556 空氣調和·冷凍工學 論文集 第7卷 第4號(1995)/pp. 556~565

난류 대류를 도입한 고온 축열 시스템 모델의 열복사 전달에 관한 연구

Combined Thermal Radiation with Turbulent Convection Conjugate PCM Model

김 광 선*
K. S. Kim

Key words : Phase Change Material(상변화 물질), Thermal Radiation(열복사), Turbulent Convection(난류 대류), Enthalpy Model(엔탈피법), Coupled Mode(결합현상)

Abstract

The physical model of interest is based upon the concentric cylinder, where the outside cylinder is filled with optically thick and high temperature phase change material(PCM). The fluid is flowing through the inside cylinder to transfer the appropriate energy. The fluid is flowing through the inside cylinder to transfer the appropriate energy. The governing equations for the phase change material including internal thermal radiation and for the turbulent transfer fluid have been employed and numerically solved. The optically thick phase change justifies the P-1 spherical harmonics approximation, which is believed to be appropriate choice particularly for the much coupled problem like in this study.

The solid/liquid interface, temperature distribution within the PCM and the heat flux from the PCM to the transfer fluid have been obtained and compared with those of laminar transfer fluid. The numerical results show that the turbulent transfer fluid accelerates the solid/liquid interface and results in the increase of heat transfer rate from the PCM. The internal thermal radiation within the PCM, however, does not always play a role to increase the heat transfer rate throughout the inside cylinder. It is believed that the combined heat flux has been picked up more in the inflowing area than in the pure conductive phase change material.

기 호 설 명

B : 방사력$[n_\upsilon \sigma T^4](W/m^2)$
C_p : 정압비열(J/kgK)
F_r : 무차원 반경방향 복사열 유속$(q_r/\sigma T_r^4)$
F_z : 무차원 축방향 복사열 유속$(q_z/\sigma T_r^4)$
h : 비엔탈피(J/kg)
h_{sl} : 잠열(J/kg)
I : 복사강도(W/m^2)
$I_{b\nu}$: 스펙트럼 Plank함수$(W/m^2 \cdot \mu m)$
I_r : 기준복사강도(W/m^2)
I_ν : 스펙트럼 복사강도$(W/m^2 \cdot \mu m)$
k : 난류운동에너지
K : 열전도도(W/mK)

* 한국기술교육대학교 기계공학과

K_1,K_2 : 요소표면의 열전도도
K_3,K_4 : (W/mK)
Ks : 용융 온도에서의 고체의 열전도도 (W/mK)
1_r,$1\theta^*$,1_z : 방향여현
n : 단위수직벡터
p : 압력(N/m²)
P_r : Prandtl수(ν_f/α_f)
q_r : 반경방향 복사열유속(W/m²)
q_z : 축방향 복사열유속(W/m²)
r_i : 내부실린더 반경(m)
r_o : 외부실린더 반경(m)
T : 온도(K)
t : 시간(s)
U_{in} : 입구속도(m/s)
U_τ : 전단응력속도
u, ν : 속도(m/s)
V_n^* : 고체/액체 경계면 속도(m/s)
z : 축 길이(m)
α : 흡수계수(m^{-1})
α_s : 고체의 용융온도에서의 열확산 계수
β : 소멸계수($\alpha+\omega$)(m^{-1})
ϵ : 난류소산율, 표면방사
η : 축방향 광학 거리[($\alpha+\omega$)z]
λ : 산란계수[$\omega/(\alpha+\omega)$]
ρ : 밀도(kg/m³)
σ : Stefan-Boltzman 상수(W/m^2K^4)
γ : 반경방향 광학 좌표[($\alpha+\omega$)r]
ϕ : 무차원 복사강도(I/I_r)
ϕ_o : 무차원 강도 영의 모멘트
ϕ_r : 무차원 반경방향 1차 모멘트
ϕ_z : 무차원 축방향 1차 모멘트
ω : 산란계수
Ω : 단위 입체각(steradian)
Φ : 무차원 Planck 함수($B/\pi I$)

상 첨 자

m : time level

하 첨 자

b : black
f : transfer fluid/fusion
i : spatial location/inner
l : liquid
o : outer
r : reference
w : wall

1. 서 론

물질이 상변화를 진행하면서 발생 또는 흡수하는 열에너지 전달문제는 한세기를 지나면서 이론적 또는 실험적으로 연구되어 왔다. 한정된 자원인 석유, 석탄, 원자력, LNG등으로 부터 얻어지는 에너지는 인류를 위하여 효율적으로 사용하여야 하며 특히 열원으로부터 발생된 에너지는 불필요한 시간에 적당한 형태로 저장하였다가 필요한 시간에 적절히 사용되는 기술이 필요하게 되었다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 저부하시 에너지를 저장하였다가 고부하시 필요한 에너지를 사용하는 고온축열 에너지 저장시스템의 개발 및 연구는 그동안 상당한 진척을 보고 있으며 현재 미공군에서는 우주정거장에서 사용할 수 있는 에너지 저장시스템의 개발을 추진중에 있다. 고온축열에너지 저장시스템의 최적화설계를 위한 시뮬레이션 알고리즘 및 소프트웨어 개발에 종사하고 있는 대부분의 연구는 불투명 상변화물질을 이용하면서 그결과 고온상변화물질의 내부에서 발생될 수 있는 복사열의 영향을 무시하고 있다.

고온축열시스템에 사용되는 상변화물질은 경제성과 공학의 규모적인 측면에서 특히 광물성염(inorganic salts)이 바람직하며 최저융고온도(eutectic) 혼합물이 그중에서도 아주좋다. 이러한 상변화 물질로써 바람직한 열적상태량은 (1) 단위무게 및 부피당 용융잠열이 높을 것 (2) 용해온도가 높을 것 (3) 열전도도가 높을 것 (4) 여러번의 용해 주기를 거치면서 물리적, 화학적 안정성을 갖일 것 (5) 높은 밀도를 갖일것 등이다. 축열시스템에서 활용을 위한 광물성염에 대한 조사 및 선정에 관한 연구는 몇가지 문헌에 보고되고 있다. 특히 Borucka[1]등은 축열시스템에 적합한 용해된 염을 선정하였으며 용해온도는 200℃와 1000℃사이에 존재하였고 열적상태량도 여러종류의 고체온도에

따라 분류하였다. Maru[2]등도 축열시스템에 적합한 선정된 염을 450℃와 538℃ 사이의 온도에서 열적상태량을 평가하였다.

이러한 광물성염은 미국의 공군(Wright Patterson Air Force) 연구팀에 의하여 실제로 고온축열시스템의 상변화물질로 채택되었으며 현재에도 최적화설계 및 제작에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 채택된 광물성염인 LiF-MaF_2-KF계는 고체상태에서 일부 다공성(porous)적인 성질이 있으며 내부복사열 또한 열전달 현상에 영향을 미친다. 축열시스템에 관한 연구 중 수치해석적인 시뮬레이션은 Cao와 Faghri[3]가 난류대류를 도입한 상변화 에너지 저장시스템이 저자가 아는 바로는 최근의 문헌이며 상변화 물질내부의 복사의 영향을 고려치 않았다. 또한 상변화 모델에 적용된 물리적해석은 용해시 열전달현상을 고찰 하였으며 Cao & Faghri[4]가 도입한 온도에 바탕을 둔 고정격자 이산화모델을 사용하였다. 고온축열시스템용 상변화 물질의 열물성치는 일부자료에 제한적으로 언급되고 있으나 복사물성치의 실험값은 아직 보고되지 않고 있다.

최근에 내부복사열을 고려한 상변화물질에 대하여 Kim과 Bae[5]는 충류전달 매개물질을 도입하여 수치해석을 진행하여 내부복사열의 영향을 해석하였다. 충류매개물질이 상변화물질과 연계되어 해석되었으며 내부복사열이 에너지 전달에 기여하고 있음이 보고 되었다. 본 연구에서는 미공군과 NASA에서 지원하는 고온축열시스템 모델과 동일한 원심원통형 모델을 채택하였으며 열에너지 전달을 위한 매개물질이 난류강제 대류를 일으키면서 고온축열물질과 연계되어 시스템을 구성할때 에너지 전달현상을 파악하고자 하였다. 특히 상변화물질의 내부복사열과 매개물질의 난류영향을 충류현상과 비교하여 고상/액상 경계면, 온도분포, 열전달량을 정량적으로 구하였고 응고온도 710℃의 상변화물질을 도입하므로써 미공군에서 채택한 L_iF-M_aF_2-KF계의 광물성염의 열상태량을 이용하였다.

2. 이론해석

2.1 모델의 선정

고온 축열시스템의 모델은 Fig.1에서와 같이 미공군에서 개발하고 있는 동심원통형으로 하며 외부원통 내부에 광학적으로 두꺼운 상변화물질로 채워져 있고 내부원통으로 에너지전달 매개물질이 흐르고 있다. 축방향의 길이는 L이고 내부원통의 반경은 r_i, 외부원통의 반경은 r_o이며 에너지 전달 매개물질의 입구에서의 강제 대류속도 및 온도는 U_{in}과 T_{in}이다. 내부원통의 두께는 상변화물질과 에너지 전달 매개물질이 여전히 전도영향이 지배적이므로 본 연구에서는 무시하도록 한다[4]. 또한 본 연구를 해석함에 있어서 상변화 물질의 액체영역이 용융온도상태에 있으므로 수치해석 영역에서 제외하고 전도의 지배적인 영향에 따라 자연대류는 무시할 수 있다.

2.2 고온축열 시스템의 난류 대류 방정식 구축

고온축열시스템에서 상변화물질이 보유하고 있는 에너지를 전달유체는 많은양의 열을 전달하여야 하며 따라서 전달유체의 Reynolds수가 2300이상의 경우 난류 대류모델을 택한다. 물리적인 모델은 2차원 원통형이며 전달유체는 정상난류 상태에서 비압축성 Newtonian 유체로 가정한다. 따라서 2차원 원통형 강제대류유동은 질량, 운동량, 에너지 보존의 법칙에 의하여 지배되며 난류유동을 해석키 위하여는 난류 운동에너지와 난류 소산율을 나타내는 두 미분방정식($k-\varepsilon$모델)을 사용한다.

$$\frac{1}{\gamma}\frac{\partial}{\partial\gamma}(\gamma v)+\frac{\partial u}{\partial z}=0 \qquad (1)$$

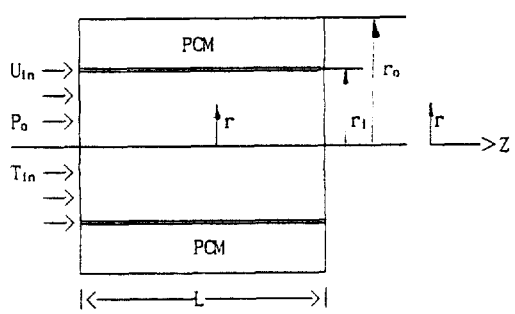

Fig.1 The schematic of the latent heat storage system

$$\frac{1}{\gamma}\frac{\partial}{\partial\gamma}(\rho\gamma v^2)+\frac{\partial}{\partial z}(\rho vu)$$
$$=-\frac{\partial p}{\partial\gamma}+\frac{1}{\gamma}\frac{\partial}{\partial\gamma}(\gamma\mu_e\frac{\partial v}{\partial\gamma})+\frac{\partial}{\partial z}(\mu_e\frac{\partial v}{\partial z})+S_v \quad (2)$$

$$\frac{1}{\gamma}\frac{\partial}{\partial\gamma}(\rho\gamma uv)+\frac{\partial}{\partial z}(\rho u^2)$$
$$=-\frac{\partial p}{\partial z}+\frac{1}{\gamma}\frac{\partial}{\partial\gamma}(\gamma\mu_e\frac{\partial u}{\partial\gamma})+\frac{\partial}{\partial z}(\mu_e\frac{\partial u}{\partial z})+S_u \quad (3)$$

$$\frac{1}{\gamma}\frac{\partial}{\partial\gamma}(\gamma vT)+\frac{\partial}{\partial z}(uT)$$
$$=\frac{1}{\gamma}\frac{\partial}{\partial\gamma}(\gamma\Gamma_e\frac{\partial T}{\partial\gamma})+\frac{\partial}{\partial z}(\Gamma_e\frac{\partial T}{\partial z}) \quad (4)$$

위에서

$$S_v=-\frac{\mu v}{\gamma^2}+\frac{\partial}{\partial z}(\mu_t\frac{\partial u}{\partial\gamma})$$
$$+\frac{1}{\gamma}\frac{\partial}{\partial\gamma}(\gamma\mu\frac{\partial v}{\partial\gamma})-\frac{1}{\gamma}\frac{\partial}{\partial\gamma}(\frac{2}{3}\gamma k\rho_f)$$

$$S_u=\frac{\partial}{\partial z}(\mu_t\frac{\partial u}{\partial z})+\frac{1}{\gamma}\frac{\partial}{\partial z}(\gamma\mu_t\frac{\partial v}{\partial z})-\frac{\partial}{\partial\gamma}(\frac{2}{3}k\rho_f)$$

$$\mu_e=\mu+\mu_t$$

$$\Gamma_e=\alpha+\frac{\mu_t/\rho_f}{\mathrm{Pr}_t}$$

$\mu_t=\rho C_\mu k^2/\varepsilon$는 난류 와류 점성계수이고 k는 난류운동에너지이고, ε는 난류소산율 이라 한다.

$$\frac{1}{\gamma}\frac{\partial}{\partial\gamma}(\gamma vk)+\frac{\partial}{\partial z}(uk)$$
$$=\frac{1}{\gamma}\frac{\partial}{\partial\gamma}(\gamma\Gamma_k\frac{\partial k}{\partial\gamma})+\frac{\partial}{\partial z}(\Gamma_k\frac{\partial k}{\partial z})+S_k \quad (5)$$

$$\frac{1}{\gamma}\frac{\partial}{\partial\gamma}(\gamma v\varepsilon)+\frac{\partial}{\partial z}(u\varepsilon)$$
$$=\frac{1}{\gamma}\frac{\partial}{\partial\gamma}(\gamma\Gamma_\varepsilon\frac{\partial\varepsilon}{\partial\gamma})+\frac{\partial}{\partial z}(\Gamma_\varepsilon\frac{\partial\varepsilon}{\partial z})+S_\varepsilon \quad (6)$$

식 (5)와 식(6)에서

$$S_k=G-\rho_f\varepsilon$$

$$S_\varepsilon=\frac{\varepsilon}{k}(C_1G-C_2\rho_f\varepsilon) \quad (7)$$

$$\Gamma_k=\frac{\mu_t}{\rho_k},\qquad \Gamma_\varepsilon=\frac{\mu_t}{\rho_\varepsilon}$$

$$G=\mu_t\left[2\left[(\frac{\partial u}{\partial z})^2+\frac{\partial v}{\partial\gamma})^2+(\frac{v}{\gamma})^2\right]+(\frac{\partial u}{\partial\gamma}+\frac{\partial v}{\partial z})^2\right]$$

난류모델상수는 Launder와 Spalding[6]으로 부터 다음을 사용한다.

$C_\mu=0.09,\ C_1=1.44,\ C_2=1.92,\ \sigma_k=1.0,\ \sigma_\varepsilon=1.3$

전달유체에 대한 경계조건은 입구에서는

$$T(r,0)=T_{in},\ u(r,0)=U_{in},\ v(r,0)=0$$

이고 출구에서는 다음과 같다.

$$\frac{\partial T(\gamma,L)}{\partial z}=0,\quad \frac{\partial u(\gamma,L)}{\partial z}=0 \quad (8)$$

벽에 있어서의 k와 ε에 대한 경계조건은 벽함수를 적용하여 난류에너지의 생성과 소산의 보전원리 및 Prandtl의 혼합길이 모델을 사용한다.

$$\frac{k}{U^2_\tau}=\frac{1}{\sqrt{C\mu}}$$

$$\frac{y\varepsilon}{U_\tau^4}=\frac{1}{\sqrt{0.14y_P^+}}(y_P^+>11.5) \quad (9)$$

여기서 $y_P^-=\frac{y_PU_\tau}{\nu},\quad U_\tau=\sqrt{(\nu(\frac{\partial u}{\partial y_P})_\omega)}$

k에 대한 벽함수는 벽근처에 있어서 k방정식의 경계조건을 제공하고 ε에 대한 벽함수는 ε방정식에 대한 경계조건을 제공한다. 운동량 방정식에서 벽근처의 확산항을 구하는 식과 에너지 방정식에서

열유속 q_{fw}가 주어질때 내부원통과 상변화 물질과의 경계면에서의 온도를 구하는 식은 다음과 같다.

$$\frac{u_P}{U_\tau}=\frac{1}{0.41}\,ln(y_P^{+}E) \tag{10}$$

$$1.1(T_{fw}-T_P)\rho c_\mu^{\frac{1}{4}}K_f^{\frac{1}{2}}=P_r[\frac{1}{0.41}\ln(y_P^{+}+E)]\,q_{fw}$$

위에서 T_{fw}는 내부실린더의 온도를 나타내고 K_f는 전달유체의 열전도도를 나타내며 E의 값은 9를 택하였다.[3][6]

2.3 상변화 물질을 지배하는 엔탈피모델 및 복사열 전달방정식

2차원 원통형 상변화 물질을 이산화한 검사체적의 에너지 증가율은 에너지보존의 법칙에 의하여 검사체적 표면을 통하여 전도되고 복사되는 율과 같아야 한다.

$$\frac{d}{dt}\int\int\int\rho h dv=\int\int K grad\,T\cdot\vec{n}dA-\int\int q_r\cdot\vec{n}dA \tag{11}$$

이러한 검사체적 방법은 다음과 같은 상변화 경계면에서 경계조건을 포함한다.

$$\left(K\frac{\partial T}{\partial n^*}\right)_s-\left(K\frac{\partial T}{\partial n^*}\right)_l-(q_{r,s}-q_{r,l})=\rho h_{sl}V^*_n \tag{12}$$

위에서 V^*_n는 응고면의 수직방향으로의 속도를 나타낸다. 식 (11)을 무차원화 하면

$$\begin{aligned}K_s\delta\tau\,\frac{dH}{d\zeta}=&\left[K_1(1+\frac{\delta\tau}{2\tau})\frac{\partial\theta}{\partial\tau}\right]_{\tau+\delta\tau/2}\\&-\left[K_2(1-\frac{\delta\tau}{2\tau})\frac{\partial\theta}{\partial\tau}\right]_{\tau-\delta\tau/2}\\&+\left(K_3\frac{\delta\tau}{\delta\eta}\frac{\partial\theta}{\partial\eta}\right)_{\eta+\delta\eta/2}\\&-\left(K_4\frac{\delta\tau}{\delta\eta}\frac{\partial\theta}{\partial\eta}\right)_{\eta-\delta\eta/2}\\&+\left[-\left[(1+\frac{\delta\tau}{2\tau})F_r\right]_{\tau+\delta\tau/2}\right.\\&\left.+\left[(1-\frac{\delta\tau}{2\tau})F_r\right]_{\tau-\delta\tau/2}\right.\\&\left.-\left(\frac{\delta\tau}{\delta\eta}F_z\right)_{\eta+\delta\eta/2}+\left(\frac{\delta\tau}{\delta\eta}F_z\right)_{\eta-\delta\eta/2}\right]\frac{Ste}{N}D\end{aligned} \tag{13}$$

와 같이 된다.

식 (13)에 사용된 무차원수는 다음과 같다.

$$H=\frac{1}{\rho_s\delta v}\int\int\int\frac{\rho(h-h_s)}{h_{sl}}dv,\quad\theta=\frac{K_s}{\alpha_s\rho_s}\frac{(T-T_f)}{h_{sl}}$$

$$\tau=\gamma\beta,\ \eta=z\beta,\ \zeta=\alpha_s\beta^2t,\ F_r=\frac{q_r}{\sigma T_r^4},\ F_z=\frac{q_z}{\sigma T_r^4},$$

$$N=\frac{K_s\beta}{4\sigma T_r^3},\ Ste=\frac{K_s(T_f-T_r)}{4\alpha_s\rho_s h_{sl}},\ D=\frac{T_r}{T_f-T_r} \tag{14}$$

H =무차원 엔탈피, Ste=Stefan 수,
θ =무차원 온도, D=무차원 온도
τ,η=무차원 광학거리, N=전도-복사계수

순수물질의 엔탈피와 온도의 관계는 다음과 같다.

$$h-h_s=C(T-T_{fusion})=\frac{K}{\rho\alpha}(T-T_{fusion}),\ T<T_{fusion}$$

$$h-h_s=\frac{K}{\rho\alpha}(T-T_{fusion})+h_{sl},\quad T>T_{fusion} \tag{15}$$

$$\theta=\frac{\alpha K_s}{K\alpha_s},\quad H<0(\text{고체영역}) \tag{16}$$

$$\theta=0,\qquad 0\leq H\leq 1(\text{상변화시}) \tag{17}$$

$$\theta=\frac{\alpha K_s}{K\alpha_s}(H-1),\qquad H>1\ (\text{액체영역}) \tag{18}$$

복사열전달의 경우 등방향 산란, 흡수 및 방출을 하는 회색 매개체가 유한 원통형내부에서 지배하는 방정식은 Uesugi와 Tsujita[7]에 의하여 유도된다.

$$l_r\frac{\partial\psi}{\partial\tau}-\frac{1}{\tau}l_\theta\left(\frac{\partial\psi}{\partial\varphi}-\frac{\partial\psi}{\partial\theta}\right)+l_z\frac{\partial\psi}{\partial\eta}$$
$$=(1-\omega^*)\Phi+\frac{\omega^*}{4\pi}\int\psi'\,d\Omega \qquad (19)$$

구조화 근사법에 의하여 방정식(19)에 방향여현의 멱을 곱한후 단위 입체각 4π에 걸쳐서 적분하면 무차원 P−1 근사 복사열전달 방정식과 복사열유속이 유도된다.

$$\frac{\partial^2\psi_o}{\partial\tau^2}+\frac{1}{\tau}\frac{\partial\psi_o}{\partial\tau}+\frac{\partial^2\psi_o}{\partial\eta^2}=3(1-\omega^*)(\psi_o-4\pi\Phi) \quad (20)$$

$$F_r=\frac{\psi_r}{\pi}=-\frac{1}{3\pi}\frac{\partial\psi_o}{\partial\tau},\quad F_z=\frac{\psi_z}{\pi}=-\frac{1}{3\pi}\frac{\partial\psi_o}{\partial\eta} \quad (21)$$

축열시스템의 원통벽과 상변화하는 경계면을 등방향 회색면이라 가정하면 Marshak형 경계조건이 유도된다.

$$\psi_o\pm E_i\frac{\partial\psi_o}{\partial\tau^*}=4\pi\Omega_{wi},\quad \tau^*=\tau,\ \eta$$
$$E_i=\frac{2}{3}\frac{2-\varepsilon_{wi}}{\varepsilon_{wi}} \qquad i=1,\ 2,\ 3,\ 4 \qquad (22)$$

상변화 물질과 전달유체 경계면에서의 경계조건은

$$-K_p\frac{\partial T}{\partial\gamma}\Big]_{\gamma=\gamma+}+\frac{\psi_\gamma}{\pi}\sigma T_\gamma{}^4\Big]_{\gamma=\gamma+}=-K_f\frac{\partial T}{\partial\gamma}\Big]_{\gamma=\gamma-} \qquad (23)$$

이며 상변화물질 벽면에서의 경계조건과 전달유체의 초기조건은 다음과 같다.

$$\frac{\partial T(r,\,o,\,t)}{\partial z}=0,\ \frac{\partial T(r,\,L,\,t)}{\partial z}=0,\ \frac{\partial T(r_o,\,z,\,t)}{\partial r}=0$$
$$T(r,\,z,\,o)=T_{in},\quad u(r,\,z,\,o)=v(r,\,z,\,o)=0 \quad (24)$$

3. 수치해석

본 연구의 목표를 달성키 위하여는 난류 전달유체, 상변화 물질, 그리고 상변화 물질내부에서 영향을 미치는 복사열을 지배하는 방정식과 초기 및 경계조건을 각각 이산화하여 수치해석을 성공적으로 진행하여야 한다. 강제대류를 동반한 에너지 전달유체의 지배방정식은 Patankar[8]에 의한 검사체적 이용 이산화방법에 근거를 둔 SIMPLE에 의하여 수치해를 구하고 이산화된 방정식은 Thomas Algorithm에 의하여 벽함수를 사용하여 수치적으로 해석하였다. 상변화 영역에서는 에너지 보존방정식(13)와 복사열 근사 전달방정식(20)를 이산화하면, 구하고자하는 온도와 압력변수로 비선형 이산화 대수 방정식을 형성 하였고 이러한 비선형 방정식은 SOR상수를 도입한 Gauss-Seidel 반복계산에 의하여 해를 구하였다. SOR 반복계산 방법에서는 각 시간단계당 수렴시간을 단축키 위하여 새로운 엔탈피값을 구할때 Over Relaxation 계수를 곱하여 수정을 하고 액상과 고상의 상변화 경계면은 식(16), (17), (18)에 의하여 각시간단계당 구할 수 있다. 상변화물질과 전달유체간의 경계면에서는 상변화 물질내의 복사 및 전도 열전달의 합이 전달유체내의 벽면 근처에서의 전도열전달과 같도록 식(23)을 사용하였다. 수렴조건으로 사용되는 기준은 상변화물질과 전달유체간의 경계면에서 열유속의 절대크기의 변화의 차의합을 취하며 이는 각시간단계당 수렴되는 온도, 엔탈피, 유체속도를 내포하고 있다. 사용된 격자는 상변화물질의 경우 30×30이고 에너지전달 매개물질의 경우 30×20을 기준으로 하였고 $\triangle\zeta=0.01\sim0.001$을 취할때 수치안정화 및 수렴조건을 만족하였다. 다음은 각 단계에서의 수렴조건을 나타내며,

$$\sum_{n=1}^{N}\left|\frac{H^{n+1}-H^n}{H^n}\right|_{t+\triangle t}<10^{-3}$$

$$|(q_{전도}+q_{복사})_{상변화물질}-(q_{전도})_{전달매개물질}|<10^{-3}$$

이며 정상상태를 위한 수렴조건은 다음과 같다.

$$\sum_{n=1}^{N}\left|\frac{H_{t+\triangle t}-H_t}{H_{t+\triangle t}}\right|<10^{-4}$$

난류의 경우 층류에 비하여 수렴된 컴퓨터 계산 시

간은 5배 이상이 되어 CRAY XMP의 경우 1시간, PC486/66의 경우 40시간 정도가 소요되었다.

4. 수치결과 및 고찰

Kim과 Yimer[9]는 내부원통의 온도가 순간적으로 응고온도 이하로 냉각되어 일정온도에서 유지된다고 가정하여 광학적으로 두꺼운 상변화 물질의 내부복사열의 영향을 고찰하였다. 내부복사열은 내부원통의 전구간을 통하여 내부복사열을 무시할 경우보다 열전달 증가 및 고상화를 가속화 시켰다.

내부원통을 흐르는 에너지 전달유체를 도입[5]하여 강제층류 대류에 의하여 내부복사열을 도입한 상변화 물질에 저장된 에너지를 이동시키는 경우 그 영향을 조사하였으며 내부복사 열과 내부원통의 온도변화를 보고 하였다. 이번 논문에서는 원통내부를 흐르는 유체가 강제 난류 대류상태에서 내부복사열을 도입한 상변화 물질로부터 에너지를 전달하는 경우를 수치해석적으로 접근하므로써 그 난이도를 증가 시켰다. 수치의 불안정성과 막대한 컴퓨터 계산시간을 최소화하여 실용성 있는 프로그램 개발에 집중적인 투자가 이루어졌으며 격자수는 30(축방향)×20(전달유체반경방향)×30(PCM반경방향)을 기준으로 하였고 시간단계인 $\Delta\zeta$는 0.01~0.001로 취하면서 SOR 상수의 경우 3~8을 취하였다. Grid 수의 증가는 컴퓨터 cpu시간을 증가시켰으나 앞에서 기술한 허용오차 0.001를 크게 줄이지 못하였다. Fig.2는 난류 전달유체(Re=3000)가 Z=0.127, 0.254, 0.381m에서 축방향속도 u를 각각 나타내고 있으며 같은 위치에서 시간에 따른 속도 변화가 없었고 내부원통 벽면으로부터 전단응력의 영향을 나타내고 있다. 상변화 내부의 복사열과 전도열이 난류전달 유체의 속도 변화에 미치는 영향은 극히 작다는 것을 알 수 있다. Fig.3은 Re=1700(층류)의 경우 반경방향의 전달유체와 상변화 물질내부의 온도분포를 나타내고 있으며 Fig.4는 Re=3000(난류)의 경우 반경방향의 온도분포를 보여준다. Fig.3과 Fig.4에서 수직점선으로 나타난 내부원통면의 온도를 비교하여 보면 전체적인 온도분포경향은 유사하나 Fig.3(층류)에서의 내부원통면의 온도가 20~30℃정도 예상된 대로 높게 유지되고 있다. 두 그림에서 수평점선은 내부원통면을 나타낸다. 특히 Fig.4에서는 내부복사열을 도입한 경우가 내부원통벽면의 온도를 더욱

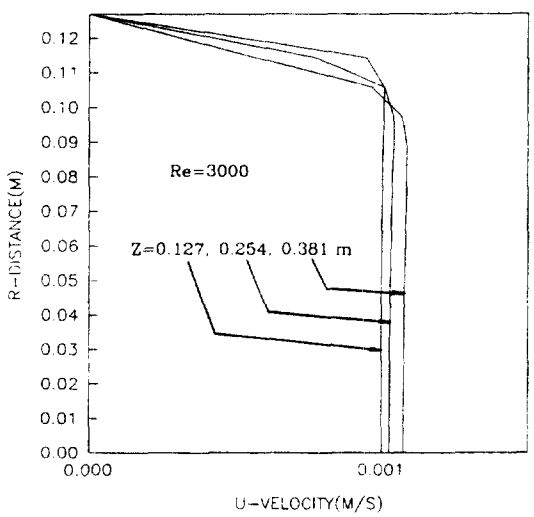

Fig.2 Axial velocity u distribution at different z locations
(Re=3000, T_{in}=573K, K_s=17.307 W/mK, ρ_s=2803.2kg/m^3)

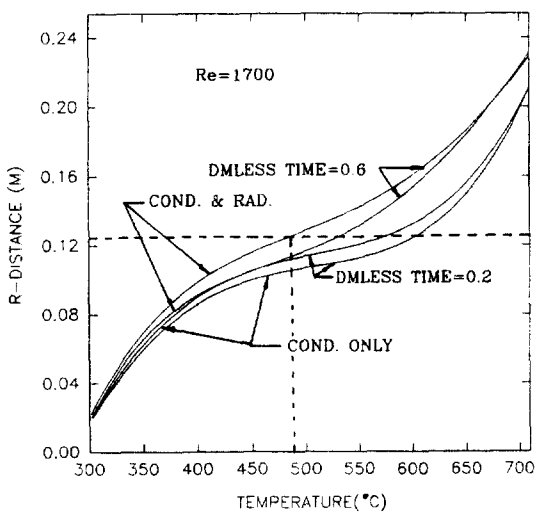

Fig.3 Radial temperature distribution at ζ=0.2, 0.6
(Re=1700, α=6m^{-1}, N=0.45)

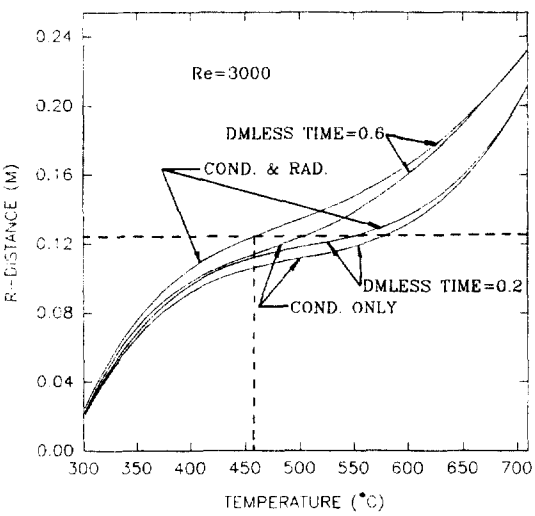

Fig.4 Radial temperature distribution at $\zeta=0.2, 0.6$ (Re=3000, $\alpha=6m^{-1}$, N=0.45)

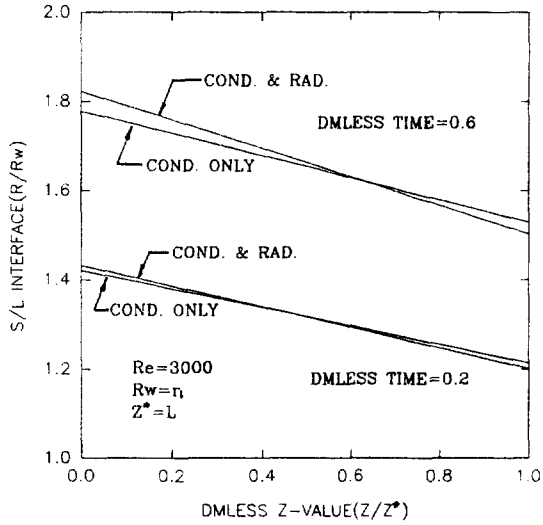

Fig.6 Solid/liquid interface with internal thermal radiation (Re=3000, $\alpha=6m^{-1}$, N=0.45)

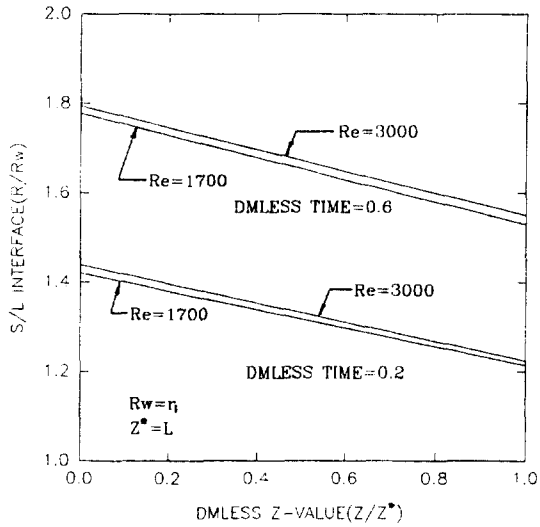

Fig.5 Solid/liquid interface for different Reynolds numbers (Re=1700, 3000, No Radiation)

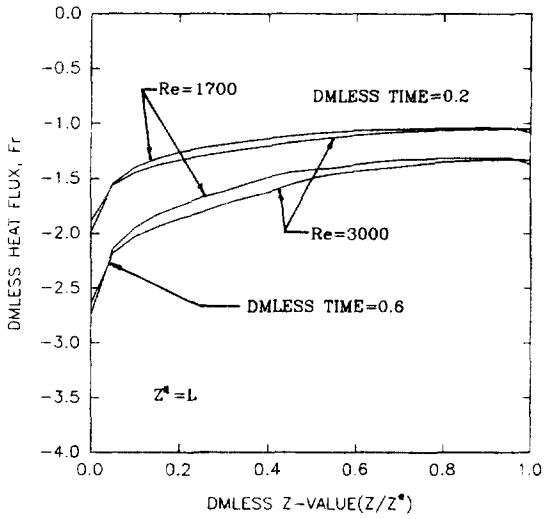

Fig.7 Heat fulx for different Reynolds numbers (Re=1700, 3000, No Radiation)

빨리 낮춤으로써 열전달량과 상변화 물질의 응고현상에 영향을 미치고 있다.

전달유체의 온도장이 상변화 물질이 완전히 응고될때까지는 정상상태에 도달하지 못하고 있는동안 Fig.2에서 알 수 있듯이 속도장은 빠른 시간내에 정상상태에 도달되고 있다. 이는 전달유체의 완전히 발달된 정상상태의 실험열전달 관계식을 이용할 경우에는 시스템의 성능 계산에 중요한 오차를 발생시킬 수 있음을 말해준다.

Fig.5에서는 내부복사열을 배제하고 충류(Re=

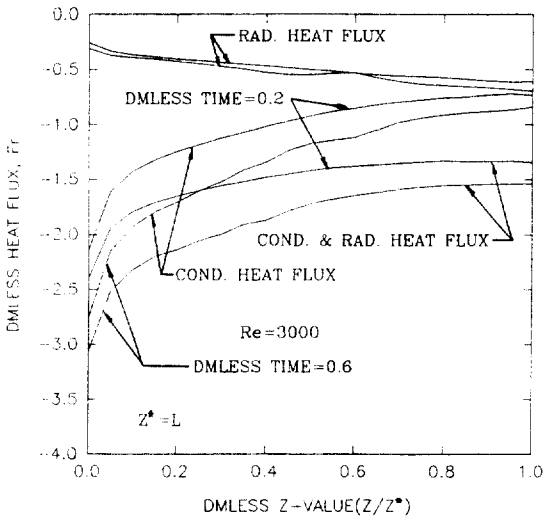

Fig.8 Heat fulx with internal thermal radiation (Re=3000, $\alpha=6m^{-1}$, N=0.45)

1700)와 난류(Re=3000)의 경우 액상/고상간의 경계면을 나타내고 있으며 Re=3000인 경우에 고상화가 먼저 진행되고 있다. 그러나 Fig.6에서 상변화 물질에 내부복사열을 도입할 경우 입구부분에서 고상화가 먼저 진행되고 따라서 전달유체는 입구부분에서 열을 빨리 흡수한 결과 후반부에 가서는 고상화의 속도가 다소 늦어지고 있음을 알 수 있다. 따라서 Kim과 Yimer[9]에서 가정한 내부원통의 온도가 일정하다라는 가정과는 달리 층류 및 난류 전달유체의 경우 응고속도가 전체적으로 증가하는 것은 옳지 않다는 것을 알 수 있다.

Fig.7은 상변화 내부의 복사열을 고려하지 않은 경우 내부원통면에서 층류 및 난류 전달유체로 전달된 열에너지 분포를 나타내며 Fig.8의 내부복사열을 도입할 경우에는 복사 및 전도 전열량의 합이 상당부분 증가되어 있다. 난류의 영향보다는 여전히 내부 복사열의 영향이 상대적으로 크게 나타나고 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 Prandtl 수가 작은 (0.1~0.01) 전달유체에 강제 난류대류 $k-\varepsilon$ 방정식을 도입하여 고온축열 시스템의 상변화 물질 내부의 열복사 전달에 관한 영향을 수치해석 하였다. 고온축열 시스템에 있어서 내부복사의 영향은 난류전달 유체의 경우에도 시스템 설계 요소에 중요한 변수로써 작용하고 있으며 난류의 상대적인 영향은 오히려 작게 나타났다. 난류전달유체의 도입을 통한 성공적인 수치해석은 실제 시스템에 더욱 가까운 해석을 가능케 하였으며 전달유체의 비정상적인 온도변화, 층류와 난류의 응고상태 비교, 내부복사열 도입시의 층류 및 난류의 응고현상, 내부원통면을 통한 전도 및 복사에 의한 열전달량에 관한 결과를 얻었다. 향후 연구분야로써는 광학적으로 얇고 비회색체인 상변화 물질의 도입과 전달유체의 Prandtl수가 비교적 큰 경우에도 확대적용 하는것이 바람직하다.

후 기

이 논문은 1993년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었으며 관계자께 감사드린다.

참 고 문 헌

1. Borucka, 1975, "A Survey and Selection of Inorganic Salts for Application to Thermal Energy Storage", Report to the U. S. Energy Research and Development Adminstration.
2. Maru, H. C., Dullea, J. F., and Huang, V. S., 1976, "Molten Salt Thermal Energy Storage system : Salt Selection", U. S. Energy Research and Development Admin-stration Report.
3. Cao, Y. and Faghri, A., 1992, "A Study of Thermal Energy Storage systems with Conjugate Turbulent Forced Convection", J. of Heat Transfer, Vol. 114, pp. 1019~1027.
4. Cao, y. and Faghri, A., 1990, "A Temperature Transforming Model with a Fixed Grid Numerical Methodology for Phase Change Problems Including Natural Convection", J. of Heat Transfer, Vol. 112, pp. 812~816.
5. Kim, K. S. and Bae, M. W., 1993, "Thermal

Radiation Effects on PCM/Forced Convection Conjugate Module", Transport Phenomena in Thermal Engineering, Begell House, pp. 197~202

6. Launder, B. E., & Spalding, D. B. 1974, "The Numerical Computation of Turbulent Flow", Comp. Meth. Appl. Mech Eng., Vol.3, pp. 263~289.
7. Uesegi, A. and Tsujita, J., 1969, "Diffuse Reflection of Searchlight Beam by Slab. Cylindrical and Spherical Media", Astronomy Society of Japanese Publication, Vol. 21, pp. 370~383.
8. Patankar, S. V., 1980, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", McGraw-Hill Book Company.
9. Kim, K. S and Yimer, B., 1988, "Thermal Radiation Heat Transfer Effects on Solidification of Finite Concentric Cylindrical Medium-Enthalpy Model and P-1 Approximation", Numerical Heat Transfer, Vol.14, pp. 483~498.