

# 캡슐 형상이 축열에 미치는 영향

정재동<sup>†</sup>

세종대학교 기계공학과

## Effect of Capsule Shape on Heat Storage

Jae Dong Chung<sup>†</sup>

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

(Received August 17, 2002; revision received October 4, 2002)

**ABSTRACT:** A numerical investigation of the constrained melting of phase change materials within spherical-like capsule is presented. A single-domain enthalpy formulation is used for simulation of the phase change phenomenon. The solution methodology is verified with the melting process inside an isothermal spherical capsule. Especially, the effect of capsule shape on the heat storage is emphasized. Two shape parameters are considered from the real capsule shape showing good characteristics of heat storage and the effect of these parameters is examined. Early during the melting process, the conduction mode of heat transfer is dominant. Thus the capsule shape with large surface area is desirable. However, the capsule shape with large surface area plays negative role on the strength of buoyancy-driven convection that becomes more important as melting continues.

**Key words:** Heat storage(축열), Capsule shape(캡슐 형상), Phase change(상변화)

### 기 호 설 명

$C_P$  : 비열  
 $d_1$  : 캡슐 형상인자, 함몰 정도  
 $d_2$  : 캡슐 형상인자, 뒤편 정도  
 $f$  : 분율  
 $h$  : 에너지방정식의 종속변수  
 $h_\xi, h_\eta$  : 기하학적 계수  
 $J$  : Jacobian  
 $n$  : 형상인자  
 $p$  : 압력  
 $Pr$  : Prandtl 수

$R_{eff}$  : 유효반경  
 $Ra$  : Rayleigh 수  
 $S$  : 생성항  
 $Sc$  : 과냉각 정도  
 $Ste$  : Stefan 수  
 $T$  : 온도  
 $t$  : 시간  
 $U, V$  : 관변속도성분  
 $u, v$  :  $(x, y)$ 방향의 속도  
 $x, y$  : 좌표

### 그리스 문자

$\alpha$  : 열확산율  
 $\alpha_\xi, \alpha_\eta$  : 기하학적 계수  
 $\beta_\xi, \beta_\eta$  : 기하학적 계수

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-2-3408-3776; fax: +82-2-3408-3333

E-mail address: jdchung@sejong.ac.kr

- $\Gamma$  : 유효확산계수
- $\mu$  : 점성계수
- $\xi, \eta$  : 변환된 좌표
- $\rho$  : 밀도
- $\phi$  : 대표중속변수

**하첨자**

- 0 : 초기값
- l : 액상
- m : 응점
- s : 고상
- w : 벽

**1. 서 론**

근래에 들어서는, 대부분의 발전설비들이 부하 추종형으로 운전하기 곤란한 대용량화 및 원자력 발전의 증가추세인 반면, 산업의 발전 및 국민소득의 향상에 따른 하절기 냉방수요의 급격한 증가는 국가의 기간산업인 발전설비의 비효율적 운전을 초래하는 주된 원인이 되고 있다. 따라서 발전설비의 부하조절용으로 즉, 하절기 주간의 첨두부하를 심야시간대로 전이하여 부하 평준화를 이룰 수 있는 축냉식 냉방시스템의 필요성이 증가하고 있다. 축냉식 냉방시스템은 값싼 심야전력을 사용하여 심야시간에 냉동기를 가동하여 축열조에 냉기를 저장한 후에, 다음날 낮시간에는 냉동기의 가동 없이 저장된 냉기를 이용하여 냉방을 함으로써, 주간 최대부하시의 냉방전력을 사용 안하거나 줄일 수 있는 냉방시스템이다.

효과적인 운용을 위해 빙축열시스템의 주요 구성요소 용량감소를 위한 최적화 연구가 필요하고, 운전에너지 비용절감을 위해서는 경제적 운전전략에 대한 연구가 필요하다. 이를 위해 시스템의 중요 구성요소 중의 하나인 축열과정에 대한 시뮬레이션이 실험적인 연구와 함께 병행되어야 한다.

빙축열조의 유형은 제빙현상에 따라서 정적제빙형과 동적제빙형으로 구분되어 진다. 정적제빙형에는 전열면에서 얼음이 생성되고 고착되는 제빙방식으로, 시스템 구성이 간단하다는 장점이 있으나 제빙이 진행될수록 얼음의 두께가 커져 냉

동기의 제빙효율이 낮아지는 단점이 있다. 대표적인 시스템으로 외유형 관외빙착형, 내유형 관외빙착형, 그리고 캡슐형 등이 있다. 정적제빙형은 비교적 시스템의 가격이 저렴하고 설치 및 운전이 용이하고 오랜 기간 동안의 사용실적을 통하여 신뢰성이 충분히 입증되어 빙축열시스템의 거의 대부분을 차지하고 있다. 동적제빙형에는 제빙된 얼음을 연속적으로 이탈시켜 저장하는 제빙방식으로 시스템 구성 및 운전제어가 복잡하다는 단점이 있으나 얼음의 크기 및 두께가 작아 제빙효율이 높으며 부하측으로 얼음을 직접 반송할 수 있다는 장점이 있다. 이의 대표적인 예로 빙박리형과 아이스 슬러리형 등이 있다. 현재까지 관외빙착형에 대한 성능 모델<sup>(1,2)</sup>은 많이 개발이 되어 오고 있지만, 동적제빙형과 캡슐형<sup>(3,4)</sup> 빙축열조에 대한 모델링은 많이 발표되고 있지 않다.

본 연구는 캡슐형을 대상으로 하고 고상의 이동에 의한 발생하는 대류는 배제하고 자연대류가 미치는 영향만을 보다 엄밀히 해석할 목적으로 고상이 고정된 채 용해되는 것으로 가정하고 수치적으로 해석하였다. 캡슐 형상이 상변화에 미치는 영향을 살펴보고 실제적인 잠열 축열시스템을 설계하고 최적화하기 위한 캡슐 형상의 최적화를 위한 기초연구로, 기존에 우수한 성능을 보이는 것으로 보고된 캡슐 형상을 대상으로 몇 가지 형상인자를 변화시키면서 그 영향을 살펴보았다.

**2. 해 석**

**2.1 해석대상모델**

유효면적이 기존의 관외빙착형 시스템에 비하여 50~100% 이상 향상되었고 주름 및 함몰부를 주어 물의 상변화시 내부 압력이 올라가지 않아 구조적으로 매우 안정적이라 발표된 실제 캡슐형상과<sup>(5)</sup> 이의 간략화된 모델 형상을 Fig. 1에 나타내었다. 모델 형상은 2차원 축대칭 형상으로 가정하였기에 실제 3차원 형상과 다소 차이가 있으나 가운데 부분의 함몰과 다른 표면에서의 덩플을 가지는 기본적인 특성은 유지된다. Fig. 2는 Fig. 1(b)의 3차원 모델 형상을 간략히 도시한다. 반경  $R_{eff}$ 인 기존의 구형 캡슐과 비교하기 위해 전체 부피는 변하지 않고 가운데 부분의 함몰( $d_1$ )과 표면에서의 덩플( $d_2$ )을 조정하면서 그

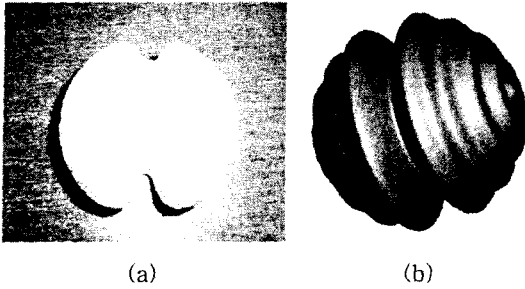


Fig. 1 Capsule shape of (a) real and (b) model case.

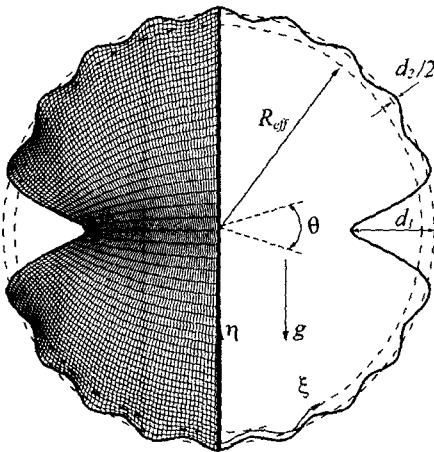


Fig. 2 Schematic diagram of the model and grid system.

형상인자가 상변화에 미치는 영향을 살펴본다. 덩플의 개수 ( $n=3-5$ )에 따라 가운데 함몰부분의 폭은 결정되고 ( $=\theta=180^\circ/(n+1)$ ) 기준 경우를  $d_1=0.4 R_{eff}$ ,  $d_2=0.05 R_{eff}$ 로 하여  $R_{eff}$ 에 대해 상대적인 함몰부분의 크기비율( $d_1/R_{eff}$ )을 고정하고  $d_2=0.025, 0.05, 0.1 R_{eff}$ 에 대한 해석을 수행하여 형상인자  $d_2$ 의 영향을 살펴보고,  $R_{eff}$ 에 대해 상대적인 덩플의 크기비율( $d_2/R_{eff}$ )을 고정하고  $d_1=0.2, 0.3, 0.4 R_{eff}$ 에 대한 해석을 수행하여 형상인자  $d_1$ 의 영향을 살펴보았다. 해석에 사용된 전형적인 격자계와 좌표계를 함께 도시하였다.

해석은 용점  $T_m$ 보다 높은 일정한 온도  $T_w$ 로 유지되는 원관 내부에 균일한 초기온도  $T_0$ 로 고정된 채 충전되어 있는 고상의 상변화물질이 용

Table 1 Thermophysical properties of n-octadecane (C<sub>18</sub>H<sub>38</sub>)

Properties	Value
Melting temperature	28.18°C
Density	814 kg m <sup>-3</sup>
Thermal expansion coefficient	9.1×10 <sup>-4</sup> K <sup>-1</sup>
Viscosity	3.878×10 <sup>-3</sup> kgm <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup>
Latent heat	2.4136×10 <sup>5</sup> J kg <sup>-1</sup>
Specific heat of solid	1.9×10 <sup>3</sup> J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Specific heat of liquid	2.2×10 <sup>3</sup> J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Thermal conductivity of solid	0.390 Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Thermal conductivity of liquid	0.157 Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>

해되는 과정이다. 수치해석시 엔탈피 방법에 의존한 점을 제외하면 비교의 편의를 위하여 공식화에 필요한 기본가정과 해석대상 상변화물질은 타 연구와 일치시켰다. 구체적으로 해석에 도입된 가정은 다음과 같다.

- 용해과정은 중력방향에 대하여 좌우대칭이다.
- 파생각은 무시한다.
- 고상과 액상의 밀도는 동일하며 따라서 상변화에 따른 체적변화가 없고 고상이 고정된 채 용해하는 고정형이다.

상변화물질은 n-Octadecane으로서 그 물성치는 참고문헌 (3)과 동일하다(Table 1).

### 2.2 수치해석

비압축성, 뉴턴유체에 대한 일반형 지배방정식을 직교좌표계에 대해 보존식 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(x^n \rho \phi) + \frac{\partial}{\partial x}(x^n \rho u \phi - x^n \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(x^n \rho v \phi - x^n \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y}) = x^n S(x, y) \tag{1}$$

형상인자  $n$ 은 평면일 경우 0, 축대칭일 경우 1의 값을 가진다. 여기서,  $\phi$ 는 일반적인 종속변수이며,  $\Gamma$ 와  $S$ 는 유효확산계수와 생성항으로  $\phi$ 에 따라 적절히 정의된 값을 Table 2에 나타내었다. 운동량방정식은 임의의 큰 수  $A$ 를 도입함으로써 생성항의 액상분율  $f_l$ 이 1이면 Navier-Stokes 방정식이,  $f_l$ 이 0이면 각 속도성분은 강제적으로 0

Table 2 Variables in the governing equations

$\phi$	$\Gamma$	$S$
1	0	0
$u$	$\mu$	$-\frac{\partial P}{\partial x} - \Gamma \frac{u}{x^2} - A \frac{(1-f_l)^2}{f_l^3}$
$v$	$\mu$	$-\frac{\partial P}{\partial y} + \rho g \beta h - A \frac{(1-f_l)^2}{f_l^3}$
$h$	$\frac{k}{C_{pl}}$	$\frac{C_{pl} - C_{ps}}{C_{pl}} \frac{\partial}{\partial t} \{ \rho f_s (h + T_m) \} - \frac{L}{C_{pl}} \frac{\partial}{\partial t} (\rho f_l)$

이 되며, 에너지방정식도 생성항을 통하여 용해 잠열을  $f_l$ 의 함수형태로 효과적으로 반영하고 있다. 이때 에너지방정식의 종속변수는  $h = T - T_m$  이다.

무차원화된 지배방정식을 비직교좌표계로 변환하기 위하여 좌표변환

$$x = x(\xi, \eta), \quad y = y(\xi, \eta) \quad (2)$$

을 도입하면 식(1)은 다음과 같이 변환된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\bar{J} \rho \phi) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \rho U \phi - \frac{\alpha_\xi \Gamma}{h_\xi} \frac{\partial \phi}{\partial \xi} \right) \\ + \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \rho V \phi - \frac{\alpha_\eta \Gamma}{h_\eta} \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \right) = \bar{J} S(\xi, \eta) \quad (3) \\ - \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \frac{\beta_\xi \Gamma}{h_\xi} \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \right) - \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \frac{\beta_\eta \Gamma}{h_\eta} \frac{\partial \phi}{\partial \xi} \right) \end{aligned}$$

여기서 각 기하학적 계수들은 문헌 (3,6)을 참고한다.

본 연구의 해석영역은 좌우대칭이므로 좌표변환은 영역의 우반부를 대상으로 수행되었다. 이 경우 전체영역을 해석대상으로 한 경우와 비교하여 차이를 확인할 수 없게 일치한 결과를 보여준다. 해석 경계조건은 다음과 같다.

$$U = 0, \quad \frac{\partial V}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial h}{\partial n} = 0 \quad \text{at } \xi = 0 \quad (4a)$$

$$U = 0, \quad V = 0, \quad h = 1 \quad \text{at } \xi = 1 \quad (4b)$$

지배방정식(3)을 유한체적법<sup>(7)</sup>으로 이산화하였으며 SIMPLER 알고리즘에 의존하여 수치해석하였다. 엔탈피 방법의 핵심적인 요소인 각 검사

체적에 대한 액상분율  $f_l$ 의 변화는 Voller and Swaminathan<sup>(8)</sup>에 의해 제안된 방법을 고·액상의 비열이 다른 경우에 대하여 수정하여 적용하였다.

$$\begin{aligned} f_s \frac{\Delta V}{\Delta t} \left[ \frac{\rho L}{C_{pl}} + \frac{C_{pl} - C_{ps}}{C_{pl}} \rho (h + T_m) \right] = \\ - \left[ \sum a_{nb} h_{nb} + h_{no} + h^0 \right] \\ + \frac{C_{pl} - C_{ps}}{C_{pl}} \frac{\Delta V}{\Delta t} \rho \{ f_s^0 h^0 + T_m f_s^0 \} \quad (5) \\ + \frac{\rho L}{C_{pl}} \frac{\Delta V}{\Delta t} f_s^0 \\ f_l = 0 \quad \text{if } (f_l)^{k+1} < 0 \\ f_l = 1 \quad \text{if } (f_l)^{k+1} > 1 \end{aligned}$$

이때 수치해석 관점에서는  $a_P$ 를 매우 큰 값을 주어 수렴속도를 향상시킬 수 있다. 여기서,  $k$ 는 시간스텝,  $\Delta V$ ,  $a_{nb}$ ,  $h_{nb}$ 는 각각 검사체적의 체적, 이산화방정식의 계수 및 인접 검사체적의 엔탈피이다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 검증

실린더 형상은 지배방정식에서 형상인자  $n$ 이 0인 경우에 해당하는 것으로 축열이나 자연대류와 관련하여 많은 연구가 수행된 분야이다. 동일한 프로그램으로 상변화가 없는 자연대류의 경우와, 상변화를 동반하는 등온가열 수평원관내 용해의 경우에 대해 문헌 (3,9)에서 검토하였다.

구 형상은 지배방정식에서 형상인자  $n$ 이 1인 경우에 해당하는 것으로 많은 응용분야가 있음에도 상대적으로 그 연구가 그다지 활발하지 않았던 분야이다. 그 원인 중의 하나는 수치적 처리의 어려움 때문이며 본 연구에서는 축대칭 문제에 대해 Kim et al.<sup>(6)</sup>이 제안한 효율적인 알고리즘을 적용하였다. 엄밀해가 존재하는 순수전도문제, 동심 구형내 자연대류를 해석하여 기존의 실험, 수치해석 결과와 비교하여 일치되는 결과를 얻었다. 구형 캡슐에서 고상이 고정된 채 용해하는 고정형에 대한 해석 결과는 Khodadadi and

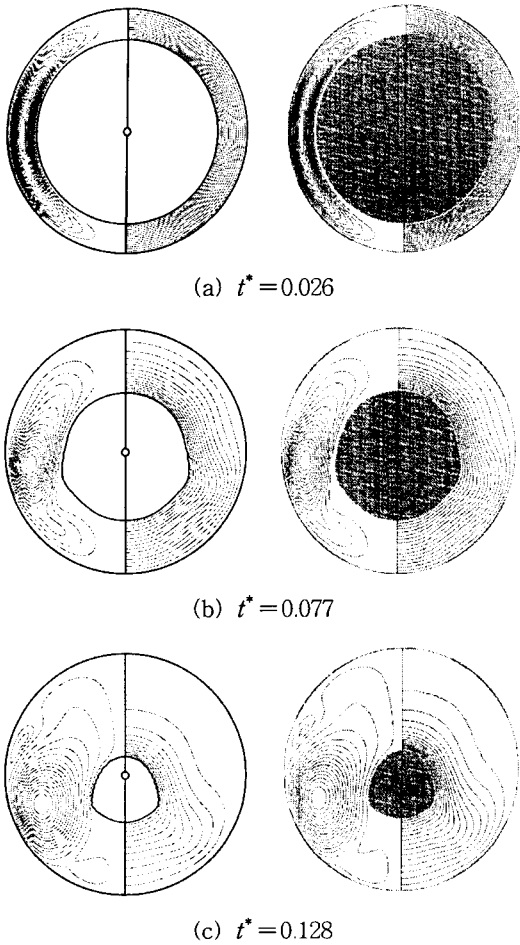


Fig. 3 Comparison of streamlines and temperature contours with reference case.

Zhang<sup>(10)</sup>의 수치해석 결과와 비교하여 몇몇 시간 ( $t^* = Ste \cdot at / R_{eff}^2$ )에 대해 Fig. 3에 제시하였다. 해석조건은  $Pr = 0.03$ ,  $Ra = 17850$ ,  $Ste = 0.0267$ ,  $Sc = 0$ 이고 사용된 상변화 물질의 물성치는 문헌 (10)과 동일하다. 좌측은 본 연구의 결과이며 우측은 Khodadadi and Zhang<sup>(10)</sup>의 수치해석 결과이다.

### 3.2 캡슐 형상 최적화

#### 3.2.1 격자실험

기준 경우 ( $d_1 = 0.4 R_{eff}$ ,  $d_2 = 0.05 R_{eff}$ )에 대해 격자실험을 수행하여 시간에 따른 용해율의 변화

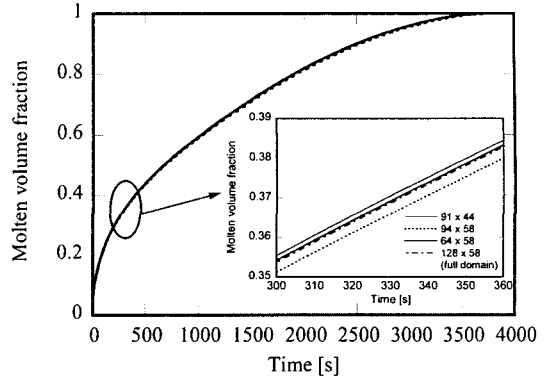
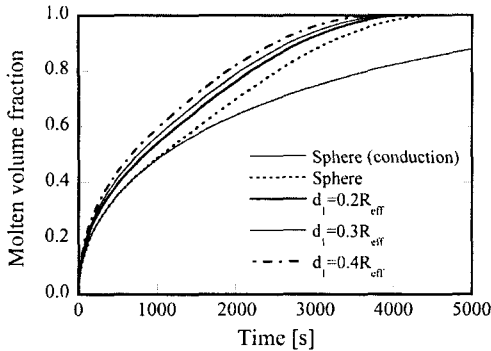


Fig. 4 Grid test.

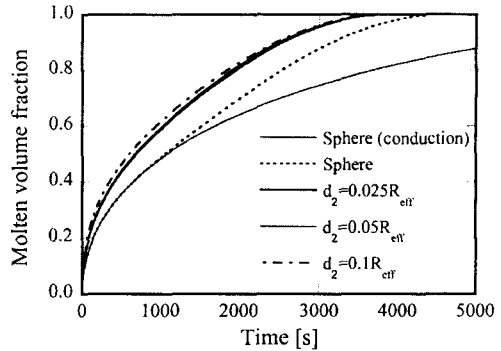
를 비교한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 좌우대칭이라는 가정하에 반구만을 해석영역으로 한  $\xi \times \eta = 91 \times 44$ ,  $94 \times 58$ ,  $64 \times 58$ 의 경우와 전체영역을 해석대상으로 한 경우  $\xi \times \eta = 128 \times 58$ 에 대한 결과를 비교하였다. 각 경우에 대해 그 차이를 구별하기 어려울 정도로 일치하며 차이를 가시화하기 위해 일부분을 확대한 경우에도 거의 일치하는 결과를 보인다. 주의할 사항은, 구형 캡슐의 특성상 반경이 큰 영역에서 약간의 반경 변화도 체적에 큰 영향을 미침을 생각하면  $\xi \times \eta = 94 \times 58$ 의 경우에 보이는 약간의 차이는 전도가 주도적인 응고 초기에 발생한 것으로 무시할 만하다. 즉, 응고 초기의 한 개의 격자보다도 훨씬 작은 반경 변화에 의한 차이이다. 본 연구에서는  $\xi \times \eta = 64 \times 58$ 로 하여 이후의 해석을 수행하였다. 또한 동일한 격자 정밀도로 전체영역을 해석대상으로 한 경우 ( $\xi \times \eta = 128 \times 58$ )와 반구만을 해석한 경우 ( $\xi \times \eta = 64 \times 58$ ) 그 차이는 구별하기 힘들 정도로 일치된 결과를 주어 사용된 좌우대칭 가정은 타당한 것으로 판단된다. 따라서 이후의 과정은 해석영역이 좌우대칭이므로 영역의 우반부를 대상으로 수행하기로 한다.

#### 3.2.2 형상인자의 영향

Fig. 5는 형상인자  $d_1$ 을 고정하고  $d_2 = 0.025$ ,  $0.05$ ,  $0.1 R_{eff}$ 에 대한 해석을 수행하여 형상인자  $d_2$ 의 영향을 살펴보고, 형상인자  $d_2$ 를 고정하고  $d_1 = 0.2$ ,  $0.3$ ,  $0.4 R_{eff}$ 에 대한 해석을 수행하여 형상인자  $d_1$ 의 영향을 살펴본 결과를 시간에 따른



(a)



(b)

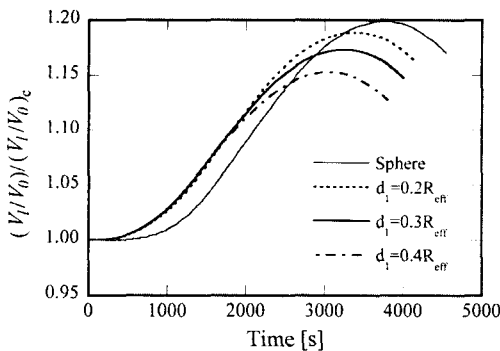
Fig. 5 The timewise variation of molten volume fraction for (a) fixed  $d_2$  and (b) fixed  $d_1$ .

Table 3 Surface area ratio of the present capsule to sphere capsule

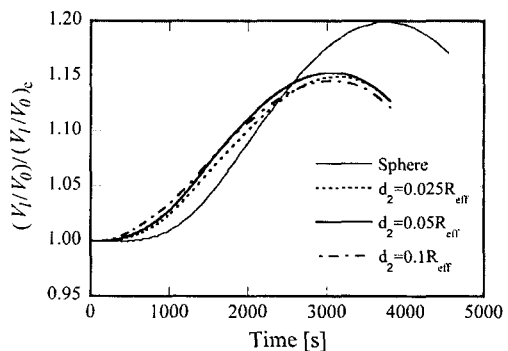
$d_2 \backslash d_1$	$0.2 R_{eff}$	$0.3 R_{eff}$	$0.4 R_{eff}$
$0.025 R_{eff}$			1.2211
$0.05 R_{eff}$	1.1122	1.1811	1.2524
$0.1 R_{eff}$			1.3782

용해율로 표시한 것이다. 기준을 일반적인 구형 캡슐에서의 결과와 비교하여 캡슐 형상이 용해율 증가에 미치는 영향을 살펴보았다. 또한 자연대류의 영향을 가시적으로 나타내기 위해 구형 캡슐의 경우 열전도만에 의한 결과를 함께 제시하였다. 모든 경우에 용해 초기에는 열전도가, 후기에는 자연대류가 지배적인 정성적 경향을 보이며 이는 이미 잘 알려진 사실과 부합하고 캡슐벽 내 표면에서 고상이 성장하여 점차 열저항이 커지는

경향을 잘 보여주고 있다. 캡슐 가운데 부분의 함몰 정도를 나타내는 형상인자  $d_1$ 은 그 값이 커짐에 따라 용해율이 증가한다(Fig. 5(a)). 표면에서의 덩플 정도를 나타내는 형상인자  $d_2$ 도 그 값이 커짐에 따라 용해율이 증가하나(Fig. 5(b)) 증가 정도가 작아 축열에 미치는 캡슐 형상을 결정하는 형상인자로  $d_1$ 의 영향이 주도적임을 알 수 있다. 캡슐 형상의 동결 계면면적이 클수록 제빙 효율이 증가할 것이라는 사실은 어쩌면 당연한 사실이다. Fig. 5의 용해율의 증가와 각 경우에 대응하는 캡슐 표면적증가(Table 3)의 상관관계를 살펴볼 필요가 있다. 하지만 이는 열전도만을 생각했을 때의 예측일 것이다. 용해 후반부의 주도적인 열전달 메카니즘은 자연대류로 계면면적을 넓히는 방향으로의 캡슐 형상변화가 대류열전달을 방해해서는 전체적인 용해율이 오히려 나빠질



(a)



(b)

Fig. 6 The timewise variation of the ratio of molten volume fraction with that of pure conduction for (a) fixed  $d_2$  and (b) fixed  $d_1$ .

수도 있을 것이다. 이런 관점에서 각각의 캡슐 형상에 대해 열전도만이 존재할 경우에 대한 결과를 기준으로 하여 도시한 Fig. 6을 살펴볼 필요가 있다. 응고 초기에 열전도가 주도적임을 다시 한번 확인할 수 있다. 또한 형상인자  $d_1$ 의 영향이  $d_2$ 보다 훨씬 큼을 확인할 수 있다. 캡슐 형상의 표면적이 클수록, 즉  $d_1$ 이 커질수록 용해율이 커짐과 동시에 자연대류에 의한 영향이 줄어들고 있음에 주의할 필요가 있다. 즉, 캡슐 형상의 표면적이 커질수록 열전도에 의한 열전달 증가와 자연대류 강도가 감소하는 효과가 상충된다. 응고 초기에는 열전도에 의한 열전달 증가로 인한 용해율 증가가 두드러지겠으나 시간이 지남에 따라 자연대류 강도가 감소하여 오히려 일반

구형의 경우보다 나쁜 성능을 보일 수도 있음을 알 수 있다.

일반 구형 캡슐과 비교하여 상변화에 미치는 주도적인 형상인자인  $d_1=0.2, 0.4$ 인 경우에 대해  $t=10 \text{ min}, 30 \text{ min}, 45 \text{ min}$ 에서의 유동장과 온도장을 Fig. 7~Fig. 9에서 살펴보았다. 캡슐 가운데 부분의 함몰된 부분이 자연대류의 발달을 끊어 주는 역할을 하고 있으며 이로 인해 전반적인 유동형태도 변하게 된다.  $d_1=0$ 인 일반 구형 캡슐의 경우 하부 대칭면 상경계면이 오목한 형상을 보이거나 캡슐 가운데 부분의 함몰 정도가 커질수록 불룩한 상경계면을 나타낸다. 각 경우에 대해 열전도방향과 자연대류방향이 일치하는 상부가 두 방향이 서로 반대인 하부에 비해 용해가 왕성하게 일어났음을 알 수 있다.

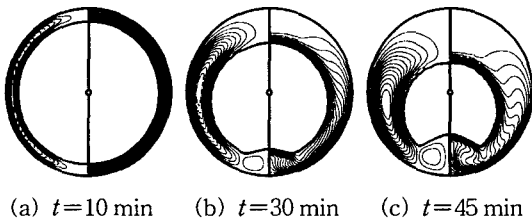


Fig. 7 Flow pattern and temperature distribution for  $d_1=0$  and  $d_2=0$ .

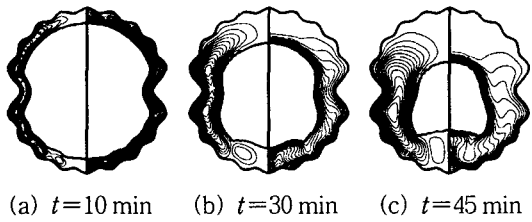


Fig. 8 Flow pattern and temperature distribution for  $d_1=0.2 R_{eff}$  and  $d_2=0.05 R_{eff}$ .

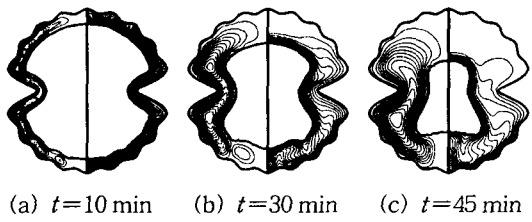


Fig. 9 Flow pattern and temperature distribution for  $d_1=0.4 R_{eff}$  and  $d_2=0.05 R_{eff}$ .

#### 4. 결 론

발전설비의 부하조절용으로 축냉식 냉방시스템의 필요성이 증가하고 있는 시점에서 시스템의 중요 구성요소 중의 하나인 정적제빙형인 캡슐형에서의 상변화 열전달을 수치적으로 해석하였다. 수치해석 방법은 고정격자계에 의한 엔탈피 방법에 의하였다. 캡슐 형상이 상변화에 미치는 영향을 살펴보고 실제적인 잠열축열시스템을 설계하고 최적화하기 위한 캡슐 형상의 최적화를 위한 기초연구로, 기존에 우수한 성능을 보이는 것으로 보고된 캡슐 형상을 대상으로 몇 가지 형상인자를 변화시키면서 그 영향을 살펴보았다. 반경  $R_{eff}$ 인 기존의 구형 캡슐과 비교하기 위해 전체 부피는 변하지 않고 가운데 부분의 함몰( $d_1=0.2, 0.3, 0.4 R_{eff}$ )과 표면에서의 덩플( $d_2=0.025, 0.05, 0.1 R_{eff}$ )을 조정하면서 그 형상인자가 상변화에 미치는 영향을 살펴본 결과 형상인자로  $d_1$ 의 영향이 주도적임을 알 수 있었다. 하지만 캡슐 가운데 부분의 함몰된 부분이 자연대류의 발달을 끊어 주는 역할을 하고 있으며 이로 인해  $d_1$ 을 키움에 따라 응고 초기에는 열전도에 의한 열전달 증가로 인한 용해율 증가가 두드러지겠으나 응고 중반 이후에는 오히려 자연대류 강도가 감소하는 효과가 나타나 두 효과가 상충된다. 따라서 전체적인 성능향상을 위해서는 형상의 최적

화가 필요할 것이다. 표면에서의 덩플 갯수도 형상인자로 선택하여 해석하였지만 그 영향이 작은 것으로 나타났다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부에서 시행한 전력산업연구개발사업의 기술개발로서 기초전력공학공동연구소 주관으로 수행되었으며, 이에 관계자에게 감사드린다.

## 참고문헌

1. Kim, D. H., Kim, D. C., Kim, I. G., Kim, Y. K. and Yim, C. S., 1997, A study on the heat transfer characteristics during outward melting process of ice in a vertical cylinder, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 9, pp. 171-179.
2. Yamada, M., Fukusako, S., Kawanami, T. and Watanabe, C., 1997, Melting heat transfer characteristics of a horizontal ice cylinder immersed in quiescent saline water, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 40, pp. 4425-4435.
3. Chung, J. D., Lee, J. S. and Yoo, H., 1997, Thermal instability during the melting process in an isothermally heated horizontal cylinder, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 40, pp. 3899-3907.
4. Kawanami, T., Fukusako, S., Yamada, M. and Itoh, K., 1999, Experiments on melting of slush ice in a horizontal cylindrical capsule, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 42, pp. 2981-2990.
5. EnE System, [www.enesystem.co.kr](http://www.enesystem.co.kr)
6. Kim, C.-J., Ro, S. T. and Lee, J. S., 1993, An efficient computational technique to solve the moving boundary problems in the axisymmetric geometries, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 36, pp. 3759-3764.
7. Patankar, S. V., 1980, *Numerical heat transfer and fluid flow*, Hemisphere Publishing Corporation.
8. Voller, V. R. and Swaminathan, C. R., 1991, General source-based method for solidification phase change, *Numerical Heat Transfer*, Part B, Vol. 19, pp. 175-189.
9. Chung, J. D., Kim, C.-J., Yoo, H. and Lee, J. S., 1999, Numerical investigation on the bifurcative natural convection in a horizontal concentric annulus, *Numerical Heat Transfer*, Part A, Vol. 36, pp. 291-307.
10. Khodadadi, J. M. and Zhang, Y., 2001, Effect of buoyancy-driven convection on melting within spherical containers, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 44, pp. 1605-1618.