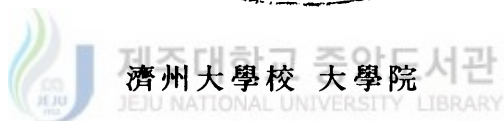
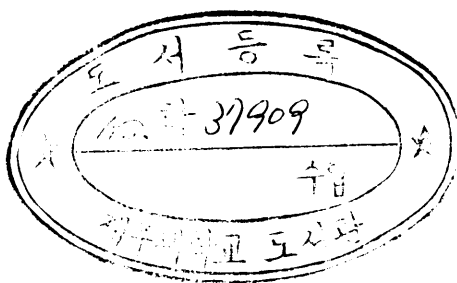


17
993.1

071312

碩士學位論文

미세캡슐화된 相變化物質을 함유한
蓄熱블럭의 熱性能 特性에 관한 研究



濟州大學校 大學院

에너지工學科

李 東 奎

1998年 12月

미세캡슐화된 相變化物質을 함유한 蓄熱블럭의 熱性能 特性에 관한 研究

指導教授 千 院 基

李 東 奎

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함



李東奎의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 _____ 印

委 員 _____ 印

委 員 _____ 印

濟州大學校 大學院

1998年 12月

Thermal Performance of the Storage Brick Containing Microencapsulated PCM

Dong-Gyu Lee

(Supervised by professor Won-Gee Chun)



JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF NUCLEAR AND ENERGY ENGINEERING
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

1998. 12.

목 차

LIST OF FIGURES	iii
LIST OF TABLES	v
NOMENCLATURE	vi
SUMMARY	vii
I. 서론	1
1. 연구배경	1
2. 연구 동향	4
3. 연구 목적	5
II. 이론적 배경	7
III. 실험 장치 및 실험 방법	12
1. 상변화형 미세캡슐의 구조 및 특성	12
2. 상변화형 미세캡슐 제조공정	13
3. 축열블럭 제작	14
4. 실험 장치	16
5. 실험방법	18
IV. 실험 결과 및 분석	20
1. 축열블럭의 축열 및 방열특성	20



1) 온도분포	20
2) 열전달율	23
2. 총괄 열전달 계수(Overall heat transfer coefficient : U-value)	37
3. 유효도(Effectiveness)	43
V. 결론	46
VI. 참고문헌	47



LIST OF FIGURES

Fig. 1. Heat transfer of storage brick containing microencapsulated phase change material	8
Fig. 2. Freezing in microencapsulated phase change material	8
Fig. 3. Three film layers in microcapsule	12
Fig. 4. Schematic diagram of the continuous production of PCM core ...	13
Fig. 5. Thermal storage brick and thermocouple positions	15
Fig. 6. Photograph of the thermal storage brick	15
Fig. 7. Schematic diagram of the test facilities	17
Fig. 8. Photograph of experimental apparatus	17
Fig. 9. Pipe surface temperature of the thermal storage brick	25
Fig. 10. Temperature variation of the internal position in storage brick during charging process	26
Fig. 11. Temperature variation of the internal position in storage brick during discharging process	26
Fig. 12. Surface temperature variation of the thermal storage brick during charging process	27
Fig. 13. Surface temperature variation of the thermal storage brick during discharging process	27
Fig. 14. Temperature variation on the storage brick surface	28
Fig. 15. Temperature variation with pipe radial distance	29
Fig. 16. Internal temperature variation for different mass flow rates	30
Fig. 17. Surface temperature variation for different mass flow rates	31
Fig. 18. Temperature variation of the internal position in thermal storage for different cooling temperatures	32

Fig. 19. Surface temperature variation of the thermal storage brick
for different cooling temperatures33

Fig. 20. Heat transfer rate with time for different PCM
concentrations during discharging34

Fig. 21. Released energy rate for different mass flow rates35

Fig. 22. Heat transfer rate for different cooling temperatures36

Fig. 23. U-value with time for different PCM concentrations39

Fig. 24. U-value with dimensionless distance40

Fig. 25. U-value for different cooling temperatures41

Fig. 26. U-value variation with cooling temperature42

Fig. 27. Average effectiveness with PCM concentration44

Fig. 28. Average effectiveness with cooling temperature45



LIST OF TABLES

Table 1. Material volume required for the thermal energy storage of 10^6 KJ	2
Table 2. Heat storage uses and temperature range	3
Table 3. Phase change materials	3
Table 4. Thermodynamic properties of the microencapsulated PCM	13
Table 5. The accuracy and precision of the instruments	18
Table 6. Experimental conditions	19
Table 7. Cycle time on the variation of mass flow rate	22
Table 8. Integrated withdrawal energy with PCM concentration	24
Table 9. Discharging time and integrated withdrawal energy with heat transfer fluid inlet temperature	24

NOMENCLATURE

T : temperature

S : heat source

k_s : thermal conductivity of thermal storage brick

r : radial coordinate

z : coordinate in the axial direction

k_m : thermal conductivity of cement mortar

k_c : thermal conductivity of microcapsule

c : volumetric concentration of microcapsules

\dot{Q} : heat transfer rate

ρ_c : density of microcapsule

\dot{V}_s : volume change rate of the solid phase in microcapsule

λ : latent heat of phase change material

T_m : melting temperature of microcapsule

r_p : interface location in a microcapsule

t : time

R_p : radius of microcapsule

\dot{m} : mass flow rate of heat transfer fluid

C_p : specific heat of heat transfer fluid

T_w : temperature of heat transfer fluid

U : U-value

T_p : average pipe temperature

D : pipe diameter

L : pipe length

T_{in} : pipe inlet temperature

T_{out} : pipe outlet temperature

A_s : pipe surface area

Bi_c : microcapsule Biot number

h_c : microcapsule heat transfer coefficient

NTU : number of thermal units

ϵ : effectiveness



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

SUMMARY

The utilization of microencapsulated phase change materials(PCMs) provides several advantages over conventional PCM application. The heat storage system, as well as heat recovery system, can be built to a smaller size than the normal systems for a given thermal cycling capacity. This microencapsulated PCM technique has not yet been commercialized, however.

In this work sodium acetate trihydrate($\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) was selected for the PCM and was encapsulated. This microencapsulated PCM was mixed with cement mortar for utilization as a floor heating system.

In this experiment performed here the main purpose was to investigate the thermal performance of a storage brick with microencapsulated PCM concentration. The thermal performance of this storage brick is dependent on PCM concentration, flow rate and cooling temperature of the heat transfer fluid, etc.

The results showed that cycle time was shortened as the PCM content was increased and as the mass flow rate was increased. The same effect was obtained when the cooling temperature was decreased.

For each thermal storage brick the overall heat transfer coefficient(U-value) was constant for a 0% brick, but was increased with time for the bricks containing microencapsulated PCM.

For the same mass flow rate, as the cooling temperature decreased, the amount of heat withdrawn increased, and in particular a critical cooling temperature was found for each thermal storage brick.

The average effectiveness of each thermal storage brick was found to be approximately 48%, 51% and 58% respectively.

I. 서론

1. 연구배경

오늘날 전세계적으로 새로운 에너지원의 개발과 무공해 에너지에 대한 관심이 고조되고 있다. 이러한 에너지는 발생형태에 따라 다르며 사용처의 용도에 맞도록 적당한 형태나 수준으로 바뀌어 사용하게 된다. 그리고 에너지 발생-에너지 수송-에너지 사용의 과정에서 에너지 수요와 공급측 간의 시간적, 질적, 양적으로 불일치가 발생하여 많은 에너지가 비효율적으로 낭비가 된다. 그러므로 에너지를 보다 균질하고 안정한 에너지로 이용하기 위해서는 에너지 발생원과 에너지 사용처간에 에너지 저장시스템을 사용하여 일단 에너지를 적당한 형태로 저장하는 것이 에너지를 보다 효율적으로 사용하는 방법중의 하나이다. 그리고 효율적 에너지 저장은 고가의 연료를 절약하고 에너지 낭비를 줄임으로써 비용효과 측면에서도 상당한 절약 효과를 가져온다. 이러한 에너지 저장 중에 열에너지를 저장하는 방법은 현열 에너지 저장(sensible heat storage)과 잠열 에너지 저장(latent heat storage)이 있다. 현열 에너지 저장은 저장 매질의 온도 상승으로 인해서 에너지를 저장하는 방법이고 잠열 저장은 저장 매질의 상변화시 잠열 에너지를 이용하는 저장 방법을 의미한다. 그러나 현열 저장은 저장 매질의 온도가 상승함에 따라 열손실도 함께 증가함으로써 단열이 요구되고 이는 저장 시스템의 원가를 높이는 결과를 낳게 된다. 그리고 열을 추출하는 사이에 저장온도는 계속 강하하지만 이는 점점 적은 열유속(heat flux)의 결과가 된다. 이에 비하여 잠열 저장은 에너지 저장 밀도가 크기 때문에 축열조의 부피를 크게 줄일 수 있다. Table 1을 보면 물을 이용한 현열저장방식에 비해 상변화 물질을 이용할 경우 축열조의 부피를 약 4.5배 정도 줄일 수가 있다. 그리고 거의 일정한 온도에서 열에너지를 저장하고 회수할 수가 있으므로 과열 현상을 막아 외부로의 열손실을 줄이고 온도 제어장치 없이 시스템의 온도를 거의 일정하게 유지할 수 있는 장점을 가지고 있다.

Table 1. Material volume required for the thermal energy storage of 10^6 KJ

Rock	33m'
Water	13m'
Salt hydrate	2.8m'

이러한 잠열저장은 축열물질로 잠열재를 사용하게 되고 적절한 잠열재 선택은 시스템 성능과 연관되므로 매우 중요한 사항이다.

난방용과 냉방용으로 사용할 수 있는 저온용($-5^{\circ}\text{C} \sim 120^{\circ}\text{C}$) 잠열 축열제로 높은 용융열을 가지는 상변화 물질(phase change material :PCM)은 여러 가지가 있으나 이들 물질 모두를 이용할 수 있는 것은 아니다. 하나의 잠열재는 일정한 잠열 온도 수준만을 가지고 있기 때문에 열원의 온도 수준과 사용 목적에 따른 다양한 저장 온도 수준에 대응할 수 없으므로, 상변화 온도 수준과 축열 이용온도 수준이 다를 경우, 잠열 온도 수준 축열이 갖는 고농축 축열 효과를 얻을 수 없게 된다. 그래서 효과적인 잠열재 선택이 필수적이다. Table 2는 저온용 축열용도와 온도범위를 나타내고 있고 Table 3은 이러한 저온용 축열용도에 적합한 상변화 물질의 종류를 보여준다.

이러한 상변화 물질의 적용형태는 다양하나 크게 벌크(bulk)형태와 미세캡슐 형태로 나눌 수 있다. 상변화 물질의 미세캡슐화(microcapsulization)란 상변화 물질을 얇은 구형의 필름으로 감싸는 기술을 말한다. 최근에는 기술의 발달로 인하여 지름이 1mm이내의 얇은 구형 막으로 상변화 물질을 코팅시키는 기술이 개발되었다. 상변화 물질을 미세캡슐을 제조하여 이용할 경우 전열면적이 커지므로 축열 및 방열에 대한 열응답성이 향상되고 수분의 증발과 상분리를 억제하는 효과를 얻을 수 있다. 미세캡슐화한 상변화 물질은 기존의 벌크(bulk)형태의 PCM을 이용한 축열 시스템의 문제점으로 지적된 사항들을 개선해 주고 응용 분야의 다양화를 이루었다. 즉, 온돌이나 벽돌등 건축자재나 열교환기 충전물질, 태양열 온수기 축열조 등에 이용 가능성이 매우 높다.

Table 2. Heat storage uses and temperature range

용도	온도(℃)
냉방	0~15
열펌프(Heat Pump) 열원	15~30
태양열 주택	15~50
급탕	40~60
난방	70~80
냉동기 열원	80~120

Table 3. Phase change materials

종류	물질	용융점(℃)	잠열(cal/g)
무기염수화물	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	32.2	42.0
	$\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	36.0	63.0
	$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	36.0	45.6
	$\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	58.0	63.0
파라핀계	$\text{C}_{28}\text{H}_{58}$	61.4	39.1
	$\text{C}_{24}\text{H}_{50}$	50.6	38.7
	$\text{C}_{22}\text{H}_{46}$	44.0	37.5
	$\text{C}_{20}\text{H}_{42}$	36.4	59.1
유기물	Stearic Acid	69.0	48.4
	Myristic Acid	57.0	47.0
	Lauric Acid	42~44	42.4
	Capric Acid	31.5	36.4

2. 연구 동향

물질의 상변화에 따른 잠열을 이용한 축열 방법은 1940년 후반부터 연구가 시작되어, 1970년대 두 차례의 에너지 위기를 겪으면서 많은 발전을 하였다. 잠열 물질을 사용한 열에너지 저장에 관한 연구 결과로는 상변화 물질의 벌크(bulk)형태를 이용한 경우의 열전달 특성과 상변화 물질을 미세한 구형의 캡슐로 제작하여 이를 응용한 형태를 들 수 있다.

Masayuki Kamimoto(1980)등은 NaNO_3 (sodium nitrate)와 NaNO_2 의 혼합물을 스테인레스스틸 용기에 채우고 열전달관이 중앙을 통과하는 형태의 축열조에서 방열 과정동안 열전달 매체(공기)의 열전달 계수와 축열 물질의 열전도 계수를 이론적 방법과 실험적 방법으로 평가하여 서로 비교하였다.

A. Abhat(1983)는 저온용($0\sim 120^\circ\text{C}$) 잠열재의 종류를 분류하고 이러한 잠열재의 용해와 응고 성질에 대해서 조사하였다.

Ahmet Kurklu(1996)는 잠열 축열조의 단점중의 하나인 낮은 열전달율을 증진시키기 위하여 축열조의 단면적이 출구 쪽으로 갈수록 좁혀지는 형태의 축열조를 제작하였고 이러한 축열조의 열성능을 NTU방법에 의해서 평가하였다.

Mehmet Esen(1996)등은 상변화 물질을 원통형에 채우고 이러한 원통형 다발을 다시 커다란 원통형에 장착한 형태의 축열조의 수치적 해석을 엔탈피 방법에 의해서 상변화 물질의 과도 현상 열전달을 묘사하였다.

Morrison(1978)등은 공기를 열전달 매체로 한 태양열 축열조에 축열 매질로 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (sodium sulphate decahydrate)를 사용할 경우 자갈을 사용한 형태의 축열조에 비해서 부피를 4배로 줄일 수 있고 파라핀 왁스를 사용할 경우 2배로 줄일 수 있다고 보고했다. 또한 액체로 열전달 매체로 사용할 경우 기존의 현열 축열조에 비해서 부피를 대략 2배 정도 줄일 수 있다고 하였다.

Y. Cao와 A. Faghri(1991)는 상변화 물질을 함유한 축열조의 성능을 수치적으로 해석하였고 상변화 물질의 상변화와 열전달 유체의 낮은 Pr수의 과도 강제 열전달에 대한 해석을 수행하였다.

국내적으로, 조수(1992)등은 주거 건물에서의 난방용 에너지 소비량 절감 목적으로 잠열저장 패널을 이용한 바닥난방공간의 실내온도분포를 분석하였다.

Takeo S. Saitoh(1996)등은 n-octadecane을 사용하여 지름이48mm, 길이가 150mm인 원통형 캡슐과 지름이 90mm인 구형캡슐의 축열 과정에서 상변화 물질의 액체 비율이 F_o , St_e , Gr_m 의 함수로 표현했고 캡슐내부에서의 자연대류 열전달과 열전도가 조합된 영향을 고려하였다.

Yasushi Yamagishi(1990)등은 두 종류의 파라핀을 5~1000 μ m의 다양한 크기의 미세캡슐을 제작하여 미세캡슐 크기에 따른 전열 특성을 확인한 결과 5 μ m의 크기를 갖는 미세캡슐이 5000번의 사이클 시험을 해도 구조적으로 안전하고 전열 특성 변화가 적음을 확인하였다. 그리고 이러한 미세캡슐을 함유한 슬러리 형태의 축열조의 유동 특성을 확인하였다.

P. Charunyakorn(1991)등은 원형 덕트내에서 열전달 매체와 함께 미세캡슐화된 상변화 물질이 슬러리 유동을 할 때, 이에 대한 열전달 특성에 관한 연구를 수행하여 이와 같은 형태의 축열조를 저온용으로 이용할 경우 주요 변수는 스테판(Stefan) 수와 미세캡슐의 농도이고 단상(single phase) 유동보다 2~4배 높은 열유속(heat flux)을 나타낸다고 하였다.

곽희열(1998)등은 지방산의 일종인 $CH_3(CH_2)_{12}COOH$ (Myristic acid)를 미세캡슐로 제조하여 이러한 미세캡슐을 함유한 바닥난방용 장판과 기존의 장판의 열성능을 비교하였고 미세캡슐 함유량에 따라서 캡슐을 함유한 장판의 전열 특성에 관한 연구를 수행하였다.

위와 같이 상변화 물질에 대한 연구는 물질 그 자체의 열역학적 특성에 대한 연구와 벌크(bulk)형태의 응용 사례가 대부분이었다. 그리고 미세캡슐에 관한 연구도 그 응용성에 중점을 두기보다는 캡슐 자체에 대한 전열 특성에 대한 연구중심이었다.

3. 연구 목적

연구 동향에서도 알 수 있듯이 PCM 이용 기술은 물질의 열역학적 특성 분석이나 벌크 형태의 PCM을 이용한 축열 시스템들이 주를 이루고 있다. 그러나 미세캡슐화한 PCM의 응용분야는 매우 다양하여 열전달 매체와 직접 접촉시켜 열저장

및 열회수 능력을 증대시키는 방향으로 진행되고 있고, 축열체(thermal mass)로서 건물의 바닥난방이나 천장 부분의 축열체로 이용 가능성을 들 수 있다. 그리고 자연형 태양열시스템을 건물구조체에 적용할 경우 축열 밀도가 높은 상변화 물질을 축열체로의 이용 가능성에 대한 연구가 진행중이다. 자연형 태양열 시스템의 개념은 태양열을 건물구조체를 이용한 획득형태로 열을 이용하는 시스템으로서 미세캡슐을 함유한 축열체의 적용범위는 매우 다양하다.

그리고 우리나라 주거건물의 거의가 온수를 이용하여 건물의 구조체에 열을 저장하는 현열이용방식으로 단위 부피당 열용량이 적어 축열시설에 많은 공간이 요구되고, 간헐난방시 실내의 과열(overheating) 현상으로 인한 열손실과 실내 온도의 큰 변화 폭으로 쾌적 실내 환경에 불리한 실정이다. 그러나 잠열재를 이용한 축열체의 적용으로 기존의 축열 방법의 단점을 보완하고 축열두께의 축소가 가능하고 조립화 모듈화로 인한 시공 인력 절감은 물론 최근 개발되고 있는 조립식 온수온돌 시스템의 축열체 문제를 효과적으로 해결 가능하다.

따라서 본 연구에서는 미세캡슐화한 PCM을 시멘트 몰타르와 혼합하여 건물의 바닥난방에 적용하기 위해서 축열블럭의 열성능 특성을 규명하고자 하였다. 우리나라 난방 시스템의 온수공급온도를 살펴보면 개별난방의 경우 57~60℃이므로 상변화온도가 58℃인 $\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (sodium acetate trihydrate)를 선택하여 구형 미세캡슐을 제조하였고, 건물의 바닥난방에 적용하기 위한 전 단계로 미세캡슐을 함유한 축열블럭을 제작하였다. 제작된 축열블럭이 미세캡슐 함유량, 열전달 매체의 유량, 방열과정시 유입 냉각온도에 따른 축열블럭의 열성능 평가에 관한 내용을 다루었다.

II. 이론적 배경

축열블럭의 축열량과 방열량을 분석하고 미세캡슐 함유량에 따른 열응답성을 분석하기 위하여 Fig. 1에 보여지는 축열블럭에 대한 정상상태 지배방정식을 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(k_s \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \left(\frac{k_s}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_s \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S = 0 \quad (1)$$

여기에서 S는 축열블럭 내에 존재하는 미세캡슐의 상변화 과정중 잠열 방출에 의한 열량을 표현한다. 식(1)에서 열전도 계수 k는 일반적으로 시멘트 몰타르의 열전도 계수와는 다르다. 미세캡슐 함유량에 따른 영향을 고려한 열전도 계수는 맥스웰 관계식으로부터 평가된다.

$$k_s = \frac{2 + k_c/k_m + 2c(k_c/k_m - 1)}{2 + k_c/k_m - c(k_c/k_m - 1)} \quad (2)$$

식(1)에서 축방향으로 열전도는 구리관 반경 방향으로의 열전도에 비해서 무시할 수 있다고 가정을 하면 식(1)에서 z방향 성분이 사라진다.

미세캡슐 내에서의 상변화 과정을 고려한 S항을 표현하기 위해서 Fig. 2와 같은 모델을 설정하였다. S항은 미세캡슐입자 1개당 열방출량과 축열블럭내 미세캡슐의 개수의 곱으로 표현된다.

그러므로 미세캡슐입자 1개당 열전달율은 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{Q} = \rho_c \dot{V}_s \lambda = 4\pi k_c (T_m - T) \frac{r_p}{1 - (1 - \beta_c) r_{pl}} \quad (3)$$

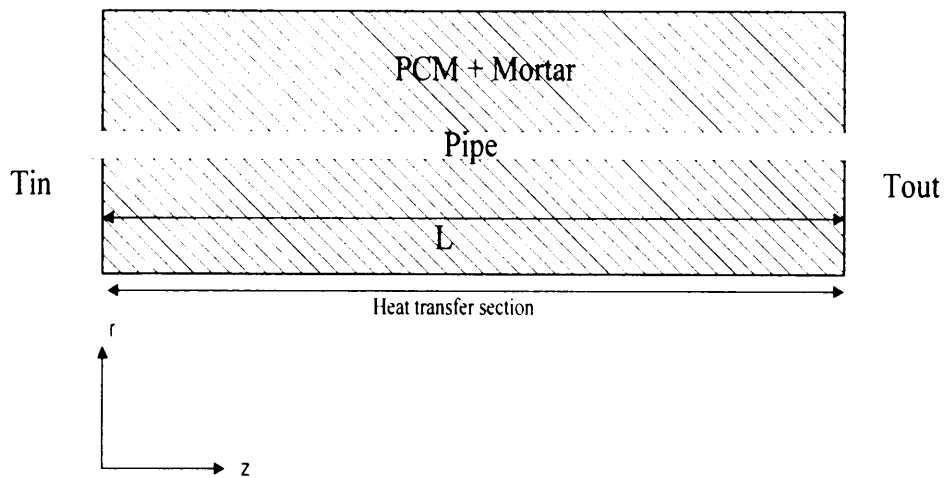


Fig. 1. Heat transfer of storage brick containing microencapsulated phase change material

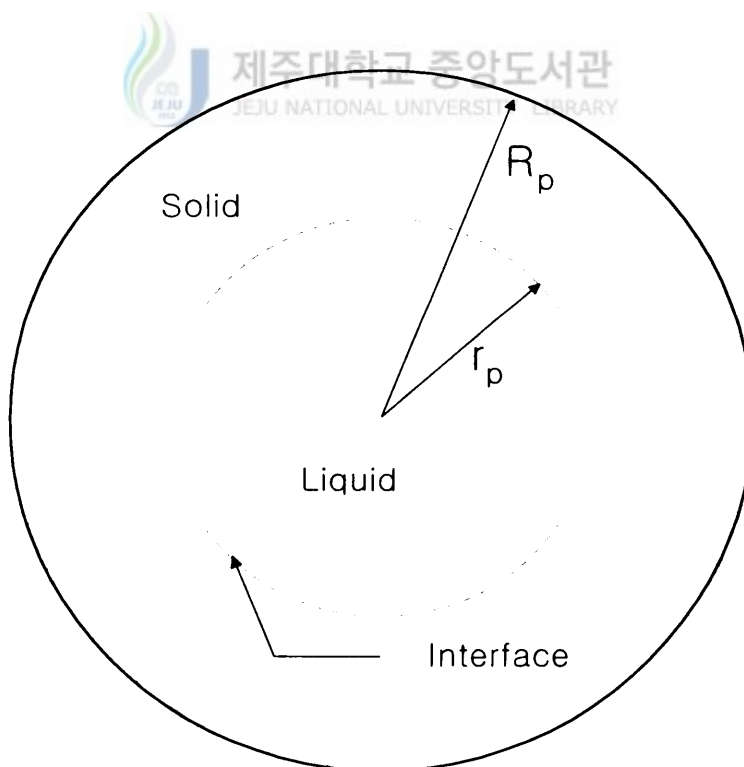


Fig. 2. Freezing in microencapsulated phase change material

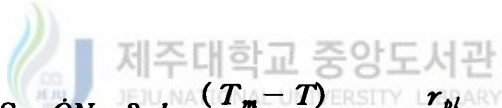
여기에서 \dot{V}_s 는 고상(solid phase)의 체적 변화율을 표현한다.

$$\dot{V}_s = -4\pi r_p \frac{dr_p}{dt} \quad (4)$$

미세캡슐 내에서 고상과 액상을 구분해주는 경계면의 위치, r_p 는 다음과 같이 주어진다.(P. Charunyakorn, *et al.*, 1991)

$$t_i = (1 - r_{pl}^2)/2 + (1 - r_{pl}^3)(\beta_c - 1)/3 \quad (5)$$

여기에서 t_i 은 무차원 시간으로 $t(\alpha_c/(R_p^2))(C_c(T_m - T)/\lambda)$ 로 표현되고 β_c 는 $k_c/h_c R_p = 1/Bi_c$ 로 표현된다. 그러므로 S항은 다음과 같이 주어진다.



$$S = QN = 3ck_c \frac{(T_m - T) r_{pl}}{R_p^2 (1 - (1 - \beta_c)r_{pl})} \quad (6)$$

여기에서 N은 축열블럭 단위체적 당 미세캡슐의 개수를 나타낸다.

미세캡슐 내에서의 응고 과정에서 r_p 의 값은 열평형 방정식으로부터 결정된다.

$$\frac{4}{3}\pi(R_p^3 - r_p^3)\lambda\rho_c = \int_0^t \dot{Q}dt \quad (7)$$

왼쪽 항은 상변화과정에 의한 잠열을 나타내고 오른쪽 항은 미세캡슐과 시멘트 몰타르와의 열교환에 의한 적산 열량을 표현한다.(P. Charunyakorn, *et al.*, 1991)

다음은 축열블럭의 축열과정과 방열과정시 총체적인 전열특성을 확인하기 위하여 NTU방법에 의한 열교환율을 평가하기 위한 이론적 해석이다.

27

축열블럭을 가로지르는 구리관은 특정시간 t 에 대해서 균일하고 열전달은 축 방향보다는 구리관 반경 방향으로 가속된다는 가정 하에 다음과 같은 방법으로 축열블럭의 전열 특성을 분석하였다.

특정 시간 t 에 대해서 열전달 매체에 의한 열전달율은 다음과 같이 표현되고,

$$dq = \dot{m}C_p dT_w \quad (8)$$

그리고 축열블럭을 가로지르는 구리관 표면에서의 열전달량은 다음과 같이 표현된다.

$$dq = U dA (T_w - T_p) \quad (9)$$

여기에서 $dA = \pi D dL$ 로 국부 열전달 단면적을 나타낸다.
 식(8)과 식(9)를 조합하면,

$$\dot{m}C_p dT_w = U \pi D dL (T_w - T_p) \quad (10)$$

$$\frac{dT_w}{dL} = \frac{\pi D U}{\dot{m}C_p} (T_w - T_p) \quad (11)$$

으로 표현된다.

여기에서 식(11)을 입구와 출구에 대해서 적분하면 식(12)와 같고,

$$\ln \frac{(T_{out} - T_{av,p})}{(T_{in} - T_{av,p})} = \frac{U \pi D L}{\dot{m}C_p} \quad (12)$$

식(8)을 구리관 입·출구에 대해서 적분을 하면 식(13)과 같다.

$$q = \dot{m}C_p(T_{out} - T_{in}) \quad (13)$$

식(12)와 식(13)을 조합하면 LMTD(Logarithmic Mean Temperature Difference)를 포함하는 다음과 같은 식을 얻게된다.

$$q = UA_s(LMTD) \quad (14)$$

$$\text{여기서, } LMTD = \frac{(T_{out} - T_{in})}{\ln \frac{(T_{out} - T_{av,p})}{(T_{in} - T_{av,p})}}$$

식(14)를 사용하여 실험결과의 U값(U-value)을 제시할 수 있고 이러한 U값의 결과로 NTU(Number of Thermal Units)의 개념을 도입할 수 있다.



$$NTU = \frac{UA_s}{\dot{m}C_p} \quad (15)$$

제주대학교 양도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

이러한 NTU는 이론적으로 축열블럭에 최대 저장 가능한 에너지량과 실제 저장할 수 있는 에너지량의 비를 정의하는 유효도(effectiveness)를 정의한다.

$$\epsilon = 1 - \exp(-NTU) \quad (16)$$

여기에서 q, U, NTU, ε의 값들은 시간에 따라 변하고 이러한 양들을 계산하기 위해서 정상 상태가 특정 시간 t에 대해서 만족한다고 가정을 하였다.

Ⅲ. 실험 장치 및 실험 방법

1. 상변화형 미세캡슐의 구조 및 특성

바닥 난방용 축열블럭에 사용된 상변화물질, $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{12}\text{COOH}$ 를 Fig. 3과 같이 스프레이 공법에 의하여 1차적으로 PMMA(Poly Methyl Methacrylate) 코팅을 하고 2차적으로 왁스(wax)코팅, 다시 최종적으로 3차 PMMA코팅을 함으로써 용융-동결시 PCM의 결정수 누출을 방지하고 기계적 강도를 향상시켰다. 이러한 코팅재를 선정하게 된 배경은 내열성, 내화학적, 내수성이 좋고 스프레이 코팅법에 적합한 재질이고 필름 형성도가 좋고 기계적 강도가 우수한 재질이어야 하고, 필름형성시 증기(water vapor) 투과성이 낮아야 하는 조건을 충족시키는 PMMA를 선택하게 되었다.(한국에너지기술연구소, 1996) 그리고 제조된 미세캡슐의 열역학적 특성은 Table 2와 같다.

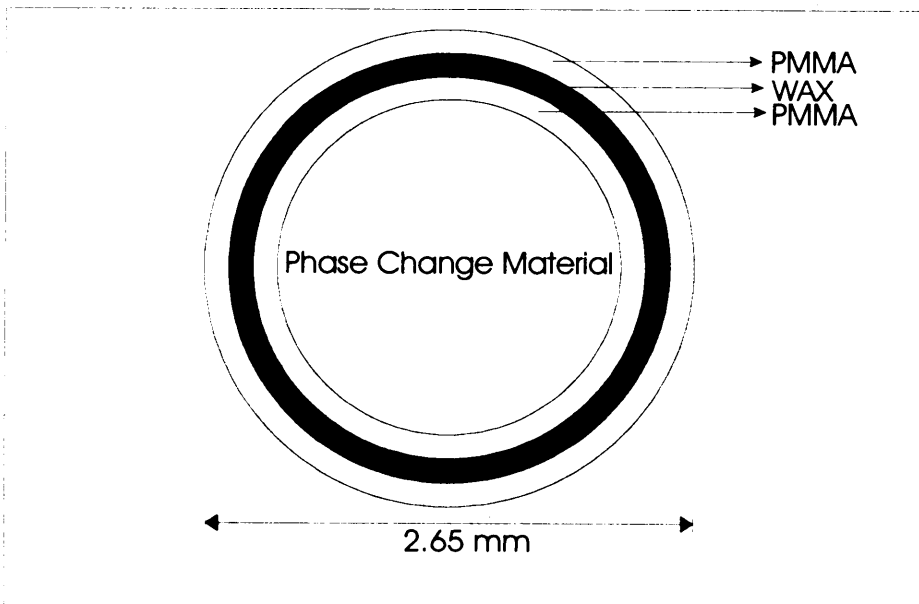


Fig. 3. Three film layers in microcapsule

Table 4. Thermodynamic properties of the microencapsulated PCM

용융점	58 ℃
직경	2.65 mm
잠열	272.44 kJ/kg
비열(고체)	2.79 kJ/kg · K
비열(액체)	3.68 kJ/kg · K
열전도도(고체)	0.55 W/m · K
밀도(고체)	1.45 g/cm ³
과냉각 온도	10 ℃
결정성장 속도	2.4 mm/sec

2. 상변화형 미세캡슐 제조공정

Fig. 4는 연속적인 미세캡슐 제조방법을 보여준다. 가열 밴드(heating bend)에 의해서 용해된 상변화 물질은 노즐을 통해 방출됨으로서 구형입자를 형성하고 액체 유기용매(organic solvent)에서 겔(gel)화된다. 다시 여과기(sieving)를 통하여 일정한 크기의 입자를 선별하고 나서 왁스가 용해되어 있는 용매를 코팅장치(Rotor-Tangential Coater)에 주입함으로써 미세캡슐을 코팅을 하고 최종적으로 PMMA가 용해되어 있는 용매에서 코팅을 하였다. (한국에너지기술연구소, 1996)

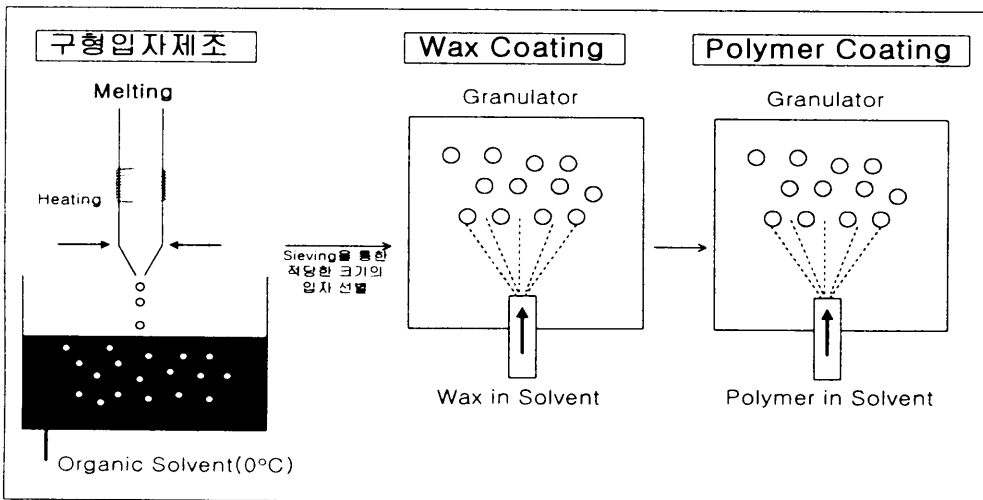


Fig. 4. Schematic diagram of the continuous production of PCM core

3. 축열블럭 제작

제조된 상변화형 미세캡슐($\phi=2.65\text{mm}$)의 열물성 및 전열특성을 실험하기 위하여 제작된 축열블럭은 미세캡슐과 시멘트 몰타르(시멘트:모래=1:3)와 균일하게 혼합하여 $50\times 50\times 300\text{mm}$ 의 크기로 제작하였다. 그리고 미세캡슐 함유량에 따른 축열용량과 방열특성을 알아보기 위해서 몰타르와 서로다른 미세캡슐 체적비(0, 10, 15, 20%)를 갖는 축열블럭 4개를 제작하였다. 축열 및 방열 과정동안 축열블럭에 열을 전달하는 매체로 증류수를 사용하였고 열전달 매체가 흐르도록 열전도도가 우수한 구리관($\phi=6.35\text{mm}$)을 사용하였다. Fig. 5는 제작된 축열블럭의 모양과 시간에 따른 전열특성을 측정하기 위한 열전대(T-type)의 위치를 나타낸 것이고 Fig. 6은 제작된 축열블럭의 사진이다. 열전대의 위치는 축방향 성분보다는 가로와 세로 방향성분의 온도분포를 관찰하기 위한 배치를 이루었다. 즉, 축열블럭의 중앙위치의 가로방향으로 구리관 표면, 축열블럭 내부와 표면에 각각 배치를 했다.

단면 A-A에서는 상부표면과 하부표면 그리고 열전달 유체가 흐르는 구리관 표면에 열전대를 부착하였고 단면 B-B에서는 측면과 측면에서부터 12.5mm인 지점에 각각 열전대를 부착하였다. 이러한 열전대의 위치분포는 미세캡슐을 함유함에 따라서 축열블럭 내부에서의 열전도도는 미세캡슐이 없는 축열블럭과는 다를 것이고 제작된 축열블럭의 크기를 고려해 볼 때 축방향으로의 열전달보다는 가로와 세로 방향으로의 열전달이 가속될 것이기 때문이다.

축열과 방열시 열용량을 계산하기 위해서 축열블럭을 통하여 흐르는 작동유체의 온도를 측정하기 위하여 파이프 입구와 출구에 열전대(sheath thermocouple probe : $\phi 1.5\text{mm}$)를 설치하였다.

제작된 축열블럭은 축열 및 방열시 외부 환경으로의 열손실을 최소화하기 위해서 단열재(fiber wool, $t=25\text{mm}$)로 단열을 하였다.

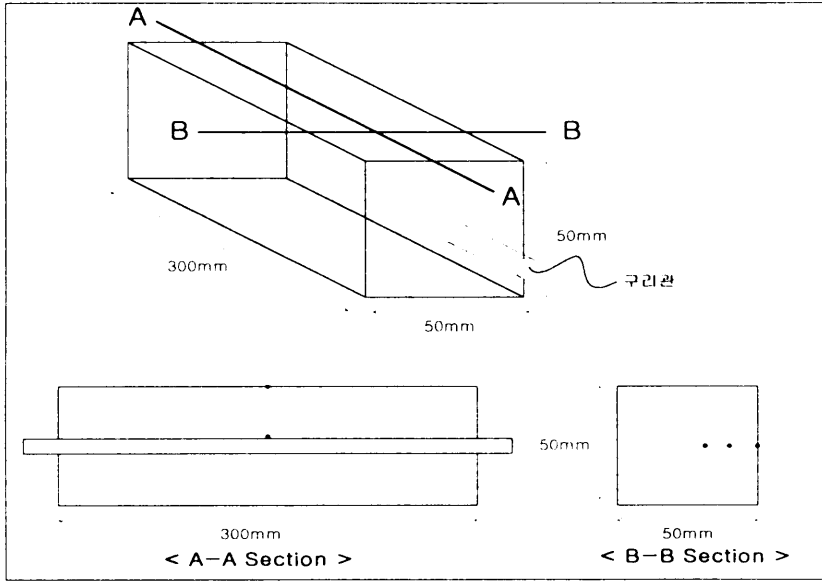


Fig. 5. Thermal storage brick and thermocouple positions



Fig. 6. Photograph of the thermal storage brick

4. 실험 장치

상변화형 미세캡슐을 함유한 축열블럭의 전열특성을 조사하기 위해서 Fig. 7 과 같은 실험장치를 구성하였고 Fig. 8은 제작된 실험 장치도를 보여주는 사진이다.

열전달 유체로 물을 사용한 실험장치는 ASHRAE STANDARD 94.1 - 1985(RA 91)를 토대로 설계 및 제작하였으며, 축열블럭의 주기시간(cycle time), 용량, 유량 그리고 온도의 변화를 자유롭게 할 수 있다.

실험장치 구성요소는 크게 향온챔버, HVAC, 가열 및 냉각 순환기, HVAC제어기로 나눌 수 있다. 향온챔버는 축열블럭의 축열 및 방열 실험을 수행하는데 있어서 실험변수들간의 반복실험에 따른 오차를 줄이고 축열블럭과 주위환경 사이의 총괄 열손실계수(Overall Heat Loss Coefficient)의 변화를 최소로 하기 위하여 항상 일정온도를 유지하도록 하였다.

각각의 축열블럭은 다분배기관(Distribution manifold)으로 연결하여 동시에 열전달 유체가 흐르도록 구성하였고 다분배기관과 축열블럭사이에는 유량계를 설치하여 각각의 축열블럭에 대해 똑같은 유량에서 실험을 수행할 수 있도록 하였다. 그리고 사용된 열전달 유체는 배관내의 스케일 부착을 최대한 억제하고 정확한 물성치를 확보하기 위하여 순수제조장치를 통하여 제조된 증류수를 사용하였다.

향온챔버의 일정온도를 유지하기 위해서 HVAC부분을 설정했고 이 부분은 향온챔버 안에 위치해 있는 열교환기에 연결을 하여 챔버의 온도가 설정온도보다 높을 경우 온도조절기에 의해서 가동되도록 하였고 향온챔버의 온도가 설정온도보다 낮을 경우 챔버 안의 히터가 작동되도록 설정하였다. 이러한 작동은 솔레노이드 밸브에 의해서 설정온도보다 낮을 경우 솔레노이드 밸브가 개방되어 HVAC부분에서 설정된 물이 향온조안의 열교환기를 통하여 흐르고 설정온도 보다 높을 경우 솔레노이드 밸브가 닫히도록 하였다.

축열블럭의 축열 과정은 Hot Circulator를 통하여, 설정한 온도로 축열블럭을 통하여 흐를 수 있게 했고 방열 과정은 Refrigerating Circulator에서 설정된 온도로 열전달 유체가 흐르도록 구성하였다.

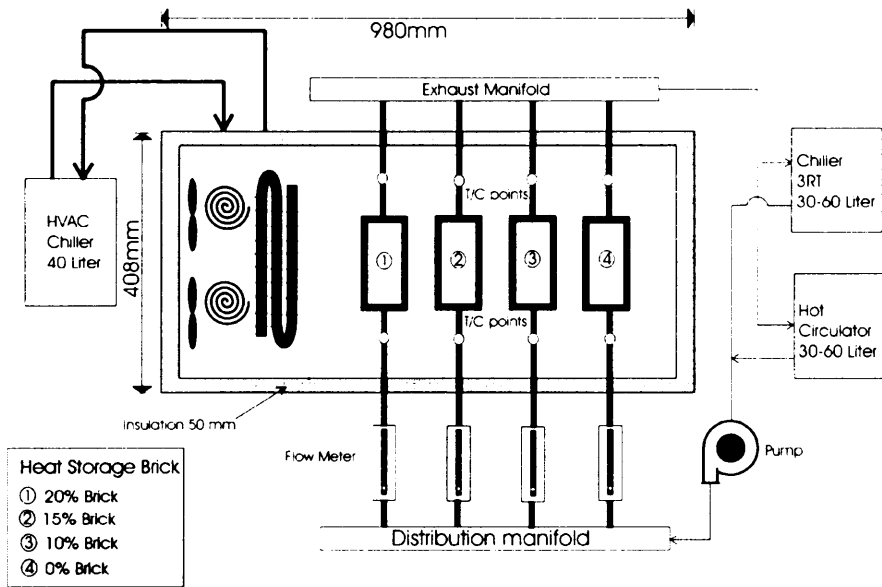


Fig. 7. Schematic diagram of the test facilities



Fig. 8. Photograph of experimental apparatus

유량계와 축열블럭 입구의 단면적은 동일하게 설정하였고 측정치와 관계된 오차범위는 Table 5와 같다.

Table 5. The accuracy and precision of the instruments

	오차 범위	정확도
온도	$\pm 0.5^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.2^{\circ}\text{C}$
온도차	$\pm 0.1^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.1^{\circ}\text{C}$
유량	$\pm 1.0\%$	$\pm 1.0\%$

5. 실험방법

축열블럭의 열성능을 평가하기 위한 시험 방법은 ASHRAE STANDARD 94.1-1985(RA 91)를 기준으로 하였다. 모든 시험은 축열시험과 방열시험으로 구분된다. 축열시험은 열전달 유체가 축열블럭에 열을 저장하는 과정이고 방열 시험은 열전달 유체가 축열블럭으로부터 열을 회수하는 과정을 의미한다.

모든 시험에 있어서 축열블럭의 온도는 시험 전에 설정온도로 균일해야 하며 축열블럭을 통하여 흐르는 열전달 유체는 정상유동임을 확인하여야 한다. 즉, 정상 상태를 확인하기 위하여 열전달 유체는 1시간 동안 입구와 출구의 온도차가 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 이하가 되고 시험장치를 통해서 계속 순환시켰다.

열전달 유체의 정상유동은 축열 및 방열 시험동안 유량이 $\pm 1\%$ 이하로 변할 때 정상상태에 도달했다고 간주하였다.

정상상태 열전달율도 실험기간동안 열전달율이 $\pm 2.5\%$ 이내로 변할 때 정상상태 열전달에 도달했다고 간주하였다. 그러나 일부 잠열재의 과냉각은 어떤 시점에서 피할 수 없이 큰 방출열량을 일으킬 수 있다.

시험전 미세캡슐이 상변화가 정상적으로 이뤄지도록 하기 위해서 적어도 5사이클의 상변화 과정을 완벽하게 수행한 후 실험을 하였다.

주기 시간을 정하기 위해서 실험과정은 단기 주기(short cycle)와 장기 주기(long cycle) 과정 시험으로 구성되나 본 연구에서는 단기시험만을 수행하였다.

▶ 단기 주기

- ① 축열시험을 하기 위해서 밸브와 제어를 조절하기 위한 10분 이내의 대기 시간을 갖는다. 이 대기시간동안은 보조열원, 펌프 등은 작동이 멈춘 상태에 있어야 한다.
- ② 축열 시험기간으로 축열 시간은 $T_{out} = T_i + \Delta T$ 일 때 종료한다.
- ③ 축열시험 조건에서 펌프 등은 작동이 멈춘 상태로 10분 동안의 대기시간을 갖는다. 이 대기시간은 방열시험 기간을 위한 밸브와 제어를 조정하기 위한 예비기간이다.
- ④ 방열 시험기간으로 방열 시간은 $T_{out} = T_{in}$ 일 때 종료한다.

①~④과정을 축열블럭의 한 주기(cycle)로 정의한다.

본 연구에서 수행한 실험 조건은 Table 6에 제시되어 있다. 유량 변화에 따른 축열블럭의 축열 및 방열 성능을 측정하고 방열시 냉각 온도 변화에 따른 열성능을 측정하였다.



Table 6. Experimental conditions

유량	축열	방열
	입구 온도	입구 온도
0.2 l/min, 0.3 l/min 0.4 l/min, 0.5 l/min	70℃	20℃, 15℃, 10℃

IV. 실험 결과 및 분석

미세캡슐을 함유한 축열블럭의 열성능 평가를 위한 실험에서 축열블럭의 주기(cycle time)에 영향을 주는 주요 변수로 미세캡슐 함유량, 유량, 방열시 유입냉각온도로 설정하여 이러한 변수에 대해서 축열블럭의 축열 및 방열 성능, 총괄 열전달계수(overall heat transfer coefficient), 유효도(effectiveness)를 평가하였다.

1. 축열블럭의 축열 및 방열특성

미세캡슐 함유량은 경제성 및 사용목적에 따른 기계적 강도 등을 고려하여 설정해야 한다. 그래서 축열블럭의 축열 및 방열특성은 미세캡슐 함유량이 0%, 10%, 15%, 20%(채적비)로 설정하여 수행하였다. 유량변화는 축열 및 방열과정시 열을 축열하고 회수하는 시간에 큰 영향을 미치므로 0.2 l/min~0.5 l/min(0.1 l/min 간격)으로 설정하였다. 그리고 축열시스템의 에너지를 사용하기 위해서는 열을 회수하는 매질이 필요하고 열을 회수하는 과정에서 열전달율은 매질의 유입온도에 따라서 다르게 나타나므로 방열과정시 유입냉각온도는 입구온도를 10℃, 15℃, 20℃에 대해서 실험을 수행하였다.

1) 온도분포

Fig. 9는 열전달 유체가 흐르는 구리관 표면에서의 온도 변화를 보여주고 있다. 축열과정시 90분이 경과하고 난후 4개의 축열블럭 모두에서 구리관 표면온도가 정상상태에 도달했고 방열과정도 역시 90분이 경과한 후 표면온도가 정상상태에 도달함을 알았다. Fig. 10과 Fig. 11은 유량이 0.3 l/min이고 축열 과정시 입구온도는 70℃, 방열과정시 입구온도가 15℃인 경우 축열블럭 내부(w=12.5mm) 온도변화를 나타내고 있다. 축열과정시 미세캡슐의 상변화는

도까지 도달하는데 걸리는 시간은 순수블럭(미세캡슐 함유량 0%)은 70분, 미세캡슐 함유량이 10%인 블럭은 100분, 15%블럭은 120분, 그리고 20%블럭은 160분이 경과하였다. 즉 미세캡슐함유량이 증가할 수록 온도증가 속도가 느리게 나타났고 이러한 결과는 미세캡슐을 함유함으로써 미세캡슐에 열을 저장하는 시간을 필요로 하기 때문인 것으로 사료되었다. 방열과정시 약 30분이 경과하고 난 후부터 각 축열블럭사이에 온도차가 존재하기 시작했고 60분이 경과될 때 가장 큰 온도차를 보였다. 즉, 미세캡슐을 시멘트 몰타르와 혼합하였을 경우 잠열효과는 미세캡슐의 상변화 온도에서 나타나는 것이 아니라 그 이하에서 연속적으로 잠열효과 현상을 보여줌을 알았다. Fig. 12와 Fig. 13은 똑같은 조건에서 축열블럭 표면(w=25mm)의 온도 변화를 나타내고 있다. 축열과정시 10%와 15% 축열블럭의 온도증가 속도는 비슷한 경향을 보였고 미세캡슐 함유량이 20%인 경우가 정상상태 도달시간이 제일 길었다. 정상상태 온도도 미세캡슐을 함유하지 않은 블럭과 비교해 볼 때 낮게 유지됨을 알았다. 이러한 결과는 미세캡슐을 바닥난방에 적용시, 기존의 현열 이용식 바닥난방의 문제가 되는 특정부분의 과열(overheating)현상을 방지할 수 있고 온도분포가 구리관 반경방향으로 균일하게 분포시킬 수 있을 것으로 사료되었다. 방열 과정도 축열 과정과 마찬가지로 캡슐 함유량이 증가할수록 방열시간이 증가하였고 외기조건온도(30℃)까지 강하하는데 걸리는 시간을 보면 미세캡슐 함유량이 0%인 블럭이 45분, 10%블럭이 60분, 15%블럭이 65분, 그리고 20%블럭이 80분이 소요되었다. 그리고 방열을 시작한지 40분이 경과한 후 각 축열블럭사이의 온도차가 증가하고 약 60분이 경과한 후 최대를 보여주었다. 이러한 결과는 내부온도변화에서 나타난 결과와 약 10분 정도의 시간 지연현상을 보여주었다. 즉, 상변화 과정은 방열실험을 시작한지 열전달 유체가 흐르는 구리관 반경방향으로 시간에 따라 연속적으로 이루어지고 60분이 경과한 후 내부와 표면사이에서 상변화 활동이 가장 활발한 것으로 사료되었다. 그리고 미세캡슐을 이용할 경우 방열과정시 온도강하 속도가 느리므로 사용자가 원하는 온도에 가깝게 유지할 수 있다.

Fig. 14는 미세캡슐 함유량에 따른 특정 시간에 대한 표면 온도 변화를 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 방열을 시작한지 60분이 경과한 후 각 축

열블럭사이의 온도변화가 최대치를 보여주었고 90분이 경과한 이후부터는 변화 폭이 감소함을 보여주었다.

Fig. 15는 열전달 유체가 흐르는 구리관 반경방향에 따른 온도 변화를 보여주고 있다. 구리관 표면과 내부사이의 온도구배가 내부와 표면사이의 온도 구배보다 크다. 이러한 결과는 열유속(heat flux)은 각 축열블럭에 대해서 균일하게 일어나고 있으나 열전달 단면적이 구리관 쪽으로 갈수록 감소하기 때문이다. 그리고 0%블럭과 20%블럭 사이의 온도구배를 살펴보면 20%블럭이 0%블럭보다 온도구배가 빠르다는 것을 알 수 있었다. 이는 열저항이 20%블럭이 0%블럭보다 높다는 것을 의미한다.

Fig. 16과 Fig. 17은 방열과정시 유입 냉각온도가 15℃이고 미세캡슐 함유량이 10%인 축열블럭이 유량변화에 대한 내부와 표면 온도변화를 보여주고 있다. 유량이 증가할수록 열전달 유체의 열전달 계수의 증가로 인하여 열회수 시간이 짧아져 방열시간이 감소를 하였다. Table 7은 유입냉각온도가 15℃이고 미세캡슐 함유량이 20%인 축열블럭의 유량변화에 대한 주기시간이 실려있다. 이러한 주기시간은 축열인 경우 축열블럭의 표면온도가 미세캡슐의 상변화 온도(58℃)까지 증가하는데 걸리는 시간으로 정의를 했고 방열인 경우 방열 실험 시작 후 20℃까지 강하하는데 걸리는 시간으로 정의하였다. 특히 유량이 0.4 l/min일 때와 0.5 l/min일 때는 거의 주기 시간과 온도분포에 있어서 차이를 보여주지 않았다. 즉 축열블럭에서 열을 회수하는 과정시 유량의 임계 상태가 존재함을 보여주었다.

Table 7. Cycle time on the variation of mass flow rate
(PCM concentration:20%, cooling temperature:15℃)

유량	축열시간(min)	방열시간(min)
0.2 l/min	270	240
0.3 l/min	240	190
0.4 l/min	180	180
0.5 l/min	180	160

Fig. 18과 Fig. 19는 축열과정시 입구온도가 70℃, 유량이 0.2 l/min인 조건에서 방열과정시 유입 냉각온도에 따라서 미세캡슐 함유량이 20%인 축열블럭

의 내부온도와 표면온도변화를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 열전달 매체의 유입냉각온도가 낮을 수록 온도강하가 빨랐고 시간이 지남에 따라 각각의 온도차는 증가를 하였다. 이런 결과로 인하여 축열블럭의 유입냉각 온도를 낮게 유지함으로써 해서 방열 주기 시간을 줄일 수 있다.

1) 열전달율

Fig. 20은 냉각 온도가 15℃, 유량이 0.2 l/min인 조건에서 방열과정시 시간 변화에 대한 열전달 유체가 축열블럭으로부터 회수하는 열전달율을 나타내고 있다. 이러한 열전달율은 구리관 입·출구 온도차의 함수로 주어지고 파이프 입·출구 온도차는 미세캡슐 함유량에 따라서 변하게 된다. 방열과정에서의 열전달율은 측정시간, Δt 동안에 일정하다고 간주하고 식(13)에 의해서 계산을 하였다. 즉 열전달율은 Δt 동안 일정하다고 간주하였는데 이러한 가정은 Δt 를 매우 작게 설정함으로써 해서 오차를 줄일 수 있다. 본 실험에서는 $\Delta t=1min$ 으로 설정하였다. 그리고 이러한 열전달율로부터 실제로 회수한 에너지를 계산하기 위해서 다음식을 사용하였다.

$$Q_d = \sum_{i=1}^n m C_p (T_{out} - T_{in}) \Delta t \quad (17)$$

결과 그림에서 알 수 있듯이 미세캡슐 함유량이 증가할수록 방열에너지는 증가하였다. 그리고 방열기간 초기에 열전달율은 각 축열블럭에 대해서 비슷하게 열을 방출하나 시간이 지남에 따라 미세캡슐 함유량이 다른 축열블럭들 사이에서 열전달율은 차이를 보였다. 이러한 사실은 캡슐 내에서의 상변화 활동을 설명해 주는 사실이다.

Table 8은 미세캡슐 함유량에 따라서 외기 온도(30℃)까지 강하하는데 방열되는 열량을 식(17)에 의해서 계산한 것이다.

Table 8. Integrated withdrawal energy with PCM concentration

미세캡슐 함유량	방열량
0%	45 Wh
10%	58 Wh
20%	82 Wh

Fig. 21은 미세캡슐 함유량이 20%이고 냉각 온도가 20℃인 실험조건에서 방열에너지 변화를 보여주고 있다. 유량이 증가할수록 방열에너지는 감소하는 경향을 보여주었다. 방열에너지는 유량이 증가할수록 방열초기에 방열에너지의 50%이상을 방열하고 이러한 결과로 인하여 방열에너지는 유량보다는 입·출구 온도차에 매우 민감하게 반응함을 알 수 있었다.

Fig. 22는 냉각 온도 변화에 따른 열전달율을 나타내고 있다. 냉각 온도가 낮을 수록 열전달율이 높게 나타났다. 즉 열전달 매체의 냉각 온도를 낮게 유지함으로써 축열블럭으로부터 열을 회수하는 양이 증가하게 된다. 또한 회수 시간이 짧으므로 미세캡슐이 같은 시간당 여러 번 상변화 과정을 거듭할 수 있다.

이러한 열전달율을 시간에 대해서 적분하면 각 주기 당 열회수량을 계산할 수 있는데 이를 살펴보면 Table 9와 같다. 냉각 온도가 10℃인 경우와 20℃인 경우를 살펴보면 방열량은 44Wh의 차이를 보였다. 유입 냉각온도가 낮을 수록 축열블럭과의 온도차가 커지므로 열전달율은 증가를 하였다. 특히, 냉각 온도가 20℃인 경우는 다른 경우보다 상당히 낮은 열전달율을 보여주었다.

Table 9. Discharging time and integrated withdrawal energy for heat transfer fluid cooling temperatures (PCM concentration:20%, flow rate:0.2 l /min, heating temperature:70℃)

입구 온도	방열 시간(min)	방열량(Wh)
10℃	45min	117.0 Wh
15℃	50min	99.1 Wh
20℃	55min	73.0 Wh

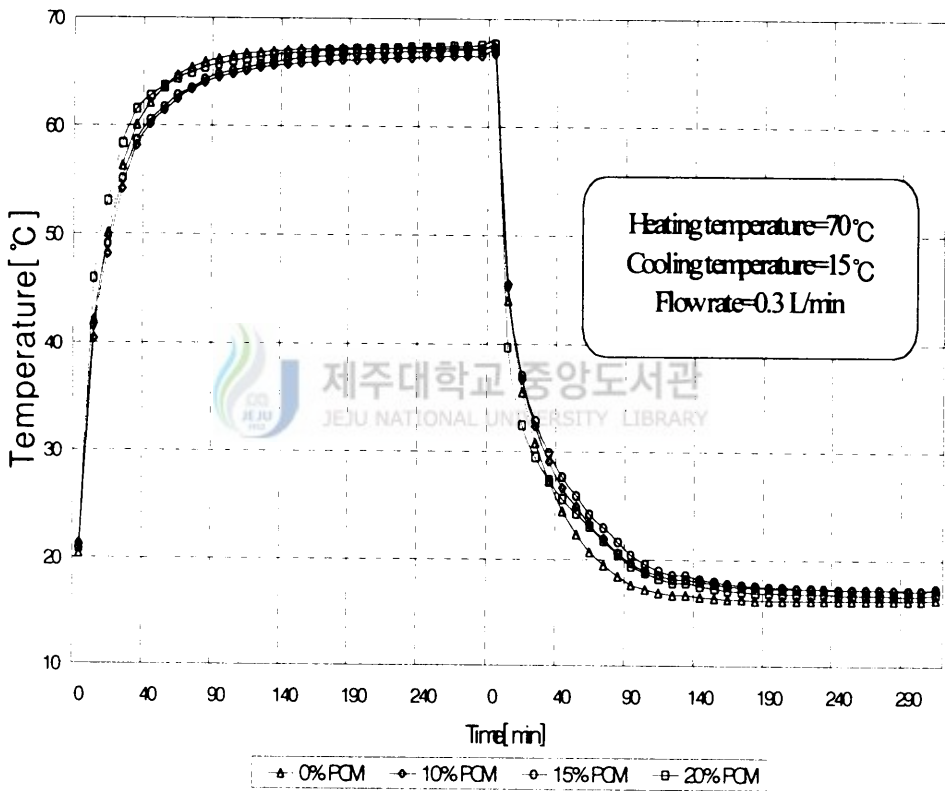


Fig. 9. Pipe surface temperature of the thermal storage brick

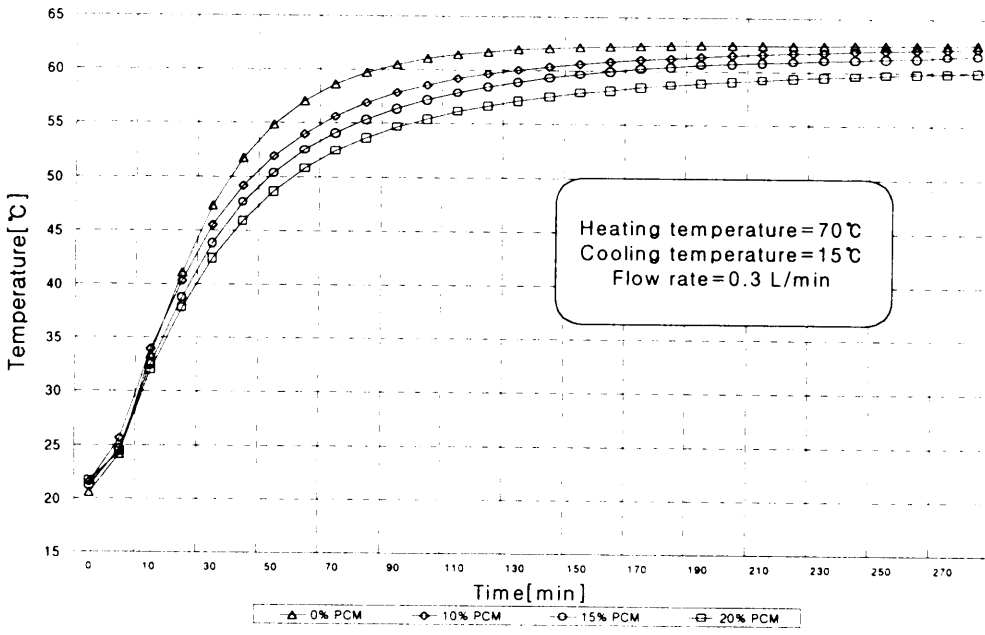


Fig. 10. Temperature variation of the internal position in storage brick during charging process

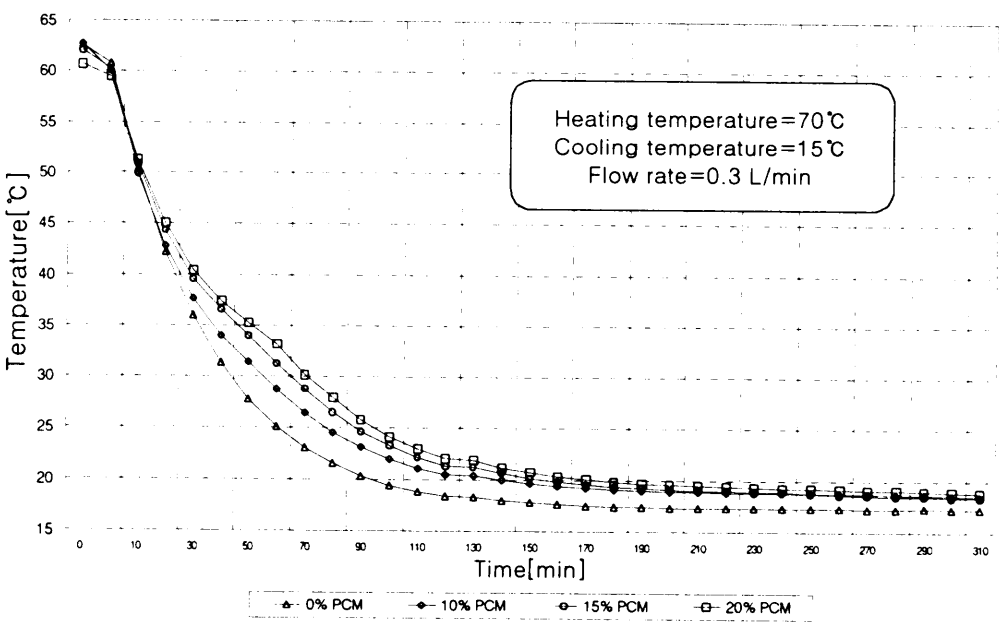


Fig. 11. Temperature variation of the internal position in storage brick during discharging process

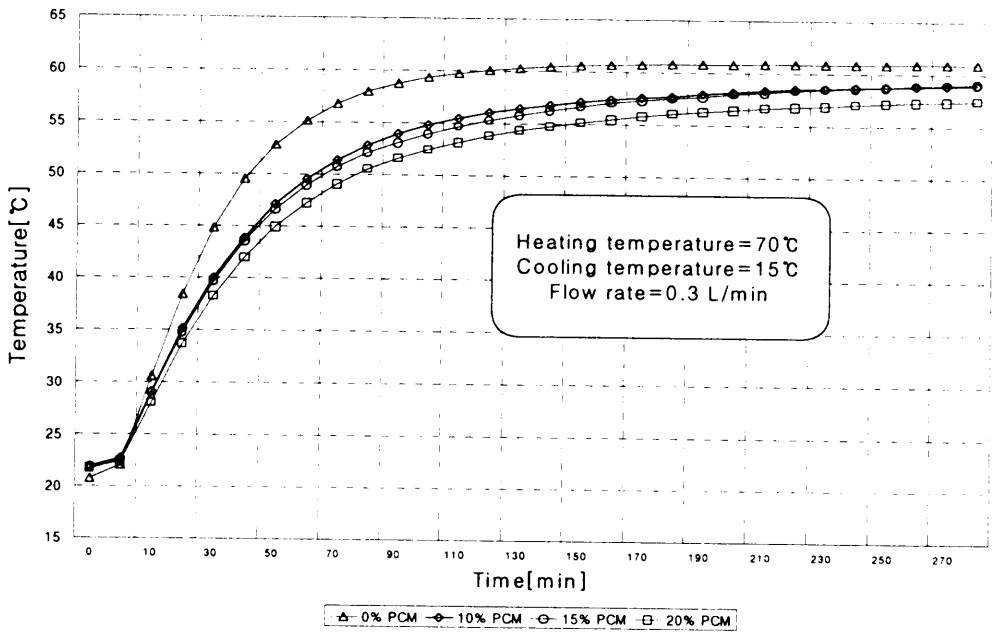


Fig. 12. Surface temperature variation of the thermal storage brick during charging process

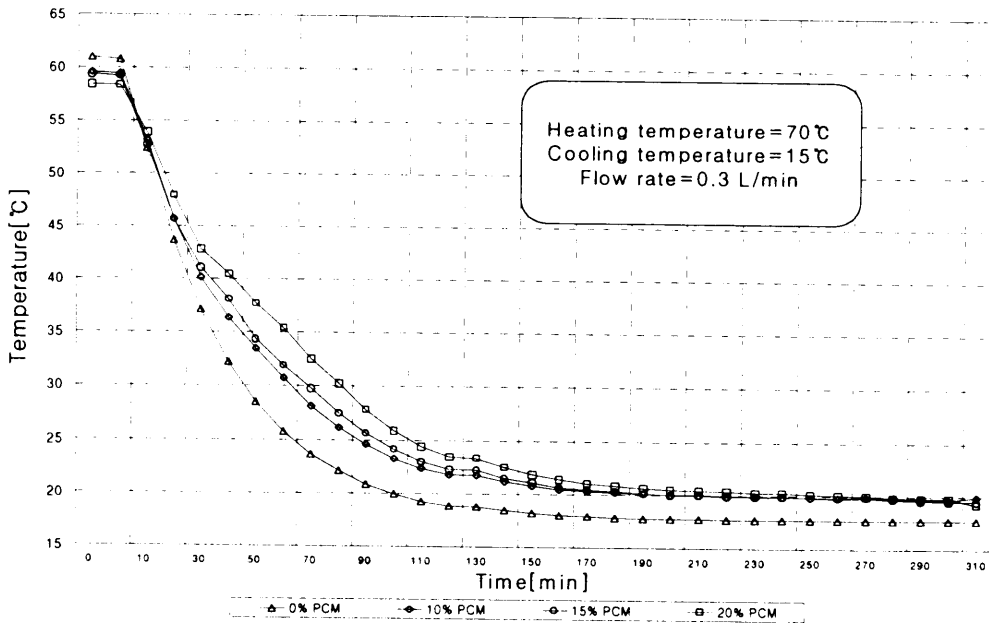


Fig. 13. Surface temperature variation of the thermal storage brick during discharging process

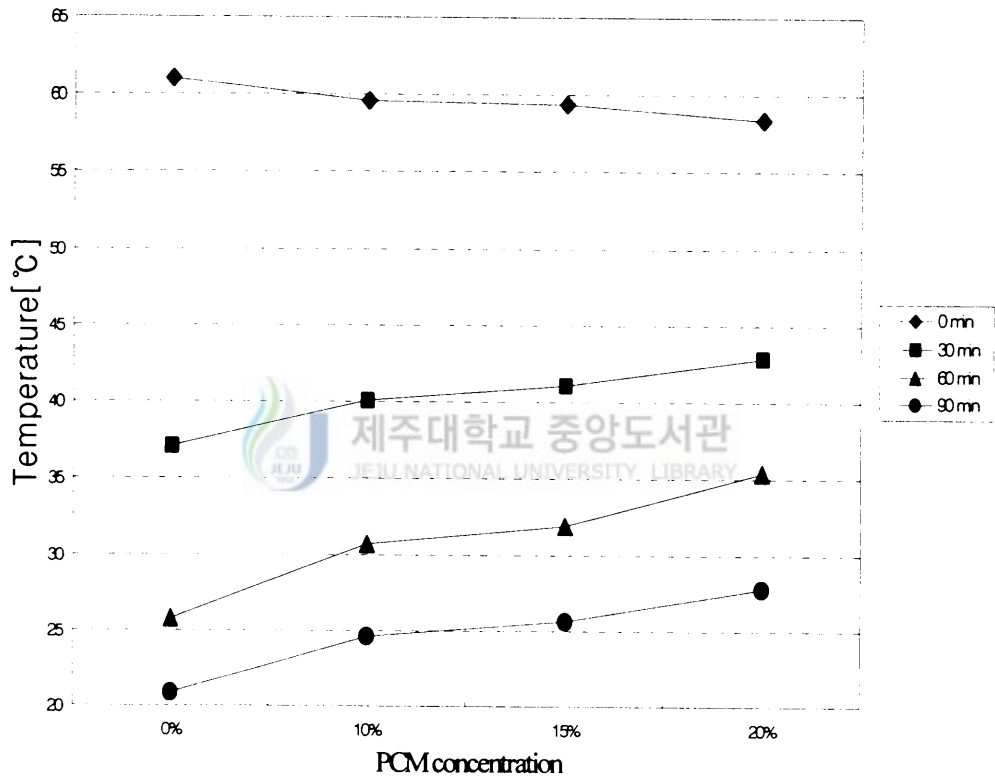


Fig. 14. Temperature variation on the storage brick surface
 temperature : 15°C, flow rate : 0.3 l /min,
 PCM concentration:20%)

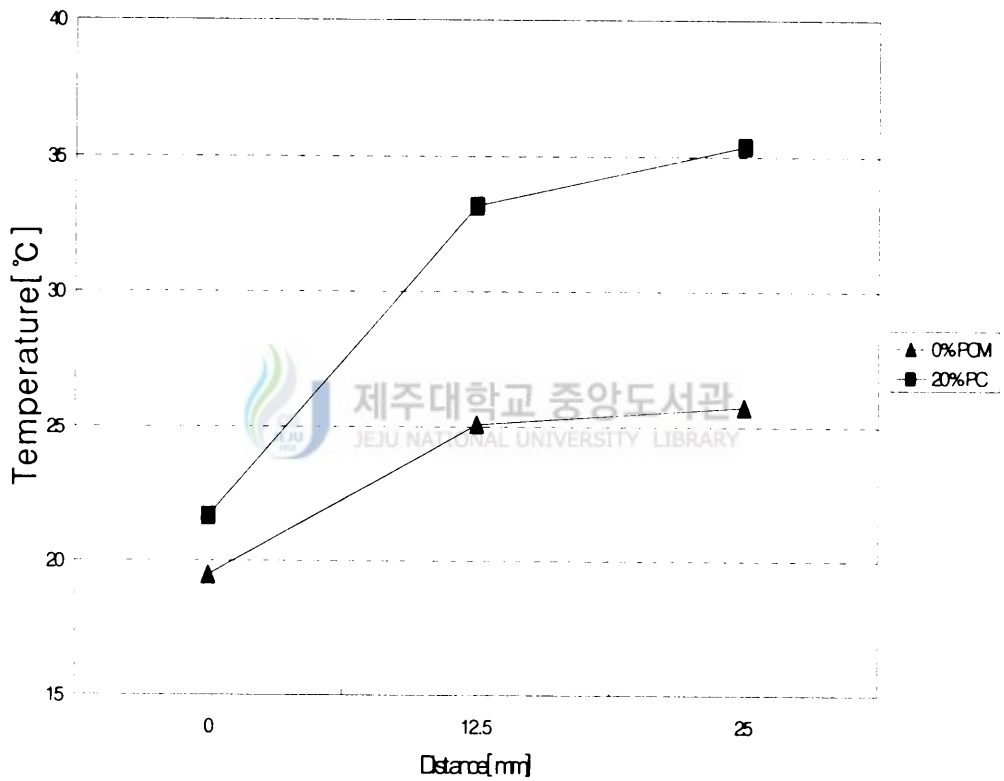


Fig. 15. Temperature variation with pipe radial distance
(cooling temperature : 15°C, flow rate : 0.3 l/min)

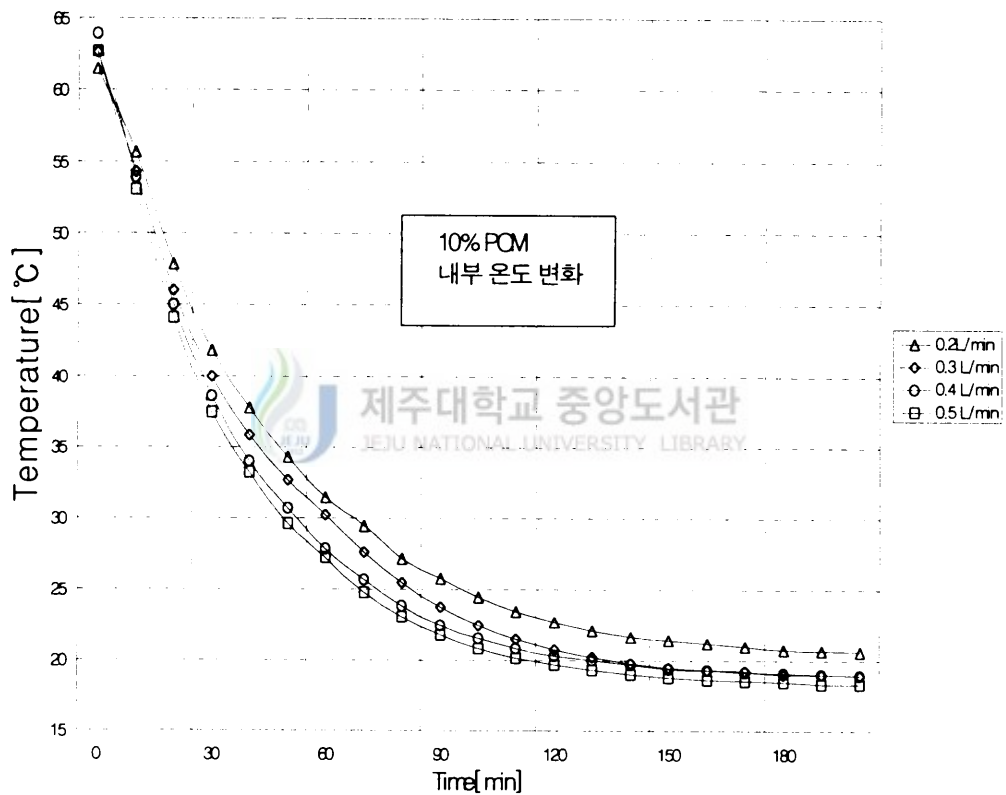


Fig. 16. Internal temperature variation for different mass flow rates (heating temperature : 70°C, cooling temperature : 15°C)

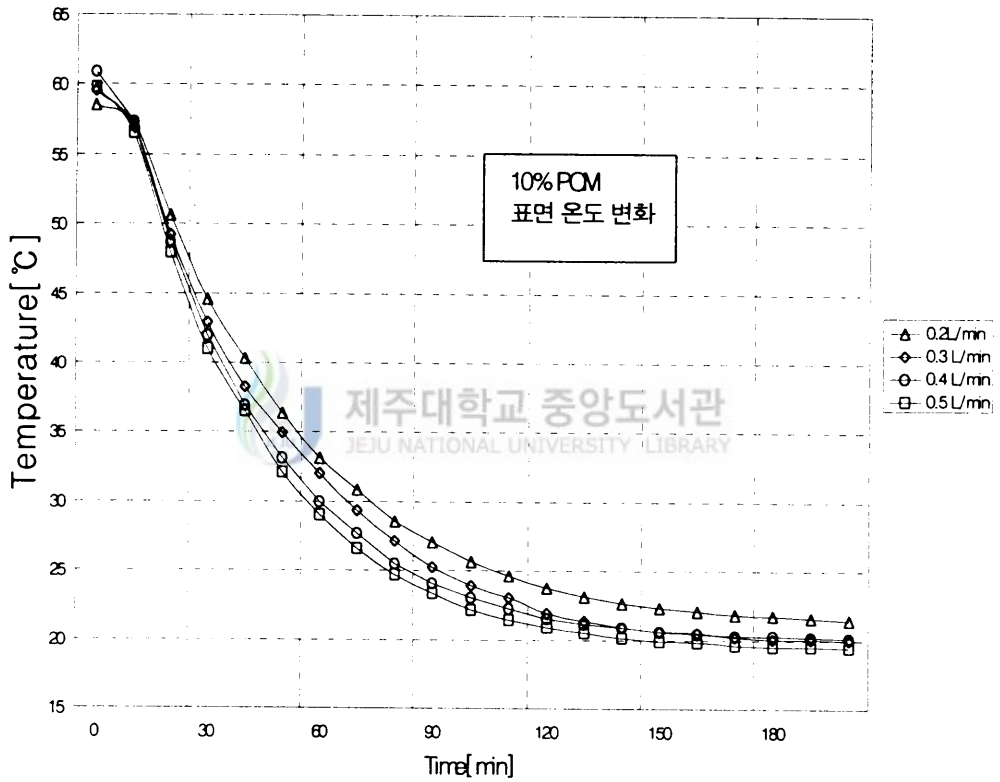


Fig. 17. Surface temperature variation for different mass flow rates (heating temperature : 70°C, cooling temperature : 15°C)

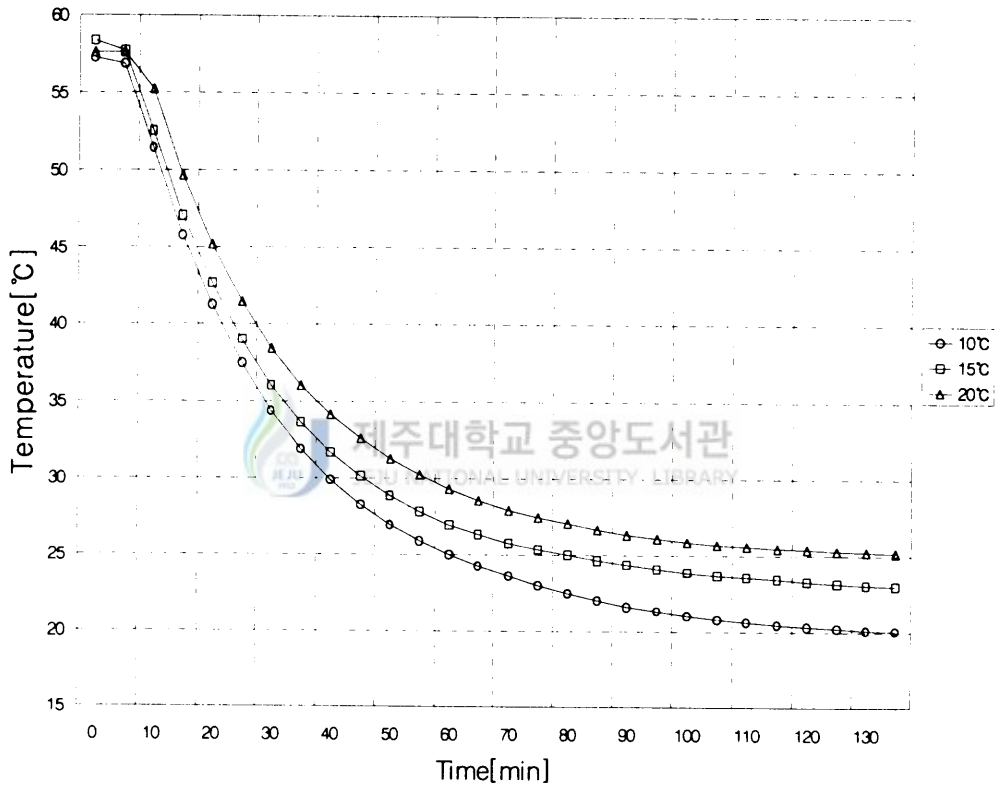


Fig. 18. Temperature variation of the internal position in thermal storage brick for different cooling temperatures during discharging process (PCM concentration:20%, flow rate:0.2 l /min, heating temperature: 70°C)

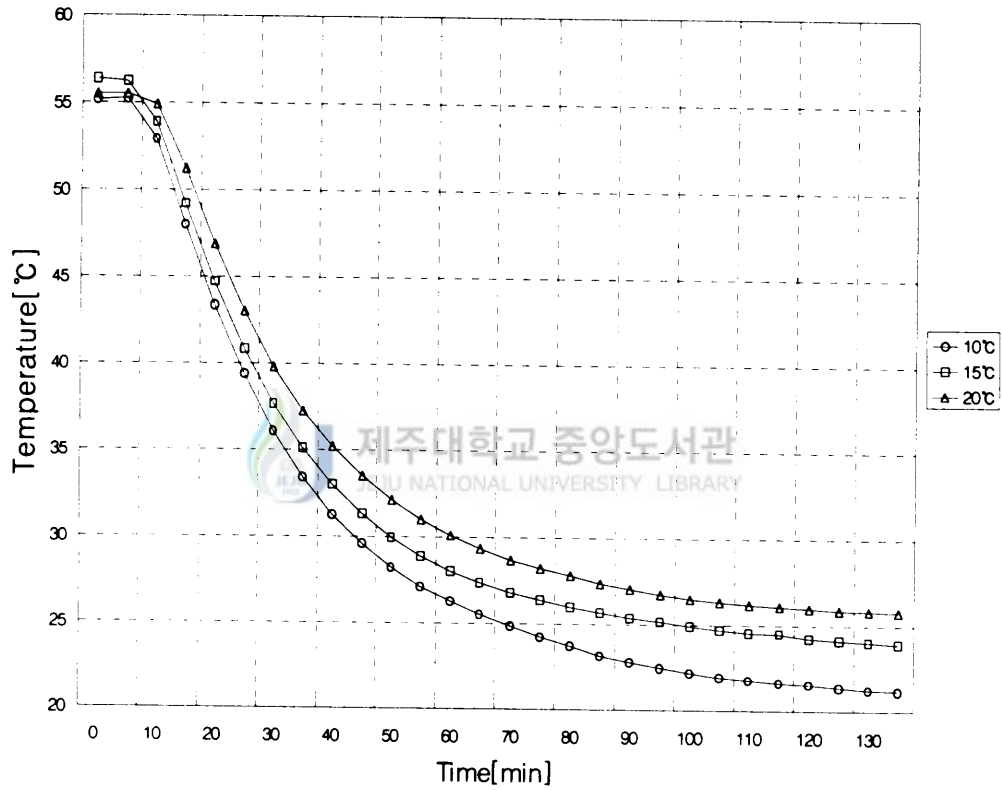


Fig. 19. Surface temperature variation of the thermal storage brick for different cooling temperatures during discharging process (PCM concentration:20%, flow rate:0.2 l /min, heating temperature:70°C)

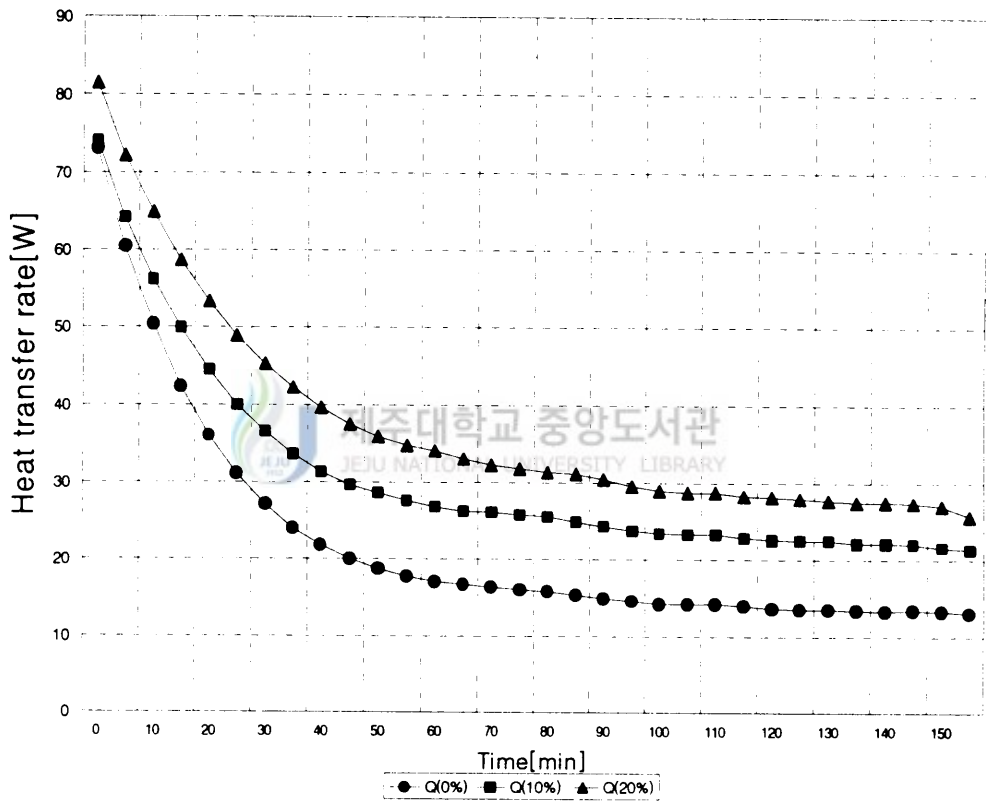


Fig. 20. Heat transfer rate with time for different PCM concentrations during discharging process (cooling temperature : 15°C, flow rate : 0.2 l/min)

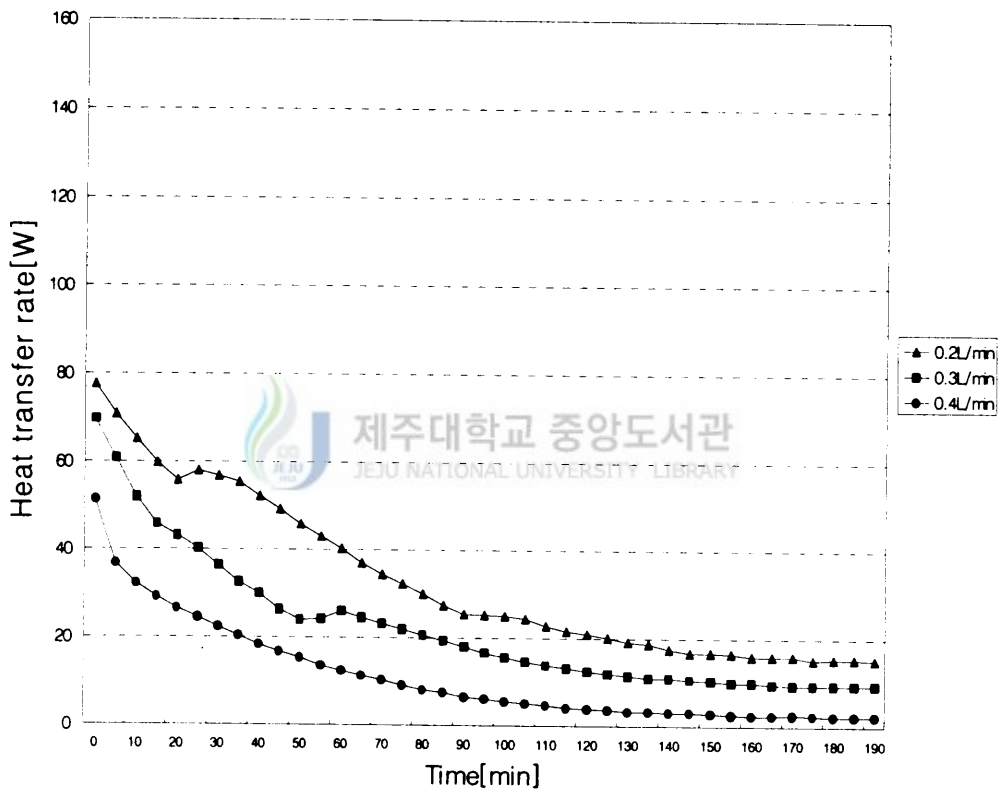


Fig. 21. Released energy rate for different mass flow rates (PCM concentration:20%, heating temperature:70℃, cooling temperature:20℃)

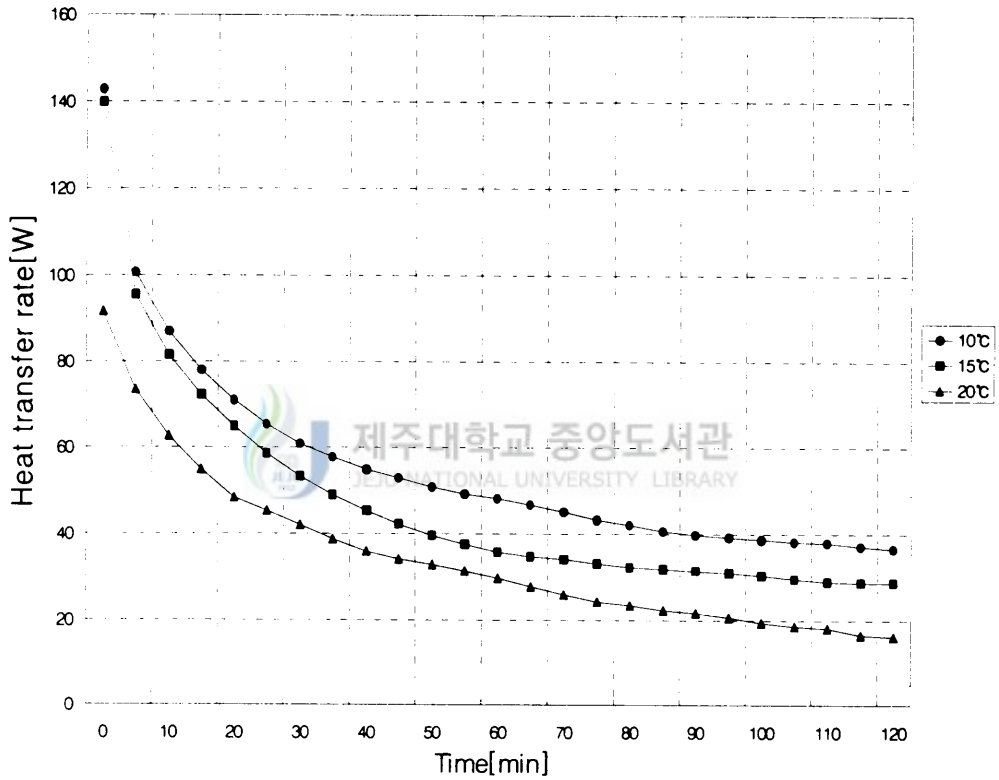


Fig. 22. Heat transfer rate for different cooling temperatures during discharging process
 (PCM concentration:20%, flow rate:0.2 l/min,
 heating temperature:70℃, environment temperature:29℃)

2. 총괄 열전달 계수(Overall heat transfer coefficient : U-value)

축열블럭의 방열과정시 열전달 유체가 흐르는 구리관 표면에서의 총괄 열전달 계수는 식(14)에서 정의를 하였다.

Fig. 23은 유입냉각온도가 15℃, 유량이 0.3 l/min인 실험 조건에서의 총괄 열전달계수(U값)의 변화를 보여주고 있다. 순수 축열블럭(함유량 0%)은 시간이 경과해도 일정한 U값을 유지하는 반면에 미세캡슐을 함유한 축열블럭은 시간에 따라 증가하는 경향을 보여주었다. 이는 시간이 지남에 따라 상변화 활동에 의한 잠열을 열전달 유체가 회수하고 이는 입·출구 온도차와 U값으로 나타나게 된다. 방열기간 초기에 미세캡슐 함유량이 다른 블럭들간의 U값은 일치하나 시간이 경과함에 따라 차이를 보였고 10%와 20%블럭의 경우 약 100분이 경과한 후 일정한 값에 도달하는 경향을 보였다. 그리고 10%블럭과 20%블럭사이의 U값의 차이보다는 미세캡슐 유무에 대한 차이가 약 200W/m²℃정도 높았다.

Fig. 24는 열전달 유체가 흐르는 구리관 반경방향의 무차원 거리에 대한 U값의 변화를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 축열블럭 내부의 열저항이 매우 크게 나타났다. 즉, 구리관과 열전달 유체사이의 열저항은 축열블럭 내부의 열저항에 비해서 매우 작다. 구리관과 축열블럭 내부와의 U값의 차이는 축열블럭 내부와 표면에서의 U값의 차이보다 매우 크게 나타났다. 구리관의 열전도도는 축열블럭의 열전도도와 비교해 볼 때 매우 크기 때문에 구리관에 의한 열저항은 무시할 수 있다. 그러므로 $Bi=hL/k$ 의 값이 매우 크므로 축열블럭내부에서의 온도 구배는 매우 큼을 알 수 있다. 일반적으로 미세캡슐을 함유함으로 해서 열전도도의 저하를 가져오는 문제가 있을 수 있으나 결과 그림에서도 보여지듯이 순수블럭과 10%블럭을 비교해 볼 때 구리관 표면과 축열블럭 내부 사이의 U값의 구배는 거의 비슷하고 20%블럭인 경우 이 보다는 조금 높았다. 이러한 결과로 캡슐을 함유함으로 해서 열전도도에서의 문제는 없는 것으로 사료되었다.

Fig. 25는 방열과정시 열전달 매체의 유입냉각 온도에 따른 축열블럭의 U값의 변화를 나타내고 있다. 시간에 따라서 U값은 증가하고 유입냉각 온도가 낮

을 수록 U값은 크게 나타났다. Fig. 25를 보면 미세캡슐 함유량이 높을수록 그리고 방열시 열전달 매체의 냉각 온도가 낮을수록 U값은 증가하였다. 그리고 유입냉각 온도가 20℃인 경우 80분이 경과한 후 U값은 감소하는 경향을 보여주었다. 즉, 축열 시스템에서 열을 회수하는 과정에서 열을 회수하는 매질의 온도가 이러한 온도보다 높을 경우 에너지를 적절하게 회수할 수 없음을 나타내고 있다.

Fig. 26은 열전달 매체의 유입냉각 온도와 축열블럭의 미세캡슐 함유량에 따른 U값을 보여주고 있다. 20% 축열블럭인 경우 열전달 매체의 유입냉각 온도가 높을 수록 U값은 감소를 하였다. 그러나 10% 축열블럭인 경우 유입냉각 온도가 10℃인 경우 보다 15℃인 경우가 U값이 오히려 더 높았다. 이러한 사실로 인하여 미세캡슐 함유량에 따라서 열을 회수하는 매질의 최적 온도를 결정할 수 있었다. 즉, Fig. 25와 Fig. 26의 결과로 축열블럭은 미세캡슐 함유량에 따라서 열을 회수하는 매질 온도의 상한치(upper limit value)와 하한치(lower limit value)가 존재함을 알 수 있었다.



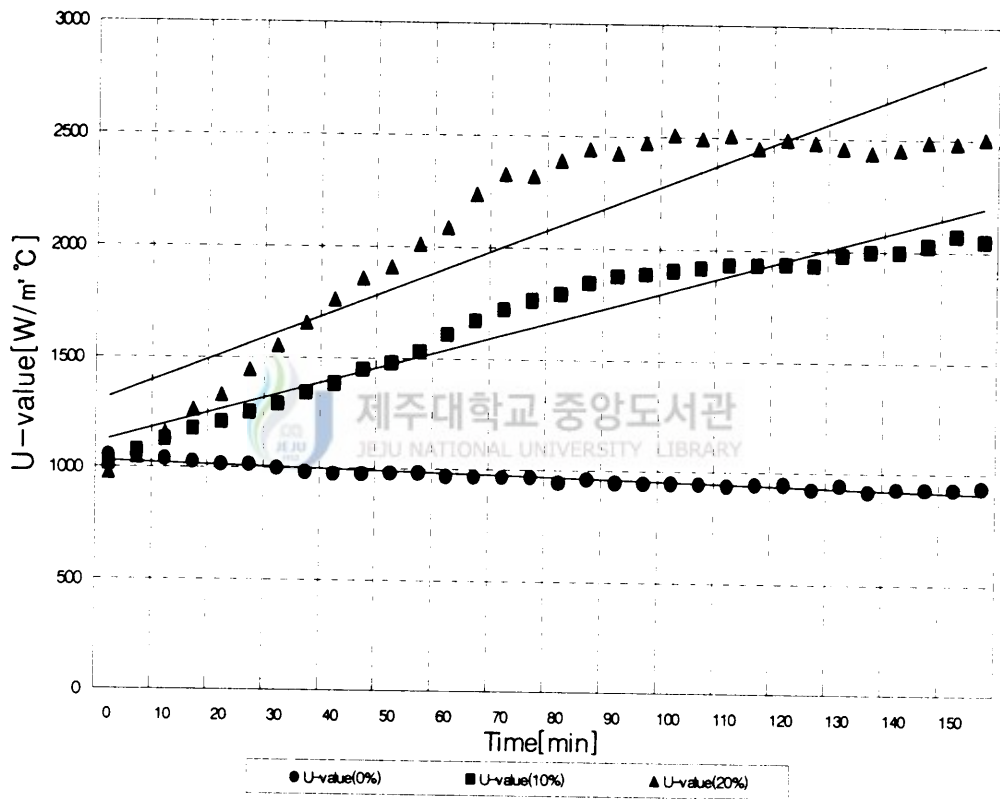


Fig. 23. U-value with time for different PCM concentrations
 (cooling temperature : 15°C, flow rate : 0.3 ℓ /min)

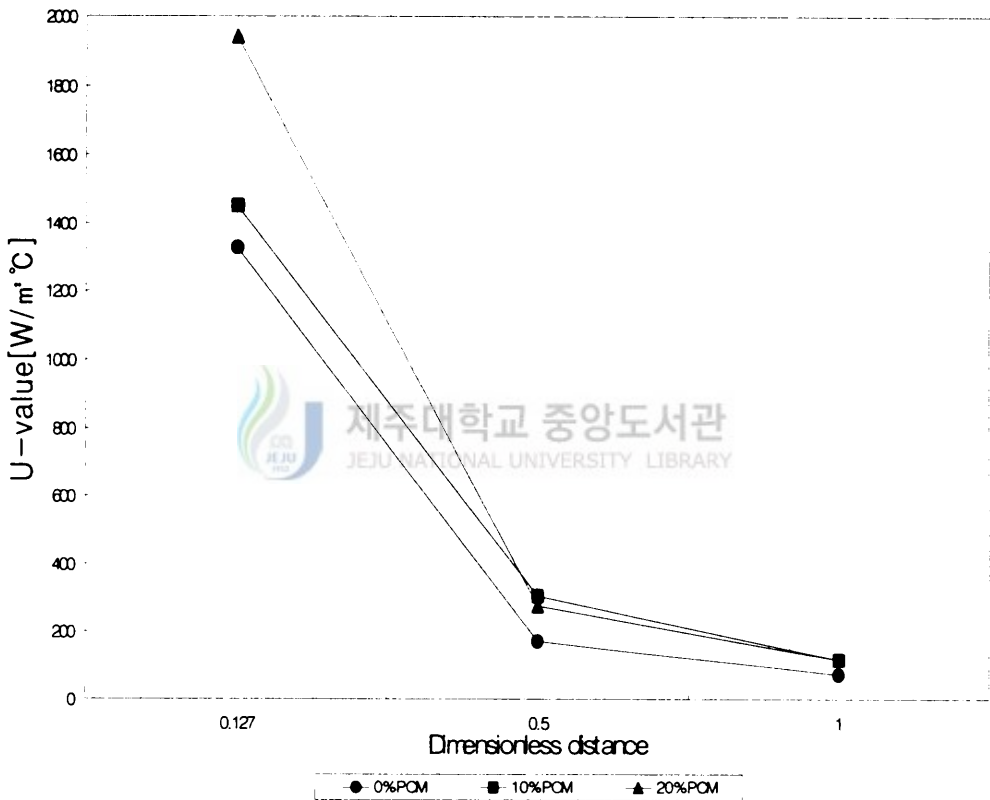


Fig. 24. U-value with dimensionless distance
 (heating temperature:70°C, cooling temperature:15°C,
 flow rate:0.2 l/min)

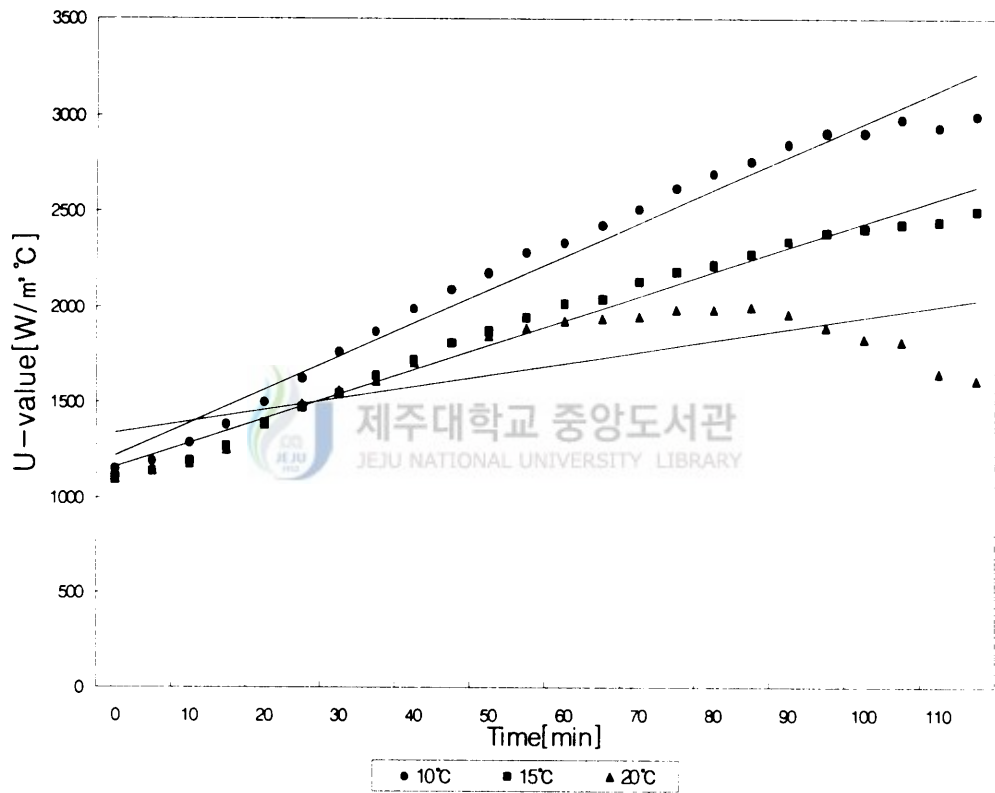


Fig. 25. U-value for different cooling temperatures
 (PCM concentration:20%, flow rate:0.2 l /min,
 heating temperature:70°C, environment temperature:29°C)

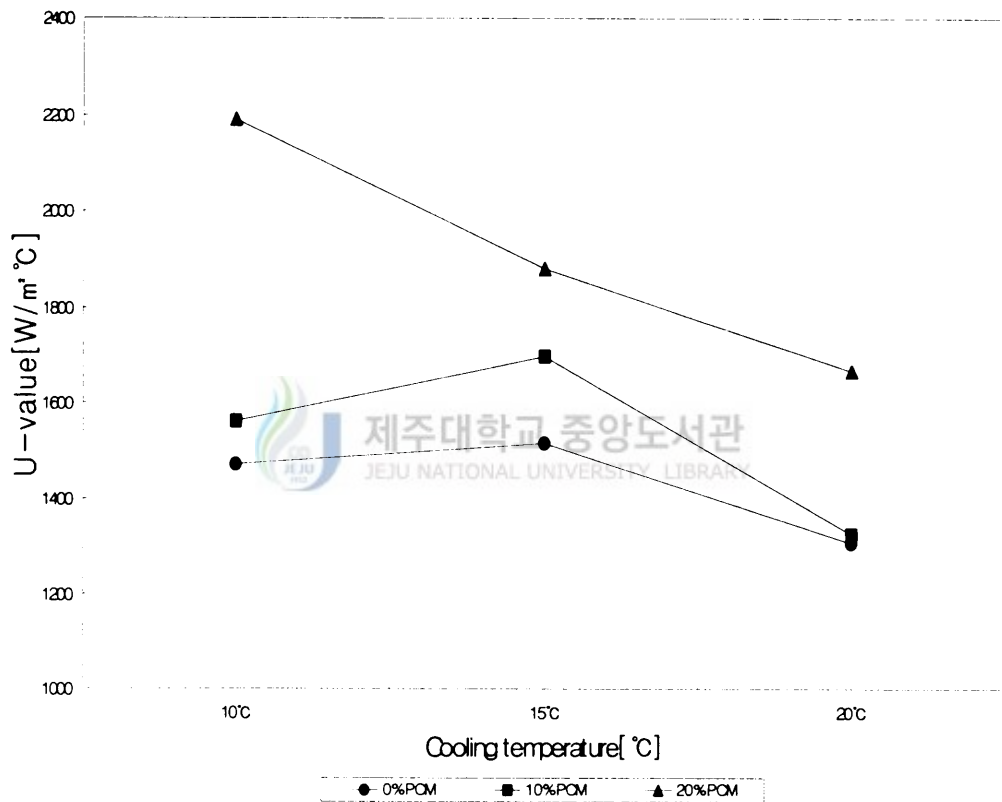


Fig. 26. U-value variation with cooling temperature
 (flow rate:0.2 l/min, heating temperature:70°C,
 environment temperature:29°C)

3. 유효도(Effectiveness)

유효도는 축열블럭의 열성능을 평가하기 위한 척도로서 이론적으로 축열블럭에 최대로 저장 가능한 에너지량과 실제 저장 가능한 에너지량의 비로 정의된다.

Fig. 27은 미세캡슐 함유량에 따른 유효도(effectiveness)를 보여주고 있다. 유효도는 총괄 열전달계수에 비례하므로, 미세캡슐 함유량이 증가할수록 유효도는 증가하는 경향을 보였고 순수블럭(함유량 0%)과 10%블럭과의 유효도 차이는 3.3%이고 20%블럭과의 유효도 차이는 10.1%를 나타내었다.

Fig. 28은 미세캡슐 함유량과 방열과정시 유입냉각온도에 따른 각 축열블럭의 유효도를 나타내고 있다. 미세캡슐 함유량이 20%인 축열블럭은 유입냉각온도가 증가함에 따라 감소하는 반면에 미세캡슐 함유량이 10%인 축열블럭인 경우 유입냉각온도 15℃일 때가 10℃일 때보다 높게 나타났다. 이러한 결과는 총괄열전달계수가 보였던 결과와 일치하였다. 즉, 미세캡슐 함유량에 따라서 열을 회수하는 매질의 임계온도(critical temperature)가 다름을 알 수 있었다. 각 실험에 대한 유효도는 미세캡슐 함유량 20%이고 유입냉각 온도가 10℃일 때 63%로 가장 높았다.



Fig. 27. Average effectiveness with PCM concentration
 (heating temperature:70℃, cooling temperature:15℃,
 flow rate:0.2 ℓ /min)

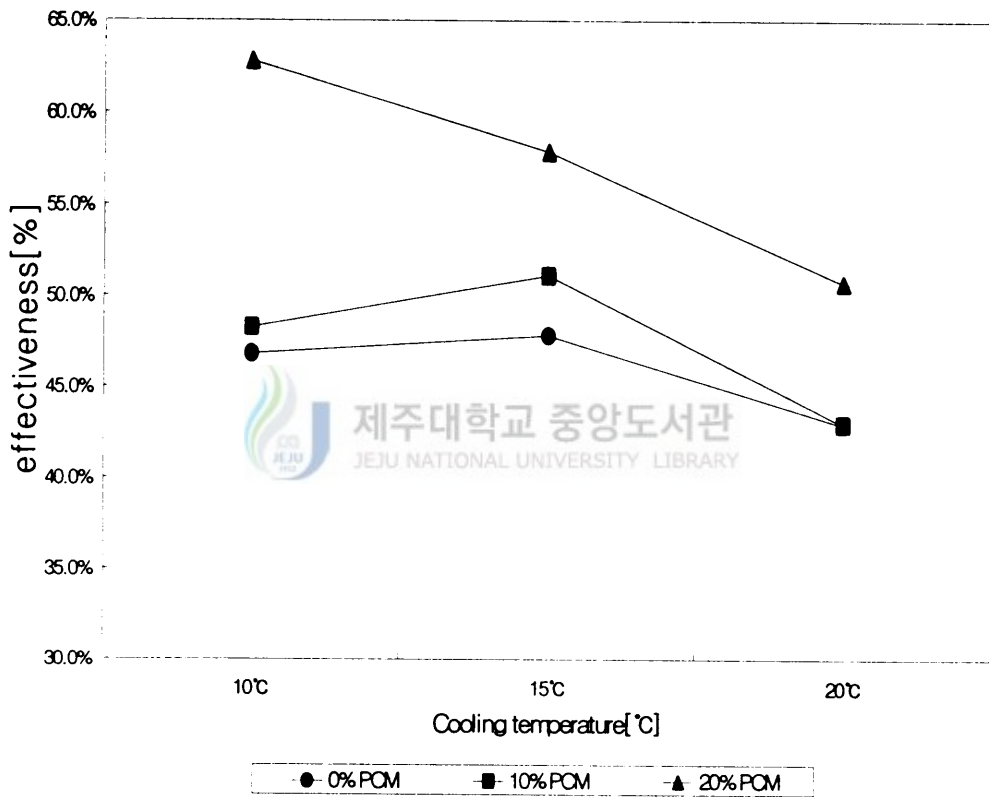


Fig. 28. Average effectiveness with cooling temperature (flow rate:0.2 l /min, heating temperature:70°C, environment temperature:29°C)

V. 결론

미세캡슐을 함유한 난방용 축열블럭의 축열 및 방열 시험은 각각 미세캡슐 함유량이 다른 4개의 축열블럭에 대해서 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 축열블럭의 축열 및 방열 시간(cycle time)은 미세캡슐 함유량이 증가함에 따라 증가하고 유량이 증가할 수록 감소를 하였다. 그리고 방열과정시 유입 냉각온도가 낮을 수록 주기시간은 감소를 하였다.
2. 상변화형 미세캡슐을 함유한 축열블럭은 축열과정시 과열현상을 방지하고 방열과정시 미세캡슐 내에서의 잠열방출로 인하여 구리관 반경방향으로 균일한 온도분포를 나타내었다.
3. 열전달율은 미세캡슐 함유량에 비례하나 방열과정시 유입냉각온도에 반비례하였고 시험기간동안 방출열량은 미세캡슐 함유량이 0%인 블럭인 경우 45Wh, 10%블럭인 경우 58Wh, 20%블럭인 경우 82Wh를 방열하였다.
4. 총괄 열전달계수(U-value)는 미세캡슐 함유량이 0%인 블럭에서는 시간에 따라 일정한 값을 유지하는 반면에 미세캡슐을 함유한 축열블럭은 시간에 따라 증가를 하였다.
5. 평균 총괄 열전달 계수는 방열과정시 유입냉각온도가 10℃일 때 미세캡슐 함유량이 0%인 블럭과 20%블럭에서의 차이는 720W/m²℃로 가장 큰 차이를 나타냈다.
6. 방열과정시 열전달 매체의 유입냉각온도의 임계온도(critical temperature)가 미세캡슐 함유량에 대해서 다르게 나타났다.
7. 유효도는 미세캡슐 함유량이 0% 블럭인 경우 48%, 10% 블럭인 경우 51%, 20% 블럭인 경우 58%를 나타내었고 유입냉각온도가 10℃이고 미세캡슐 함유량이 20%인 블럭인 경우 63%로 가장 높게 나타났다.

VI. 참고문헌

- A. Abhat, 1983, Low Temperature Latent Heat Thermal Energy Storage: Heat Storage Material, *Solar Energy*, Vol. 30, pp. 313~332.
- 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.
- Masayuki Kamimoto *et al.*, 1980, Investigation of Nitrate Salts for Solar Latent Heat Storage, *Solar Energy*, Vol. 24, pp. 581~587.
- Mehmet Esen *et al.*, 1996, Development of a model compatible with solar assisted cylindrical energy storage tank and variation of stored energy with time for different phase change materials, *Energy Convers. Mgmt.*, Vol. 37, No. 12, pp. 1775~1785.
- Hiroshi Kimura, Junjiro Kai, 1985, Phase Change Stability of Sodium Acetate Trihydrate and its Mixtures, *Solar Energy*, Vol. 35, No. 6, pp. 527~534.
- D. J. Morrison, S. I. Abdel-Khalik, 1978, Effects of phase-change energy storage on the performance of air-based and liquid-based solar heating systems, *Solar Energy*, Vol. 20, pp. 57~67.
- Takeo S. Saitoh, *et al.*, 1996, Experimental Investigation on Combined Close-contact and Natural Convection Melting in Horizontal Cylindrical and Spherical Capsules, *IEEE*, pp. 2090~2094.

Yasushi Yamagishi, *et al.*, 1996, An Evaluation of Microencapsulated PCM for Use in Cold Energy Transportation Medium, IEEE, pp. 2077~2083.

P. Charunyakorn, *et al.*, 1991, Forced convection heat transfer in microencapsulated phase change material slurries: flow in circular ducts, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 34, No. 3, pp. 819~833.

Y. Cao, A. Faghri, 1991, Performance characteristics of a thermal energy storage module: a transient PCM/forced convection conjugate analysis, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 34, No. 1, pp. 93~101.

ASHRAE Standard 94.1-1985, 1991, Method of Testing Active Latent-Heat Storage Devices Based on Thermal Performance, pp. 1~10.

한국에너지기술연구소, 1996, 태양에너지의 효율적 이용을 위한 상변화 물질의 미세캡슐화, 보고서, pp. 111~142.

곽희열, *et al.*, 1998, 미세캡슐 잠열재를 사용한 축열장판의 열성능 연구, 공기조화냉동공학회, pp. 978~983.

조수, 손장열, 1992, 잠열저장패널이용 바닥난방공간의 실내온도분포에 관한 연구, 태양에너지, Vol. 12, No. 1, pp. 59~71.

감사의 글

어느덧 2년이란 세월이 흘러 졸업을 앞두고 있는 지금 이렇게 보잘것 없는 논문을 마치고 보니 아쉬움이 많이 남습니다.

한국 에너지 기술 연구소에서 배움의 장을 열어주신 강용혁 박사님께 진심으로 감사를 드리고 곽희열 박사님, 이의준 박사님, 윤종호 박사님, 윤환기 선생님, 유창균 선생님께 감사를 드립니다.

그리고 연구소에서 공부할 수 있도록 도와 주신 천원기 교수님께 감사를 드리고 이윤준 교수님, 조경호 교수님, 이현주 교수님, 박재우 교수님, 김신 교수님께 감사를 드립니다. 또한 연구소를 처음 소개해 준 김휴찬 선배님께도 감사를 드리고 에너지 공학과 조교 선생님께도 감사를 드립니다.

연구소 생활에 활력소를 불어넣어 주신 기세형, 준언이형, 창범씨, 정균씨, 보령씨에게도 고마움을 전합니다. 그리고 연구소 1년 생활이 즐겁고 재미있게 보낼 수 있도록 도와 준 동료 명철이게 진심으로 고마움을 전합니다. 짜증내지 않고 학교 소식을 전해 주고 최종 논문 검토까지 보아준 경진이형에게도 진심으로 고마움을 전합니다. 또한 연구소에 와 있으면서 연락을 전혀 못한 희갑이형과 형적이형에게도 미안한 마음 전합니다. 그리고 후배 성택이, 보안이에게도 고마움을 전합니다. 마지막으로 부모님께 진심으로 감사를 드립니다.