

완전유리식 태양열 집열 튜브에의 적용을 위한 축열장치의 설계에 관한 수치해석적 연구

현 준 호* · 천 원 기**

A Numerical Study on the Design of a Thermal Storage Device for Its Application in All-Glass Solar Evacuated Tubes

Jun-Ho Hyun* and Won-Gee Chun**

ABSTRACT

The basic aim of this study is to utilize PCM(Phase Change Material) that is required for storage of solar energy. PCM's thermal, physical characteristics are affected by temperature. PCM is easy to change one into another phase at low temperature. While the temperature change makes the PCM melted or solidified, an amount of energy can be transfer. In order to evaluate the PCM's characteristics and its phase change related to heat transfer, 3 dimensional computer simulation is adapted and its analysis is accomplished. The simulation was carried out under changing of temperature for an insulated cylinder filled with PCM and the PCM's thermal characteristics was observed based on time.

Key Words : phase change material (PCM), Simulation, Temperature

1. 서론

oil crisis 등을 거치면서 새로운 에너지개발에 인류가 관심을 가진 이래로 화석연료가 아닌 새로운 에너지원에 대한 오랜 연구와 다양한 실용화 시스템의 개발 등으로 새로운 에너지원으로서의 태양열에너지의 중요성이 명백하게 드러나고 있다.

태양에너지가 중요한 대체에너지의 역할을 담당하기 위해서는 효과적이고, 경제적이며, 신뢰성 있는 태양열 저장시스템의 개발이 요구된다. 이는 태양에너지가 지니고 있는 공간적으로는 제약이 없으나 시간적인 제약이 있는 특징 때문이다[1].

현재 지구에 도달하는 태양열 그 자체는 밀도가 낮은 저급의 에너지원이고, 시간 및 계절별로 에너지의 질과 양이 두드러지게 다르기 때문에 효과적인 집열을 통하여 저장·활용하는 경우가 대부분이다.

에너지 저장에 대한 응용은 기본적으로 현열 또는 잠열의 효과에 기인하고 있다. 현열의 저장은 물의 가열과 냉각에 대한 액체에 기반을 두고 있는 시스템

* 제주대학교 대학원

Graduate School, Cheju Nat'l Univ.

** 제주대학교 기계에너지생산공학부, 첨단기술연구소

Faculty of Mechanical, Energy & Production Eng., Research Institute of Advanced Technology, Cheju Nat'l Univ.

과 고체에 대한 공기에 기반을 두고 있는 시스템으로 대표되어질 수 있다. 일반적으로 잠열을 이용한 방법이 현열을 이용한 것 보다 더 큰 에너지를 저장 할 수 있으며 따라서 상변화 열전달 문제는 공학적인 응용에서 중요한 역할을 하고 있다. 이러한 문제에는 크리스탈 결정성장, 금속의 주조나 정화, 플라스틱 제조공정, 토양과 얼음의 응고 등이 포함되고 열에너지의 저장, 즉, 태양열과 전기에너지 저장에 관련하여 잠열을 이용한 방법이 지난 수십 년간 상당히 주목을 받으며 폭넓게 연구되어져 왔다.[2]

초기의 모델들은 고체와 액체에 대한 열전도문제를 근간으로 한 것이 일반적이었다. 하지만, 실제 물리적인 현상에서는 액상일 때 자연대류가 발생할 수도 있으며 이는 때때로 응고 또는 용해현상에서 중요한 역할을 한다. 이것은 여러 사람들에 의해서 실험적으로도 이미 증명된 사실이다. 따라서 후반기 모델들에서는 대류효과도 고려해 주었다. 하지만, 이러한 모델들도 대부분이 2차원 해석이었고, 몇몇의 3차원 모델들이 있다 할지라도 그 대부분이 간단한 수직 또는 수평 평면 벽에서의 냉각 또는 가열에 대한 것이었다. 또한, 두개의 상이 같이 존재하는 cyclic 응고 및 용융 과정에 대해서는 수행된 사례가 극히 드물다. 또 다른 어려움 중의 하나가 해석할 모델의 형상에 관한 문제이다. 전형적인 형상이 아닌 어떤 모델의 경계면 형상과 그에 따른 여러 개의 경계조건들은 응용면이 적합한 형상을 가지지 못하게 할 수도 있다. 상변화 물질(phase change material)의 다양한 열 물리적 특성들은 온도에 의해 지배되어진다. 이러한 경우에는 해석적인 해 또는 근사적인 해를 구하는 것이 불가능하며 따라서 새로운 수치해법이 필요 되어 진다.[3,4]

본 연구에서는 온도에 따른 상의 형상변화, 열전달 형태와 실린더 내부의 온도변화 등을 분석하고, 상변화 물질의 에너지 저장물질로서의 적합성을 알아보고자 한다.

II. 이론적 고찰

자연대류가 없는 경우에는 에너지 보존법칙이 각 영역에 적용되어지고, 상 경계면의 운동은 적절한 초

기조건, 경계조건과 함께 경계면에서의 열평형에 의해 지배되어진다.

자연대류가 있는 경우에는 그 모델의 해석이 상당히 복잡해지고, 따라서 연속방정식, 운동량 방정식 그리고, 에너지 방정식이 동시에 고려되어져야 한다.

상변화 물질(PCM)의 응고가 진행되는 동안 PCM container의 열적현상을 해석하는데 있어서 실질적인 현상을 기술하는 지배방정식을 다음과 같은 가정을 도입하여 단순화 하였다.

- ① 각 상에서의 열 물성치는 일정하다.
- ② 2상 영역에서의 온도 분포는 선형적이다.
- ③ PCM container 표면에서의 열방출은 없다.
- ④ PCM container 내부는 PCM으로 완전히 채워져 있다.
- ⑤ Transient condition
- ⑥ 액상에서의 대류 열전달은 무시한다.

2.1. A test problem specification - Conduction phase change

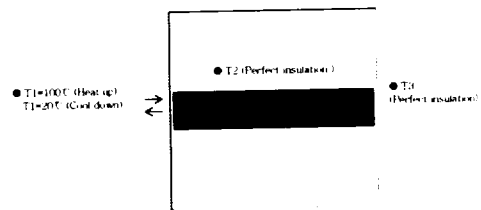


Fig. 1. Geometry for the three dimensional PCM container.

(1) PCM container Size :

25mm(직경)×140mm(길이)×0.5mm(두께)

Material : SUS

(2) PCM material : Paraffin Wax (상변화 온도 60°C로 가정)

① Melt temperature [°C] - 47

② Heat of fusion (ΔH) [J/kgm] - 2.09×10^5

③ Density (ρ) [kgm/m³, solid] - 820 (solid), 770 (liquid)

④ Heat capacity (Cp) [J/kgm°C] - 2890 (solid), 2510 (liquid)

- ⑤ Thermal conductivity (k) [W/m°C] -
0.14 (solid), N/A (liquid)
- (3) Boundary condition
 - ① 온도지정 - · Heat up(PCM 흡열시)
T₁ = 100°C
 - Cool down
T₁ = 20°C
 - ② q" = 0 : perfect insulation
- (4) Initial condition
T_{pcm} = T_{ambient} = 20°C

- ② Boundary condition
 - At Z = 0, T₁ = 100°C (Heat up)
T₁ = 20°C (Cool down)
 - At Z = L, $\frac{\partial T}{\partial z} = 0$
(q"=0 : perfect insulation)
 - At r = r_{out}, $\frac{\partial T}{\partial r} = 0$
(q"=0: perfect insulation)
- ③ Initial condition
t = 0 : T_{pcm} = T_{ambient} = T₀ = 20°C

2.2. Enthalpy definition

$$H = h + \Delta H \quad (2a)$$

$$h = CT \quad (2b)$$

$$\Delta H = f(T) =$$

$$\begin{cases} L, & (T \geq T_s) \\ L(1-F_s), & (T_s > T \geq T_s) \quad (T < T_s) \\ 0, & (T_s < T) \end{cases} \quad (2c)$$

$$F_s(T) =$$

$$\begin{cases} 0, & (T \geq \varepsilon) \\ (\varepsilon - T) / 2\varepsilon, & (\varepsilon > T \geq -\varepsilon), \quad (T < -\varepsilon) \\ 1, & (T < -\varepsilon) \end{cases} \quad (2d)$$

여기서, T=ε와 T=-ε는 각각 액화점 및 응고점의 온도이다.

2.3. 지배방정식

위와 같은 가정 하에서 PCM container와 PCM에
서의 지배방정식과 초기 및 경계조건은 다음과 같다.

① Energy

$$\partial \left[\frac{\rho H}{\partial t} \right] = \nabla \cdot (k \nabla T)$$

$$\rho \left[\frac{\partial h}{\partial t} \right] = \alpha \left[\frac{1}{r} \frac{\partial(r \partial T / \partial r)}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] - S_k, \quad t > 0 \quad (2d)$$

$$\text{여기서, } S_k = \frac{\partial \rho \Delta H}{\partial t}, \quad \alpha = \frac{k}{c}$$

III. 실험방법

3차원 모델에서 어떤 경계면이 그것의 녹는점 보다 더 높은 온도에서 지배되어지고 있을 때 그 경계면의 온도가 고체의 녹는점을 넘어서면 액화가 일정한 비율로 진행되기 시작한다. 이때 열전달은 두개의 상에서 같이 일어나므로 그 결과식은 각각의 상에서 구해야 한다.

고상과 액상의 경계면에서는 열평형에 대한 미분방정식을 풀어서 그 위치를 추정할 수 있고, 그 열전달 프로세스의 방식은 고상에서는 전도이지만, 액상에서는 전도뿐만 아니라 고체와 액화되어 가는 과정에서 발생하는 밀도 차에 의한 자연대류가 있을 수 있다.

만약 용융과정에서 액화의 양상이 어떠한 층을 이루며 나타난다면, 그것은 단지 전도만의 문제일 것이다. 하지만, 실제적인 현상은 액체는 어떠한 외적 요인으로 인하여 흔들리게 되고 따라서 층을 이루면서 액화되어지지 않게 된다. 이러한 경우에는 운동량방정식이 고려되어야 되고, 그 해석은 한층 더 복잡해지게 된다.[5]

상변화 열전달 해석 문제는 대체적으로 analytically 또는 numerically 비정상 열전도방정식을 푸는 것과 관련되어 진다. 이번 해석에서는 여러 번 반복되는 응고와 용융과정 중에서 PCM의 온도에 대한 cyclic 변동에 대해서도 연구되어 진다.

상변화 물질(PCM), Paraffin Wax가 채워진 3차원

원통형 실린더를 모델로 Heat transfer finite volume package, STAR-CD가 해석을 위해 사용되어졌다. 그 원통형 실린더의 사이즈는 25mm(D) × 140mm(L) × 0.5mm(W)이다.

Simulation 1. - 외면이 100% 단열되어 있고 일정한 초기온도를 유지하고 있는 원통형 실린더의 한쪽 면에 순간적으로 용융온도 보다 높은 100°C의 온도를 가한 후, 내부 PCM의 상태변화와 온도장을 계산한다. 이때, $t=0 : T_{pcm} = T_{ambient} = 20^\circ\text{C}$ 이고 상변화 온도는 60°C로 가정한다. 결과적으로 일정시간이 흐른 후에는 액체 경계면이 발생하게 되고 그 상경계면은 점차적으로 이동하게 된다. PCM의 상태가 고상에서 액상으로 완전히 변화된 후에는 100°C의 온도를 가했던 한쪽 면을 다시 초기온도로 돌려서 액상 경계면을 다시 이동 시킨다.

Simulation 2. - Simulation 1과 동일하나 원통형 실린더의 외부에 역시 외면이 100% 단열된 오일 자켓을 씌운 후 같은 방법으로 오일 자켓의 한쪽 면을 순간적으로 100°C로 만든 후, 내부 PCM의 상태변화와 온도장을 계산한다. 이때도 $t=0 : T_{pcm} = T_{ambient} = T_{oil} = 20^\circ\text{C}$ 이다. PCM의 상태가 고상에서 액상으로 완전히 변화 후에는 그 과정을 반대로 수행한다. 즉, 오일 자켓의 한쪽 면을 순간적으로 다시 20°C로 만들어 응고를 시킨다.

Simulation 3. - Simulation 2의 모델에 마개를 장착하고 그 마개의 종류를 변화 시켜 가면서 마찬가지로

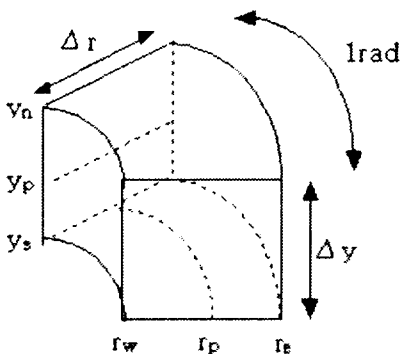


Fig. 2. Control volume of cylindrical coordinates.

마개의 한쪽 면을 순간적으로 100°C로 만든 후, 내부 PCM의 상태변화와 온도분포를 기록한다. 이때도 초기조건과 경계조건은 동일하다. 역시 PCM의 상태가 고상에서 액상으로 완전히 변화 후에는 그 과정을 반대로 수행하여 마개를 통한 열손실에 따른 온도장을 계산한다.

여기서는 먼저 Simulation 1을 수행하였다.

$$a_p h_p = a_n h_n + a_s h_s + a_e h_e + a_w h_w + b + a_p^0 h_p^{old} \quad (3a)$$

where,

$$a_E = D_e = a_e \frac{r_e \Delta y}{(\delta r)_e}$$

$$a_W = D_w = a_w \frac{r_w \Delta y}{(\delta r)_w}$$

$$a_N = D_n = a_n \frac{r_p \Delta y}{(\delta y)_n}$$

$$a_S = D_s = a_s \frac{r_p \Delta y}{(\delta y)_s}$$

$$a_P = a_E + a_W + a_N + a_S + a_P^0$$

$$b = \frac{\rho \Delta V}{\Delta t} (\Delta H_P^{old} - \Delta H_P) = a_P^0 \cdot (\Delta H_P^{old} - \Delta H_P)$$

$$a_P^0 = \frac{\rho}{\Delta t} \Delta V, \Delta V = r dr dy$$

IV. 결과 및 고찰

Fig. 3과 4는 시간에 따른 상경계면의 변화를 나타낸다.

Simulation 1에서는 전도만을 고려하였으므로 상변화에 따른 밀도차와 대류효과가 나타나지 않았다. 따라서, 복잡한 해석을 요하는 운동량 방정식 등은 고려하지 않아도 되었다.

3차원 원통형 실린더 모델의 상변화 해석이 수치적으로 수행되어졌다. 대류효과를 고려한 해석이 계속해서 수행되어질 것이다.

V. 결론

본 연구는 완전 유리식 태양열 집열기에서의 적용을

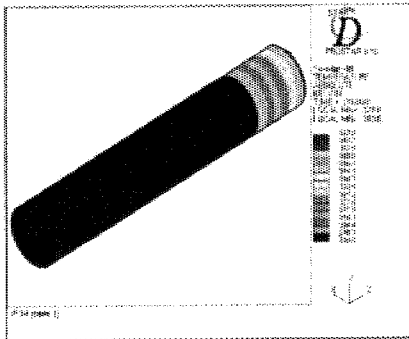


Fig. 3. Plot of the phase front (melting temperature) with $t = 2000$ sec.

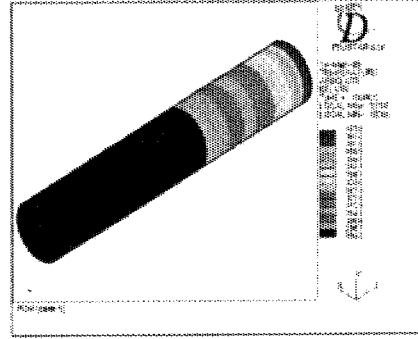
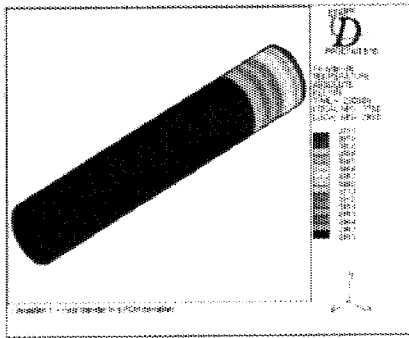
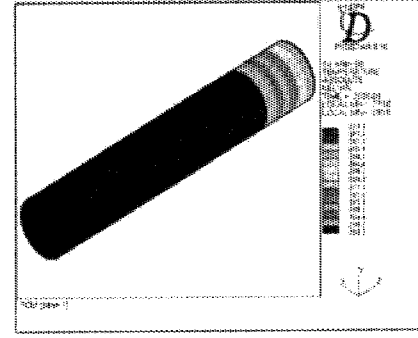


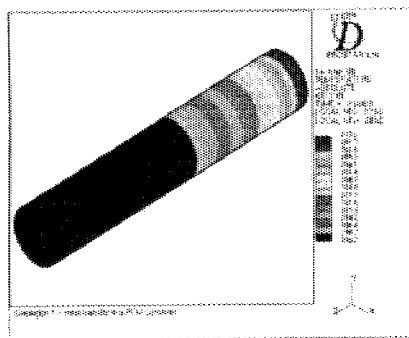
Fig. 4. Plot of the phase front (melting temperature) with $t = 10000$ sec.



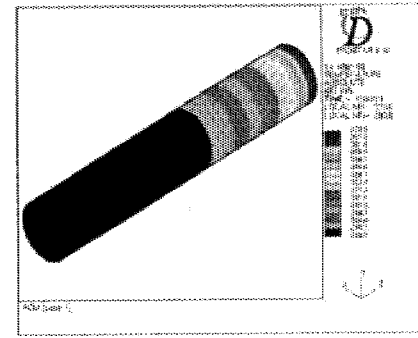
$t = 2000$ sec(without Latent Heat)



$t = 2000$ sec(with Latent Heat)



$t = 10000$ sec(without Latent Heat)



$t = 10000$ sec(with Latent Heat)

Fig. 5. Plot of the phase front (melting temperature).

위해 고안한 태양열 축열 장치의 열 전달 특성에 관하여 수치해석적 연구를 수행한 내용을 소개하고 있다. 축열 장치는 일사 조건이 양호한 주간에는 태양열

을 축열하여 흑한기 주위의 외기온이 영하로 갑자기 떨어지더라도 집열 튜브의 동파에 의한 파손을 방지함에 그 목적이 있으며, 본 연구는 이와같은 축열 장

치의 설계시 기본적으로 필요한 축열 장치의 열전달 특성을 살펴보기 위하여 간단한 모델을 설정하였다. 얻어진 연구 결과는 완전 유리식 태양열 집열 튜브에 장입될 축열 장치의 태양열 가열 조건에 대한 일차원적 결과를 제시하고 있다.

후 기

본 연구는 포항산업과학연구원(RIST)의 지원에 의하여 수행되었으며 관련 제위께 심심한 사의를 표합니다.

참고문헌

1) Study Circle for Solar Thermal Storage Technology.

1994. 과학기술처 보고서.
- 2) Ahmet Kurklu. 1996. Thermal performance of a tapered store containing tubes of phase change material: cooling cycle. Energy Convers. Mgmt. Vol.38. No.4. pp.333-340.
 - 3) 한국에너지기술연구소. 1996. 태양에너지의 효율적 이용을 위한 상변화 물질의 미세캡슐화. 보고서. pp.111-142.
 - 4) 임장순. 1991. 상변화 물질을 이용한 잠열축열조에 대한 기초 연구. 동력자원부.
 - 5) 조금남, 정갑용. 1995. 원통형 축냉조내 구형 캡슐들의 축냉에 관한 실험연구. 대한기계학회 논문집. 제10권. pp.2647-2656.
 - 6) 최은수. 1995. 상변화 물질을 이용한 관내 대류열 전달 향상에 관한 연구. 대한기계학회 추계학술대회 논문집. pp.419-422.