

[논문] 한국태양에너지학회 논문집
Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol. 21, No. 4, 2001

태양열을 이용하는 잠열축열 시스템에 관한 연구 (제1보 PCM 계산 모델의 개발)

구학근*, 김종열*

* 동명대학 가스냉동과

A Study on latent heat storage system with Solar heat (Part 1. Development of PCM modeling)

H.G. Ku*, J.R. Kim*

* Department of Gas & Refrigeration, Tongmyong College

Abstract

This study has been conducted to verify the possibility of adaptation of a latent storage type air-conditioning system, shifting the peak load of electronic power to a building. In this paper, an energy equation to evaluate performance of PCM(phase change material) has been suggested and solved, after discretization. As a result, it is confirmed that the results from the energy equation are correspond with those from present studies to analysis of one-dimensional solidification and to analysis of two-dimensional solidification.

기 호 설 명

	[kJ/(kg · K)]
C_P : 비열[kJ/(kg · K)]	f : 대상셀이 고상인 체적비율[-]
C_{PE} : 잠열을 비열로 환산한 등가비열	f^0 : 1회 전의 고상율 반복값[-]
	k_s : 고상의 열전도율[W/(m · K)]

- k_l : 액상의 열전도율[W/(m·K)]
 L_a : 잠열량[kJ/(kg)]
 L : 대표길이[m]
 Nb : 공간차분 분할수[-]
 Ste : 잠열과 현열의 비를 나타내는 무차원수 [-]
 T_0 : 초기온도[°C]
 T_f : 융점(응고점)[°C]
 T_{sol} : 고상선 온도[°C]
 T_{liq} : 액상선 온도[°C]
 T_{top} : 잠열이 피크를 나타내는 온도[°C]
 T_w : 경계온도[°C]
 α_s : 고상의 온도전도율[m²/h]
 α_l : 액상의 온도전도율[m²/h]
 ΔT : 상변화 온도폭[°C]
 Δt : 시간 간격[sec]
 λ : 응고속도를 나타내는 정수[-]

1. 서 론

쾌적성을 지향한 현대 건물의 공조시스템은 외부의 기후에 따라 에너지를 소비하는 패턴이 집중되는 경향이 있다. 특히 냉방의 경우 전기를 이용하는 냉방시스템이 주류를 이루고 있어 한여름의 대낮에는 전력사용량이 피크를 이룬다. 따라서, 이에 대한 대책으로 빙축열 시스템이나 가스를 이용한 흡수식 냉동 시스템에 많은 관심을 가지고 실제 건물에 적용하고 있다. 따라서 본 연구는 이러한 전력사용량의 피크를 이동시킬 수 있는 잠열축열식 공조시스템에 주목하고자 한다.

일반적으로 잠열식 공조시스템은 공조부하의 피크를 이동할 수 있는 유용한 수단으로 많이 연구되고 있으며 그 적용은 바닥면적이 2000~6000m²인 대형건물에 많다. 피크전력을 이동할 수 있고 에너지수요 구조를 개선하기 위해서는

이같은 건물과 기존 건물에 잠열 시스템을 적용하는 것이 유효하다.

또한 잠열축열재는 물질의 상변화에 필요한 열을 이용하여 일정 온도를 장시간 유지하여 실온의 변동을 억제하는 일을 한다. 예를 들면 실내의 바닥이나 벽면을 축열재로 이용하면 주간 일사의 열을 흡수하고 그 온도를 계속 유지하여 야간에 방출하여 실온을 유지할 수 있으며 겨울이나 냉난방이 모두 필요한 중간기에 유용하게 이용할 수 있다. PCM(잠열축열재)은 현열 축열재의 약 10배의 열용량을 가지고 있으며 축열 밀도가 크고, 컴팩트한 축열재로서 그 실용화가 기대되고 있는 재료이다. 또한 일정한 온도에서 상변화하기 때문에 실내를 일정 환경으로 유지할 수 있으며 쾌적성 면에서도 그 효과가 기대된다.

본 연구에서는 이에 대한 기초단계로 축열밀도가 높은 PCM을 주택의 구조체 혹은 공조기에 직접 적용하기 위해 PCM의 성능을 평가할 수 있는 PCM의 열거동을 수치모델화하여 PCM 계산 모델을 작성한 뒤, 1차원 응고문제의 해석해 및 2차원 응고문제를 기존의 연구결과와의 비교를 통해 계산모델의 정도 검증 및 타당성에 대해 검토하고자 한다.

2. PCM의 계산모델

PCM의 열거동을 나타내는 계산모델로서 열전도, 대류, 2성분의 혼합물을 취급하는 고도의 모델²⁾들이 있지만, 본 연구에서는 PCM의 계산에 대해서는 1성분의 열전도만으로 취급하기로 한다.

PCM의 열전도 계산모델로서 이동경계법, 좌표변환법, 엔탈피법, 등가비열법, 온도회복법 등 다양한 방법³⁾이 있다.

본 논문에서는 고상율을 이용하여 나타낼 수 있는 에너지 방정식을 그대로 이산화하여 푸는 방법을 채용했다. 여기서, 고상율 f 는 대상셀에서

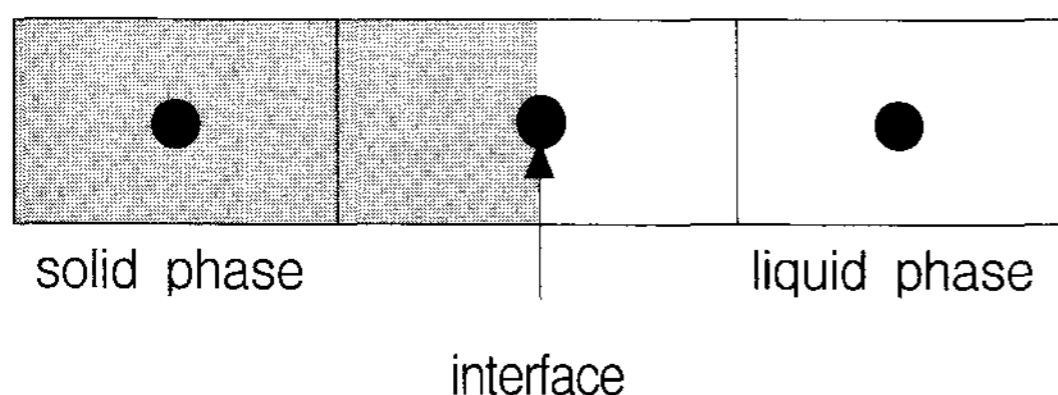


Fig. 1. Description of solid fraction

고상의 체적비율을 나타내는 변수이다($0 < f < 1$). f 가 1인 경우는 대상 셀은 모두 고상, 0인 경우는 모두 액상으로 한다. 그림 1에 고상율의 개념도를 나타냈다.

상변화를 나타낸 에너지식은 고상율 f 를 이용하여 이하와 같이 나타낸다. 단 C_p 는 비열, L_a 는 잠열량, k 는 열전도율, f 는 고상율을 나타낸다.

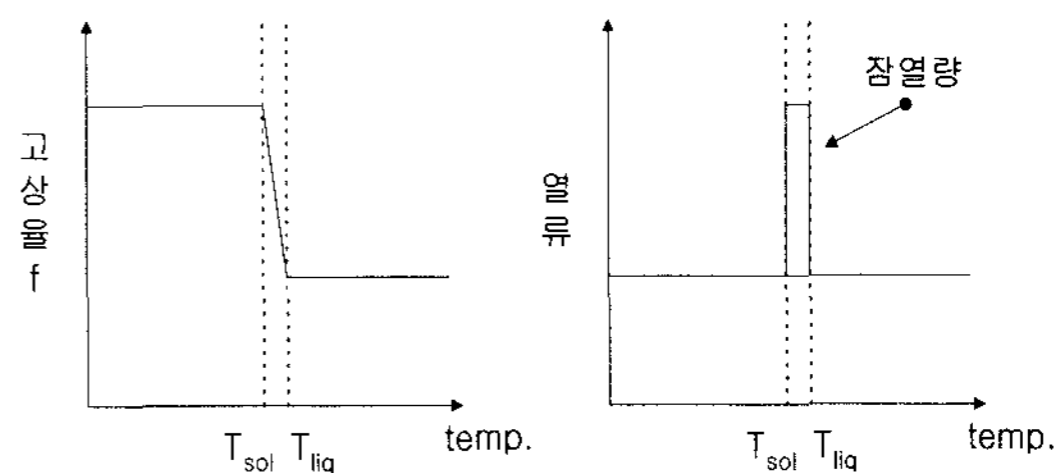
$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + \rho L_a \frac{\partial f}{\partial t} \quad (1)$$

2.1 잠열 모델화

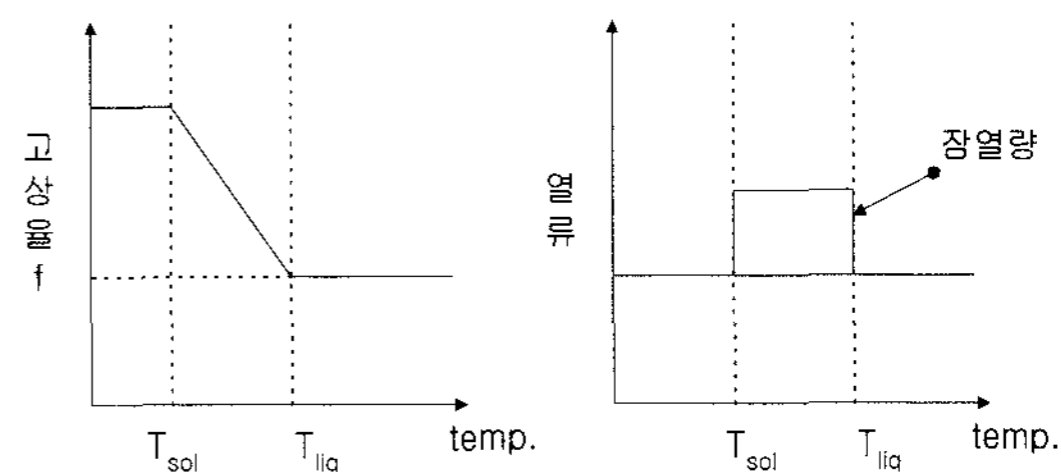
일반적으로 물과 같은 순수 물질은 어느 한 점의 온도에서 용해, 응고를 하지만, 2성분계와 같은 혼합물질은 일정한 온도폭을 가지면서 상변화를 한다.

그때의 잠열 분포로서는 산과 같은 형태를 하고 있는 것이 대부분이다. 이러한 잠열의 모델화로서는 (a) 융점(온도폭 $\Delta T=0$)에 잠열을 집중시키는 잠열집중 온도 일정형, (b) 잠열을 일정 온도 폭으로 일정하게 분산시켜 열용량에 추가되는 잠열분산 열용량 추가형, (c) 열용량을 일정하게 하지 않고 분포를 주는 잠열분산 열용량 분포형을 거론할 수 있다⁴⁾.

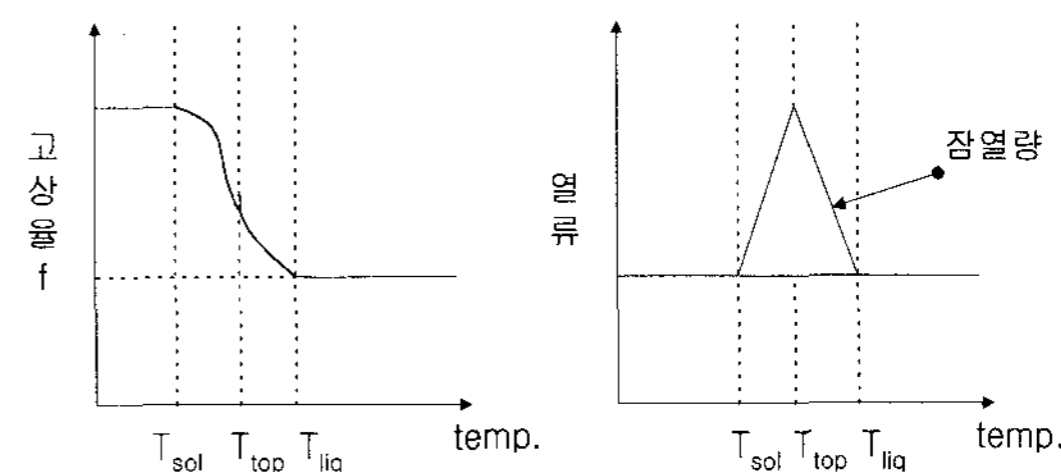
본 연구에서는 음해법에 의해 차별화하여 계산하고 있지만 (b)의 잠열분포가 일정한 관계식(그림 2)에 의해, 식 (2)의 고상율 f 와 온도 T 의 선형관계식을 얻을 수 있다. 또 융점 온도폭 ($\Delta T = T_{liq} - T_{sol}$)이 0인 경우, $\Delta T \approx 0$ 로



(a) 집중온도 일정형



(b) 열용량 추가형



(c) 열용량 분포형

Fig. 2. The relations between solid fraction and temperature between latent heat flow and temperature

하는 것에 의해 모델 (a)에 대응시킬 수 있다.

여기서, T_{sol} (고상선 온도)는 용해하기 시작할 때의 온도이며, T_{liq} (액상선 온도)는 응고하기 시작할 때의 온도이다.

(c)의 잠열분포를 가지는 모델은 본 연구에서는 잠열분포를 3각형으로 근사시키는 것을 시도하여, 식 (3)과 같이 고상율 f 와 온도 T 의 2차 관계식을 얻을 수 있었다. 단 T_{top} 은 잠열이 피크값을 나타낼 때의 온도이다.

선형 관계

$$f = \frac{T_{liq} - T}{\Delta T} \quad (2)$$

2차 관계

$$f = 1 - \frac{(T - T_{sol})^2}{\Delta T(T_{top} - T_{sol})}$$

$$= \frac{(T_{liq} - T)^2}{\Delta T(T_{liq} - T_{top})}$$

[$T_{sol} \leq T \leq T_{top}$], [$T_{top} \leq T \leq T_{liq}$]

(3)

또 식 (1)과 같은 형태는 온도 T가 고상율 f에 의존하며, 계산이 불안정하게 되기 쉽게 때문에 고상율 f와 온도 R의 관계식에 의해 생성항 S를 선형화하는 것으로 계산의 안정화를 도모한다.

$$S = \frac{\rho L_a}{\Delta t} (f - f^0) = \frac{\rho L_a}{\Delta t} \left(\frac{T_{liq} - T}{\Delta T - f^0} \right)$$

$$= \frac{\rho L_a}{\Delta t} \left(\frac{T_{liq}}{\Delta T} - f^0 \right) - \frac{\rho L_a}{\Delta t \Delta T} T$$
(4)

특히 고상율 f와 온도 T가 선형관계에 있는 경우 그림 2의 (a), (b)의 생성항은 식 (4)와 같이 선형화된다. 생성항 S는 S_c 와 S_p (정수)로 나타내어지며, 온도 T에 관한 1차식으로 나타내어진다. 그리고 그림 2의 (c)의 2차 관계식에서도 생성항을 선형화하는 것으로 계산의 안정화를 필요로 한다.

2.2 온도보정

본 연구에서는 음해법을 이용하고 있으며 반복 계산을 할 경우, 온도 T^{n+1} 이 T_{sol} 혹은 T_{liq} 를 뛰어넘는(상변화를 한) 경우, 잠열량 L_a 를 고려하지 않기 때문에 온도 T^{n+1} 을 다음 식에 의

해 보정할 필요가 있다. 보정식(음해인 경우)은 이하의 식으로 나타내어지며, 결과로서 온도 T^{n+1} 대신에 T를 준다. 식 (5)의 좌변은 열량변화를 나타내며, 우변 제1항은 현열 변화량, 제2항은 잠열변화량을 나타낸다.

$$C_P = (T^n - T^{n+1})$$

$$= C_P(T^n - T_{sol}) + C_{PE}(T_{sol} - T^n) \quad (5)$$

$$T = T_{sol} - (T_{sol} - T^{n+1})C_P/C_{PE} \quad (6)$$

단, 잠열을 비열로 환산한 등가비열 C_{PE} 는 $C_{PE} = C_P + L_a/(T_{liq} - T_{sol})$ 로 나타내어진다.

3. 1차원 응고문제

1차원 반무한 고체의 응고문제에서 얻어지는 해석해로서 Neumann의 해가 존재하지만 그 경계면 위치를 결정하는 λ 의 해석해와 본 연구의

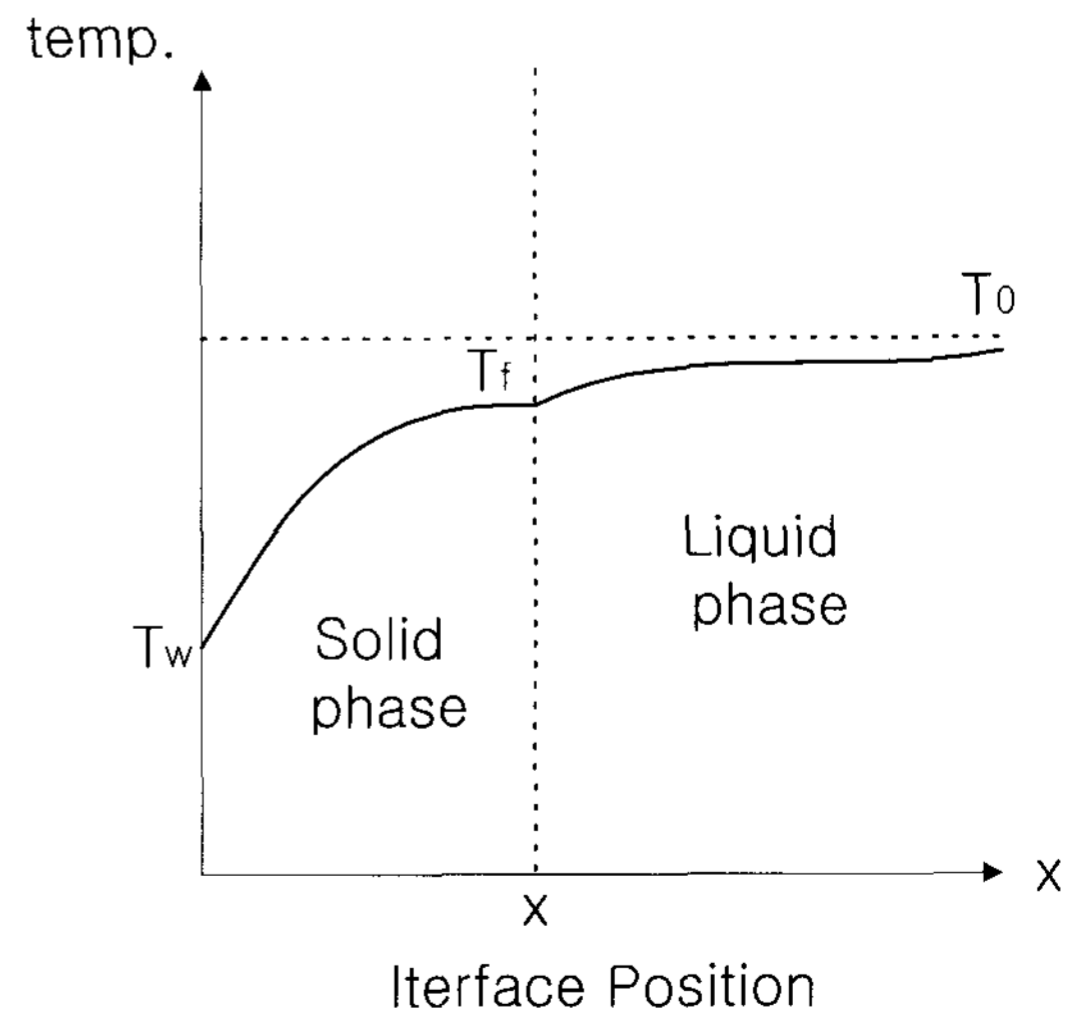


Fig. 3. Initial condition and Boundary condition of the Neumann's

해석 모델에 의해 얻어진 해의 비교를 통해 본 계산 모델의 정도를 검증한다.

계산조건으로서 융점(응고점) T_f , 초기온도 $T_0 = T_f(t=0)$, 경계온도 $T_w=0$, 열전도율비 $k_s/k_l=1$, 열확산비 $\alpha_s/\alpha_l=1$ 을 설정한다. 또 경계에서의 무차원 경계면 위치 X/L 는 대표길이를 L 로서 다음과 같은 식으로 주어진다.

$$\frac{X}{L} = 2\lambda\sqrt{\frac{\alpha_s t}{L^2}} \quad (7)$$

단 λ 는 이하의 경계면에서의 에너지 보존식에서 구하는 값이다.

$$\frac{e^{-\lambda^2}}{\text{erf } \lambda} = \frac{\lambda\sqrt{\pi}}{\text{Ste}} \quad (8)$$

Table 1. Calculation error of λ for various Nb

Ste	NB	λ_{exact}	$E_{\text{max}}[\%]$	$E_{\text{avg}}[\%]$
0.1	5	0.220013	77.24	2.35
	25		4.8	0.92
	50		0.63	0.093
	100		0.27	0.12
0.5	5	0.464767	46.23	1.9
	25		1.52	0.136
	50		3.27	0.19
	100		3.43	0.21
1.0	5	0.620035	19.2	1.73
	25		5.66	0.84
	50		6.2	0.63
	100		6.45	0.71

$$E_{\text{max}} = |(\lambda_{\text{exact}} - \lambda_{\text{numerical}}) / \lambda_{\text{exact}}| \times 100$$

$$E_{\text{avg}} = \sum_{i=1}^N |(\lambda_{\text{exact}} - \lambda_{\text{numerical}}) / \lambda_{\text{exact}}| / N \times 100$$

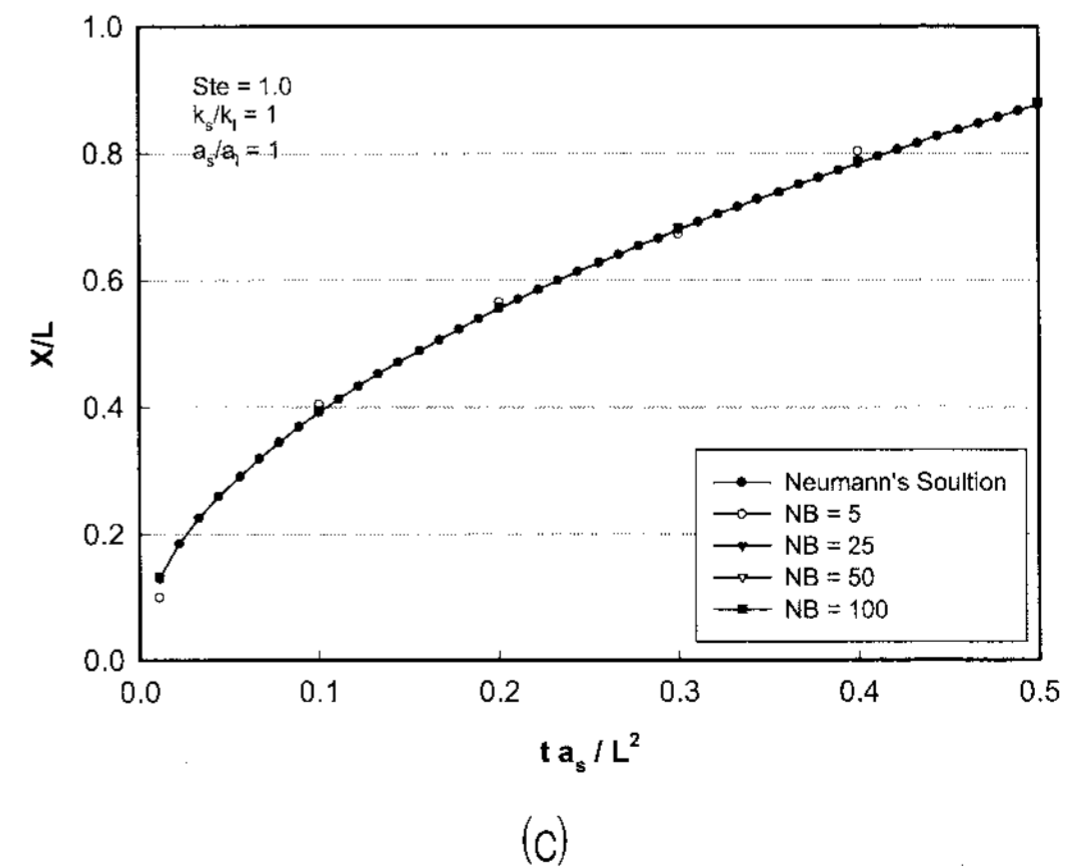
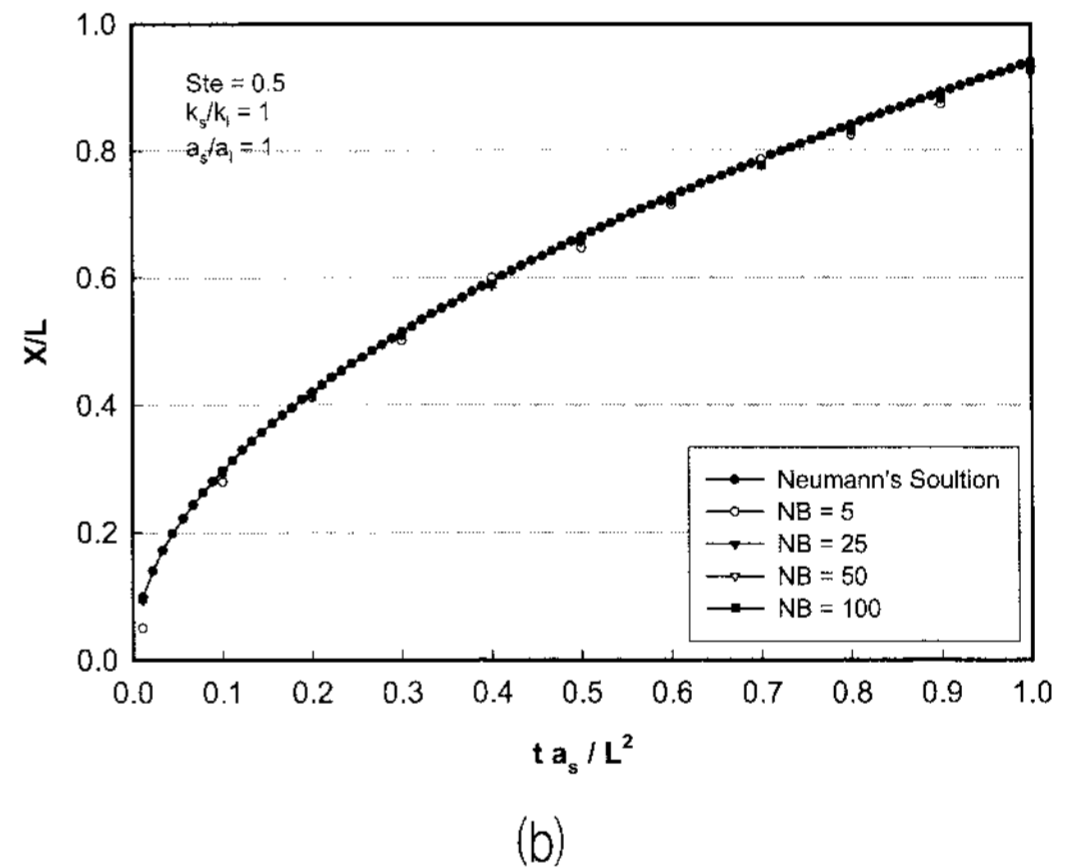
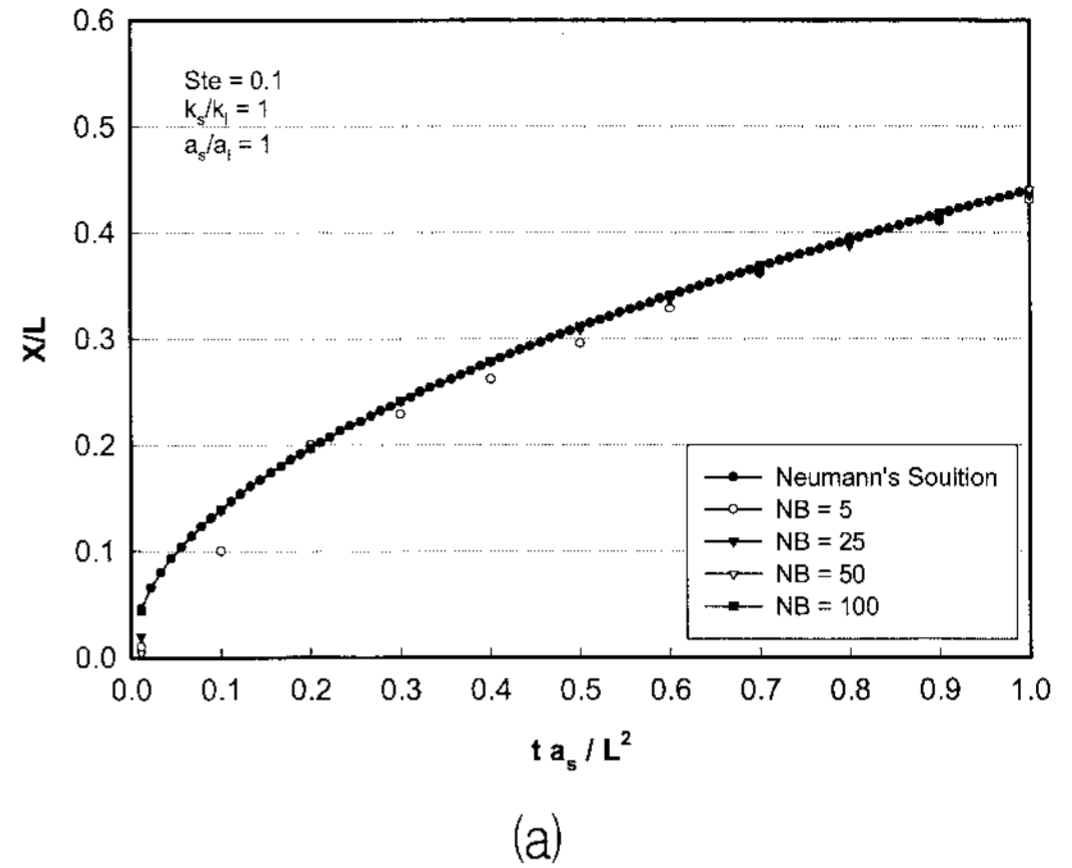


Fig 4. Comparison of interface position in Neumann's problem for the Stefan problem

잠열과 현열비를 나타내는 무차원 수인 스테판 수 Ste 는 다음과 같다.

$$Ste = \frac{C_p(T_f - T_s)}{L_a} = \frac{C_p T_f}{L_a} \quad (9)$$

실내에서 PCM을 다루는 경우, Ste 수는 거의 1 이하라고 생각되기 때문에, Ste 수를 0.1, 0.5, 1.0인 경우에 대해서 잠열집중 온도일정형으로 계산하며, 공간의 차분 분할 수 NB 에 대해서 분할수에 따라 해에 미치는 정도의 영향을 조사하기 위해 5, 25, 50, 100분할로서 경계면 위치를 결정하는 λ 를 계산하였다(표 1).

표 1에 의해 분할 수가 5인 경우, 모든 Ste 수에서 계산초기에 최대오차가 크게 되는 것이 확인되지만, 평균오차를 보면 NB 가 5인 경우를 제외하면 1% 이하이며, 그림 4에서도 알 수 있듯이, 정도는 문제가 없는 것으로 생각된다. 또한 Ste 수가 적게 되면 계산 초기에서 오차(특히 최대오차)가 크게 되어 가는 경향이 있는 것을 알 수 있다. 한편 C. Kim⁵⁾는 좌표변환법을 이용하여, 고상을 50분할, 액상을 300분할하여 계산하였으며 최대오차 0.1%라는 결과를 얻었지만, 본 계산 모델에서 50분할인 경우 최대오차가 6.2%로 다소 정도는 떨어지지만 평균오차가 1% 미만으로 그다지 문제가 없다고 판단된다.

4. 2차원 응고문제

PCM에서 자주 거론되는 2차원 응고문제에 대해 본 논문에서는 Crowley⁶⁾, Hsiao⁷⁾, Y. Cao⁸⁾의 문헌값(계산치)과의 비교를 통해 계산모델의 타당성을 검토한다.

즉 Crowley는 엔탈피법, 또 Hsiao는 등가비열법, Y. Cao는 엔탈피비법을 수정한 방법으로 계산하였다.

계산조건으로서는 초기상태를 액상으로 하여 그림 5에 나타내듯이 2변을 T_w 로 일정하게 유지하고 다른 2변은 단열상태로 유지한다. 단 초기온도 T_0 , 용점 T_f 로 하며 표 2와 같이 Ste 수, 열전도율비 k_l/k_s , 열확산율비 α_l/α_s 를 문헌값과 동일한 값을 설정하였다.

이 조건하에서 대각선상의 경계면 위치에 의해 문헌값과 비교하였다. 또한 Crowley는 20×20 메쉬로 해석하고 있기 때문에 계산대상의 차원에는 같은 메쉬수를 이용하였다.

$$T_n = \frac{T_0 - T_w}{T_f - T_w} \quad (10)$$

그림 6에 의해 본 계산결과는 문헌값(계산값)과 거의 일치한다고 생각된다. 또한 열전도율비

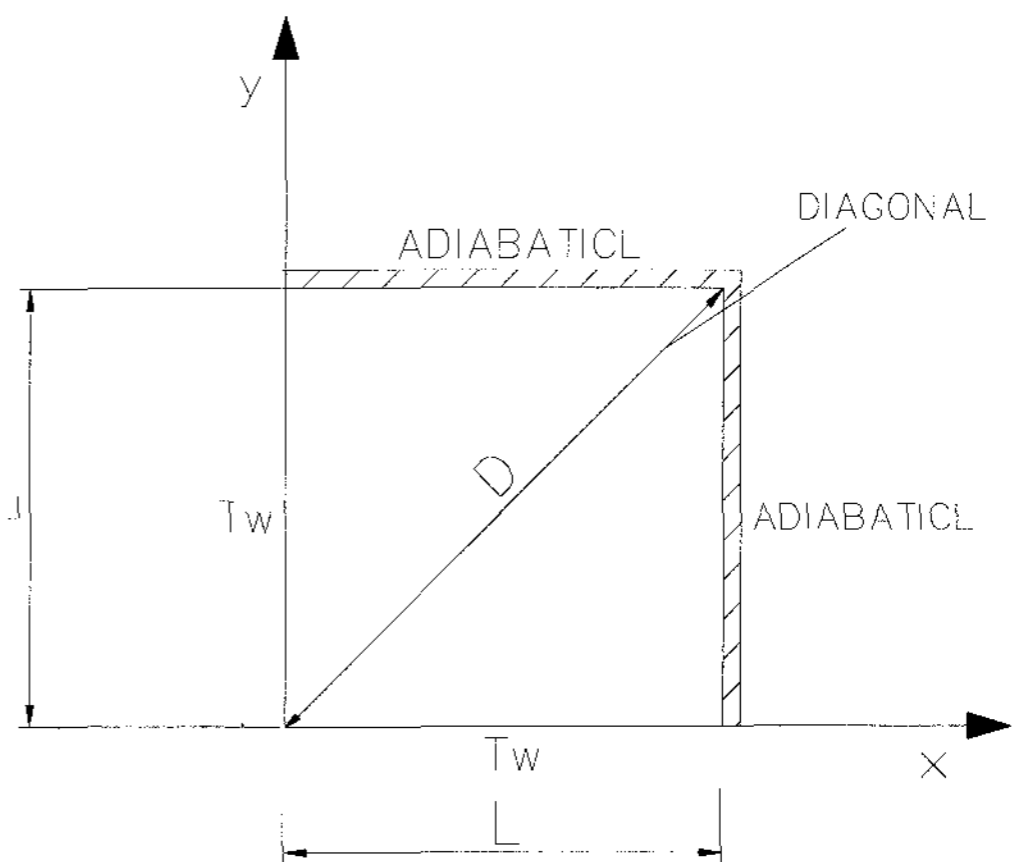


Fig. 5. Description of the geometry and boundary conditions for the free-zing problem

Table 2. Calculation conditions

	T_n	Ste	k_l/k_s	α_l/α_s
Case 1	1	0.641	1.0	1.0
Case 2	9/7	2	0.9	0.9

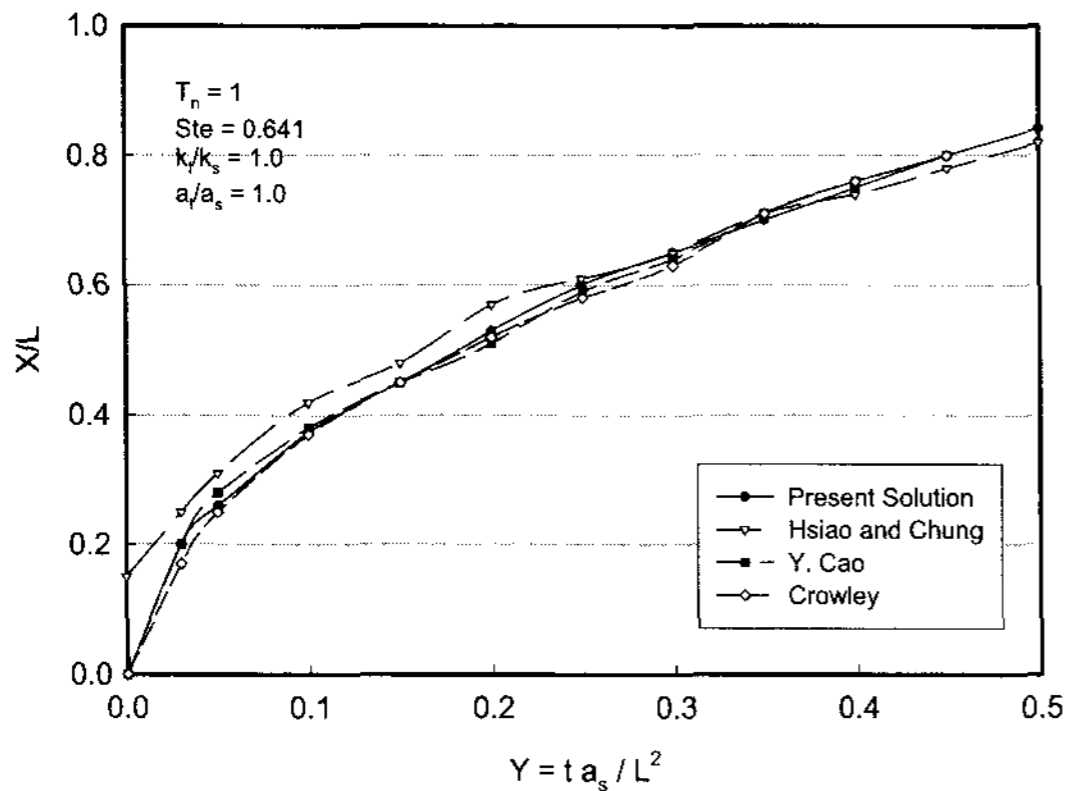


Fig. 6. Interface position along the diagonal for solidification of a saturated liquid

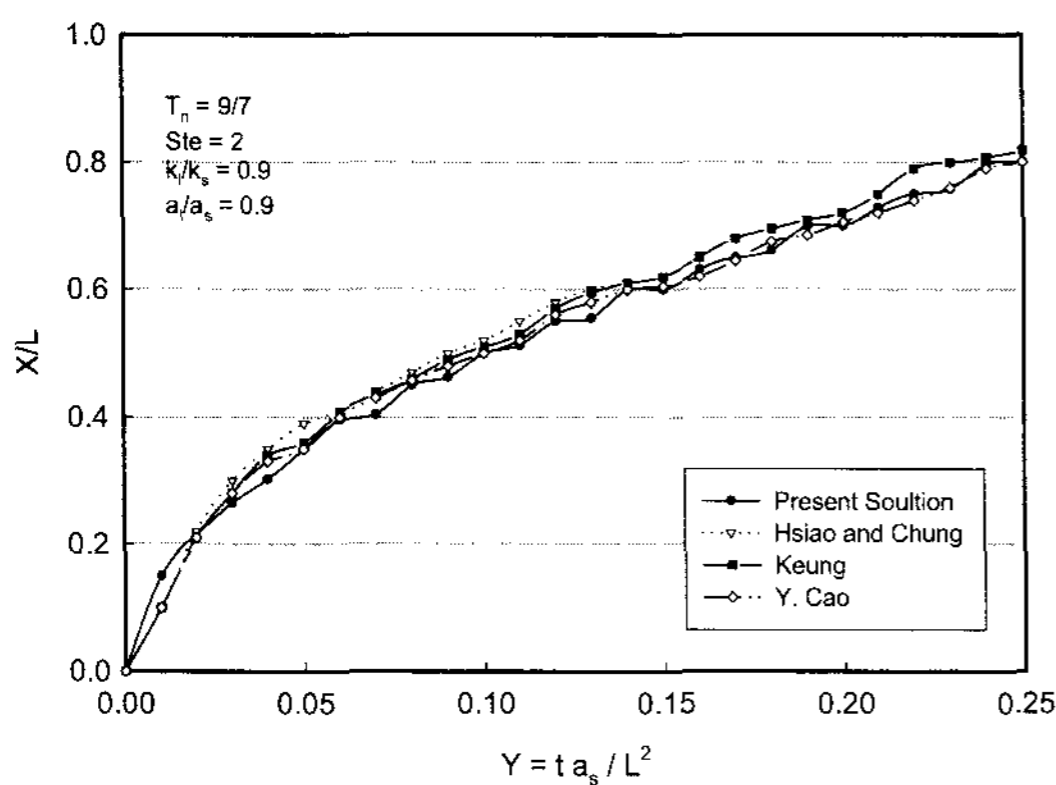


Fig. 7. Interface position along the diagonal with prescribed boundary temperature

k_l/k_s 나 열확산율비 α_l/α_s 를 변화시켜 계산한 그림 7에서도 비교적 잘 일치한다는 것을 확인하였다.

이상으로 본 계산에서 이용하는 PCM 계산 모델은 2차원에서 적용할 수 있다고 생각되며 3차원으로 확장해도 문제가 없다고 생각된다.

5. 결 론

본 논문에서는 PCM의 계산모델을 개발하여 1

차원 응고문제의 해석해 및 2차원 응고문제의 문헌값과의 비교를 통해 계산모델의 타당성을 얻었다.

앞으로 본 계산모델을 이용하여 패시브 태양주택과 같은 실외환경조건에 큰 영향을 받는 시스템이나 기존의 바닥난방을 대체할 수 있는 PCM을 이용한 바닥난방시스템에 대한 열거동 및 열적 쾌적감을 예측, 검토하여 실제 건물에 적극 이용할 수 있도록 하고자 한다.

후 기

본 연구는 2001학년도 동명대학 학술연구비의 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 竹谷伸行, CFDによる室内熱氣流環境解析手法の高度化と應用に關する研究, 大阪大學碩士論文集, 平成4年.
2. W. D. Bejllon and E. P. Incropera, Numerical Analysis of Binary Solid-Liquid phase change Using a continuum Model, Numerical Heat Transfer, 13, 277-296, 1988.
3. C. Kim and M. Kaviany, A numerical method for phase-change problems, Int. J. Heat Mass Transfer, 33, 2721-2734, 1978.
4. A. B. Crowley, Numerical solution of Stefan problems, Int. J. Heat Mass transfer, 21, 215-218, 1978.
5. J. S. Hsiao and B. T. F. Chung, An efficient algorithm for finite element solution to two-dimensional heat transfer with melting and freezing, ASME paper

No. 84 HT-2, 1984.

6. Y. cao and A. Faghri, A Numerical analysis of Stefan problems for generalized multi-dimensional phase change structures using the enthalpy transforming model, Int. J. Heat Mass Transfer, 32, 1289-1298, 1989.

7. Haruo soeda, Juniji Onishi, Kim Jongryeol and Minoru Mizuno, Numerical on the effect of latent heat storage in a heating system of a residential room, 4th JSME-KSME thermal engineering conference, 2000.