

## 에너지 축열보드 열해석을 위한 컴퓨터 수치해석

강용혁 · 엄태인\* · 곽희열

한국에너지기술연구소, \*대전산업대학교

### Computer Simulation for the Thermal Analysis of the Energy Storage Board

Yong-Hauck Kang, Taein Ohm\* and Hee Yeol Kwak

Korea Institute of Energy Research, \*Taejon National University of Technology

#### 요 약

캡슐형 잠열재를 이용한 열저장 시스템은 바닥 난방 및 건물 난방에서 매우 효과적인 시스템이다. 이러한 시스템 개발에 필수적인 요소가 열유동 매체가 순환하는 파이프 주변의 캡슐내 온도 분포와 열유동 매체의 유량 등이다. 그러므로 본 연구에서는 3차원 비정상 상태에서 Navier-Stokes 방정식, 난류모델을 비롯한 스칼라 보존 방정식을 적용하여 캡슐 블록의 온도 분포 및 파이프 내의 유동장 해석을 수행하였다. 또한 본 연구와 같이 계산 영역이 특별한 기하학적 현상을 형성(circle + square)인 문제 해결하는데 적용할 수 있는 새로운 격자 생성 기술(MBFG/CCM)을 개발하였다. 격자계는 파이프에서 원형 격자를 이용하였고, 캡슐 블록에서 사각 격자를 이용하여 다중격자와 미세격자를 결합하여 사용하였다. 본 연구의 목적은 컴퓨터를 이용한 수치해석적 방법을 미세 캡슐을 이용한 축열보드에 적용하여 2 종류의 열경계 상태에 대하여 속도와 온도분포를 계산하여 비교분석을 하는 것이다. 온도는 축열 보드의 한 쪽 면은 대류면이고 다른 한쪽면은 단열면인 경우(Case 2)보다 양면 모두 단열인 경우(Case 1)일 때 더 높게 상승하였다. 온수 파이프 중심선인  $Y=0$ 에 가까운 영역에서 Case 1과 Case 2 사이에 축열 보드 내에서 온도 차이는 확연하게 나타났다. 향후 수치해석의 정확도를 높이고 축열 보드의 열전달 현상을 보다 정확히 계산하기 위해서는 위치 및 시간에 따른 정밀한 온도 측정값이 필요하고 특히 잠열재인 미세 캡슐이 상변화를 하므로 온도 변화에 따른 물질의 비열( $C_p$ )과 열전달율( $\lambda$ )을 고려한 방정식이 요구된다.

**Abstract** — Latent heat storage system using micro-encapsulated phase change material is effective method for floor heating of house and building. The temperature profile in capsule block and flow rate of hot water are important parameters for the development of heat storage system. In the present study, a mathematical model based on 3-D, non-steady state, Navier-Stokes equations, scalar conservation equations and turbulence model (k-ε), is used to predict the temperature profiles in capsule and the velocity vectors in hot water pipe. The multi-block grids and fine grids embedding are used to join the circle in hot water pipe and square in capsule block. The phase change process of the capsule is quite complex not only because the size of phase change material is very small, but also because phase change material is mixed with the cement to form thermal storage block. In calculation, it's assumed that the phenomena of phase change is limited only the thermal properties of phase change material and the change of boundary is not happened in capsule. The purpose of this study is to calculate the temperature profiles in capsule block and velocity vectors in hot water pipe using the numerical calculation. Two kinds of thermal boundary condition were considered, the first (case 1) is the adiabatic condition for the both outside surfaces of the wall, the second (case 2) is the case in which one surface is natural convection with atmosphere and another surface is adiabatic. Calculation results are shown that the temperature profile in capsule block for case 1 is higher than that for case 2 due to less heat loss in adiabatic surface. Specially, in the domain of near  $Y=0$ , the difference of temperature is greater in case 1 than in case 2. The detailed experimental data of capsule block on the temperature profile and the thermal properties such as specific heat and coefficient of heat transfer with the various temperature are required to predict more exact phenomena of heat transfer.

## 1. 서 론

세계적인 에너지 고갈과 수급의 불안정 및 환경공해 문제로 인하여 청정에너지 개발은 물론 효율적인 에너지 이용에 큰 관심이 집중되고 있다. 이러한 관점에서 무한정, 무공해인 태양열 에너지를 이용함에 있어서 그 간 문제점으로 지적되어온 공급과 소비의 시간적, 공간적 불일치로 인하여 이용 효율이 떨어지므로 경제성이 낮았다. 그러므로 이들 문제를 해소하기 위한 방법으로 효과적인 에너지 저장에 대한 연구가 이루어지면서 축열 방법에 대한 연구가 많이 수행되고 있다.

현재 이용되고 있는 축열 방법으로는 축열 물질의 온도 변화에 의한 현열 저장(sensible heat storage)과 축열 물질의 상변화시 잠열에 의한 잠열저장(latent heat storage)이 있다<sup>[1][3]</sup>. 현열 저장은 동일한 물질의 상에서 에너지를 저장하므로 에너지 저장량에 따라 온도가 변화하고, 에너지 회수시 열유속이 변화하며 저장온도가 고온인 경우에는 열손실이 크므로 단열이 요구된다. 반면 잠열저장은 물질의 상변화를 통하여 동일한 온도에서 에너지를 저장하고 회수하므로 균일한 에너지 활용이 가능하며 에너지 저장 밀도가 크기 때문에 축열조의 부피를 크게 줄일 수 있다. Table 1에서 제시한 바와 같이 저장 방법에 따라 축열조의 부피를 비교해 보면 약 4~12 배 차이가 난다.

현열에 의한 축열 방법은 고전적인 방법인 반면 상변화 물질(phase change material: PCM)에 의한 잠열 축열 방법은 1940년대 후반부터 연구가 착수된 이래 상변화 물질과 축열 형태 개발에 중점으로 이루어져 상변화 물질 개발은  $\text{NaNO}_3$ (sodium nitrate)와  $\text{NaNO}_2$  혼합물을 상변화 물질로 이용한 열전달 연구<sup>[4]</sup>와 잠열재 및 축열조 열성능에 대한 연구<sup>[5][6]</sup>가 일본 및 미국에서 이루어졌으며, 태양열 축열조에 대하여 상변화 물질로  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 를 사용하여 축열조의 크기를 1/2~1/4까지 줄일 수 있었다<sup>[7]</sup>. 국내에서는 한국에너지기술연구소에서  $\text{CH}_4(\text{CH}_2)_{12}\text{COOH}$ (myristic acid)와  $\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (sodium acetate trihydrate)를 난방용 바닥 장판에 이용한 연구가 이루어 졌다<sup>[1][3]</sup>. 축열 형태로는 상변화 물질을 적재한 형태의 열전달 연구와 미세한 구형의 캡슐

**Table 1. Volume of material required for the thermal energy storage of  $10^6$  kJ.**

Type	Material	Volume ( $\text{m}^3$ )
Sensible Heat Storage	Rock	33
	Water	13
Latent Heat Storage	Salt hydrate	2.8

**Table 2. Thermodynamic properties of the micro-encapsulated phase change material (PCM).**

Melting temperature	58°C
Diameter	2.65 mm
Latent heat	272.44 kJ/kg
Specific heat (solid)	2.79 kJ/kg·K
Specific heat (liquid)	3.68 kJ/kg·K
Thermal conductivity (solid)	0.55 W/m·K
Density (solid)	1.45 g/cm <sup>3</sup>
Over-cooling Temperature	10°C
Velocity of growth	2.4 mm/sec

로 제작하여 전열 특성과 내구성 실험을 수행하였다<sup>[4][5][8][9]</sup>. 그러나 현재 국내에서는 상변화 물질을 이용한 축열보드에서 비정상 상태 열전달에 관한 이론적 연구가 부족하여 최적 축열재의 량 및 온수 유량과의 상관관계에 대한 규명이 시급한 과제이다. 그러므로 본 연구에서는 컴퓨터를 이용한 수치해석적 방법을 통하여 미세 캡슐을 이용한 축열보드에 대하여 2종류의 열 경계 상태에 대하여 온수의 속도분포와 축열보드 내의 온도분포를 계산하여 비교, 분석을 하였다.

본 연구에서 사용한 상변화 물질의 열적 특성을 Table 2에 제시하였으며, 몰타르와 혼합하여 잠열재 층을 이루게 된다.

## 2. 수학적 모델

3차원 비정상 상태 Navier-Stokes 방정식, 스칼라 보존 방정식 및 난류 모델(k-ε)에 기초한 수학적 모델을 온수 파이프에서의 유체 속도 분포와 캡슐의 온도 분포를 구하기 위하여 수치해석적 방법을 이용하였다. 캡슐 내의 상변화 물질은 크기가 매우 작을 뿐만 아니라, 미세 캡슐은 축열보드 내에서 시멘트와 균일하게 섞여있기 때문에 매우 복잡한 과정이다. 그러므로 본 연구에서는 상변화 물질의 상태변화는 단지 물질의 열적 성질을 변화시킬 뿐 캡슐에 의한 경계조건의 변화는 초래하지는 않는다고 가정하였다.

축열 보드의 열적 경계조건은 2가지가 있으며, 첫째(case 1)가 축열 보드 상·하의 표면 모두가 단열상태이고, 둘째(case 2)는 상부 표면이 공기와 접촉하여 자연대류를 일으키는 대류면이고 하부면은 단열 상태이다.

본 연구에서 사용한 모델은 미세 캡슐 축열보드를 가로 100 mm, 세로 100 mm, 높이 50 mm로 정하였으며 Fig. 1에 X, Y면의 3차원 형상을 나타내었다. 본 모델은 기하학적으로 가로축을 기준으로 대칭이므로, 계산영역의 세로의 길이는 실제 캡슐 길이의 절반이 된다. 또한 축열보드의 상·하면이 모두 단열면인 경우 계산영역

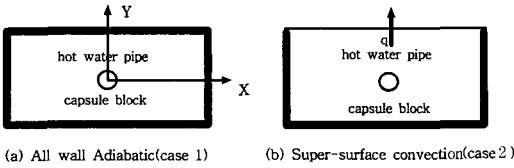


Fig. 1. Schematic diagram of capsule block and hot water pipe.

역의 높이는 전체 지면 높이의 절반인 25 mm이다. 계산영역에서 원형의 온수 파이프 부분을 제외하고는 multi-block BFC(Body Fitted Coordinate) 격자계를 사용하기 때문에 X-Y에서의 좌표의 방향은 매우 복잡하므로 전체 계산 영역의 모든 부분들을 나타내기는 어렵다. 그러나 모든 BFC의 Euclidean 공간에서 직교좌표는 계산영역의 모든 점에서 일정하며, 온수 파이프의 입구 조건은 다음과 같다.

- 넓이방향은 X, 높이방향은 Y, 그리고 길이방향은 Z이다.
- 캡슐안의 관 지름은 6.35 mm이다.
- 유입수의 유동속도는 1.0 l/min이고, 온도는 70°C이다.
- 대기의 주변온도는 15°C이다.

비정상 상태의 계산에서 초기조건은 캡슐과 주변에서 열평형을 이루고 있으며, 캡슐의 온도는 주변온도와 동일한 15°C로 정하였다.

2-1. 지배방정식

본 연구에서 계산하고자 하는 캡슐 축열보드의 열유동 현상을 비정상 상태로 가정하고 축열보드 내에 설치된 온수파이프에서 유동하는 액체는 Newton 유체로 가정하였으며, 이를 지배하는 연속방정식, 운동방정식 및 에너지방정식을 시간평균 형태로 기술하면 다음과 같다.

◆ 연속 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}[\alpha_k \rho_k] + \frac{\partial}{\partial x_i}[\alpha_k \rho_k U_{k,i}] = 0 \tag{1}$$

$\rho_k$  : 상 k의 평균밀도  
 $U_{k,i}$  : 각 상 k(k=s, l)에서 I성분의 평균속도  
 $\alpha_k$  : 국부 평형 방정식을 구성하는 상 k의 체적분율로 관계식은 다음과 같다. 즉  $\sum_{k=1,s} \alpha_k = 1$

◆ 운동 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}[\alpha_k \rho_k U_{k,i}] + \frac{\partial}{\partial x_j}[\alpha_k \rho_k U_{k,i} U_{k,j}] = -\alpha_k \frac{\partial p_i}{\partial x_i} + \alpha_k \rho_k g_i + \frac{\partial}{\partial x_j}[-\alpha_k \rho_k \overline{u_{k,i}' u_{k,j}'} + \tau_{k,ij}] + I_{k,i} \tag{2}$$

$p_i$  : 액상에서의 평균압력

$u_{k,i}'$  ; 순간속도의 변동량  
 $\rho_k \overline{u_{k,i}' u_{k,j}'}$  ; 액상(k=l)에서는 난류 Reynolds 전단응력 텐서이고 고상(k=s)에서는 입자 응력 텐서의 운동 부분  
 $\tau_{k,ij}$  ; 액상에서는 응력텐서의 점성 부분이고 고상에서는 입자들의 상호 충돌에 기인한 입상 응력텐서  
 $I_{k,i}$  ; 평균압력에 의한 영향을 뺀 후 상 사이에서 계면 운동량의 전달 부분으로 국부 평형식은 다음과 같다. 즉

$$\sum_{k=1,s} I_{k,i} = 0$$

운동 방정식 계산의 종결은 계면 전달항,  $I_{k,i}$ 을 비롯하여 Reynolds 응력항,  $\rho_k \overline{u_{k,i}' u_{k,j}'}$  과 분자 점성항 또는 고체 충돌에 의한 응력항인  $\tau_{k,ij}$ 의 식에 의하여 결정된다.

◆ 에너지 방정식

$$\rho C_v \frac{DT}{Dt} = -\nabla \cdot \vec{q} - p \nabla \cdot \vec{U} + v \Phi^* + q^* \tag{3}$$

- $\vec{q}$  : 열 flux
- $\vec{U}$  : 속도 벡터
- $\Phi^*$  : 점성 소모에너지
- $q^*$  : 내부열원
- $v$  : 등점성 계수

온수 파이프 내 유체를 Newton 유체로 가정하여 점성에 의한 전단 응력항을 기술하면 다음과 같다.

◆ Molecular viscous transport

$$\tau_{i,j} = -\rho_l \nu_l \left[ \frac{\partial U_{l,i}}{\partial x_j} + \frac{\partial U_{l,j}}{\partial x_i} \right] + \frac{2}{3} \delta_{ij} \left[ \rho_l \nu_l \frac{\partial U_{l,m}}{\partial x_m} \right] \tag{4}$$

◆ Turbulent transport

Reynolds 전단력항을 계산하기 위하여 eddy 점성 개념을 도입하여 기술하면 다음과 같다.

$$\rho_l \overline{u_{l,i}' u_{l,j}'} = -\rho_l \nu_l' \left[ \frac{\partial U_{l,i}}{\partial x_j} + \frac{\partial U_{l,j}}{\partial x_i} \right] + \frac{2}{3} \delta_{ij} \left[ \frac{1}{2} \rho_l \overline{u_{l,m}' u_{l,m}'} + \rho_l \nu_l' \frac{\partial U_{l,m}}{\partial x_m} \right] \tag{5}$$

난류 점성계수  $\nu_l'$ 는 난류 운동에너지  $k_i$ 과 특성시간  $\tau_i$ 의 함수이다. 난류모델은 계면 난류 운동량 전달을 무시함으로써 표준 k-ε 모델을 사용할 수 있다. 강력한 난류 에디의 특성시간은 운동에너지,  $k_i$ 과 운동에너지 소산율  $\epsilon_i$ 로부터 직접 산출된다.

$$\nu_l' = \frac{2}{3} k_i \tau_i \quad \rho_l k_i^2 = \frac{1}{2} \rho_l \overline{u_{l,i}' u_{l,i}'} \quad \tau_i = \frac{2}{3} C_i \frac{k_i}{\epsilon_i}$$

$k_i$ 과  $\epsilon_i$ 을 산출하기 위한 두 개의 전달방정식은 다음과 같다.

$$\alpha_i \rho_l \frac{\partial k_i}{\partial t} + \alpha_i \rho_l U_{l,i} \frac{\partial k_i}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} C_2 \alpha_i \rho_l \nu_l' \frac{\partial k_i}{\partial x_j}$$

$$- \alpha_i \rho_i \varepsilon_i - C_3 \alpha_i \rho_i \overline{u_{i,j} u_{i,j}} \frac{\partial U_{i,j}}{\partial x_j} \quad (6)$$

$$\alpha_i \rho_i \frac{\partial \varepsilon_i}{\partial t} + \alpha_i \rho_i U_{i,j} \frac{\partial \varepsilon_i}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} C_4 \alpha_i \rho_i V_i' \frac{\partial \varepsilon_i}{\partial x_j} - C_5 \alpha_i \rho_i \overline{u_{i,j} u_{i,j}} \frac{\partial U_{i,j}}{\partial x_j} \frac{\varepsilon_i}{k_i} \quad (7)$$

위의 식에서 사용된 난류모델의 계수는 다음과 같다.

$$C_1 = 0.09 \quad C_2 = 1.00 \quad C_3 = 0.769 \quad C_4 = 1.44 \quad C_5 = 1.92$$

한편 단일 상에서 계면 운동량 전달은 다음과 같은 관계를 가진다. 즉  $I_{i,j} = -I_{j,i} = 0$

### 2-2. 초기조건과 경계조건

모델 방정식을 풀기 위해서는 적절한 초기 조건과 경계 조건이 필요하며, 초기조건은 문제에 따라 각각 다르다. 입구에서는 각 상에 대한 질량유속,  $\alpha_k \rho_k U_k$  및 온도,  $T_k$ 를 경계조건으로 주어져야 한다. 출구에서 압력은 대기압이고, 층류에서 관통할 수 없는 고체벽에서 액체의 벽에 수직인 속도 성분은 0으로 정하였다. 난류인 온수파이프 내 점성 경계 저층에서는 운동량과 난류전달 방정식에 대한 벽함수는 다음과 같은 경험식을 이용하였다.

$$U_{i,j}^+ = \frac{1}{K} \log x_j^+ + B \quad (8)$$

$$U_{i,j}^+ = \frac{U_{i,j}}{U^*} \quad x_j^+ = \frac{x_j}{x^*} \quad U^* = \left( \frac{\tau_{i,j}}{\rho_i} \right)^{1/2} \quad x_j^* = \frac{U}{(\tau_{i,j} \rho_i)^{1/2}}$$

$$K = 0.465 \quad B = 5.50 \quad k = \frac{U^{*2}}{C_1^{1/2}} \quad \varepsilon = \frac{U^{*3}}{Kx_j}$$

고체벽의 경계면에서는 no-slip 조건을 적용하였고, 단열면과 대칭면에서 경계조건은 다음과 같이 표면에서 에너지 유속이 0임을 가정한다.

$$\frac{\partial T}{\partial x_j} = 0$$

대류 열전달 표면에서는 표면과 대기사이의 열유속을 다음식에 의하여 계산하였다.

$$q = h (T_{air} - T) \quad (9)$$

$T_{air}$  : 대기온도

$h$  : 대류 열전달 계수

### 2-3. 격자계(grid)

본 연구에서 사용한 격자계는 원형과 사각형을 합하

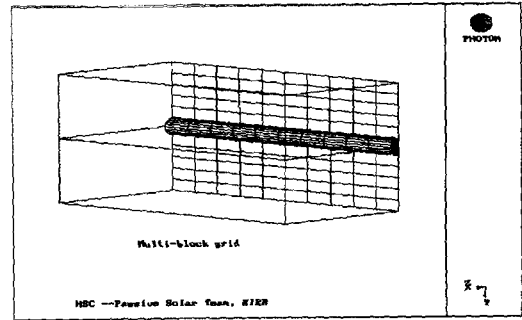


Fig. 2. 3-D MBFGE grid of capsule.

여 사용하였으며, 온수 파이프 부분에서는 다중 격자와 미세 격자를 원형으로 적용하였고 나머지 캡슐의 블록 부분에서는 사각형 격자를 적용하였다. 현재까지 온도 변화가 큰 온수 파이프 부분의 정밀한 수치해석을 위해서는 조밀한 격자를 형성하여 이용하여 왔으나 이 영역에서 난류 경계층은 사각형 격차가 존재하므로 사다리꼴 형태의 격자를 피할 수 없으며, 계면에서 고체 표면의 조도 수준에 따라 결정되므로 수치해석 결과에는 도움이 되지 못한다. 그러므로 본 연구에서는 이러한 문제점을 해소하기 위하여 MBFGE(multi-block grids and fine-grid embedding)과 CCM(collocated covariant method)을 채택하였으며 Fig. 2에 제시하였다.

## 4. 컴퓨터 수치계산

유체 유동 및 열전달 지배 방정식은 미분의 형태로 표시되기 때문에 직접적으로 수치해석은 불가능하므로 PHOENICS에서는 지배 방정식을 유한체적법(finite volume formulation)을 사용하여 계산하였다.

CFD에서의 중요한 고려 사항은 유한 체적방정식에서 대류항의 이산화이며, 이 과정에서 핵심은 격자의 블록 중심에 저장되는 대류변수와 이 변수의 각 체적면에서의 대류값 사이의 적절한 관계를 정하는 것이다. PHOENICS에서는 HDS(hybrid differencing scheme)를 대표적인 scheme이나 UDS(upwind differencing scheme), QUICK(Quadratic Upwind Interpolation for Convection Kinematics)scheme이 이용되고 있다. 유한 체적방정식은 일정한 순서로 배열되어 있는 격자판에서 보존 방정식을 해석하기 때문에 수렴성이 우수하다. 이유는 다음과 같다.

UDS체계는 간단하고 안정적이지만 대류현상이 지배적인 문제의 수치해석에서는 심한 수치적 확산이 일어나 변수들의 변위가 심하게 될 수 있는 경우에는 정확한 해를 얻는 것이 방해받을 수 있다. 격자 블록의 Pe

수가 2 이상일 때 HDS는 물리적 확산을 생략한 1차 UDS를 사용하므로 절대적으로 안정하지만, 격자판 각 격자 방향에 비교하여 흐름의 방향이 경사진 경우에는 크게 확산될 수 있다.

일정한 순서로 배열된 MBFGE/CCM 해는 높은 정확도를 확보하여 대류항을 처리함으로써 수치적 확산의 영향을 완화시킬 수 있다. PHOENICS에서 QUICK scheme 외에 높은 차수의 scheme은 Rubin과 Khosla (1982)의 수정방법 등이 있다. 난류를 계산하기 위해서는 k-ε 모델을 이용하며, 전체 계산의 수렴을 향상시키기 위해 under-relaxation의 방법을 사용한다.

경계조건으로서 벽쪽에서 속도 분포에 대한 log-law는 가스상태에서 적용된다. 바깥쪽에는 진공압력이 0으로 표현되는데, 이것은 존재 평면을 통해 출입이 없는 고체로 취급한다. 대칭은 유클리드 공간(Euclidean space)에서 y방향에 대해 대칭면으로 적용된다.

### 5. 결과 및 고찰

본 연구에서는 온수 파이프와 캡슐 블록 주위의 유체 속도 및 온도 분포를 외부 벽면이 모두 단열인 조건(case 1)과 상부 표면은 대기와 자연대류를 일으키고 나머지 3개 벽면이 단열인 조건(case 2)에 대하여 PHOENICS v2.1.3을 이용하여 계산하였다.

#### 5-1. 벽면이 모두 단열인 경우의 온도장(case 1)

비정상 상태에서 시간에 따른 캡슐블록의 온도 분포를 계산하기 위해서는 초기 slab의 온도 분포 자료를 입력할 경우 시간에 따른 정확한 온도 분포를 계산할 수 있지만, 본 연구에서는 온도 분포의 측정자료가 확보되지 못하여 초기 온도를 균일 온도분포를 가정하여 계산하였다. Fig. 3~Fig. 5는 비정상 상태에서 각각 2, 6, 10

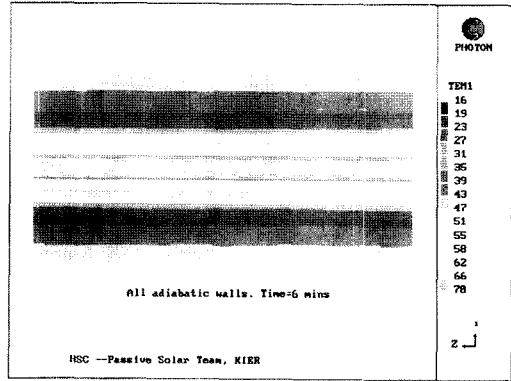


Fig. 4. Temperature distribution for Case 1 after 6 minutes.

분이 경과했을 때 X-Z 평면의 온도 분포를 보여주고 있으며, 여기서 중앙 부분은 높은 온도를 나타내고 있다. (물의 입구 온도는 70°C이다). 이들 그림에서 흰색 부분은 온도 경계 부분으로서 실제 온도값을 나타내지 않고 있다.

Fig. 3으로부터 알 수 있듯이 대기와 접촉하고 있는 표면의 온도는 약 20°C이나 온수관 근처의 캡슐 온도는 약 50~55°C까지 상승하게 된다. 온도의 난류 경계층은 온수관 안쪽에서 충분히 발달되어 있으며, 등온선의 분포는 층류 저층 경계에서 발달함을 보여주고 있다.

Fig. 4는 초기부터 시간이 6분 경과할 때의 온도 분포를 나타내고 있으며 여기서 특이한 사항은 잠열재 부분 전영역의 온도가 27°C 이상이고, 가장 낮은 온도 영역은 표면으로서 온도가 약 27°C이다.

Fig. 5는 시간이 10분 경과할 때 온수 파이프로부터 잠열재에 전달된 열에 의한 온도 분포를 나타낸 것으로서 표면 온도가 약 33°C 이상임을 알 수 있다.

층류 저층 경계에서 속도 분포는 Fig. 6에서 나타난 바와 같이 벽으로부터 일정한 범위 안에서 완전히 발달

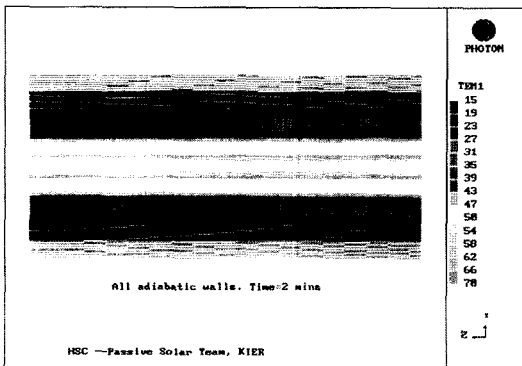


Fig. 3. Temperature distribution for Case 1 after 2 minutes.

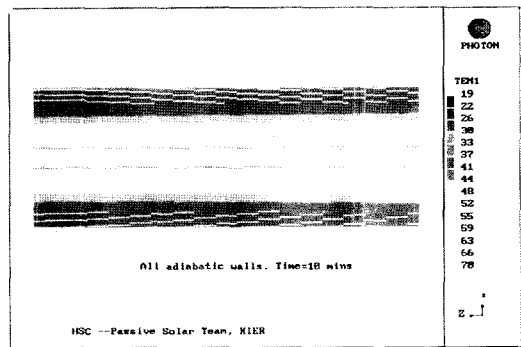


Fig. 5. Temperature distribution for Case 1 after 10 minutes.

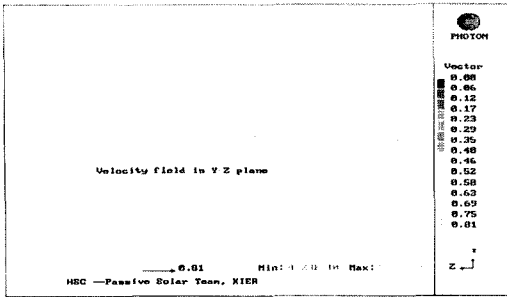


Fig. 6. Velocity field inside hot water pipe for Case 1.

된 난류 영역과 연결되며, 온수관의 유체가 점성유체가 되기 때문에 균일 속도일 때 파이프의 입구 경계층은 파이프의 표면을 따라 형성된다. 파이프 입구 근처에서 경계층 발달은 평판을 따라 흐르는 유동과 유사하나, 경계층이 발달하는 반대쪽 벽이 존재하기 때문에 유동분포는 평판의 경우와 동일할 수는 없다.

Fig. 3으로부터 파이프 내의 유동은 경계층이 발달하여 파이프 단면을 채우기 때문에 완전히 발달된 유동이 형성됨을 보여주며, 이 경우 온도 경계층의 입구길이 (starting or entrance length)는 파이프 전체 길이의 1/3이다. 일반적으로 속도 경계층의 입구길이는 온도 경계층의 입구길이 보다 짧게 나타난다. 입구길이에서 직경

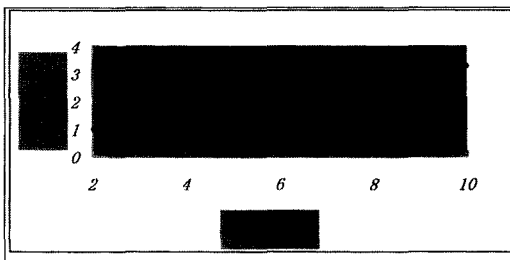


Fig. 7. Temperature increase with time for Case 1 (Yellow area).

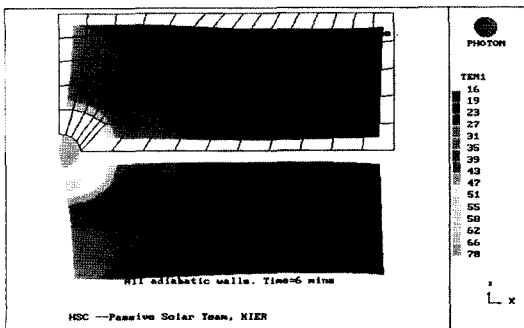


Fig. 8. Temperature distribution in X-Y plane for Case 1.

에 따른 속도 분포는 최대 속도인 중심으로부터 양쪽 벽에서 0까지 변하는 경계층을 Fig. 4에서 알 수 있다.

위의 계산 결과에서 알 수 있는 것은 온수 파이프 주위 온도가 초기에는 빠르게 증가하나, 시간에 경과함에 따라 증가속도가 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 이 결과는 Fig. 7에 나타난 바와 같다.

Fig. 8은 시간이 초기부터 6분이 경과했을 때 축방향에서 X-Y평면의 온도 분포를 자세히 나타낸 것으로 Super-boundary에 온도 윤곽선이 구부러지는 이유는 라플라스 눈금(Laplace 격자)이 형성되기 때문이다.

### 5-2. 한쪽 면은 대류 열전달이 일어나고 다른 면은 단열인 경우 온도장(case 2)

Fig. 9는 시간이 6분일 때 case 2에 대한 X-Y평면의 계산영역의 등온선(Counter)을 나타내는 것으로서 case 1인 경우와 주된 차이는 온도영역이 원통평면의 중심에 대하여 대칭을 이루지 않는 것이다. 이것은 중심면을 경계로 상부와 하부의 열전달율이 다르기 때문이며, 즉 상부의 대류면에서는 열손실이 증가하게 되어 하부인 단열면 근처에서의 온도 보다 더 빠르게 상승한다. 또한

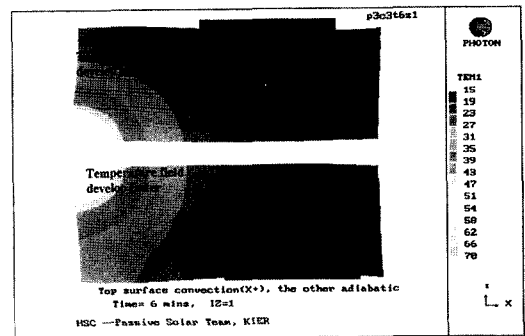


Fig. 9. Temperature distribution in X-Y plane for Case 2.

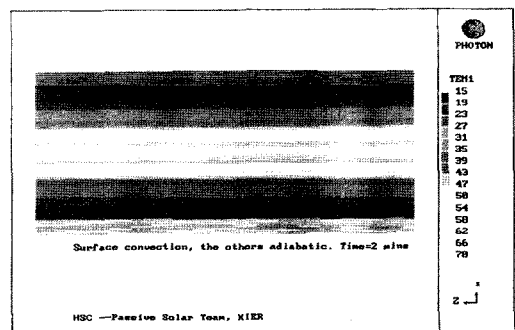


Fig. 10. Temperature distribution for Case 2 after 2 minutes.

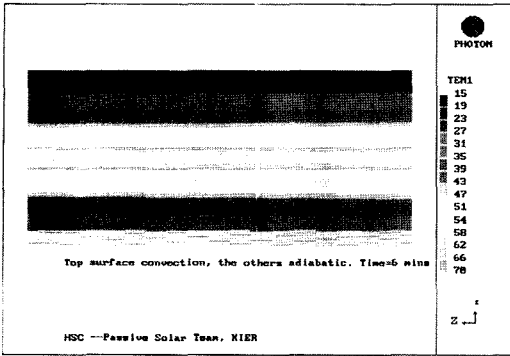


Fig. 11. Temperature distribution for Case 2 after 6 minutes.

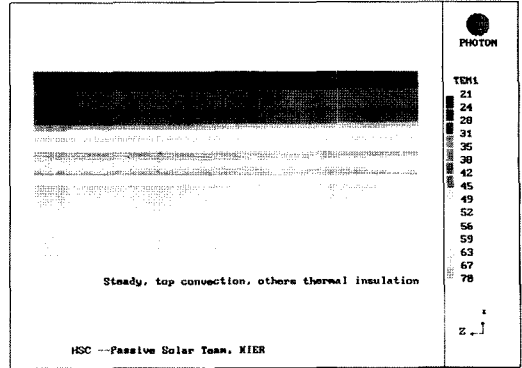


Fig. 13. Temperature distribution for Case 2 in steady state.

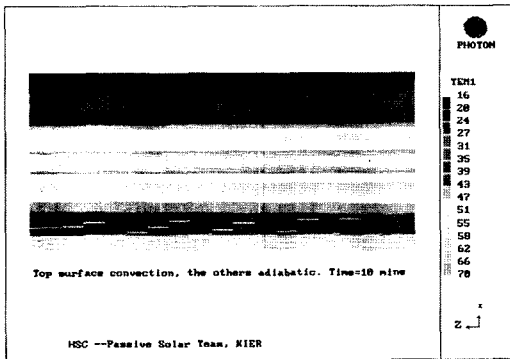


Fig. 12. Temperature distribution for Case 2 after 10 minutes.

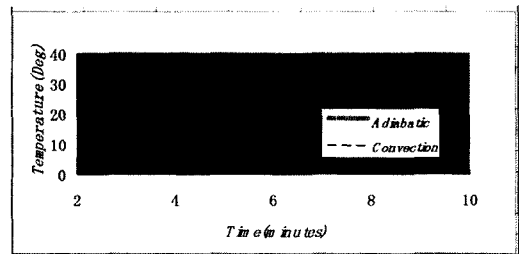


Fig. 14. Transient temperature at the Y=0 surface for Case 1 and Case 2.

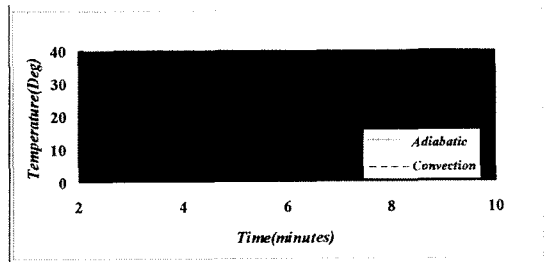


Fig. 15. Transient temperature at the Y=Max surface for Case 1 and Case 2.

대류면에 의하여 전체 단면에서 열손실이 증가하여 내부의 온수파이프 표면에서 큰 열손실을 일으키게 되므로 파이프 안쪽에서의 온도는 감소하게 된다. Fig. 10~Fig. 12는 Case 2에서 시간에 따른 온도 변화를 나타낸 것으로서 전체 계산 시간은 Case 1과 동일한 10분이다.

Fig. 10에 나타낸 바와 같이 초기 단계인 시간이 2분 경과했을 때 상·하 표면의 온도는 15°C 정도이나, Fig. 11에서는 6분이 경과했을 때 상부표면의 온도는 19°C 이상까지 상승하였으며, Fig. 12에서 관찰할 수 있듯이 10분이 경과했을 때 상부 대류표면의 온도는 24°C까지 상승하였다. 이 온도는 Fig. 13에 나타낸 바와 같이 정상상태인 경우의 상부 표면 온도 분포와 동일한 값이나 하부의 단열면에서의 온도값은 상당히 변화함을 알 수 있다. 단열면의 온도는 시간이 2분에서 10분으로 증가하는 동안 16°C에서 39°C로 변화하였고, 정상상태인 경우는 45°C가 되었다.

Fig. 14는 온수 파이프의 중심인 Y=0 근처 영역에서 Case 1과 Case 2의 온도를 나타내고 있으며, 이 그림에

서 시간이 경과함에 따라 온도 차이가 증가하는 것을 볼 수 있다. Fig. 15는 표면 근처인 Y=Max에서 Case 1과 Case 2의 온도를 나타내고 있으며, Y=0에서의 온도 차이 보다 더 큰 것을 알 수 있다.

## 6. 결 론

컴퓨터를 이용한 수치해석을 미세 캡슐을 이용한 축열 보드에 대하여 2종류의 열 경계 상태에 대하여 속도 와 온도 분포를 계산하여 비교분석을 하였다. 온도는 축

열 보드의 한 측면이 대류면이고 다른 한쪽면은 단열면인 경우(Case 2) 보다 양면 모두 단열면인 경우(Case 1) 일 때 더 높게 상승하였다.  $Y=0$ 에 가까운 영역에서 Case 1과 Case 2 사이에 축열 보드 내에서 온도차이는 확연하게 나타났다.

또한 본 연구에서와 같이 계산 영역이 특별한 기하학적 현상을 형성(circle+square)인 문제 해결하는데 적용할 수 있는 새로운 격자 생성 기술(MBFG/CCM)을 개발하였다. CCM은 BFC/MBFG 혼합 눈금에 수렴 과정을 가속시킴으로서 SIMPLE 알고리즘에서 이용되어 왔던 엇갈린 격자(staggered 격자)와 많은 차이가 있다. 향후 본 수치해석의 정확도를 높이기 위하여 다음과 같은 후속 연구가 진행되어야 한다.

1) 축열 보드의 열전달 현상을 보다 정확히 계산하기 위해서는 위치별 시간별로 정밀한 온도 측정값이 필요하고 특히 잠열재인 미세 캡슐이 상변화를 하므로 이를 고려한 온도 분포 및 물성에 대한 자료가 필요하다.

2) 축열 보드에 사용된 물질의 비열( $C_p$ )과 열전달율( $\lambda$ )은 물질의 상태 및 온도에 따라 변화하므로, 이를 고려한 정확한 지배방정식이 필요하다. 즉  $C_p=f(\text{Temp})$ ,  $\lambda=f(\text{Temp})$ 이므로 사용자가 쉽게  $C_p$ ,  $\lambda$ 식을 입력할 수 있는 Subroutine set로 구성되어야 한다.

## 사용기호

$h_i$	: 대류 열전달계수
$I_{k,i}$	: 평균압력에 의한 영향을 뺀 후 상 사이에서 계면 운동량의 전달 부분으로 국부 평형식, $\sum_{k=1,5} I_{k,i}=0$
$k_i$	: 난류 운동에너지
$p_i$	: 액상에서의 평균압력
$q$	: 열 flux
$q^*$	: 내부 열원
$T_{\text{air}}$	: 대기온도
$u_{k,i}$	: 순간속도의 변동량
$U_{k,i}$	: 각 상 $k(k=s, l)$ 에서 $I$ 성분의 평균속도
$\vec{U}$	: 속도 벡터
$X$	: 넓이방향의 좌표축
$Y$	: 높이방향 좌표축
$Z$	: 길이방향 좌표축
$\alpha_k$	: 국부 평형 방정식을 구성하는 상 $k$ 의 체적분율, $\sum_{k=1,5} \alpha_k=1$
$\epsilon_t$	: 운동에너지 소산율
$\rho_k$	: 상 $k$ 의 평균밀도
$\tau_i'$	: 특성시간
$\tau_{k,ij}$	: 액상에서는 응력텐서의 점성 부분이고 고상에

서는 입자들의 상호 충돌에 기인한 입상 응력 텐서

$v$  : 동점성계수

$v_i'$  : 와점성계수

$\Phi^*$  : 점성 소모에너지

## 참고문헌

- 강용혁, 광희열: "태양에너지의 효율적 이용을 위한 상변화 물질의 미세캡슐화", 한국에너지기술연구소 보고서 (1996).
- 광희열 외: "미세캡슐 잠열재를 사용한 축열장판의 열성능 연구", 공기조화냉동공학회, pp. 978-983 (1998).
- 이동규: "미세캡슐화된 상변화물질을 함유한 축열블럭의 열성능 특성에 관한 연구", 제주대학교 대학원 논문 (1998).
- Masayuki Kamimoto *et al.*: "Investigation of nitrate salts for solar latent heat storage", Vol. 24, pp. 581-587 (1980).
- Abhat, A.: "Low temperature latent heat thermal energy storage: Heat storage material", Solar Energy, Vol. 30, pp. 313-332 (1983).
- Ahmet Kurklu: "Thermal performance of a tapered store containing tubes of phase change material: cooling cycle", Energy Convers. Mgmt., Vol. 38, No. 4, pp. 333-340 (1996).
- D.J. Morrison, S.I. Abdel-Khalik: "Effects of phase-change energy storage on the performance of air-based and liquid-based solar heating systems", Vol. 20, pp. 57-67 (1978).
- Takeo S. and Saitoh, *et al.*: "Experimental investigation on combined close-contact and convection melting in horizontal cylindrical and spherical capsules", IEEE, pp. 2090-2094, (1996).
- Yasushi Yamagishi, *et al.*: "An evaluation of microencapsulated PCM for use in cold energy transportation medium", IEEE, pp. 2077-2083 (1996).
- 홍성안: "열저장 시스템 개발에 관한 연구", 한국과학기술연구원 (1988).
- 임장순: "상변화 물질을 이용한 잠열축열조에 대한 기초 연구", 동력자원부 (1991).
- 조금남, 정갑용: "원통형 축냉조내 구형 캡슐들의 축냉에 관한 실험 연구", 대한기계학회 논문집, 제10권, pp. 2647-2656 (1995).
- Saitoh T. and Hirise K.: "High performance phase change thermal storage using spherical capsules", Chem. Eng. Comm., Vol. 41, pp. 39-58 (1986).
- Charunyakorn P., Sengupta S. and Roy S.K.: "For-



- ced convection heat transfer in micro-encapsuled phase change material slurries: Flow in a circular duct”, *Int. J. Heat Mass Trans.*, Vol. 34, No. 3, pp. 819-833 (1991).
15. Mills, A.F.: “Heat transfer”, Irwin Corp. (1993).
16. Chen, S.L. and Yue, J.S.: “A simplified analysis for cold storage in porous capsules with solidification”, *J. Heat Transfer*, Vol. 113, pp. 108-116 (1991).
17. 최은수: “상변화 물질을 이용한 관내 대류 열전달 현상에 관한 연구”, 대한기계학회 추계학술대회 논문집, pp. 419-422 (1995).