

## 굴곡진 실린더형 캡슐 형상의 축열·방열 성능 해석

### Analysis of the Charging and Discharging Performance of a New Wavy Cylindrical Shape Capsule

홍상우(Sang Woo Hong), 이용태(Yong Tae Lee), 정재동(Jae Dong Chung)<sup>†</sup>

세종대학교 기계공학과

Department of Mechanical Engineering, Sejong University, Seoul 143-747, Korea

(Received March 10, 2014; revision received April 28, 2014; Accepted: May 7, 2014)

**Abstract** This paper presents a numerical study on the constrained melting of a phase change material inside various capsule containers, using water and HDPE (High Density Polyethylene) as a PCM and a capsule material, respectively. The computations are based on an iterative, finite-volume numerical procedure that incorporates a single-domain enthalpy formulation for simulation of the phase change phenomenon. Using the enthalpy method, various capsule configurations, such as a capsule from E company, an isochoric cylinder capsule, an equivalent diameter sphere capsule, and an isochoric sphere capsule, are used to investigate the effect of capsule configurations on the charging and discharging performance. A transient three-dimensional model is used for each case. The simulation results show that the capsule from E company results in a higher melting and solidification rate of the PCM, than the other capsule configurations considered in this research.

**Key words** Charging performance(축열성능), Discharging performance(방열성능), PCM(상변화 물질), Enthalpy method(엔탈피 방법)

<sup>†</sup> Corresponding author, E-mail: [jdchung@sejong.ac.kr](mailto:jdchung@sejong.ac.kr)

#### 기호설명

$A$  : 매개변수 [ $\text{kg/m}^3 \cdot \text{s}$ ]  
 $C$  : porosity 상수 [ $\text{kg/m}^3 \cdot \text{s}$ ]  
 $C_p$  : 비열 [ $\text{J/kgK}$ ]  
 $D$  : 직경 [ $\text{mm}$ ]  
 $f$  : 액상분율 [-]  
 $g$  : 중력가속도 [ $\text{m/s}^2$ ]  
 $h$  : 현열 엔탈피 [ $\text{J/kg}$ ]  
 $H$  : 총 엔탈피 [ $\text{J/kg}$ ]  
 $k$  : 열전도 계수 [ $\text{W/mK}$ ]  
 $L$  : 용해잠열 [ $\text{J/kg}$ ]  
 $p$  : 압력 [ $\text{N/m}^2$ ]  
 $r$  : 반경방향좌표 [ $\text{mm}$ ]  
 $S$  : 표면적 [ $\text{m}^2$ ]  
 $t$  : 시간 [ $\text{s}$ ]  
 $T$  : 온도 [ $^{\circ}\text{C}$ ]  
 $T_i$  : 초기온도 [ $^{\circ}\text{C}$ ]  
 $T_m$  : 녹는점 [ $^{\circ}\text{C}$ ]  
 $T_w$  : 외벽 온도 [ $^{\circ}\text{C}$ ]  
 $U$  : 속도 [ $\text{m/s}$ ]

$V$  : 체적 [ $\text{m}^3$ ]

$Ra$  : Rayleigh 수,  $\frac{g\beta(T_w - T_m)D_e^3}{\nu\alpha}$

#### 그리스 문자

$\alpha$  : 열확산 계수 [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]  
 $\beta$  : 열팽창 계수 [ $1/\text{K}$ ]  
 $\theta$  : 원주방향좌표 [ $\text{mm}$ ]  
 $\mu$  : 점성 계수 [ $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ]  
 $\rho$  : 밀도 [ $\text{kg/m}^3$ ]  
 $\nu$  : 동점성 계수 [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

#### 하첨자

$E$  : E사  
 $e$  : 등가  
 $i$  :  $i$  벡터, 초기 값  
 $l$  : 액상  
 $m$  : 녹는점  
 $ref$  : 기준 값  
 $s$  : 고상  
 $w$  : 외벽

## 1. 서 론

열원에 있어서 열원특성상 열공급은 열 수요와 시간적 차이를 보이는 것이 일반적이다. 따라서 열에너지저장은 에너지 생산, 수송과 더불어 3대 축으로서 중요한 역할을 한다. 특히 냉난방 수요의 증가와 관련하여 최근 전기수요가 급증하는 시점에서 열저장에 대한 관심은 더욱 고조되고 있다.

에너지 저장방법 중에서 잠열을 이용한 빙축열은 축열조 내부 PCM(Phase Change Material)의 상변화 해석이 필요하다. 상변화에 의한 축열, 방열을 해석함으로써 그 효율을 향상시키기 위한 기초자료를 제공하기 때문이다. 축열조 내의 상변화 해석은 수치해석과 실험적으로 다양한 관점에서 많은 연구가 진행되어 왔다.

상경계면이 이동하는 상변화 현상은 해석의 어려움으로 해석방법 개발 자체가 연구의 대상이었다. Voller et al.<sup>(1)</sup>가 제안한 엔탈피 방법은 고정된 격자를 사용하여 상변화에 따른 잠열 및 물질의 전달을 각 보존 방정식의 생성항으로 처리하여 해석하는 방법이다. 이러한 방법을 사용하여 많은 저자들<sup>(2-8)</sup>이 엄밀하고 정확한 수치모델을 개발하는데 노력해왔다. 하지만 해석의 어려움과 상변화에 대한 본질적인 고찰을 위해 거의 대부분의 연구는 단순한 구형 또는 실린더 형상의 캡슐에 국한되어 왔다. 축열, 방열의 성능 향상을 위해서 캡슐은 동일 체적에 비해 가능한 표면적이 넓은 형상을 가져야 하며, 상변화시 수반되는 팽창 및 수축을 고려하는 형상을 가져야 할 필요성이 있다. 이러한 필요성으로 다양한 형상의 캡슐이 제안되고 있지만 그 성능에 대한 구체적인 해석이 이루어진 사례는 거의 없다.

또한, 기존 연구에서는 대부분의 경우 상변화 해석 시 PCM을 둘러싼 캡슐의 경계조건을 등온조건으로 하여 해석하였다. 상변화시 캡슐의 신축성 및 부식 등의 문제로 인해 현재는 캡슐의 재질이 초창기에 사용되던 금속속에서 열전도율이 상대적으로 낮은 폴리머 재질로 바뀌게 되었다. 최근 저자의 다른 논문<sup>(2)</sup>에서 볼 수 있듯이 PCM의 축열, 방열해석시 PCM을 둘러싼 캡슐의 전도에 대한 영향을 고려한 해석의 필요성이 제시되었다.

기존 연구로 Chung et al.<sup>(3)</sup>은 고정된 실린더 형상에 대해 엔탈피 방법을 사용하여 상변화를 해석하였으며 높은 Ra 수에 따른 상경계면의 거동에 대해 연구하였다. Ho et al.<sup>(4)</sup> 역시 동일한 형상에 대해 상경계면 및 시간에 따른 녹은양을 실험과 수치해석을 통해 비교하였다. 그러나 위의 연구들은 PCM 외벽을 등온조건으로 해석하고 있다는 점에서 한계를 가지고 있다. Tan et al.<sup>(5)</sup>은 구형 캡슐 내의 고정된 PCM에 대해 실험과 수치해석을 통해 시간에 따른 PCM의 녹은 양을 측정하였다. 이 연구에서는 캡슐로부터의 전도현상을 고려하여 수치해석을 수행하였으나 실험과 수치해석의 결과가 다

소 상이한 것으로 나타났다. 또한 캡슐의 재질로서 부피 변화에 의한 캡슐의 팽창 및 수축을 고려하기 위해 현재 많이 사용되는 HDPE(High Density Polyethylene)를 사용하지 않고 열전도율이 상대적으로 높고 취성재료인 glass를 사용하여 캡슐의 전도에 의한 영향이 상대적으로 작은 경우에 대한 해석이 이루어졌다.

이러한 기존 연구들은 대부분 PCM 외벽을 등온조건에서 해석하였거나 캡슐 형상이 실린더 혹은 구형상에 국한되어 있음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 국내 E사에서 제공한 캡슐 형상에 대해 축열, 방열 성능을 동등한 구형 및 실린더 캡슐과 비교하고자 한다. 캡슐의 열전도를 포함하는 해석을 수행함으로써 보다 실제 현상에 가까운 해석을 이루고자 하였다.

## 2. 수치해석

### 2.1 해석모델

해석에 사용된 수치모델에 대한 간략한 형상을 Fig. 1에 나타내었다. 캡슐의 재질은 HDPE을, PCM은 물을 사용하였으며 PCM은 캡슐 내부에서 고정되어 있는 상태로 가정하였다.

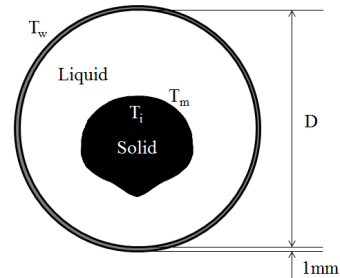


Fig. 1 Schematic diagram of a capsule.

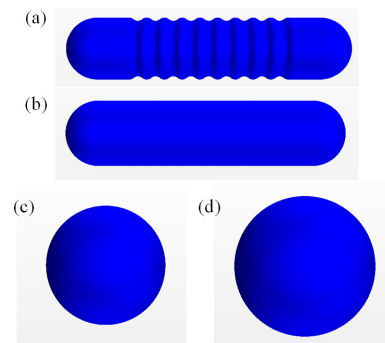


Fig. 2 Capsule configurations. (a) Capsule from E company (b) Isochoric cylinder capsule (c) Equivalent diameter capsule (d) Isochoric sphere capsule.

Table 1 Diameter of each capsule

Capsule configurations	Diameter
Capsule from E company	88.0 mm
Isochoric cylinder	88.0 mm
Equivalent diameter sphere	128.3 mm
Isochoric sphere	160.3 mm

Table 2 Thermophysical properties of PCM

Thermophysical properties	Conditions
Melting temperature, $T_m$	0°C
Density, $\rho$	997.561 kg/m <sup>3</sup>
Dynamic viscosity, $\mu$	0.00088871 Pa·s
Specific heat, $C_p$	4182.72 J/kgK
Thermal conductivity, $k$	0.6203 W/mK
Latent heat of fusion, $L$	334000 J/kg
Thermal expansion coefficient, $\beta$	0.000391 K <sup>-1</sup>

캡슐의 안지름  $D$ 는 형상마다 다른 값을 사용하며 캡슐의 재질인 HDPE에 대한 물성치는 저자의 다른 논문<sup>(2)</sup>에서 찾아볼 수 있다.

본 연구에 사용된 4개의 서로 다른 캡슐 형상을 Fig. 2에 나타내었다. 캡슐 형상의 경우 E사에서 제공한 캡슐을 대상으로 이와 체적이 같은 실린더와 구 그리고 등가직경을 갖는 구 이렇게 4가지 경우에 대해 수치해석을 수행하였다. 등가직경 구는 표면적과 체적의 비로 정의된 값으로 식(1)로 정의된다. 이는 잘 알려진 수력직경의 정의와 유사하며, 열전달 향상을 위하여 동일 체적에 대해 표면적을 키운 캡슐 형상에 대해 등가인 구형캡슐에서의 직경에 해당한다.

$$D = \frac{6V_E}{S_E} \quad (1)$$

해석에 사용된 각 캡슐 형상에 대한 직경과 PCM으로 사용된 물에 대한 물성치는 Table 1과 Table 2에 나타내었다. 본 연구에서는 상변화시 액상과 고상의 밀도차이에 의해 PCM 내에서 고체가 뜨거나 가라앉는 현상을 고려하지 않으므로 PCM의 밀도를 일정하다고 가정하며 그에 따른 열전도계수, 비열 또한 일정하다고 가정한다.

## 2.2 지배방정식

### 2.2.1 질량보존방정식

3차원 수치모델에 대한 질량보존방정식을 식(2)와 같이 표현한다.

$$\nabla U = 0 \quad (2)$$

### 2.2.2 운동량방정식

3차원 수치모델을 해석하기 위한 운동량 방정식을 식(3)과 같이 나타내었다.

$$\rho \frac{DU}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 U + S + S_i \quad (3)$$

식(3)에서  $U$ ,  $p$ ,  $\rho$  그리고  $\mu$ 는 각각 속도, 압력, 밀도 그리고 점성계수를 나타낸다.  $S$ 는 생성항으로 Boussinesq 근사 모델을 사용하여  $\rho g_i \beta (T - T_{ref})$ 으로 나타내었다. 한편,  $S_i$ 는 상변화에 따른 속도 생성항을 나타내는 것으로서 아래의 식과 같이 표현된다.

$$S_i = Au_i \quad (4)$$

여기서  $A$ 는 액상분율  $f$ 의 함수로 표현되는 매개변수이며 다음과 같이 표현된다.

$$A = \frac{C(1-f)^2}{f^3 + \varepsilon} \quad (5)$$

여기서  $C$ 는 고상 영역의 속도를 0으로 만들기 위해 사용되는 임의의 상수로서 상당히 큰 값을 사용한다. 본 연구에서는 10<sup>6</sup>을 사용하였다. 또,  $\varepsilon$ 는 0으로 나누는 것을 방지하기 위해 사용되는 값으로 0.001을 사용하였다.

### 2.2.3 에너지방정식

$$\rho \frac{DH}{Dt} = k \nabla^2 T \quad (6)$$

여기서  $H$ 는 현열 엔탈피  $h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T C_p dT$ 와 잠열에 의한 엔탈피  $\Delta H = fL$ 의 합으로 표현된다.  $L$ 은 용해 잠열을 나타내며  $H$ 는 고상일 때 0, 액상일 때  $L$  그리고 상변화 구간에서는 0에서  $L$ 사이의 값을 가지므로  $f$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$f = \begin{cases} \frac{\Delta H}{L} = 0 & \text{if } T < T_s \\ \frac{\Delta H}{L} = \frac{T - T_s}{T_l - T_s} & \text{if } T_s < T < T_l \\ \frac{\Delta H}{L} = 1 & \text{if } T > T_l \end{cases} \quad (7)$$

식(7)에서  $T_s$ 는 0°C,  $T_l$ 는 0.002°C이며 아주 작은 상경계면 구간을 형성한다.

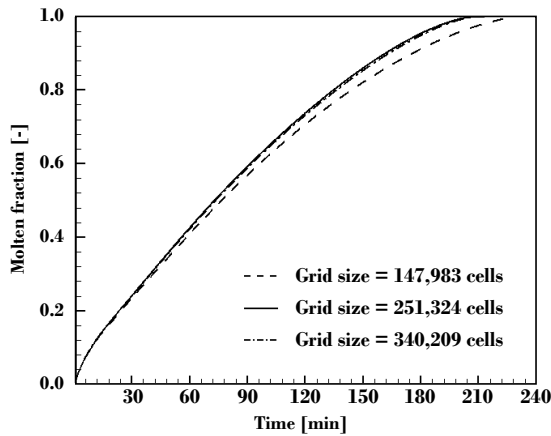


Fig. 3 Grid dependence of the numerical solution.

### 2.2.4 초기조건 및 경계조건

본 연구에서는 축열 및 방열 두 가지 경우에 대해 수치해석을 수행하였다. 방열의 경우 PCM의 초기온도  $T_i$ 는  $-3^{\circ}\text{C}$ 로 얼어있는 상태이며, 축열의 경우  $T_i$ 는  $5^{\circ}\text{C}$ 의 상온 상태이다. 이때 방열과 축열의 경우 각각  $5^{\circ}\text{C}$ 와  $-5^{\circ}\text{C}$ 의 온도가 캡슐 외벽에 등온적으로 가해지며 HDPE 재질의 캡슐을 통해 전달되는 열전도 현상을 통해 PCM의 상변화가 일어난다.

### 2.2.5 격자 검증

3차원 해석 모델의 격자의존성은 충분히 검토되었다. E사의 캡슐을 기준으로, 사용된 격자수는 150,000~350,000개이며 Fig. 3으로부터 25만 개 정도의 격자를 사용하면 충분히 타당한 결과를 얻을 수 있다고 판단되었다. 시간간격은 5초를 사용하였으며 계산시간은 개인용 PC인 Intel(R) Xeon(R) CPU E3-1275 v3 @ 3.50 GHz를 사용하였을 때 약 48시간 정도이다. 해석에는 상용 CFD 프로그램인 STAR-CCM+v7.04<sup>(9)</sup>를 사용하였다.

## 3. 해석결과 및 고찰

### 3.1 검증

해석에 사용된 상용 프로그램인 Star-CCM+의 enthalpy-porosity 방법의 적용 타당성을 검증하기 위해서 기존 연구와 비교를 실시하였다. Fig. 4는 2차원 수평형 실린더 형상의 PCM이 등온의 경계조건을 받을 때 시간에 따른 녹는 양을 비교한 것으로, 별도의 방법으로 해석된 Chung et al.<sup>(3)</sup>과 Ho et al.<sup>(4)</sup>의 실험결과와 비교하였다. 수치해석에 사용된 PCM은 n-octadecane이고, 반경 15.05 mm인 실린더를  $(r \times \theta) = (36 \times 72)$ 로 균일하게 나누었다. 해당 parameter로 Rayleigh 수는  $3.6 \times 10^5$ ,

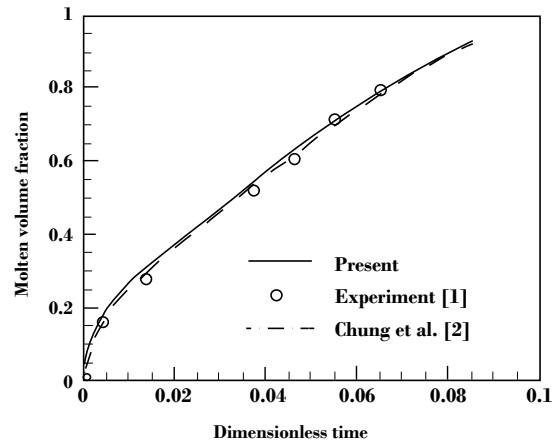


Fig. 4 Variation of the molten volume fraction.

Stefan 수는 0.045, Subcooling 수는 0.004이다. 그림에서 전도에 의한 열전달이 지배적인 초기에는 빠르게 녹으며 점차 녹는 양이 증가하면서 buoyancy-driven convection의 영향이 가해져 녹게 된다. 이러한 거동은 실선으로 표시된 본 연구의 수치해석 결과, Chung et al.<sup>(3)</sup>의 수치해석 및 Ho et al.<sup>(4)</sup>의 실험결과 모두 정량적, 정성적으로 거의 일치하는 결과를 나타내고 있다.

### 3.2 캡슐 형상에 따른 방열 성능 비교

제 2절에서 언급한 다양한 캡슐 형상에 대해 시간에 따른 PCM 내부의 온도분포를 비교하여 Fig. 5에 나타내었다. 본 연구에 사용된 캡슐 형상들에 대한 Rayleigh 수는  $1.98 \times 10^8 \sim 1.19 \times 10^9$ 으로 Fig. 5를 보면 상경계면이 다소 일그러진 모습을 볼 수 있다. 이는 높은 Rayleigh 수에 따른 셀 수의 증가로 인해 상경계면이 불안정해졌기 때문이며 Chung et al.<sup>(3)</sup>의 연구와도 같은 양상을 보이고 있다. 전도의 영향력이 강한 상변화 초기단계에는 상경계면이 일정하나 PCM 내부에서의 온도차이로 인해 생기는 부력으로 고온의 유체가 위로 흐르면서 상단부가 더 빠르게 녹는 현상을 보이며 이는 기존의 Tan et al.<sup>(5)</sup>의 연구결과와 같은 양상을 보이고 있다.

Fig. 5에서 온도가  $0^{\circ}\text{C}$  이하를 나타내는 검은 부분이 고상이며 나머지는 액상이다. 동일 시간대인 100분, 150분, 200분에서 PCM 내부의 상경계면을 비교해 보면 매시간 E사 캡슐, 등체적 실린더, 등가직경 구 그리고 등체적 구의 순으로 PCM이 빨리 녹고 있음을 알 수 있다. 실린더 형상이 등체적 구의 경우보다 빨리 녹는 이유는 같은 체적에 비해 실린더가 열전달 면적이 구형상보다 32.6% 정도 더 넓기 때문으로 해석할 수 있다. 등가직경 구의 경우 넓어진 표면적의 효과를 직경으로 환산하였기에 실린더 형상과 비슷하게 녹음

것으로 예상하였으나 온도분포 및 상경계면을 비교해보았을 때 실린더 형상이 더 우세한 것으로 판단되었다. E사 캡슐은 실린더 형상보다도 더 빨리 녹는 것을 알

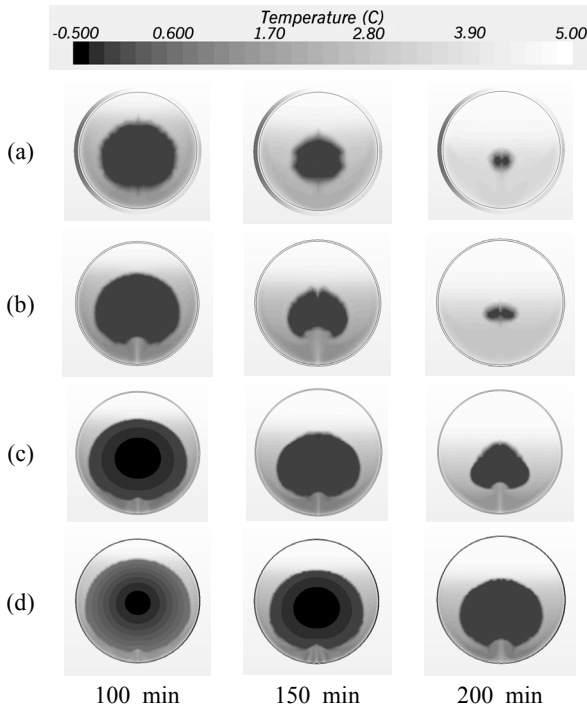


Fig. 5 Comparison of temperature contour between each capsule configuration at 100 min, 150 min, 200 min. (a) Capsule from E company, (b) Isochoric cylinder, (c) Equivalent diameter sphere, (d) Isochoric sphere.

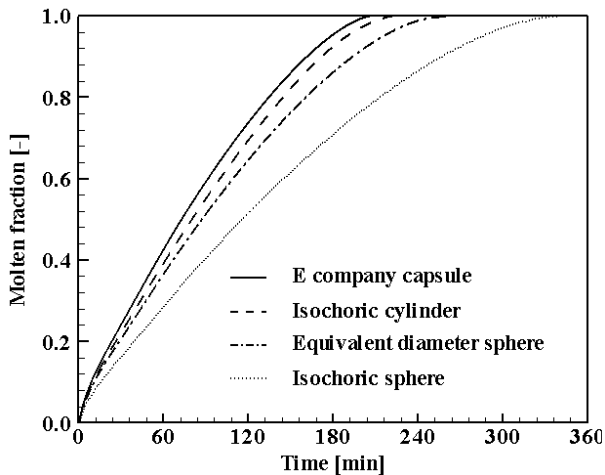


Fig. 6 Comparison of molten fraction vs. time between each capsule configuration.

수 있으며 이는 굴곡진 형상으로 인해 실린더 형상보다 열전달 면적이 7.63% 정도 더 넓어졌기 때문으로 해석할 수 있다. 또한 폴리머 재질의 특성상 굴곡진 면으로 인해 갖는 E사 캡슐의 신축성 등을 고려할 때 캡슐 형상으로서 장점을 가지고 있는 것으로 판단된다. Fig. 6는 각 캡슐 형상에 대해 시간에 따른 PCM 내부의 액상분율이 차지하는 비율을 정량적으로 비교한 그래프이다. E사 캡슐, 등체적 실린더, 등가직경 구 그리고 등체적 구형 캡슐 순으로 PCM의 녹는 속도가 빠름을 알 수 있다. 이는 방열에 있어 전체적인 시스템의 성능을 향상시키는데 중요한 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다.

### 3.3 캡슐 형상에 따른 축열 성능 비교

다양한 캡슐 형상에 대해 PCM의 응고과정을 해석하여 Fig. 7에 나타내었다. 축열의 경우 부력에 의해 뜨거운 온도가 위로 상승하면서 PCM 바닥면이 더 빠르게 열기 시작한다. 축열의 경우 방열과 달리 초반 PCM 내부에서 액상이 차지하는 비율이 100%이므로

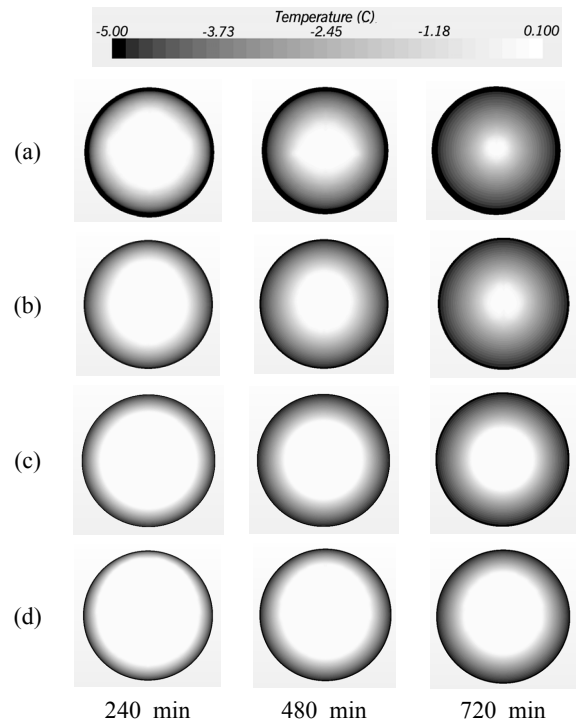


Fig. 7 Comparison of temperature contour for solidification between each capsule configuration at 240 min, 480 min, 720 min. (a) Capsule from E company, (b) Isochoric cylinder, (c) Equivalent diameter sphere, (d) Isochoric sphere.

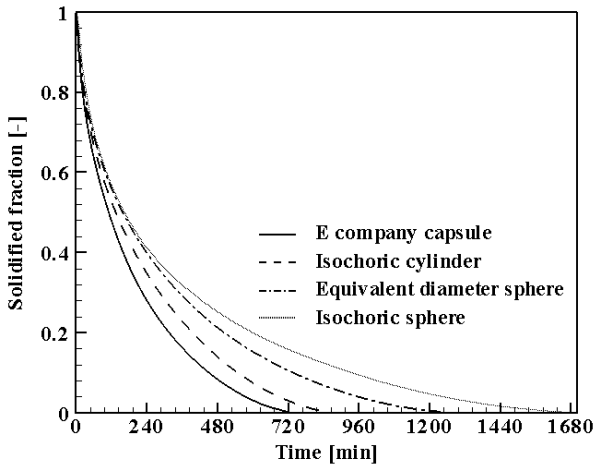


Fig. 8 Comparison of solidified fraction vs. time between each capsule configuration.

부력에 의한 대류 영향이 초반에 가장 강하게 나타난다. 따라서 이러한 온도 성층화에 따른 불규칙한 형상이 초반에 뚜렷이 나타나며 시간이 지날수록 점차 부력의 영향이 줄어들어 상경계면이 일정해짐을 알 수 있다.

이러한 영향은 모든 형상에 대해 동일하나 어는 속도가 각 캡슐별로 뚜렷한 차이를 보이고 있다. Fig. 7에서 온도가 높은 흰색부분은 액상이며 온도가 낮은 검은색 부분이 고상이다. 동일 시간대인 240분, 480분, 720분에서 각 캡슐의 상경계면을 비교해 보면 E사의 캡슐, 등체적 실린더, 등가직경 구 그리고 등체적 구의 순으로 빨리 어는 것으로 나타났다. 이는 방열과 마찬가지로 늘어 난 표면적과 관련이 있으며 표면적이 가장 넓은 E사의 캡슐이 상변화에 보다 유리한 형상이라는 사실을 다시 한 번 확인할 수 있다.

Fig. 8은 각 캡슐 형상에 대해 시간에 따른 고상분율이 차지하는 비율을 정량적으로 비교한 그래프이다. 축열의 경우 시간이 지날수록 부력에 의한 대류 영향이 줄어들게 되어 방열에 비해 상변화 속도가 크게 느린 것으로 나타났다. Fig. 8을 보면 Fig. 7의 상경계면으로부터 예측할 수 있듯이 E사 캡슐이 가장 빨리 어는 것을 알 수 있으며 그다음 등체적 실린더, 등가직경 구 그리고 등체적 구의 순으로 빨리 어는 것을 알 수 있다. 이는 축열에 있어 전체적인 시스템 성능 향상에 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 E사 캡슐을 대상으로 등체적 실린더, 등가직경 구 그리고 등체적 구에 대해 3차원 해석모델을 사용하여 PCM의 상경계면의 거동 및 축열·방열 성능에 대해 해석하였다. 해석방법은 엔탈피 방법을

사용하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 캡슐의 형상은 캡슐 내부 PCM의 상변화 속도에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.
- (2) 방열에 대한 해석 결과 4가지 캡슐 형상 중 E사 캡슐 형상의 경우 PCM의 녹는 속도가 가장 빠른 것으로 나타났다. 그 다음으로는 등체적 실린더, 등가직경 구 그리고 등체적 구의 순으로 녹는 속도가 빠른 것으로 나타났다.
- (3) 축열에 대한 해석 결과 4가지 캡슐 형상 중 E사 캡슐 형상의 경우 PCM의 어는 속도가 가장 빠른 것으로 나타났다. 그 다음으로는 등체적 실린더, 등가직경 구 그리고 등체적 구의 순으로 녹는 속도가 빠른 것으로 나타났다.

#### 후 기

본 연구는 산업통상자원부 에너지기술평가원의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다(No. 20132010101780).

#### References

1. Swaminathan, C. R. and Voller, V. R., 1992, A general enthalpy method for modeling solidification processes, Metallurgical Transaction B, Vol. 23, No. 5, pp. 651-664.
2. Lee, Y. T., Hong, S. W., and Chung, J. D., 2013, Numerical analysis of phase change problem in a spherical capsule, Proceedings of the KSME 2013 Autumn Annual Conference, Vol. 2013, No. 12, pp. 748-751.
3. Chung, J. D., Lee, J. S., and Yoo, H. S., 1997, Thermal instability during the melting process in an isothermally heated horizontal cylinder, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 40, No. 16, pp. 3899-3907.
4. Ho, C. J. and Viskanta, R., 1984, Heat transfer during inward melting in a horizontal tube, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 27, No. 5, pp. 705-716.
5. Tan, F. L., Hosseinizadeh, S. F., Khodadadi, J. M. and Fan, L., 2009, Experimental and computational study of constrained melting of phase change materials (PCM) inside a spherical capsule, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 52, No. 15-16, pp. 3464-3472.
6. Assis, E., Katsman, L., Ziskind, G., and Letan, R., 2007, Numerical and experimental study of melting in a spherical shell, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 50, No. 9-10, pp. 1790-1804.

7. Hosseinizadeh, S. F., Darzi, A. A. R., Tan, F. L., and Khodadadi, J. M., 2013, Unconstrained melting inside a sphere, International Journal of Thermal Sciences, Vol. 63, pp. 55-64.
8. Hosseinizadeh, S. F., Darzi, A. A. R., and Tan, F. L., 2012, Numerical investigations of unconstrained melting of nano-enhanced phase change material (NEPCM) inside a spherical container, International Journal of Thermal Sciences, Vol. 51, pp. 77-83.
9. STAR-CCM+7.04 User Guide, 2012, CD-Adapco.