위한 초기 및 경계조건들은 다음과 같이 설정하였다.

Initial Conditions $T=T_0$ at $t=0$ and all r

Boundary Conditions $\frac{\partial T}{\partial r} = 0$ at $r=0$ and all t

$T=T_{wall}(t)$ at $r=r_4$ and all t

여기서, 초기조건으로는 각 영역별로 초기온도를 설정하였고, 경계조건으로는 $r=0$ 일 때, 좌우 대칭이므로 온도 기울기(temperature gradient)가 0라는 조건을 사용하였고, 벽면에서의 시간에 따른 온도 변화를 또 다른 경계조건으로 사용하였다.

위의 식을 안정적으로 풀기 위해서 위의 식을 다음의 무 차원 변수들을 사용하여 다시 전개하였다.

$$r^* = \frac{r}{r_4} \quad t^* = \frac{t}{(r_4^2/\alpha_{Foam})} \quad T^* = \frac{T-T_{out}}{T_0-T_{out}}$$

$$T_{mb}^* = \frac{T_{mb}-T_{out}}{T_0-T_{out}} \quad T_{mf}^* = \frac{T_{mf}-T_{out}}{T_0-T_{out}} \quad T_{wall}^* = \frac{T_{wall}(t)-T_{out}}{T_0-T_{out}}$$

$$\alpha_{air}^* = \frac{\alpha_{air}}{\alpha_{Foam}} \quad \alpha_{ice}^* = \frac{\alpha_{ice}}{\alpha_{Foam}} \quad \alpha_{PCM}^* = \frac{\alpha_{PCM}}{\alpha_{Foam}} \quad \alpha_{water}^* = \frac{\alpha_{water}}{\alpha_{Foam}}$$

무 차원 변수들로 다시 전개한 방정식은 다음과 같다.

$$\text{Inner Space Air} \quad \frac{\partial T^*}{\partial t^*} = \alpha_{air}^* \left(\frac{\partial^2 T^*}{\partial r^{*2}} + \frac{2}{r^*} \frac{\partial T^*}{\partial r^*} \right)$$

$$\text{Foam I} \quad \frac{\partial T^*}{\partial t^*} = \left(\frac{\partial^2 T^*}{\partial r^{*2}} + \frac{2}{r^*} \frac{\partial T^*}{\partial r^*} \right)$$

$$\text{PCM} \quad \frac{\partial T^*}{\partial t^*} = \alpha_{ice}^* \left(\frac{\partial^2 T^*}{\partial r^{*2}} + \frac{2}{r^*} \frac{\partial T^*}{\partial r^*} \right) \quad \text{at } T^* < T_{mb}^*$$

$$\frac{\partial T^*}{\partial t^*} = \alpha_{PCM}^* \left(\frac{\partial^2 T^*}{\partial r^{*2}} + \frac{2}{r^*} \frac{\partial T^*}{\partial r^*} \right) \quad \text{at } T_{mb}^* \leq T^* \leq T_{mf}^*$$

$$\frac{\partial T^*}{\partial t^*} = \alpha_{water}^* \left(\frac{\partial^2 T^*}{\partial r^{*2}} + \frac{2}{r^*} \frac{\partial T^*}{\partial r^*} \right) \quad \text{at } T_{mf}^* < T^*$$

Foam II

$$\frac{\partial T^*}{\partial t^*} = \left(\frac{\partial^2 T^*}{\partial r^{*2}} + \frac{2}{r^*} \frac{\partial T^*}{\partial r^*} \right)$$

위의 방정식을 풀기 위한 초기 및 경계조건들은 다음과 같이 설정하였다.

Initial Conditions $T^*=1$ at $t^*=0$ and all r^*

Boundary Conditions $\frac{\partial T^*}{\partial r^*} = 0$ at $r^*=0$ and all t^*

$T^* = T_{wall}^*$ at $r^*=1$ and all t^*

3. 결과 및 고찰

먼저 계산에 사용된 물성 치들은 Table 1과 같이 설정하였다.

위의 표에서 내부 공간 부분은 용기의 내부에 백신이 채워져 있는 것으로 설정하여, 백신의 무게 및 부피를 측정 후 이를 공기와

Table 1. Physical properties for simulation

Physical Properties	Inner Space	Foam	Ice	Water	PCM
Density, ρ [g/m ³]	154,500	30,000	917,000	998,000	958,000
Heat Capacity, C_p [J/g · K]	1.492	1.210	2.100	4.184	837.500
Heat Conductivity, k [J/m · K · sec]	0.113	0.035	2.100	0.600	1.350
Thermal Diffusivity, α [m ² /sec]	4.92×10^{-7}	9.64×10^{-6}	1.09×10^{-6}	1.44×10^{-6}	1.68×10^{-9}

Table 2. Box geometry

Box Volume	Equivalent Radius	Dimensionless Radius (r/r_4)
0.0359	$r_1 = 0.205$	$r_1^* = 0.589$
0.0549	$r_2 = 0.236$	$r_2^* = 0.679$
0.0852	$r_3 = 0.273$	$r_3^* = 0.786$
0.1756	$r_4 = 0.347$	$r_4^* = 1.000$

물과 서로 비교하여 평균적으로 산출한 물성 치이다. 이 물성 치를 사용하여 계산한 열 확산 계수 값을 비교하여도 열 전달을 지연시킬 수 있는 부분은 상 전이가 되는 부분임을 알 수 있다. 즉, 가장 열 확산 계수가 작을 때 열전도에 걸리는 시간이 많이 소요되기 때문이다.

한편, 박스의 기하학적 모양은 다음과 같이 설정하였다. 장방형 박스 내부 공간은 0.33×0.33×0.33 m로 설정하였고, 내부 박스의 두께 0.025 m, 냉매가 차지하는 공간의 두께 0.03 m, 외부 박스의 두께 0.06 m로 설정하였다. 이를 기준으로 같은 부피를 갖고 있는 구의 상당 반경은 Table 2와 같이 계산된다.

3-1. 냉각공정

냉각 공정의 초기 조건은 아래와 같이 설정하였다.

$$T_0 = 5\text{ }^\circ\text{C and } T_{out} = 43\text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{mb} = -0.2\text{ }^\circ\text{C and } T_{mf} = 0.2\text{ }^\circ\text{C}$$

즉, 초기 내부 온도는 5 °C이며, 외부 온도는 -10 °C로 설정하였고, 상 전이는 -0.2에서 0.2 °C 사이에서 일어나는 것으로 가정하였

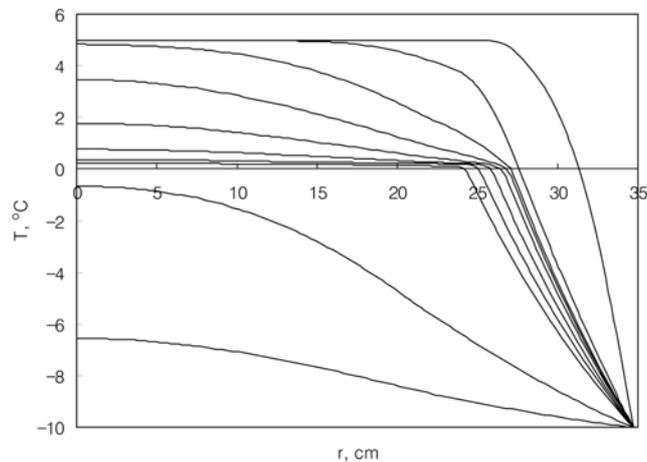


Fig. 5. Temperature change with respect to positions (Lines from top to bottom: time = 0.35, 1.39, 3.13, 5.56, 8.70, 12.52, 17.04, 22.26, 28.17, 34.78 hr).

다. 상전이 물질로는 5 °C 물을 사용하였다. 이때 계산 결과는 아래의 Fig. 5에 도시하였다. Fig. 5의 x축은 구의 중심으로부터 벽까지 거리를 나타내며, 각 선들은 위에서 아래로 열 전달 시간이 증가함에 따른 온도의 변화를 도시한 것이다. 즉, 각 선들은 어떤 일정시간에 박스 내부에서의 온도 profile을 보여주고 있다. Fig. 5에서 보여주는 것처럼 상전이 물질이 채워진 r2와 r3 사이에서 3시간부터 22 시간까지 열의 손실을 늦추는 것을 알 수 있고, 각 시간 별로 상 전이에 따른 상전이 경계 면의 이동을 관찰할 수 있다. 계산 결과로부터 초기 내부 온도를 5 °C, 외부 온도를 -10 °C로 설정하였을 때, 박스 내부의 온도는 약 22 시간까지는 0 °C 이상을 유지할 수 있음을 알 수 있다. 본 계산에서는 초기 외벽의 온도가 시간에 따라서 상승하는 것으로 보지 않고, 이미 외벽의 초기 온도가 -10 °C로 설정되었다고 가정하였다. 따라서, 만일 박스 외벽의 초기 온도가 초기 내부 온도 5 °C와 같다고 할 경우에는 좀더 오랜 시간 동안(22시간보다 오랫동안) 내부의 온도를 0 °C 이상으로 유지할 것으로 사료된다.

한편, Fig. 6는 각 위치(각각 중심으로부터 20.2, 22.9, 26.8, 30.2 cm되는 지점)에서 시간에 따른 온도의 변화를 도시한 것이다. Fig. 6에서 보는 것처럼 박스 내벽 안쪽에 해당하는 r=20.2, 22.9 cm되는 지점에서는 22시간 이상까지 내부의 온도를 0 °C 이상으로 유지하고 있음을 알 수 있고, 18에서 22시간까지는 상전이 물질의 잠열 방출로 인하여 오히려 약간 온도가 증가하는 것을 보여주고 있다. 그러나, 박스 내벽과 외벽 사이에서는 외부로의 빠른 열 전달로 인하여 r=26.6, 30.2 cm되는 지점에서 각각 1시간, 6시간 지난 후 온도가 0 °C 이하로 떨어지는 것을 알 수 있다. 또한, 내벽과 외벽 사이 상전이 물질인 물이 모두 얼음이 된 후에는 내부의 온도도 급격히 영하로 떨어지는 것을 알 수 있다. 이로부터 상전이물질의 잠열 방출이 내부의 온도를 일정하게 오래 유지하는데 중요한 역할을 할 수 있다.

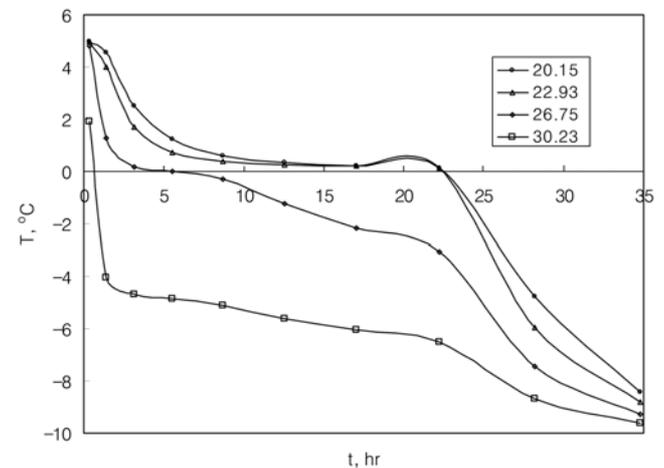


Fig. 6. Temperature change with respect to time (inner box: position, cm).

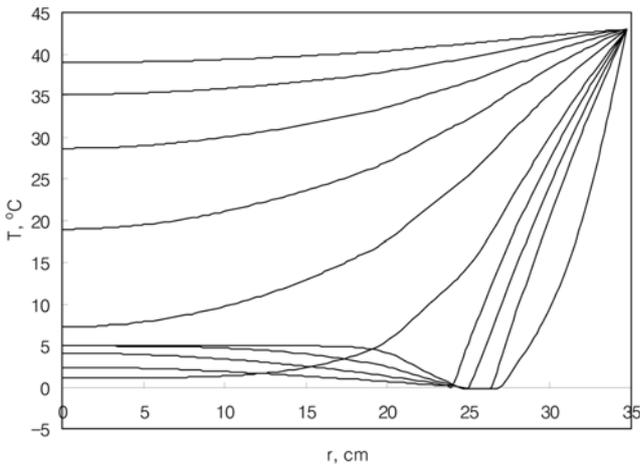


Fig. 7. Temperature change with respect to positions (Lines from bottom to top: time = 0.35, 1.39, 3.13, 5.56, 8.70, 12.52, 17.04, 22.26, 28.17, 34.78 hr).

3-2. 가열공정

가열 공정의 초기 조건은 아래와 같이 설정하였다.

$$T_0 = 5\text{ }^\circ\text{C and } T_{out} = 43\text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{mb} = -0.2\text{ }^\circ\text{C and } T_{mf} = 0.2\text{ }^\circ\text{C}$$

즉, 초기 내부 온도는 5 °C이며, 외부 온도는 43 °C로 설정하였고, 상 전이는 -0.2에서 0.2 °C 사이에서 일어나는 것으로 가정하였다. 상전이 물질로는 -1 °C 얼음을 사용하였다. 이때 계산 결과는 아래의 Fig. 7에 도시하였다. Fig. 7에서 보여주는 것처럼 상전이 물질이 채워진 r2와 r3 사이에서 1.4시간부터 5.5시간까지 열의 손실을 늦추는 것을 알 수 있고, 각 시간 별로 상 전이에 따른 상전이 경계 면의 이동을 관찰할 수 있다. 계산 결과로부터 초기 내부 온도를 5 °C, 외부 온도를 43 °C로 설정하였을 때, 박스 내부의 온도는 약 9시간까지는 10 °C 이하를 유지할 수 있음을 알 수 있다. 본 계산에서는 초기 외벽의 온도가 시간에 따라서 상승하는 것으로 보지 않고, 이미 외벽의 초기 온도가 43 °C로 설정되었다고 가정하였다. 따라서, 만일 박스 외벽의 초기 온도가 초기 내부 온도 5 °C와 같다고 할 경우에는 좀더 오랜 시간 동안(9시간보다 오랫동안) 내부의 온도를 10 °C 이하로 유지할 것으로 사료된다.

한편, Fig. 8은 각 위치(각각 중심으로부터 20.2, 22.9, 26.8, 30.2 cm되는 지점)에서 시간에 따른 온도의 변화를 도시한 것이다. Fig. 8에서 보는 것처럼 박스 내벽 안쪽에 해당하는 r=20.2, 22.9 cm되는 지점에서는 약 10시간까지 내부의 온도를 10 °C 이하로 유지하고 있음을 알 수 있고, 4에서 6시간까지는 상전이 물질의 잠열 방

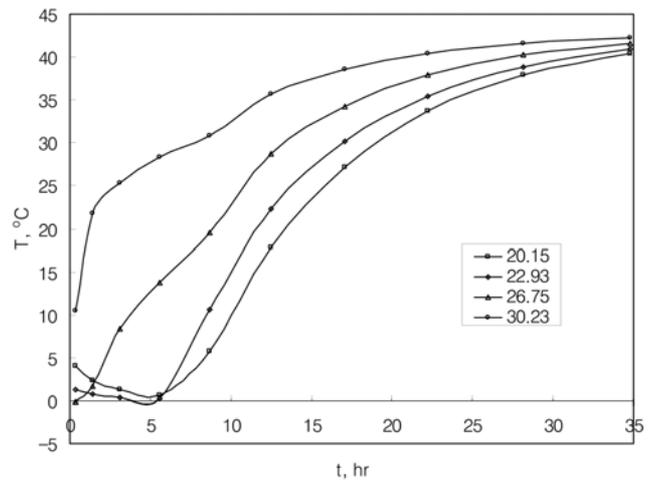


Fig. 8. Temperature change with respect to time (inner box: position, cm).

출로 인하여 r=22.9 cm에서는 오히려 온도가 0 °C 이하로 감소하는 것을 보여주고 있다. 그러나, 박스 내벽과 외벽 사이에서는 외부로부터 빠른 열 전달로 인하여 r=26.6, 30.2 cm되는 지점에서 각각 4시간, 1시간 지난 후 온도가 10 °C 이상으로 올라가는 것을 알 수 있다. 또한, 내벽과 외벽 사이 상전이 물질인 얼음이 모두 물이 된 후에는 내부의 온도도 급격히 영하로 떨어지는 것을 알 수 있다. 이로부터 상전이물질의 잠열 방출이 내부의 온도를 일정하게 오래 유지하는데 중요한 역할을 함을 알 수 있다.

3-3. 실험결과와의 비교

시뮬레이션과 동일한 조건하에서 실험을 하지는 못하였지만, 다음의 조건하에서 실험을 수행하여 시뮬레이션 결과와 비교를 하였다.

$$T_0 = 15\text{ }^\circ\text{C and } T_{out} = 43\text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{mb} = -0.2\text{ }^\circ\text{C and } T_{mf} = 0.2\text{ }^\circ\text{C}$$

즉, 초기 내부 온도는 15 °C이며, 외부 온도는 -5 °C로 설정하였고, 상 전이는 -0.2에서 0.2 °C 사이에서 일어나는 것으로 가정하였다. 상전이 물질로는 5 °C 물을 사용하였다. 구체적인 실험은 Table 3과 같이 설계하였다.

위의 조건으로 실험한 결과와 계산 결과의 비교를 다음 Fig. 9에 도시하였다. 실험 시 온도를 측정된 부분은 중심에서 r=18, 20 cm 지점이고, 계산에서도 그 부분의 온도 변화를 전산 모사하였다. Fig. 9에서 보는 것처럼 시뮬레이션 결과는 Exp. 3의 실험결과와 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 이는 Exp. 3의 실험조건이 다른 실험

Table 3. Experimental design for comparing simulation results with experimental data

Exp. No.	Outside Temp., °C	Exp. Time, hr	Outer Box Thickness, mm	Inner Box Thickness, mm	Ice Pack 1 (Weight: 1500 g, Thickness: 25 mm)		Ice Pack 2 (Weight: 750 g, Thickness: 15 mm)	
					Frozen/Non-Frozen	Frozen/Non-Frozen	Frozen/Non-Frozen	Frozen/Non-Frozen
1	-5	24	60	25	4(Side)/1(Top)	0/5(Side4, Top1)		
2	-5	24	60	25	4(Side)/1(Top)	0/4 (Side4)		
3	-5	24	60	25	5(Side)/0	0/5 (Side4, Top1)		
4	35	48	60	25	4(Side)/1(Top)	0/5 (Side4, Top1)		

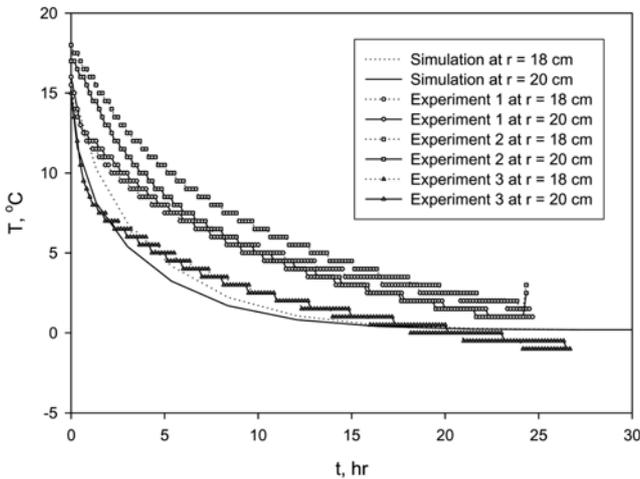


Fig. 9. Comparison of simulation result with experimental data; temperature change with respect to time.

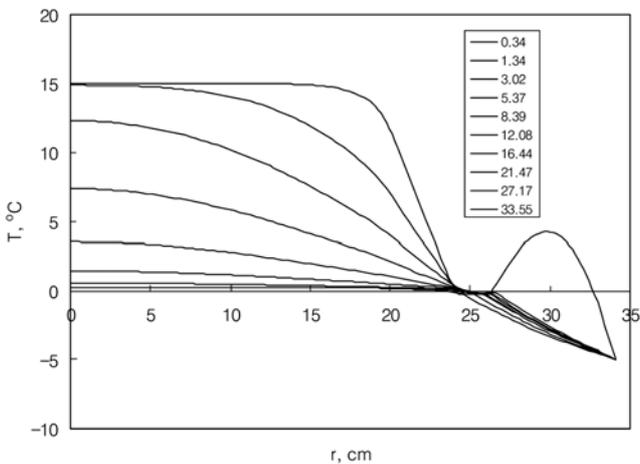


Fig. 10. Temperature change with respect to positions (Lines from top to bottom with respect to time (hr) increase).

조건들에 비하여 시뮬레이션에서 사용한 시스템과 가장 잘 일치하기 때문에 사료된다. 특히 Exp. 3의 실험의 경우, 초기온도를 15°C에서 시작을 하였다. 이때 박스 내부의 온도분포는 다음 Fig. 10과 같이 예측이 되었다. Fig. 10에서 보는 것처럼 박스 내부의 초기 온도는 15°C이고, 내부 박스와 외부 박스 사이에 -1°C의 얼음을 채우고, 내부 박스의 안쪽에 물을 설치한 경우를 전산 모사한 결과이다. 얼음을 채웠음에도 불구하고, 냉장공정 시에도 상당히 오랫동안(약 33시간 이상) 박스 내부의 온도를 0°C 이상으로 유지함을 알 수 있다.

한편, 상기 실험 시스템과의 비교를 위한 가열공정의 계산에서는 실험결과와 시뮬레이션 결과 간에 상당한 차이가 있었는데, 이는 가열공정 시에는 외벽 부분이 외부로부터의 열을 차단해주는 효과를 경계조건에 실질적으로 반영시키지 못하였기 때문으로 사료되며, 향후 시뮬레이션에서는 추가적인 실험을 통하여 표면에서의 온도의 변화(즉, 표면 온도 저항을 고려한 경계조건 선정)를 측정하여 이를 경계조건에 반영하여 시뮬레이션을 수행하고자 한다.

4. 결 론

장방형 백신수송용 포장재의 열 차단 효과를 알아보기 위한 모델

링 및 시뮬레이션을 수행하였다. 장방형의 박스를 구형 박스로 전환하여 구상한 1차원 모델은 냉장공정의 경우에는 실험 결과와 비교적 잘 일치하는 결과를 보였으나, 가열공정에서는 실험결과와 상당한 차이를 보여주었다. 이는 열의 전달 방향에 따라서 즉, 냉장공정에서는 열을 박스 내부로부터 빼앗아가는 공정인데 반하여 가열공정에서는 박스 외부로부터 열이 박스 내부로 공급되는 공정이므로 가열공정 시에는 외부로부터 열 확산에 대한 저항이 있는 것으로 사료된다. 즉, 냉장공정에서는 외부가 heat sink로 작용하여 최대 열을 빼앗아가지만, 가열공정에서는 내부가 닫힌 공간으로 외부로부터의 열의 공급을 상당히 지연시켜주는 효과가 있는 것으로 사료된다. 따라서, 가열공정에서는 일정온도의 경계조건보다는 일정 열 전달 조건으로 계산을 하는 것이 타당하다고 사료되고 이에 맞추어 시뮬레이션 프로그램을 보완하고자 한다.

감 사

본 논문은 2007년도 산학협동재단 학술연구비(과제관리번호 20070476) 지원에 의한 것으로 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. www.who.int/vaccines-documents/ "Guidelines on the international packaging and shipping of vaccines," WHO/IVB/05.23. (2005).
2. Crank, J. and Gupta, R. S., "A Method of Solving Moving Boundary Problems in Heat Flow Using Cubic Splines or Polynomials," *J. Inst. Maths. Applies*, **10**, 296-304(1972).
3. Gupta, R. S., "Moving Grid Method without Interpolations," *Comp. Meth. Appl. Mech. Engng.*, **4**, 143-152(1974).
4. Patankar, S. V., *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, McGraw-Hill, New York(1980).
5. Gupta, R. S. and Kumar D., "A Modified Variable Time Step Method for One-Dimensional Stefan Problem," *Comp. Meth. Appl. Mech. Engng.*, **23**, 101-109(1980).
6. Crank, J., "How to Deal with Moving Boundaries in Thermal Problems," in *Numerical Methods in Heat Transfer* (R. W. Lewis and K. Morgan, Eds.), John Wiley & Sons, New York(1981).
7. Pham, Q., "A Fast Unconditionally Stable Finite-Difference Scheme for Heat Conduction with Phase Change," *Int. J. Heat Mass Transfer*, **28**, 2079-2084(1985).
8. Tacke, K. H., "Discretization of the Explicit Enthalpy Method for Planar Phase Change," *Int. J. Num. Methods in Eng.*, **21**, 543-554(1985).
9. Poirier, D., "On Numerical Methods Used in Mathematical Modeling of Phase Change in Liquid Metals," *J. Heat Transfer*, **110**, 562-570(1988).
10. Ozisik, N. M., *Finite Difference Methods in Heat Transfer*, CRC Press, Florida(1994).
11. Ketkar, P. S., "Numerical Thermal Analysis," ASME, New York, (1999).
12. Sayar, S., "Heat Transfer During Melting and Solidification in Heterogeneous Materials," *Ph.D. Thesis*, Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia(2000).