

< 논문 >

상변화 물질을 이용한 이동전화기의 냉각에 관한 연구

이상진* · 정수진** · 김우승†

(2004년 10월 21일 접수, 2005년 9월 29일 심사완료)

A Study of Cooling of Mobile Phone Using PCM Module

Sang-Jin Lee, Soo-Jin Jeong and Woo-Seung Kim

Key Words : Phase Change Material(상변화물질), Latent Heat(잠열), Enthalpy Method(엔탈피법)

Abstract

The cooling effect of a mobile phone using PCM(Phase Change Material) module has been numerically investigated. A transient three-dimensional numerical analysis of heat and fluid flow with natural convection is performed in this study. Governing conservation equations for mass, momentum and energy are solved by an implicit finite volume method. An enthalpy-porosity technique has been used for modeling of the melting process. Two different ways of placing the PCM module are considered. One is to place a PCM module between the substrate and battery pack, and the other is to place a PCM module between MCM(multichip module) and battery pack. Three different types of PCMs are used to predict the performance of PCM. The results show that passive cooling with PCM can reduce the temperature rise and the effect of natural convection in PCM module considered in this study is negligible.

기호설명

β : 체적팽창계수 (1/K)
 C : 형태계수
 C_p : 정압비열 (J/kg K)
 ϵ : 다공률
 f_i : 액상분율
 g : 중력가속도 (m/s^2)
 h : 대류열전달계수 ($W/m^2 K$)
 H : 전엔탈피 (J/kg)
 q : constant in the porosity source
 k : 열전도계수 ($W/m^{\circ}C$)
 L : 잠열 (J/kg)
 μ : 동점성계수 ($kg\cdot m/s$)
 Q : 단위체적당 발열량 (W/m^3)
 ρ : 밀도 (kg/m^3)
 S : 생성항 (W/m^3)

T : 온도 ($^{\circ}C$)
 U : 대표속도 (m/s)

하첨자

s : 고체
 l : 액체
 m : 용해점

1. 서론

상변화 문제에 있어서 상경계면에서의 열평형 방정식은 수학적으로 비선형이기 때문에 해석이 쉽지 않다. 따라서 엄밀히는 많은 가정을 포함하는 특별한 경우에만 존재하며, 그 외에는 대부분 근사해법 또는 수치해법에 의해 해석되어지고 있다. 한편, 상변화 물질(Phase Change Material)을 이용한 전자장비 냉각시스템에 적용할만한 충분한 자료가 부족한 실정이므로 PCM을 이용한 열저장 기술의 효과적인 해석이 요구되고 있다.

전자장비의 냉각에 PCM을 이용하는 기술들 중

† 책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학과
 E-mail : wskim@hanyang.ac.kr
 TEL : (031)400-5248 FAX : (031)418-0153

* 한양대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 한중대학교 자동차공학과

‘피동냉각(Passive cooling)’은 저출력의 부품 및 장비에 적합하고, 고출력의 부품 및 장비에 대해서는 ‘능동냉각(Active cooling)’ 또는 부가적인 방법이 고려되어야 할 것이며, 대부분의 휴대용 전자장비는 배터리의 수명으로 인하여 출력시간이 제한되어 있으므로 PCM의 적용이 효과적이라 할 수 있다. Bentilla et al.⁽¹⁾은 PCM을 4 가지 종류(Organics: paraffins, nonparaffins, Inorganics and Metals)로 분류하였고, Witzman et al.⁽²⁾은 전자장비의 열적 안정성을 위하여 PCM을 이용한 이론 및 실험적 연구를 수행하여 PCM이 고출력 전자 모듈의 온도를 일정 시간동안 낮게 유지시킬 수 있다는 것을 보였다. Lee와 Mahalingam⁽³⁾은 CFD 기술을 이용하여 이동전화기의 열해석을 수치적, 실험적으로 수행하였고, Pal와 Joshi⁽⁴⁾는 PCM 모듈의 장착 위치를 변경시키며 출력변화에 따른 PCM의 적합한 양의 예측과 고밀도 MCMs (multichip modules)의 효과적인 냉각에 관한 연구를 자연대류를 포함하여 수치적으로 수행하였다.

이동전화기의 장시간 사용 시 단말기의 발열현상은 통화 중 끊김 현상, 통화품질 저하, 제품의 수명 단축 뿐만 아니라 인체의 안전과 직결되는 배터리 폭발 등의 문제를 야기 시킬 수 있다. 2004년 1월 미국 소비자 제품 안전 위원회는 이동전화 배터리 폭발·연소 사고가 잇따르고 있는 것과 관련 사상 최초로 이동전화기 배터리에 대한 리콜을 결정했고, 2004년 8월에는 한국소비자보호원이 이동전화기 배터리에 대한 ‘소비자 안전경보’를 발령했다. 본 연구에서는 이러한 문제들의 주 원인인 이동전화기 과열현상에 대한 방지책으로 단말기 내부에 PCM 모듈을 장착하여 효과적인 냉각에 대한 타당성을 3차원 수치해법으로 해석하였다. 또한 PCM 모듈의 위치에 따른 냉각효과를 고찰하기 위해 단말기 내 PCB(printed circuit board)의 방향을 변경하여 그 영향을 분석하였고 3가지 종류의 PCM 물질을 이용하여 이동전화기의 냉각에 적합한 PCM 물질을 선정하였다.

2. 이론 및 수치해석

2.1 해석대상

Fig. 1에서 볼 수 있듯이 이동전화기 내부에는 PA(power amplifier) 라는 부품이 PCB 위에 장착되어 있는데 이 부품은 단말기의 사용 시 전류를 송출하는 역할을 한다. 본 연구에서는 계산상의 편의를 위하여 PA를 제외한 PCB 위의 요소 각각에 대한 상세 모델링 대신에 요소들의 분포와 크기가 동일

하다고 가정하여 이를 두개의 MCMs으로 간략화하였다. MCMs에서는 단위체적당 동일한 양의 열 유속이 방출되는 것으로 가정하였다. 또한 PCM 모듈의 위치에 따른 냉각효과를 고찰하기 위해서 PCM 모듈을 PCB와 배터리 사이에 위치 시킨 경우(Case A)와 MCMs과 배터리 사이에 위치시킨 경우(Case B)를 해석하였고 이를 Fig. 2에 나타내었다.

계산에 사용된 두 가지 모델 모두 z축에 대하여 대칭이므로 실물의 절반을 해석대상으로 설정하였다. PCM은 얇은 스테인레스 용기에 채워져 있으며 이를 PCM 모듈이라 하였다. 계산에 적합한 격자생성을 위하여 여러가지 비균일 격자계를 적용한 후 PCM 모듈을 포함한 Case A와 B의 격자는 16(X)×56(Y)×40(Z)의 비균일 격자를 사용하였고, PCM 모듈이 없는 격자는 16(X)×56(Y)×24(Z)의 비균일 격자를 사용하였다.

2.2 지배방정식

PCM 모듈의 열적 현상을 해석하는데 있어서 실질적인 현상을 기술하는 지배방정식을 다음과 같은 가정을 도입하여 단순화 하였다.

- ① PCM의 열물성치는 온도와 무관하게 일정하다.
- ② PCM은 균일하고 등방성(isotropic)이다.
- ③ 단말기 내부의 복사효과는 무시 한다.
- ④ 재질 간의 접촉저항은 무시한다.

시스템 해석에 사용된 각 재질에 대한 3 차원, 비정상 지배방정식은 위에서 도입된 가정을 고려하여 식 (1)~(3)에 나타내었다. 해석에 사용된 각 재질의 물성치와 생성항은 각각 Table 1 과 Table 2 에 나타나 있다.

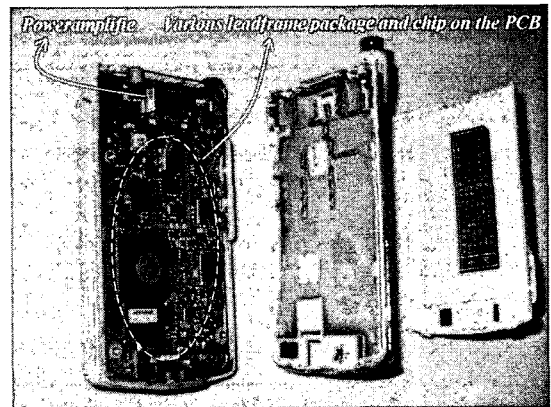


Fig. 1 Inside view of a standard Mobile phone

연속 방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j) = 0 \quad (1)$$

운동량 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho U_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j U_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) + S_i \quad (2)$$

에너지 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho H) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j H) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial T_i}{\partial x_j} \right) + S_h \quad (3)$$

2.3 상변화 모델링

엔탈피법은 현열과 잠열의 합으로 구성되는 전엔탈피를 이용하는 방법과 현열을 계산하고 잠열의

Table 1 Thermophysical properties used for computation

Material	Thermal Conductivity [W/m-K]	Density [kg/m ³]	Specific Heat [J/kg-K]	Viscosity [kg/m-s]
PCM (n-Eicosene)	0.23	795	2050	3.57×10 ⁻⁶
PCM (Paraffin Wax)	0.14	795	2700	1.07×10 ⁻³
PCM (Bi/Pb/Sn/In)	21.9	8640	522	2.59×10 ⁻³
PCM container (SUS 304)	14.9	7900	477	-
MCM & Power Amplifier	16.73	3930	765	-
Board (FR-4)	0.35	1938	1600	-
Battery (Lithium)	78.08	534	3391	-
Case & Battery (Polycarbonate)	0.22	1270	1100	-

Table 2 Source terms for various materials

Material	S ₁	S ₂	S ₃	S _h
Air	0	$\rho g \beta (T - T_{ref})$	0	0
PCM	$C \frac{(1-\epsilon)^2 \mu}{(\epsilon^3 + q)}$	$C \frac{(1-\epsilon)^2 \mu}{(\epsilon^3 + q)} + \rho g \beta (T - T_m)$	$C \frac{(1-\epsilon)^2 \mu}{(\epsilon^3 + q)}$	0
PCM container	0	0	0	0
PCB	0	0	0	0
MCM	0	0	0	Q _M
Power Amplifier	0	0	0	Q _A
Battery	0	0	0	Q _B
Case & Battery case	0	0	0	0

(1) PCM : T_m = 37 °C, L = 2.41×10⁵ J/kg.

(2) PCM : T_m = 47 °C, L = 2.09×10⁵ J/kg.

(3) PCM : T_m = 57 °C, L = 2.95×10⁴ J/kg.

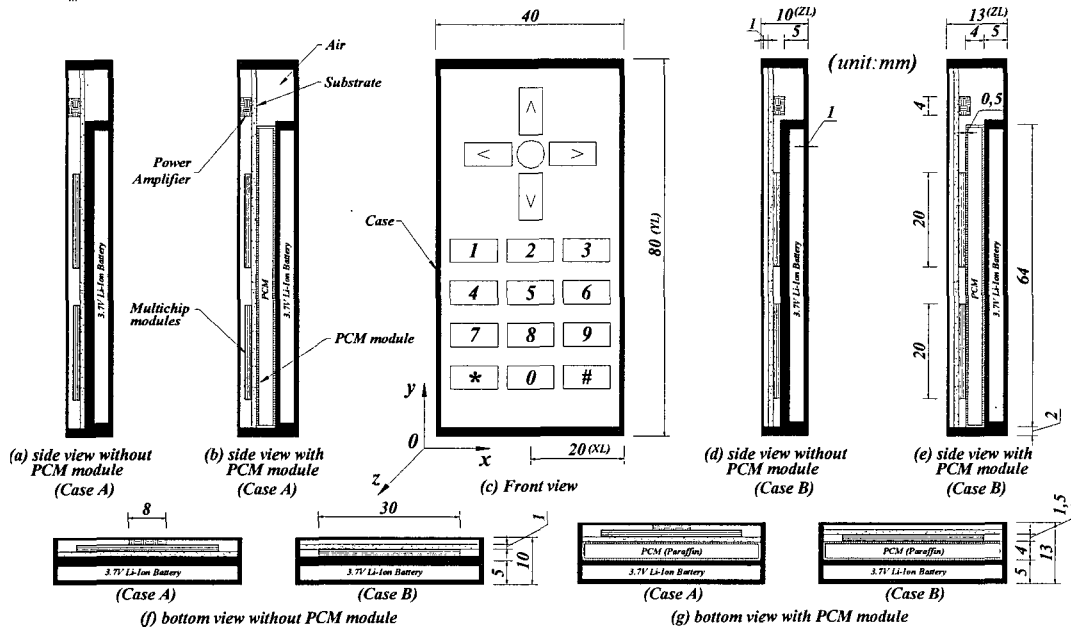


Fig. 2 Schematic of a standard mobile phone with PCM module placed between substrate and battery pack [Case A] and between MCMs and battery pack [Case B]

방출 및 흡수는 에너지 방정식의 생성항으로 처리하는 방법으로 크게 나뉘어진다. 본 연구에서는 Breant 등이 제안한 방법⁽⁵⁾을 이용하여 상변화 과정을 모델링 하였으나 잠열 처리는 전자의 방법을 사용하였다.

2.4 경계조건

지배방정식을 풀기 위한 경계조건은 대칭면($x = XL$)을 제외한 전 표면에 대류경계조건을 적용하였으며 대칭면인 $x = XL$ 에 대해서는 모든 해석 변수의 대칭면에 수직한 방향으로의 공간적인 구배를 0으로 하는 대칭경계 조건을 부여하였다. 각 면에서의 대류경계조건은 다음과 같다.

$$h_i(T - T_\infty) = -k \frac{\partial T}{\partial x_j} \quad (i=1,2,3, j=1,2,3) \quad (4)$$

여기서, XL은 20 mm, YL은 80 mm 그리고 ZL은 10 mm 또는 13 mm이다. 한편 $h_1 = 6.1 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ (전하기의 옆면), $h_2 = 6.36 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ (아랫면) 그리고 $h_3 = 3.18 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ (윗면)⁽⁹⁾을 적용하였다.

2.5 수치해석

식 (1)~(3)의 지배방정식들의 대류항 및 비정상항에 대한 차분은 상류차분법 및 완전 암시도식을 각각 사용하였고 압력장과 속도장의 연계를 위하여 PISO 알고리즘을 사용하였다. 본 연구에서는 수치해석을 위하여 상용프로그램인 STAR-CD⁽⁶⁾를 사용하였으며, 잠열 및 머쉬영역의 처리는 사용자 프로그램(user-defined subroutine)을 작성하여 해석을 수행하였다. 식 (2)의 S_1 는 Table 2에 나타나 있다. 각각의 생성항은 머쉬영역에서 유체의 속도감소를 수치해석에 반영하며 S_2 에는 부력항을 첨가하였다. 식 (3)의 S_h 는 Table 2에 나타난 MCMs, PA 그리고 배터리의 발열량이며 발열량이 총 2W 일 경우는 PA와 MCMs에서 1W, 배터리에서 1W 발열하므로 단위 체적당 생성항 Q_M , Q_A 그리고 Q_B 는 각각 $510204 \times 10^{-6} \text{ W/cm}^3$, $1020408 \times 10^{-6} \text{ W/cm}^3$ 그리고 $141643 \times 10^{-6} \text{ W/cm}^3$ 이다.

2.6 타당성 검증

상변화 해석을 위해 본 연구에서 사용한 해석 프로그램의 검증은 위하여 Swaminathan과 Voller⁽⁷⁾의 응고해석 결과와 상호비교 하였다. 이 문제에서는 상변화 모델링을 위한 두가지 유형의 고정격자 엔탈피법을 비교하여 최적의 엔탈피법을 정의하였다. 보다 자세한 내용은 Swaminathan과 Voller⁽⁷⁾의 논문에서 나타나 있으며 결과의 비교는 Fig. 3과 같고 두 결과가 잘 일치하고 있음을 볼 수 있

다. 또한 2차원 직사각형 갈륨의 용해해석에 대한 Webb과 Viskanta⁽⁸⁾의 수치해 및 Gau와 Viskanta⁽⁸⁾의 실험 결과와도 상호비교 하였다. Gau와 Viskanta⁽⁸⁾의 실험은 상변화 문제의 전형적인 예로 한쪽 벽면에서부터 가열되는 2차원 직사각형 내의 순수 갈륨에 대한 용해해석을 수행하였다. 계산에 사용된 격자는 100×80 이고 시간간격은 2초로 하였다. Fig. 4는 갈륨의 시간에 따른 상경계면의 변화를 Brent와 Voller⁽⁶⁾의 수치해 및 Gau와 Viskanta⁽⁸⁾의 실험 결과와 비교하여 나타낸 것이다. Gau와 Viskanta⁽⁸⁾의 실험결과에 대하여 Brent와 Voller⁽⁶⁾의 수치해는 $t = 2, 6, 10 \text{ min}$ 에서 빠른 용해의 진행을 보이고 있는 반면 본 연구 결과는 실험치와 비교하여 용해의 진행 속도와 상변화면의 기울기 형태에서 보다 정확한 결과를 나타내고 있음을 알 수 있고, $t = 17 \text{ min}$ 에서는 Brent와 Voller⁽⁶⁾의 수치해 및 본 연구의 결과 모두 실험치와 비교하여 느린 용해의 진행을 보이고 있으나 상변화면의 상단부 기울기를 제외한 나머지 부분에서는 본 연구의 결과가 보다 실험치에 근접하고 있음을 알 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 PCM 모듈 사용에 따른 냉각효과의 영향

Power level 2W에서 PCM 모듈의 유·무에 따른 시간의 경과에 대한 온도 변화를 Fig. 5에 나타내었다. PCM 모듈이 없는 경우는 초기단계부터 급격한 온도상승을 보이다가 서서히 줄어서 30분 경과 후에는 약 $62 \sim 68^\circ\text{C}$, 1시간 경과 후 배터리는 약 70°C , PA와 MCMs는 73°C 까지 상승하였다. 반면 PCM 모듈이 있는 경우는 초기단계 약 10분 동안 PCM 모듈과 직접적으로 접촉하지 않는 PA를 제외한 전 요소에서 온도상승율이 감소함을 알 수 있다. 특히, 10 ~ 30분 동안에는 PCM의 상변화로 인하여 MCMs과 배터리의 온도가 약 39°C 에서 거의 멈춰 있음을 알 수 있다. 따라서 단말기가 30분 동안 계속 사용되면 PCM 모듈이 없는 경우와 비교할 때 요소들간의 온도차는 최대 약 20°C 정도(40%온도감소)이고, 단말기가 1시간 동안 계속 사용되어도 MCMs과 배터리는 약 60°C , PA는 약 69°C 정도로 PCM 모듈이 없는 경우와 비교할 때 요소들간 온도차는 약 $5 \sim 10^\circ\text{C}$ (7 ~ 15%온도감소)로 나타남을 볼 수 있다.

3.2 Power level의 변화에 따른 영향

대부분의 이동전화기는 작고 얇은 형상으로 내

Isothermal solidification **Mushy region solidification**

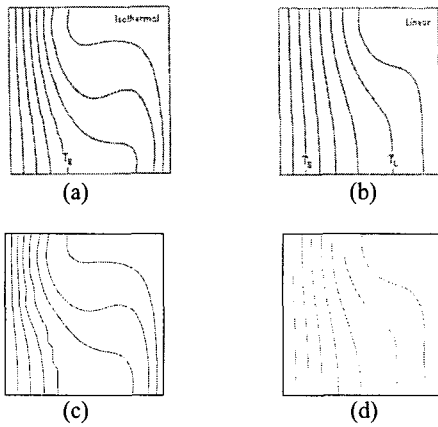


Fig. 3 Solidification of an aluminum alloy in the presence of natural convection: [(a) and (b): the results from Swaminathan and Voller⁽⁷⁾; (c) and (d): present results (The isotherms are 25°C apart.)]

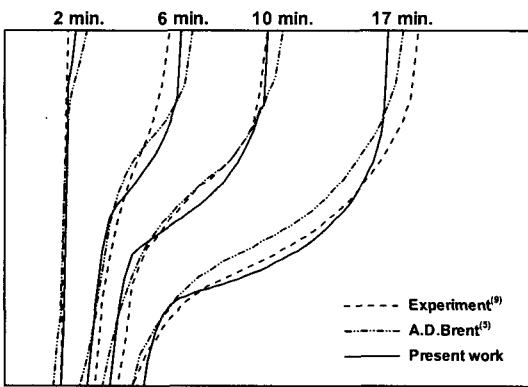


Fig. 4 Comparison of predicted melting front positions of gallium

공간의 효율적인 이용을 위하여 단말기 내 PCB는 Case B와 같은 모양으로 장착되어 있다. 이동전화기는 저 출력의 전자기기이므로 모든 power level에서 Case A와 B 모두 대체적으로 유사한 3 단계의 온도변화 양상을 나타냈다.

Case A

Fig. 6, 7, 8은 각각 PA+ MCMs에서 1W와 배터리에서 1W의 출력, PA+ MCMs에서 0.5W와 배터리에서 2W의 출력 그리고 PA+ MCMs에서 1W와 배터리에서 2W의 출력을 내는 경우에 대한 시간의 경과에 따른 온도 변화를 나타낸 것이다. 4 mm의 얇은 PCM 모듈을 사용했음에도 불구하고 세가지 각기 다른 power level 모두에서 3 단계의 뚜렷한 온도변화 양상이 나타남을 알 수 있다. 단말

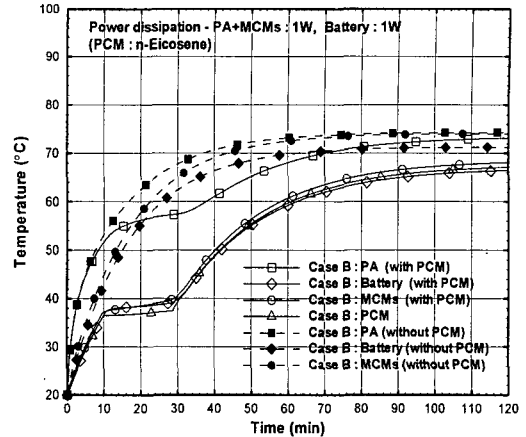


Fig. 5 Temporal variation of the temperature history for Case B with and without PCM module

기가 사용되기 시작하여 일정한 시간이 지나 PCM의 상변화 온도인 37°C에 도달하기 전까지의 초기단계에서는 power level에 관계없이 온도구배가 선형적으로 급격하게 나타남을 볼 수 있다. 이는 배터리의 발열과 PCB 전체를 통하여 흐르는 열이 양방향에서 PCM 모듈로 전달되는 동안 PCM은 고상으로 현열을 저장하게 되고 따라서 열전달은 순수 전도에만 의존하기 때문이다. 또한 PA는 그 위치가 PCB의 위쪽부분에 자리잡고 있으므로 출력이 증가할수록 온도구배는 더욱 커지고 냉각 효과는 떨어지고 있다. 두번째 단계는 PCM의 어느 한 부분이 37°C가 되면서 상변화가 진행되기 시작하여 PCM이 완전한 액상으로 변할 때까지 계속 된다. PCM 용기의 재질로는 SUS304를 사용하였다. PCM의 상변화가 끝난 후에는 PA, MCMs, PCM 및 배터리 모두에서 다시 큰 폭의 온도 상승이 발생 하는데 이 단계가 액상의 PCM에 현열이 저장되는 마지막 단계이다. Fig. 2에서와 같이 PA는 PCB의 윗부분에 장착되어 있으므로 다른 요소들에 비하여 상대적으로 PCM의 영향을 적게 받는다. 또한 PA는 크기는 작지만 고출력 요소이므로 각 Power level에 따라서 다양한 온도 상승 경향을 보였다.

Fig. 9는 단말기의 중앙부분(x=20mm)에서의 Power level 2.5W에 대한 상경계면, 온도분포 그리고 유동장을 시간의 경과에 따라 나타내고 있다. 단말기 내부의 PCM은 t = 800s가 되면 Fig. 9의 (a)에서와 같이 2W의 발열체인 배터리 인접부에서 상변화가 먼저 일어나기 시작한다. t = 1200s에서는 PCM이 계속해서 용해되어 양방향의 상경계면이 더욱 가까워지게 되면서 Fig. 9의 (b)에서와 같이 세 부분의 고상영역을 제외한 전 영역이 용해 되

었다. $t = 1500s$ 에서의 온도분포는 PCM의 온도가 전영역에 걸쳐 용해점을 넘어 PCM의 고온부인 배터리 인접부에서 저온부인 MCMs 인접부 방향으로 유동이 일어나 자연대류 효과를 나타내고 있다.

Case B

Fig. 6, 7, 8 에서 보듯이 Power level에 관계없이 잠열구간에서 MCM의 온도는 Case A 보다 Case B의 경우가 PCM의 온도에 더 가깝게 나타났다. 이는 MCMs이 PCM 모듈과 직접 접촉되어 전도열전달을 더욱 증가시키기 때문이다. Case B에서 PA는 Case A의 경우보다 PCM과 더 근접하여 위치하므로 PCM으로의 공기를 통한 대류열전달량이 증가하게 된다. 그러나 Case A의 경우보다 PCB와 PCM의 접촉 면적이 감소하게 되므로 PCM으로의 전도열전달량은 더욱 감소하게 된다. 이때 공기를 통한 대류열전달의 증가량보다 PCB를 통한 전도열전달의 감소량이 더욱 크므로 배터리의 출력이 높은 power level 2.5W를 제외한 전 영역에 걸쳐 Case A의 경우보다 PA의 온도가 상승하였다. 또한 PCM 모듈의 앞·뒷면에서 출력차가 있는 Fig. 7, 8의 경우 PA는 발열초기에 급격한 온도상승을 보이다가 일정시간이 지난 후에는 MCMs 보다 온도상승 속도가 상대적으로 감소함을 볼 수 있다. 이것은 PA의 물리적 크기는 MCMs 보다 작지만 출력은 MCMs 보다 단위체적당 2 배 이므로 PA의 초기 발열량이 증가하기 때문이다. 또한 완전 액상으로 변한 PCM은 배터리에서 PCB 방향으로 이동하는 열의 전도체 역할을 하게 되므로 상변화가 끝난 후에는 PA보다 배터리와 더 근접해 있는 MCMs의 온도가 점점 더 상승한다. Case A와 비교하여 Power level이 증가할 경우 PCB의 방향에 영향을 적게 받는 배터리의 온도는 PCM과 같이 큰 변화가 없었고, 상대적으로 그 영향을 많이 받는 PA는 그 장착위치가 온도상승의 중요한 변수임을 알 수 있다.

Fig. 10 은 Power level 2W에 대한 상경계면, 온도 분포 그리고 유동장을 시간의 경과에 따라 나타내고 있다. Power level 2W에서는 배터리에서의 발열량과 PCB 위에 장착된 요소들의 발열량이 동일하므로 배터리보다 상대적으로 체적이 작은 PA와 MCMs의 출력이 증가되게 되고 따라서 상경계면도 MCMs 인접부에서 배터리 인접부 방향으로 이동하게 된다. Fig. 9의 power level 2.5W의 경우와 비교하면 PA의 온도가 상대적으로 높게 나타나고 있음을 알 수 있다. 단말기 내부의 PCM은 $t = 1000s$ 가 되면 Fig. 10의 (a)와 같이 MCMs 인접부

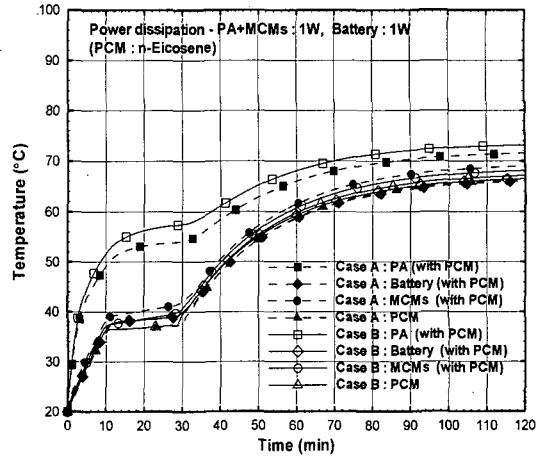


Fig. 6 Temporal variation of the temperature history for Case A and B of a power level 2W

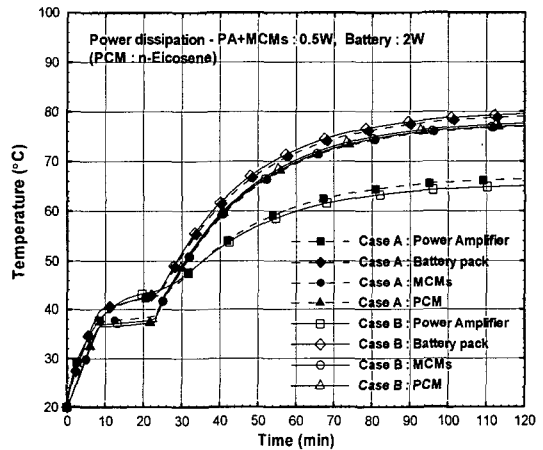


Fig. 7 Temporal variation of the temperature history for Case A and B of a power level 2.5W

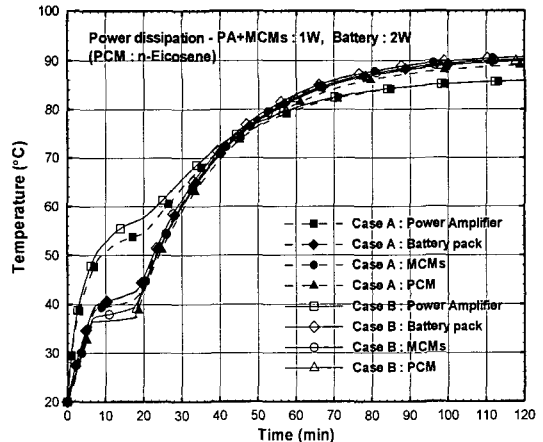


Fig. 8 Temporal variation of the temperature history for Case A and B of a power level 3W

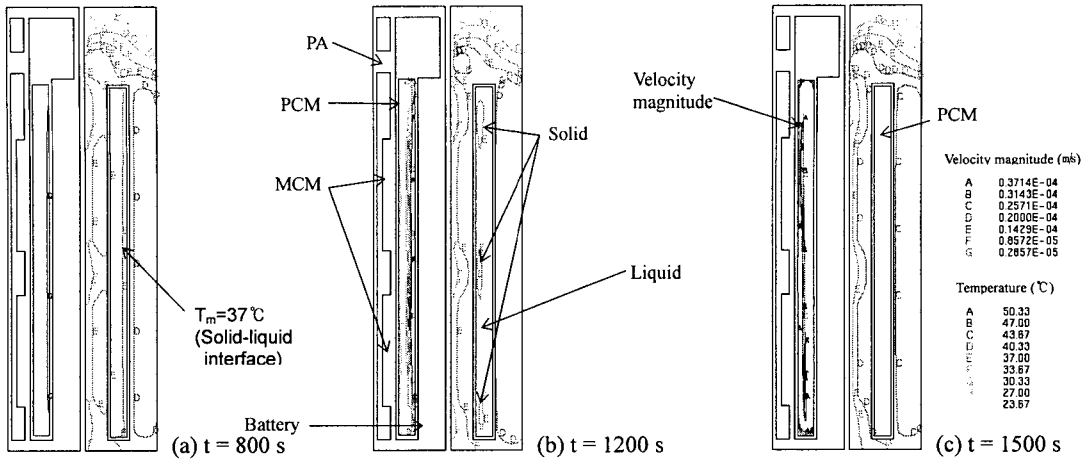


Fig. 9 Solid-liquid interfaces, temperature contours and stream line of PCM at the plane $z=20$ mm for Case A with a power dissipation of 'PA+MCMs'(0.5W) and 'battery'(2W)

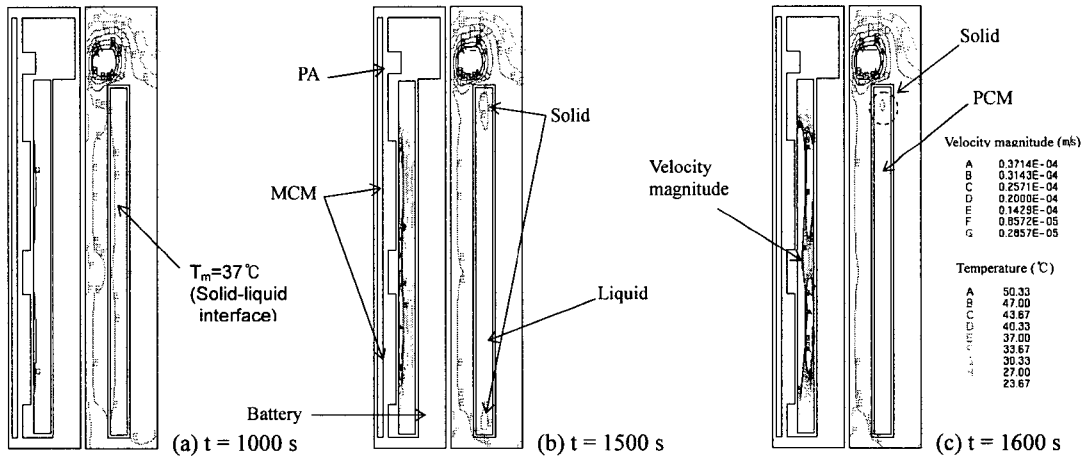


Fig. 10 Solid-liquid interfaces, temperature contours and stream line of PCM at the plane $z=20$ mm for Case B with a power dissipation of 'PA+MCMs'(1W) and 'battery'(1W)

에서 상변화를 시작하여 $t=1500s$ 에서는 Fig. 10의 (b)에서와 같이 발열체와 직접적으로 접촉하지 않는 두 부분의 고상영역을 제외한 전 영역이 용해되었다. $t=1650s$ 에서는 PCM의 대부분이 용해 되어 MCMs의 인접부에서 국부적으로 발생한 유동이 PCM의 전 영역으로 확대 되고 있음을 알 수 있다. Fig. 11은 가열된 배터리 인접부의 PCM 모듈 표면에서의 시간에 따른 온도분포를 power level 2W에서 나타낸 것이다. 단말기 사용초기 단계인 약 500s까지는 전도가 열전달의 지배적인 역할을 하기 때문에 PCM 모듈 표면 인접부 전체의 온도가 안정적이다. Power level 2W에서 PCM의 잠열 구간은 Fig. 7에서와 같이 약 10~30 min이므로 $t = 1000s$ 에서는 Case A와 B의 경우 모두 PCM 모듈

의 표면 온도분포가 일치하고 있으며 온도변화도 없었다. 상변화가 끝난 후 현열 구간인 $t=2000s\sim 3000s$ 사이에서는 PCM의 잠열에 의한 온도상승 억제효과가 사라지므로 약 13°C의 온도상승이 발생하였다. 그 이후로는 PA와 MCMs의 출력한계로 인해 온도 상승의 폭이 점차로 줄어들고 있음을 알 수 있다.

3.3 PCM 종류에 대한 영향

Fig. 12는 각각의 용해점이 37°C, 47°C 그리고 57°C 인 세 종류 PCM에 대한 시간에 따른 온도 변화를 나타낸 것이다. Paraffin wax와 n-Eicosene의 밀도는 동일하나 Paraffin wax의 비열[2700 J/(kg K)]이 n-Eicosene의 비열[2050 J/(kg·K)] 보다 크고 par-

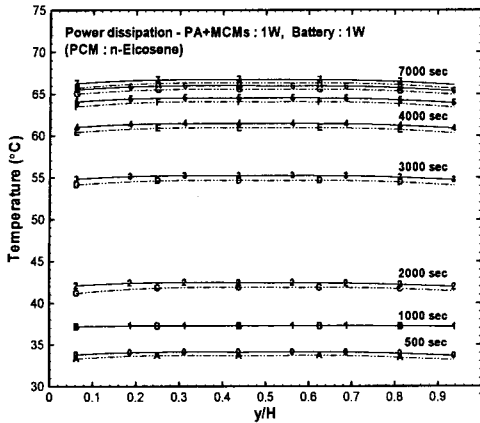


Fig. 11 Local temp. variation of PCM module for a power level of 2W

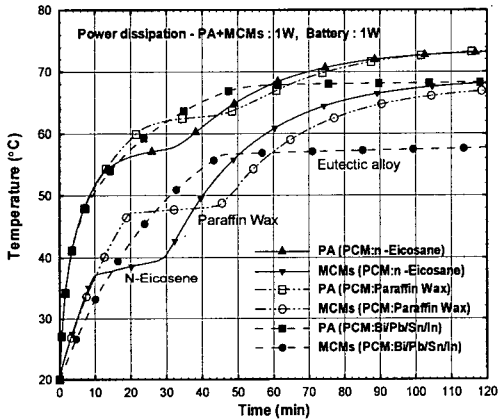


Fig. 12 Temperature history for Case B with various PCMs

affin wax의 열전도율은 n-Eicosene보다 작아 Paraffin wax의 열확산율이 n-Eicosene 보다 낮다. 잠열구간이 약 18분인 n-Eicosene이 단말기 사용후 약 37분까지는 가장 낮은 온도를 유지하였고 그 이후에서는 잠열구간이 약 26분인 Paraffin wax가 n-Eicosene 보다 낮은 온도를 유지하고 있는 것으로 나타났다. 따라서 이동전화기의 냉각을 위한 PCM의 적용시는 설계온도와 상변화온도 및 이동전화기의 평균 사용시간과 잠열의 지속시간을 함께 고려해야 보다 안정된 시스템을 확보할 수 있을 것이다. 금속계열의 eutectic alloy의 경우에는 2시간 경과 후에도 용해가 끝나지 않았는데 이는 eutectic alloy의 밀도가 다른 PCM에 비해 약 10배 이상 크므로 큰 열용량을 가지기 때문이다. 따라서 power level이 큰 경우에는 금속계열 PCM의 사용이 적합할 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 엔탈피법을 사용한 3 차원 수치 해석을 적용하여 PCM 모듈을 장착한 이동전화기의 효과적인 냉각에 대한 타당성을 검토하였다. 본 연구에서는 일반적인 이동전화기의 발열량인 power level 2W의 단말기 내에 두께 4mm의 organic PCM 모듈을 삽입한 경우에 대하여 수치해석 하였다. 통화 개시 후 PCM의 잠열구간인 약 20분 동안 이동전화기의 온도상승을 지연 시킬 수 있음을 알 수 있었다. 이 구간 동안 PCM 모듈을 장착하지 않은 경우 보다 최대 약 40%정도 온도상승을 감소시킬 수 있었고 그 이후 현열구간에서도 통화 개시 한 시간 경과 후 약 7~15% 그리고 두 시간 경과 후 6~9% 정도의 온도 감소효과를 나타내었다. 본 연구의 경우 이동전화기는 얇은 형상의 특징으로 인하여 PCM 모듈의 위치 변화(Case A & B)가 단말기 내의 온도분포에 미치는 영향은 미미하였고 온도변화 양상도 유사하였다. 또한 잠열구간에서 MCMs와 PA의 온도차는 Power level 2.5W(PA+ MCMs:0.5W, Battery:2W)에서 약 5°C 그리고 Power level 3W(PA+MCMs:1W, Battery:2W)에서는 약 15°C로 나타나 Power level이 커질수록 고출력PA와 PCM에 대한 근접설계의 필요성을 알 수 있었다. 한편, 이동전화기의 효과적인 냉각을 위한 PCM재질의 선택 시 본 연구에서 고려한 재질의 경우 설계온도 40°C 이하에서는 잠열구간이 약 18분인 N-Eicosene이 적합하고 50°C 이하에서는 잠열구간이 약 28분인 파라핀 왁스가 적합함을 알 수 있었다.

참고문헌

- (1) Bentilla, E. W., Sterrett, K. F. and Karre, L. E., 1966, *Northrop Space Lab. NAS8-11163, N66-2669.*
- (2) Witzman, S., Shitzer, A. and Zvirin, Y., 1983, *Proceedings, The winter annual Meeting of the ASME, Oktay et al., eds. Boston. MA, HTD Vol. 28, pp. 29~34.*
- (3) Lee, T. Y, Chambers, B. and Mahalingam, M., 1995, "Application of a CFD Tool for System-Level Thermal Simulation," *IEEE, Packaging and Manufacturing Tech.-Part B*, Vol. 18, No. 3, pp. 511~520.
- (4) Pal, D. and Joshi, Y. K., 1997, "Application of Phase Change Materials to Thermal Control of Electronic Modules: A Computational Study," *Journal of Electronic Packaging*, Vol. 119, pp. 40~50.
- (5) Brent, A.D., Voller, V.R. and Reid, K.J., 1988, "Enthalpy-Porosity Technique for Modeling Convection-Diffusion Phase Change: Application to the Melting of a Pure Metal," *Numerical Heat Transfer*, Vol. 13, pp. 297~318.

- (6) STAR-CD Ver.3.1 Manual, 1999, *Computational Fluid Dynamics Ltd.*
- (7) Swaminathan, C.R., and Voller, V.R., 1993, "On the Enthalpy Method," *International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow*, Vol. 3, pp. 233~244.
- (8) Gau, C. and Viskanta, R., 1986, "Melting and Solidification of a Pure Metal on a Vertical Wall," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 108, pp. 174~181.
- (9) Frank, P. Incropera and David, P. DeWitt, 1996, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 4th.