

초고온 상변화 물질을 이용한 열회수장치 개발 : Part I 축열재 모듈의 열전달 현상 해석

박준규 · 서경원 · 김상진*
아주대학교 공과대학 화학공학과
*(주)대우 기술본부

Development of a Heat Regenerator Using High Temperature Phase Change Material : Part I Prediction of Heat Transfer Phenomena in a Single Module of Phase Change Material

J.K. Park, K.W. Seo and S. J. Kim*

Department of Chemical Engineering, College of Engineering, Ajou Univ. Suwon, Korea
*Daewoo Corporation, Construction Technology Division, Seoul, Korea

요 약

본 연구에서는 초고온 잠열 축열재를 이용한 에너지 저장 시스템을 개발하기 위한 첫 단계로 에너지 저장 시스템 내부를 구성하는 단일 축열재 모듈에 대한 축방열 특성에 관한 수치모델을 개발하였다. 잠열축열재는 Si와 Al이 각각 96.8%와 2.7%인 합금으로 Ca, Fe 및 Ti 등의 불순물을 함유하고 있으며, 그것을 둘러싼 캡슐은 SiC와 흑연이 각각 58%와 42%인 합금으로 용점은 약 1673 K다. 재료분석 결과에 준하여 수치모델 개발에 필요한 물리·화학적 데이터를 참고문헌으로부터 인용하였으며 유체의 온도와 속도를 축열재의 축방열 특성에 관한 변수로 사용하였다. 상전이에 관한 해석은 겉보기 열용량 법(apparent capacity method)과 postiterative 법의 장점들을 이용하여 해석하였다. 수치해석 결과 가스의 온도가 실제 조업에 가까운 1773 K의 경우 잠열재가 축방향으로 빨리 용융되고 상대적으로 가스의 온도가 높아 온도 차이가 큰 3000 K의 경우 잠열재가 반경방향으로 빨리 용융되는 현상이 일어났다. 가스의 유속은 온도에 관계없이 느린 경우에만 용융시간에 영향을 주고 빠른 경우에는 용융시간이나 용융형태에 거의 영향을 주지 못하며, 유속이 느릴수록 축열재 내부 온도구배의 앞·뒤 비대칭성이 심해지는 것이 예측되었다.

Abstract—A mathematical model has been developed to describe heat transfer phenomena in a PCM (phase change material) module for development of an energy recovery system. The PCM module, melting point of which is around 1673 K, consists of silicon(96.8%), aluminium(2.7%) and marginal amounts of impurities such as Ca, Fe and Ti. The module is covered by a capsule that consists of SiC(58%) and graphite(42%). Physical properties that are required for model predictions were cited from the references. The apparent capacity method and the postiterative method were used in the mathematical model to describe the phase changing mechanism. Temperature and velocity of fluid are the major variables in the model calculation. For the gas temperature of 1773 K that simulates real operating conditions, the prediction shows that PCM is rapidly melted to axial direction. However, for the gas temperature of 3000 K that is higher than the real conditions, PCM is melted rapidly to the radial direction. The gas velocity has no influence on the melting phenomena of the PCM except when the gas velocity is relatively low. At the low gas velocity asymmetry of the temperature profiles in PCM is obtained.

1. 서 론

에너지저장의 기본개념은 열, 전기 또는 기계적인 형태로 생산된 에너지를 적절한 형태로 저장하였다가 필요한 장소와 시간에 적절한 수준으로 에너지를 공급하고자 하는 것으로서 에너지 공급과 소비의 시간적 또는 장소적 불일치를 해소하는 것 외에도 공급이 시간에 따라 변하는 천연에너지를 효과적으로 이용하며 양질의 산업폐열을 효과적으로 회수하기 위한 여러 목적 등에 에너지 저장시스템이 적용되고 있다. 특히 제철 산업과 요로 공업, 발전용 연소로 및 소각로를 이용하는 연소산업 등과 같이 고온의 열원을 사용하는 공정에서 발생하는 폐열은 에너지의 양과 질적인 면에서 우수한 에너지원이므로 이를 회수하여 재활용하기 위한 에너지 저장시스템의 개발이 절실히 요구된다.

고온의 폐열을 회수하는 방법중 축열식 회수방법은 환열식에 비해 장치의 규모가 큰 단점이 있으나 열회수율이 높고 양질(어느정도 일정한 범위의 온도를 갖는)의 열원을 공급할 수 있는 장점이 있다¹⁾. 이러한 축열식 열회수장치에서 축열재로 현열축열을 이용하는 내화물을 주로 사용하고 있는데, 이러한 현열재를 에너지 저장밀도가 현격하게 크고 거의 일정한 온도에서 축열과 방열을 할 수 있는 잠열 축열물질로 대체한다면 축열조의 크기를 줄여 설비투자비의 절감효과를 얻을 수 있으며 양질의 열원을 장시간 공급하므로써 에너지 이용효율을 증가시키고 나아가서 양질의 열원을 이용하는 공정의 운전조건을 개선하여 운전비용을 절감할 수 있을 것이다.

국내의 경우 태양열 이용과 관련하여 물을 이용한 축열 방법이 실용화되고 있으며 무기 합수물의 상변화를 이용한 저온축열 연구도 진행되고 있으나 금속-비금속 합금을 이용한 초고온 축열 방법에 관한 연구는 전무한 형편이다^{2,3)}. 따라서 본 연구에서는 이러한 초고온 축열시스템 개발의 첫 단계로서 초고온 축열재 모듈(PCM: phase change material) 한개에 대한 축방열 동특성에 관한 수치모사를 하였다. 본 연구는 계속적으로 축열시스템 전체에 관한 수치 모사를 개발하고, 프로그램의 타당성을 검증하기 위한 실험을 병행하여 최종적으로 최적화된 축열조를 설계·제작할 예정이다.

2. 수치모델 및 모사

2-1. 계의 정의 및 가정

본 실험에서 사용한 축열재는 본교와 기술 협력관계에 있는 소련의 Lutch 연구소에서 개발한 제품으로서 재료분석 결과 축열재는 Si와 Al의 합금이고 그것을

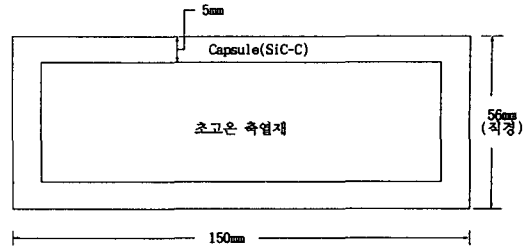


Fig. 1. Dimension of PCM module.

Table 1. PCM 모듈의 재료분석 결과.

PCM	Component	Si	Al	Ca	Fe	Ti
	Weight%*	96.79	2.65	0.12	0.34	0.08
	융점	1673 K				
	잠열량	300~350 cal/g at 1370°C				
Capsule	Component	Graphite		SiC		
	Wight%**	0.58		0.42		

* 습식 분석결과

** TGA 분석결과

둘러싸고 있는 캡슐은 흑연과 SiC의 합금으로 융점이 약 1673 K에 이르는 고온 축열재다. Fig. 1과 Table 1에 축열재 모듈의 모형과 재료분석결과를 각각 나타내었다. 본 연구의 전산모사에서 사용한 축열재의 물성치는 기존에 발표된 값을 사용하였다⁴⁻⁶⁾. 온도변화에 따른 밀도의 변화나 비열의 변화는 혼합물의 경우 Additive 법칙이 잘 맞는 것으로 알려져 있다⁷⁾. 따라서 본 수치모사에 이용된 혼합물의 물성치는 Additive 법칙을 적용하여 계산하였으며, 각각의 물성치를 Table 2에 나타내었다.

현열저장의 경우 일반적으로 알려진 대류와 전도를 고려하면 열전달율을 계산할 수 있지만 잠열저장의 경우에는 결정화속도에 따라서 열전달율이 변화될 수 있다. 즉 결정고체와 용융체의 경계면에서는 kinetic 효과를 무시할 수 없으며, 불순물이 섞여 있을 경우에 이 효과가 더욱 크게 나타날 수 있다⁸⁾. 그러나, 일반적으로 점도가 높은 액체내에서 결정화가 아주 서서히 일어날 때를 제외하고는 열전달이 율속단계가 된다. 결정고체와 용융체의 경계조건을 고려할 때 용액 또는 고체내의 평균온도기울기, $(dT/dX)=u \cdot \Delta H/k$ 가 1 K/cm 보다 크면 열전달이 율속단계라 할 수 있으며, 여기서 u는 결정화속도, ΔH 는 잠열, k는 열전도도를 나타낸다.

본 연구에서 이용된 축열모듈은 결정화가 아주 빠른

Table 2. 수치모사에 이용된 물성자료

gas		
Density, ρ_g [Kg/m ³]	351.48/T	
Heat Capacity, C_{pg} [J/Kg·K]	$[3.355 + 0.575 \times 10^{-3}T - 0.016 \times 10^{-5}T^2] \cdot R$	
Viscosity, μ_g [Pa·sec]	$2.84 \times 10^{-8}T + 1.48 \times 10^{-5}$	
Thermal Conductivity, K_g [W/m·K]	$4.75 \times 10^{-5}T + 1.925 \times 10^{-2}$	
PCM		
Thermal Conductivity, K_p [W/m·K]	138.5 : solid 138.5 : liquid	2.83 : solid $3.328 \times 10^{-2}T + 62.99$: liquid
Heat Capacity, C_{pp} [J/K·mol]	$4.1816(5.79 + 5.6 \times 10^{-4}T - 1.09 \times 10^5/T^2)$: solid 4.1816×6.12 : liquid	$4.1816(4.94 + 2.96 \times 10^{-3}T)$: solid 4.1816×7.0 : liquid
Density, ρ_p [kg/m ³]		$2767 - 0.22 T$: solid $2640 - 0.275 T$: liquid
Latent Heat, λ [kJ/kg·K]	1420	386.6
Melting temp., T_m [K]	$T_1 = 1673, T_2 = 1683$	
Graphite		
Thermal Conductivity, K_p [W/m·K]	$-5.687 \times 10^{-2}T + 116.4$	$-0.0108 T + 63.7158$
Heat Capacity, C_{pp} [J/K·mol]	$4.1816(8.93 + 3 \times 10^{-3}T - 3.07 \times 10^5/T^2)$	$4.1816(2.673 + 0.002617 T - 116900/T^2)$
Density, ρ_p [Kg/m ³]	3170	1500~2250
Melting temp., T_m [K]	2973.15	3923

*R : gas constant

금속과 비금속의 합금이므로 열전달이 율속단계라고 생각하여 상변화를 해석하였다. 그의 수치모델에 이용된 가정들은 다음과 같다.

- 1) 열전달은 이차원이고 열원은 없다.
- 2) 가스상에서 반경방향으로는 온도가 일정하고, 열교환기형태로 열전달현상이 일어난다.
- 3) 가스상과 축열재 모듈간의 열전달은 대류열전달과 복사열전달이 동시에 일어난다.
- 4) 본 시스템의 온도구간이 넓기 때문에 물리·화학적 물성치들은 상수가 아닌 온도의 함수로 만들어 이용하고 데이터가 부족한 물성치들은 평균값을 사용한다.
- 5) 전체 열교환 시스템은 단열이 잘 되어있어 외부로의 열손실은 없다.
- 6) 축열재 모듈의 크기가 작기 때문에 액상에서 자연대류에 의한 영향은 무시한다.

2-2. 지배방정식과 경계조건

PCM 모듈에 대한 열교환 시스템에서 가스와 축열재 모듈간의 열전달 현상을 해석하기 위해서는 가스에 대한

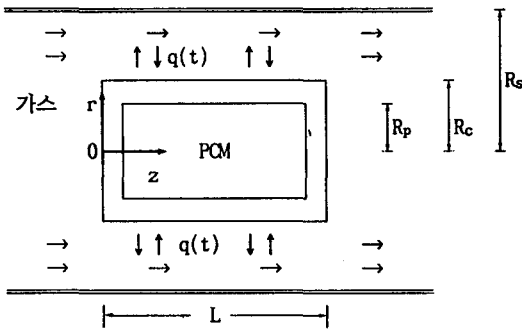
에너지수지식과 축열재를 둘러싸고 있는 캡슐의 지배방정식 및 축열재의 지배방정식이 필요하다. Fig. 2에 열교환 시스템의 개략적인 그림을 나타내었다.

먼저 축열재에 대한 에너지수지식은 반경방향과 축방향의 열전달을 고려하고 액상에서의 자연대류를 무시하면 다음과 같은 식을 유도할 수 있다. 등식의 왼쪽항은 축열재 모듈의 축적항, 오른쪽의 첫번째항은 반경방향으로의 열전달 그리고 두번째항은 축방향으로의 열전달을 각각 나타낸다.

$$\frac{\partial(\rho_p C_p T_p)}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\partial(k_p T_p)}{\partial r} \right] + \frac{\partial^2(k_p T_p)}{\partial z^2} \quad (1)$$

여기서 ρ_p 는 축열재의 밀도, C_p 는 열용량, k_p 는 열전도도, T_p 는 온도이며, 온도구간이 넓기때문에 여기서 사용한 물성치들은 온도에 의존하는 변수로 해석하였으며 그 값을 Table 2에 나타내었다.

가스에서의 지배방정식은 가스가 대상부피(Control volume)를 통과할 때의 에너지 손실이 가스에서 축열재 모듈로 대류열전달과 복사열전달에 의해 전달되어진 에너지와 일치 한다는 에너지 수지식으로부터 산출되



↓ ↑ : 열유속흐름방향 → : 가스의 흐름방향
 R_s : 열교환 시스템의 반경 R_c : 축열재 모듈의 반경
 R_p : 캡슐의 내경 L : 축열재 모듈의 길이
 q(t) : 가스와 축열재 모듈간의 열전달량

Fig. 2. Schematic diagram of a heat exchange system for one PCM module.

었다. 본 연구에 사용된 가스의 선형유속은 대부분 난류 유동구간으로 전도에 의한 열전달량은 대류열전달량에 비해 무시할 만 하다. 따라서 식 (2)에서 전도에 대한 항을 고려하지 않았다. 등식의 왼쪽항은 가스상에서 축적항, 오른쪽의 첫번째항은 가스와 축열재 포피 간의 총괄 대류 열전달, 두번째항은 복사열전달 그리고 마지막항은 가스 진행방향으로의 대류 열전달을 각각 의미한다. 복사열전달은 가스의 온도와 실험로 내부벽과의 온도는 항상 같다는 가정하에 내부벽에서 축열재로 복사된 에너지를 나타낸 것으로 도달률은 1이고 가스는 투명하다고 가정하였으며, 방출도인 ϵ 는 요로공업의 로 내부벽에서 일반적으로 적용 되어지고 있는 0.8을 사용하였다.

$$\frac{\partial(\rho_g C_{pg} T_g)}{\partial t} = -h_g \frac{2\pi R_c}{A_p} (T_g - T_c) - \frac{\sigma \epsilon F_{wc} 2\pi R_c}{A_p} (T_g^4 - T_c^4) - \rho_g C_{pg} v_g \frac{\partial T_g}{\partial z} \quad (2)$$

여기서 h_g 는 대류열전달계수, T_g 는 가스의 온도, T_c 는 캡슐의 온도, v_g 는 가스의 선형유속, R_c 은 축열재모듈의 반경, σ 는 Stefan-Boltzmann 상수, ϵ 는 방출도이고 F_{wc} 는 로 내부벽과 축열재모듈간의 도달률(view factor)이다. A_p 는 가스가 흐르는 방향으로 가스의 단면적으로 본 연구에서 제작한 실험장치에 기준을 두어 0.099 m²으로 하였고 ρ_g 와 C_{pg} 는 각각, 가스의 밀도와 열용량으로 온도에 의존하는 변수로 해석하였으며 그 값을 Table 2에 나타내었다.

대류열전달 계수(h_g)는 강제난류대류에서 이용되는 고전실험식인 식 (3)을 사용했으며, 축열일 경우 α 는 0.8,

β 는 0.4이고 방열일 경우 α 는 0.8, β 는 0.3이다⁹⁾.

$$h_g = 0.023 \times k_g / 2R_c \times Re^\alpha \times Pr^\beta \quad (3)$$

여기서 Re 와 Pr 은 각각 Reynold수와 Prandtl수로써 다음과 같이 정의 된다.

$$Re = \frac{D_H \cdot v_g \cdot \rho_g}{\mu_g} \quad (4)$$

$$Pr = \frac{\mu_g \cdot C_{pg}}{K_g} \quad (5)$$

여기서 D_H 는 수력학적 반경으로 본 연구에서 사용하게 될 실험장치의 경우 0.288 m이다. 그의 μ_g 와 k_g 는 각각 가스의 점도와 전도도를 나타낸 것으로 온도에 의존하는 변수로 해석하였으며 그 값을 Table 2에 나타내었다.

본 축열모듈은 캡슐의 두께가 5 mm나 되므로 캡슐에 의한 저항을 무시할 수가 없다. 따라서 지배방정식을 캡슐에 대해서도 적용하여 캡슐의 온도분포를 구했다.

$$\frac{\partial(\rho_c C_{pc} T_c)}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\partial(k_c T_c)}{\partial r} \right] + \frac{\partial^2(k_c T_c)}{\partial z^2} \quad (6)$$

수치모사에 이용된 초기조건과 경계조건은 다음과 같다.

- 액상에서의 자연대류를 무시하면 온도분포가 반경 방향으로 대칭이다.

$$\frac{\partial T_p}{\partial r} = 0 \text{ at } r=0 \quad (7)$$

- 열교환기 시스템은 단열이 잘 되어있어 외부로의 열손실은 없다.

$$\frac{\partial T_g}{\partial r} = 0 \text{ at } r=R_s \quad (8)$$

여기서

R_s 는 열교환기 시스템의 반경

- 캡슐과 축열재의 경계면에서 두 온도는 같다.

$$T_p = T_c \text{ at } r=R_p \quad (9)$$

여기서

R_p 는 캡슐의 내경

- 유입되는 가스의 온도와 축열재의 초기온도는 각각 T_{gin} 과 T_{p0} 로 일정하다.

$$T_g = T_{gin} \text{ at } z=0 \quad (10)$$

$$T_p = T_{p0} \text{ at } t=0 \quad (11)$$

$$T_g = T_{gin} \text{ at } t=0 \quad (12)$$

○ 가스와 캡슐의 경계조건은 다음과 같다.

$$-K_c \frac{\partial T_c}{\partial z} = h_g(T_g - T_c) + \sigma \epsilon F_{wc}(T_g^4 - T_c^4) \text{ at } r=R_c \quad (13)$$

$$-K_c \frac{\partial T_c}{\partial z} = h_g(T_{gin} - T_c) + \sigma \epsilon F_{wc}(T_{gin}^4 - T_c^4) \text{ at } z=0 \quad (14)$$

$$-K_c \frac{\partial T_c}{\partial z} = h_g(T_g - T_c) + \sigma \epsilon F_{wc}(T_g^4 - T_c^4) \text{ at } z=L \quad (15)$$

여기서

T_{gin} 과 T_{gout} 은 각각 가스의 유입되는 온도와 유출되는 온도, L 은 축열재모듈의 길이 그리고 R_c 는 축열재모듈의 반경이다.

2-3. 상전이에 관한 해석

상전이에 관한 해석은 열용량에 잠열의 효과를 가산함으로써 상전이를 해석하는 겉보기 열용량 법(apparent capacity method)^{10,11)}과 상전이 구간에서의 온도변화는 식 (5)와 같이 변한다는 postiterative 법¹²⁻¹⁴⁾의 장점들을 이용하여 해석하였다.

$$T = T_1 + (\Delta H/\lambda) \cdot (T_2 - T_1) \quad (16)$$

여기서

ΔH : 각각자점에 축적되는 에너지 총량 [kJ/kg·K]

λ : 축열재의 잠열 [kJ/kg·K]

T_1 : 축열재가 용융하기 시작하는 온도 [K]

T_2 : 축열재가 완전히 용융될 때의 온도 [K]

본 연구에 이용된 축열재는 T_1 이 1673 K이고 T_2 가 1693 K이다.

축열재에 관한 에너지수지식은 고상에 대해서는 지배방정식에 고상의 물성치를 대입한 식 (6)과 같이 표현되고, 상전이가 일어날 경우에는 격자점의 축열능력과 단위 시간당 유입되는 열량의 비가 상전환율과 같다는 식 (7)과 $dT = \Delta T \cdot df$ 라는 관계식으로 부터 유도된 식 (8)과 같이 표현되며 액상에 대해서는 지배방정식에 액상의 물성치를 대입한 식 (9)와 같이 표현된다.

고상에서는

$$\frac{\partial(\rho_{ps} C_{ps} T_p)}{\partial t} = K_{pL} \left[\frac{\partial^2 T_p}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial T_p}{\partial r} \right] \right] \quad (17)$$

여기서

ρ_{ps} : 고상에서 축열재의 밀도 [kg/m³]

C_{ps} : 고상에서 축열재의 열용량 [J/kg·K]

K_{ps} : 고상에서 축열재의 열전도도 [W/m·K]

상전이 온도에서는

$$df = \frac{\Delta Q}{C_M} \cdot dt \quad (18)$$

$$\frac{\partial T_p}{\partial t} = \frac{\Delta Q \cdot \Delta T}{C_M} \quad (19)$$

여기서

f : 순간 상 전환율

ΔQ : 단위시간에 단위체적당 주입된 열량 [J/kg·K·s]

ΔT : $T_2 - T_1$

$C_M = C_p + \Delta T$: 겉보기 열용량 [J/kg·K]

액상에서는

$$\frac{\partial(\rho_{pL} C_{pL} T_p)}{\partial t} = K_{pL} \left[\frac{\partial^2 T_p}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial T_p}{\partial r} \right] \right] \quad (17)$$

여기서

ρ_{pL} : 액상에서 축열재의 밀도 [kg/m³]

C_{pL} : 액상에서 축열재의 열용량 [J/kg·K]

K_{pL} : 액상에서 축열재의 열전도도 [W/m·°C]

특히 본 프로그램에서는 postiterative 법을 수정함으로써 각 시간 간격마다 주입되는 열량을 계산하여 온도의 변화를 산출하였으며 순간상전환율 f 와 총전환율 F 를 도입하여 축열재의 용융되는 모습을 확인하였다. 여기서 총전환율이란 각 시간간격에서 변한 순간상전환율을 모두 합한 것으로 상경계면은 총전환율이 1이 될때 다음 격자점으로 이동하게 된다.

$$F = \int dt = \frac{T - T_1}{\Delta T} \quad (21)$$

2-4. 수치해석방법

앞에서 정리된 수치모델 식들은 MOL(method of line)¹⁵⁾을 이용하여 거리의 요소를 유한차분법으로 전개함으로써 시간과 거리에 대한 편미분 방정식을 시간에 대한 상미분 방정식으로 만든 다음, 연립미분방정식을 4차의 Runge-Kutta 법중 가장 많이 이용되어지고 있는 Gill's 법^{16,17)}을 이용하여 풀었다.

격자점(node)은 반경방향 r 과 축방향 z 에 대하여 각각 n 개와 m 개로 나누었으며, 축열재 내에서 유한차분으로 나누어진 격자점들에 대한 그림을 Fig. 3에, 프로그램의 흐름도는 Fig. 4에 각각 나타내었다.

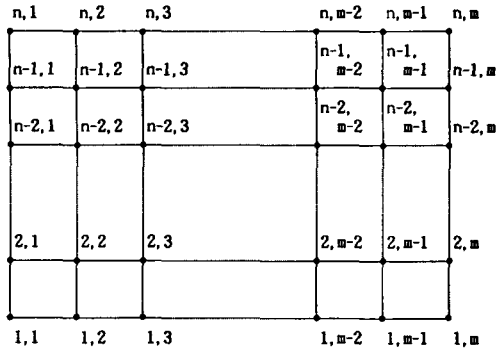


Fig. 3. 유한차분법으로 나눈 격자점.

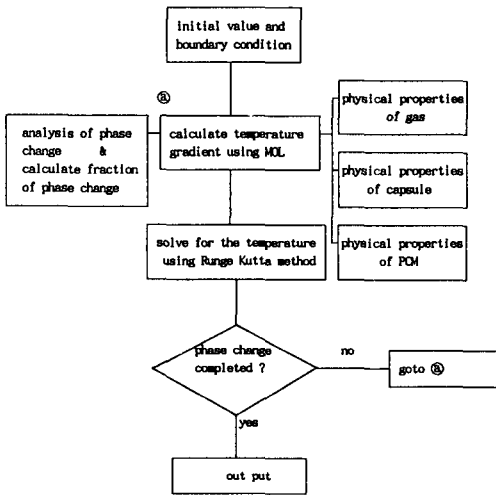


Fig. 4. Information flow for convergence of the calculation routines.

3. 수치결과 및 토의

Figs 5, 6과 7은 축열재의 초기온도가 유리공장 축열조의 초기조건과 같은 1473 K일 경우 가스의 유속과 온도변화에 따른 축열재 내부의 온도 구배를 나타낸 것으로 반경 방향으로 서로 대칭이기 때문에 축열재중위의 절반 만을 나타내었다. 고온의 가스는 왼쪽에서 오른쪽으로 흘러가며, x축과 y축의 단위는 mm이고 바깥쪽으로부터 5 mm씩의 두께는 캡슐부분으로 그 내부가 축열재이다. 축열재의 특성상 고상에서는 열전도도가 높고 상변화시 고체 표면의 온도가 녹는점으로 거의 일정하게 유지되므로 고체의 온도는 상변화 온도와 같아지게 된다. 따라서, 고체 상태로 존재하는 축열재의 온도가 거의 일정하게 유지되므로 등온선이 존재하지 않는 부분이 바로 고체 상태를 나타내는 부분이다. 본

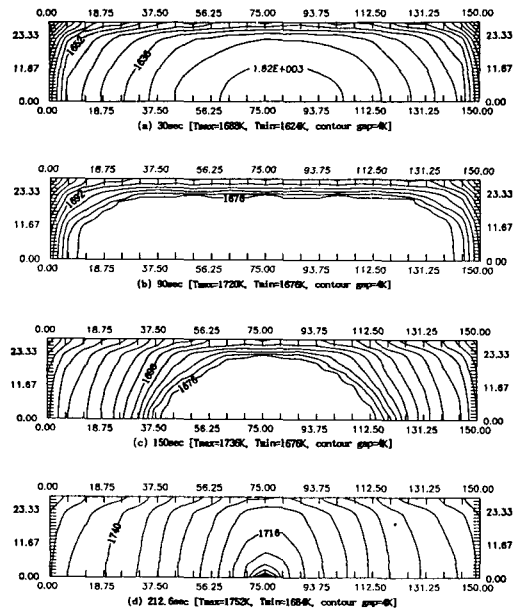


Fig. 5. Temperature profile of PCM module for the gas temperature of 1773 K (5 m/sec of gas linear velocity).

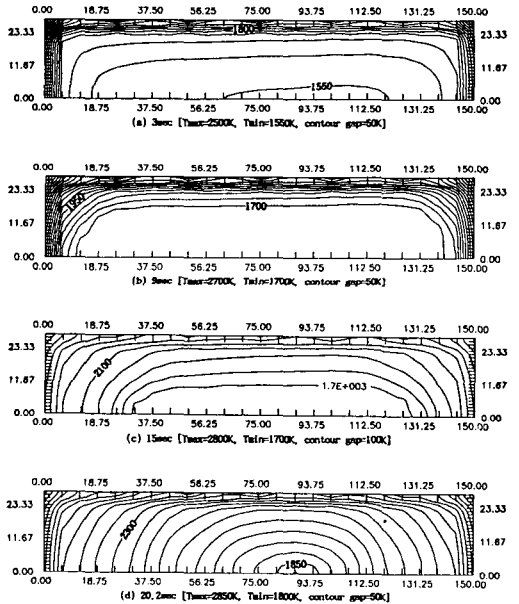


Fig. 6. Temperature profile of PCM module for the gas temperature of 3000 K (5 m/sec of gas linear velocity).

프로그램에서는 상변화율을 정의해 고체의 녹아 들어 가는 모습을 확인했으나 온도구배에서도 응용되는 모

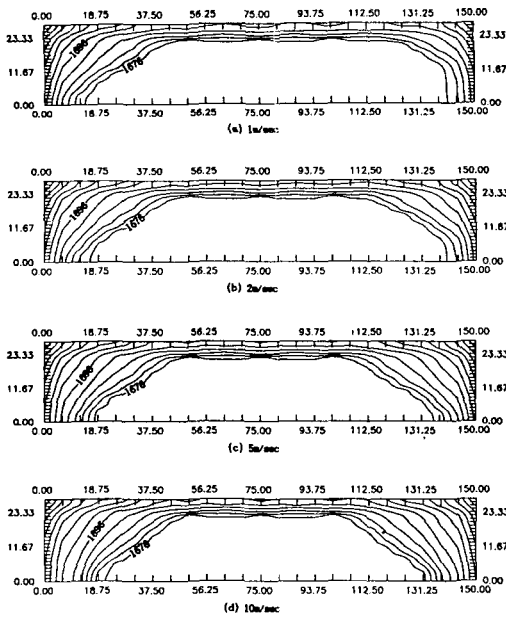


Fig. 7. Temperature profile corresponding to various inlet velocities at 120 sec at gas temperature of 1773 K.

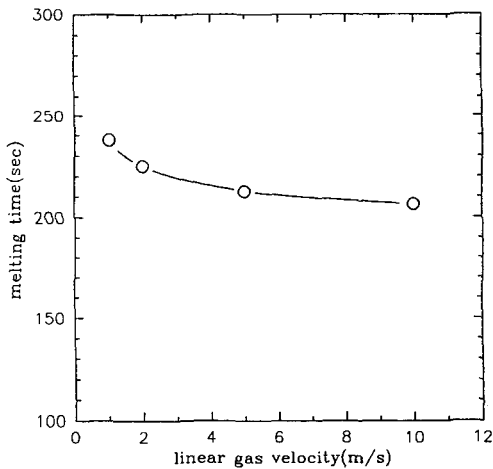


Fig. 8. Variation of melting time with velocity at gas temperature of 1773 K.

습을 확인할 수 있으므로 이에 대한 그림을 보이지 않았다.

먼저 고온의 열원을 사용하는 산업 특히 유리공장에서 발생하는 폐열을 이용할 경우 열전달 특성을 알아보기 위해 이와 유사한 조건 즉 가스의 온도가 1773 K이고 선형속도가 5 m/sec인 경우 시간에 따른 축열재 내부의 온도분포를 Fig. 5에 나타내었다. 약 40초 경과후

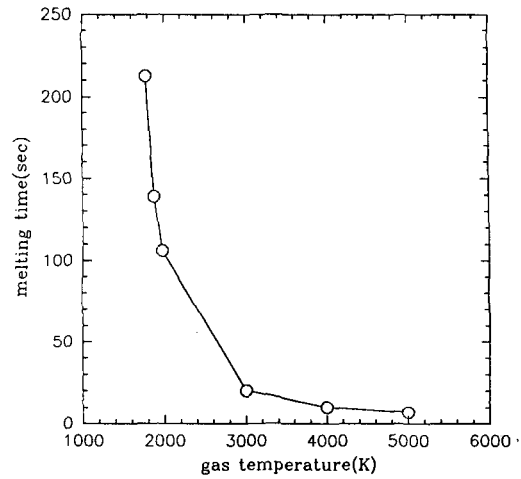


Fig. 9. Variation of melting time with temperature at gas linear velocity of 5 m/sec.

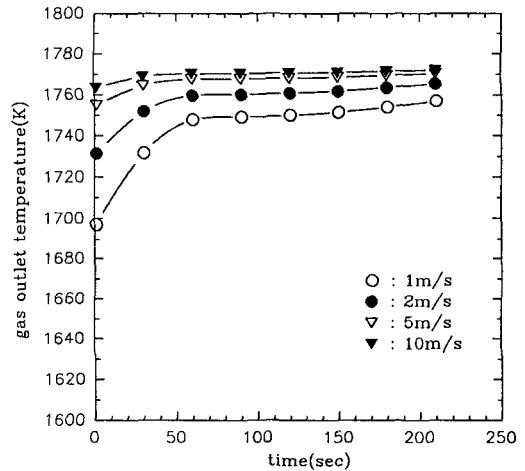


Fig. 10. Variation of outlet gas temperature corresponding to various inlet linear velocities at gas temperature of 1773 K.

축열재전체의 온도가 용융점까지 상승하면서 표면이 용융하기 시작하였으며 완전 용융하는데 212.6초 걸렸다. 즉 현열 축열시간은 약 40초, 잠열 축열시간은 약 172.6초로 잠열 축열에 의한 영향이 지배적임을 알 수 있다. 초기에는 gas와 축열재간의 온도차이가 크므로 대류에 의해 표면으로 유입되는 열량이 크지만 시간이 지남에 따라 표면으로 유입되는 절대열량이 줄어들면서 상대적으로 표면적이 넓어 온도가 빨리 증가한 모서리로부터의 전도에 의해 열전달이 지배되어 반경방향 보다는 축방향으로 빨리 용융되는 현상이 나타난다.

가스의 온도가 상대적으로 커서 축열재와 가스의 온도차이가 큰 경우의 열전달 현상을 알아보기 위해 가스의 온도가 3000 K이고 속도가 5 m/sec인 경우를 Fig. 6에 나타내었다. 축열재와 가스 사이의 온도차이가 크므로 전도에 의해 모서리로부터 전달되는 열량보다 대류에 의해 표면으로부터의 열전달이 지배적이 되어 반경 방향으로 빨리 녹아 들어가는 것을 볼 수 있다. 또, 축열재와 가스의 온도차이가 크므로 열전달량이 많아 유입되는 가스의 온도와 유출되는 가스의 온도차가 크기 때문에 축열재의 온도분포는 가스의 온도가 낮은 경우보다 비대칭성이 더 심하게 나타난다. Fig. 6의 (a)는 표면의 온도가 너무 빨리 상승하기 때문에 전체 PCM의 온도가 용융점으로 상승되기도 전에 표면이 용융하기 시작하는 모습이다. 약 3초 경과 후부터 표면이 용융하기 시작하였고 완전히 용융하는데 20.2초 걸렸다.

가스의 온도가 1773 K이고 선형속도가 1 m/sec, 2 m/sec, 5 m/sec와 10 m/sec일 때에 120초 경과 후 축열재의 온도분포를 Fig. 7에 나타내었다. 가스의 선형속도가 빠를수록 더 빨리 용융하는데 이는 유속이 빠를수록 축열재와의 접촉시간이 짧아 축방향을 따라 흐르는 가스의 온도가 거의 떨어지지 않을 뿐만 아니라 대류 열전달계수도 증가하기 때문이다. 반면에 가스의 속도가 느릴수록 축열재와 접촉시간이 길어져 가스입구 온도와 출구온도 사이에 온도차가 커지게 되므로 축열재의 앞쪽이 빨리 용융하는 현상이 발생 축열재 내부온도 구배의 좌우 비대칭성이 심하게 나타남을 알 수 있다. 완전히 용융하는데 걸리는 시간은 1 m/sec일 때 237.8초, 2 m/sec일 때 225초, 5 m/sec일 때 212.6초, 10 m/sec일 때 206.3초이다.

가스의 온도가 1773 K인 경우 선형유속에 따른 완전용융에 걸리는 시간의 분포를 Fig. 8에, 가스의 속도가 5 m/sec인 경우 온도에 따른 완전용융에 걸리는 시간의 분포를 Fig. 9에 각각 나타내었다. 완전용융에 걸리는 시간의 가장 큰 변수는 역시 가스의 온도라는 것을 확인할 수 있었다. 선형유속이 약 2 m/sec 이하에서는 축열재와 접촉시간이 길어 가스와 축열재의 온도차가 적어지므로 대류에 의한 열전달이 율속단계가 되어 가스의 속도가 용융시간에 큰 영향을 주는 변수가 되지만 2 m/sec 이상에서는 접촉시간이 짧아 축방향을 따라 가스의 온도가 별로 낮아지지 않기 때문에 축열재의 용융시간에 큰 영향을 주지 못한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 10은 가스의 온도가 1773 K이고 유속이 1 m/sec, 2 m/sec, 5 m/sec와 10 m/sec인 경우에 유출되는 가스의 온도를 시간에 따라 도시한 것이다. 가스의 선형유속이 5 m/sec 이상에서는 축열재의 상변화에 의한 영향은 거의 없다. 그러나, 유속이 2 m/sec 이하의 경우에는

축열재의 온도가 용융점까지 상승하는 동안에는 가스의 온도도 급격히 상승하지만 축열재가 상변화 구간에 이르렀을 때는 가스의 온도도 거의 일정하게 유지된다. 즉 이 구간에서는 축열재의 열전도율이 높기 때문에 대류에 의해 들어온 절대 열량의 대부분이 상변화 경계면까지 빨리 전달되어 축열재를 용융시키는데 사용되고 따라서 축열재 표면도 거의 일정한 온도로 유지되므로 식 (2)에 의해 지배를 받는 가스의 온도가 거의 일정하게 유지되기 때문이다. 또한 Fig. 10의 4가지 경우는 완전히 용융된 후 가스의 온도가 다시 상승하는 모양을 보이고 있다.

4. 결 론

본 연구에서 사용되는 초고온 축열재는 재료분석 결과 Si와 Al의 합금이고 이를 둘러싼 캡슐은 SiC와 흑연의 혼합물로서 여러 온도와 속도의 가스상에서 축열재의 상변화 하는 모습과 가스의 유출 온도분포를 계산해 보았으며 그 결과는 다음과 같다.

1. 유리공장의 폐열과 비슷한 조건인 1773 K인 경우를 보면 가스와 축열재간의 온도차이가 적기 때문에 표면으로 유입되는 절대열량 보다 표면적이 넓어 온도가 빨리 상승한 모서리로부터 일어나는 열전달이 지배적 영향을 미쳐 축방향을 빨리 녹는 현상이 발생하며, 상대적으로 가스의 온도가 높아 온도차이가 큰 경우 즉 3000 K인 경우에는 대류에 의해 표면으로 유입되는 열전달이 지배적이므로 반경 방향으로 빨리 녹아들어 간다.
2. 유속이 빠른(약 2 m/sec 이상) 경우에 유속의 변화는 축열재의 용융되는 모습이나 시간에 큰 영향을 주지 못한다.
3. 축열시 유속이 약 2 m/sec 이하이고 축열재가 상변화 구간에 있으면 식 (2)에 의해 영향을 받는 가스의 유출온도가 거의 일정하게 유지된다. 이는 폐열회수에 있어 일정한 온도의 열을 계속 공급 받을 수 있는 장점을 보여준 결과이다.
4. 가스의 온도가 같을 경우 선형유속이 느릴수록 축열재와의 접촉시간이 길어 가스 입구에서의 온도와 출구에서의 온도차이가 크게 되어 축열재 온도구배의 앞·뒤 비대칭성이 심해진다.

위의 결과는 액상에서의 자연대류를 무시하고 나온 결과로서 실제시스템에서는 액상에서의 자연대류에 의한 영향 때문에 열전달이 다소 잘 될 것으로 예측된다.

감 사

본 연구는 아주대학교 교내연구비 지원과 상공자원

부가 주관하는 에너지절약기술 개발사업에 의해 이루어졌습니다. 아주대학교와 산공자원부의 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 박원훈, 박진유, 정문조, 박태진, 홍성안, 최형준, 김병화, 김상돈, 신병철: "열저장 시스템의 개발에 관한 연구", 한국과학기술원보고서, N235-2798-6, 과학기술처 (1987).
2. 김중엽, 한성욱, 이종호, 김재선: "CaCl₂·6H₂O 결정화의 속도론적 고찰", Energy R & D, **8**(1-2), 57 (1986).
3. 김상돈, 김지동: "Na₂HPO₄·12H₂O 상변화 물질을 이용한 에너지 저장", Energy R & D, **6**(2), 100 (1984).
4. Hale, D. V., Hoover, M. J. and O'Neill, M. J.: "Phase Change Materials Handbook", NASA CR-61363 (1971).
5. Humphries, W. R. and Griggs, E. I.: "A Design Handbook for Phase Change Thermal Control and Energy Storage Devices", NASA Technical Data Book (1974).
6. Perry, R. H.: "Perry's Chemical Engineers' Handbook", 6th ed., McGraw-Hill Book Co., New York (1984).
7. Selman, J. R. and Maru, H. C.: "Physical Chemistry and Electrochemistry of Alkali Carbonate Melts", Advances in Molten Salt Chemistry, Maman-tov, G. ed., Plenum Press, New York, **4**, 159 (1975).
8. Doremus, R. H.: "Rates of Phase Transformations", Academic Press, Orlando (1985).
9. Holman, J. P.: "Heat Transfer", McGraw-Hill Book Co., Singapore (1989).
10. Salcudean, M. and Abdullah, Z.: "Numerical Simulation of Casting Processes" Proceedings of The VIII International Heat Transfer Conference and Exhibition, San Francisco, CA, Aug. 12 (1986).
11. Salcudean, M. and Mashaie, A.: "Mathematical Modelling of Heat Transfer in Permanent Molds", Dept. of Mechanical Engineering, University of Ottawa (1983).
12. Comini, G., Del Guidice, S., Lewis, R. W., and Zienkiewicz, O. C.: "Finite Element Solution of Non-linear Heat Conduction Problems with Special Reference, to Phase Change", Int. J. Num. Math. Engr., **8**, 613 (1974).
13. Hashemi, H. T. and Sliepcevich, C. M.: "A Numerical Method for Solving Two-Dimensional Problems of Heat Conduction with Change of Phase", Chem. Eng. Prog. Symp. Series, **63**(79), 31 (1967).

14. Pham, Q. T.: "A Fast Unconditionally Stable Finite-Difference Scheme for Heat Conduction with Phase Change", Int. J. Heat Mass Transfer, **28**(11), 2079 (1985).
15. Madsen, N. K. and R. F. Sincovec, ACM Trans. Math. Software, **5**(3), 326 (1979).
16. Carnahan, B., Luther, H. A. and Wilkes, J. O.: "Applied Numerical Methods", John Wiley & Sons Inc., New York (1969).
17. Gill, S.: "A Process for The Step-by-Step Integration of Differential Equations in an Automatic Computing Machine", Proc. Cambridge Phil. Soc., **47**, 96 (1951).

사용기호

- A_p : 가스가 흐르는 방향으로의 가스단면적 [m²]
 C_M : Apparent Heat Capacity [J/kg·K]
 C_p : Heat Capacity [J/kg·K]
 D_H : Hydraulic Diameter [m]
 f : 순간상전환율
 F : 총전환율
 F_{vc} : View Factor
 ΔH : 각 격자점에 축적된 에너지 총량 [kJ/kg·K]
 h_g : Convective Heat-Transfer Coefficient [W/m²·K]
 k : Thermal Conductivity [W/m·K]
 Pr : Prandtl Number (=μ·C_p/k)
 ΔQ : 단위시간에 단위체적당 주입된 열량 [W/kg·K]
 R_c : 축열재 모듈의 반경 [m]
 R_e : Reynolds Number (=D_H·v·ρ/μ)
 R_p : 캡슐의 내경 [m]
 R_s : 열교환 시스템의 반경 [m]
 T : Temperature [K]
 T₁ : 축열재가 용융하기 시작하는 온도 [K]
 T₂ : 축열재가 완전히 용융 될때의 온도 [K]
 T_{gin} : Inlet Gas Temperature [K]
 T_{gout} : Outlet Gas Temperature [K]
 ΔT : T₂-T₁ [K]
 t : Time [sec]
 v : Velocity [m/sec]
- Greek letters
 σ : Stefan-Boltzmann Constant (=5.669×10⁻⁸) [W/m²·K⁴]

ρ : Density [kg/m^3]
 μ : Viscosity [Pa/sec]
 λ : Latent Heat [$\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$]
 ε : Emissivity

p : PCM
c : Capsule
s : Solid
l : Liquid
m : Mushy Region

Subscripts

g : Gas