

【 論文 】

$\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 의 축열방열시

열전달특성에 관한 실험적 연구

An experimental study of heat transfer with $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ as P.C.M.

이 채 문* 임 장 순**
C. M. Lee C. S. YIM

ABSTRACT

Sodium pyrophosphate that melting point is 79-80°C have been Studied on heat storage and heat discharge.

In heat storage process, sodium pyrophosphate was kept up initial temperature 50°C, 60°C, 70°C which melt by heated water at temperature 85°C, 90°C, 95°C. In heat discharge process, initial temperature of sodium pyrophosphate was maintained at temperature 85°C, 90°C, 95°C which varied cooling temperature 50°C, 60°C, 70°C.

The experiment has been reached conclusions as follows.

- 1) Heat transfer properties of phase change material is controlled by conduction during heating and cooling process.
- 2) The temperature increased rapidly at initial stage and transient region increase slowly because of characteristic of latent heat.
- 3) The lower cooling water temperature is the less the time that get to thermal equivalent state take during discharge process.
- 4) The higher cooling water temperature is the less temperature difference between top and bottom in P.C.M during discharge process.

NOMENCLATURE

C : Specific heat of water
 C_{liq} : Liquid phase specific heat

C_{sol} : Solid phase specific heat
K : Liquid or solid phase thermal conductivity
 \dot{m} : Mass flowrate of water
M : Melted or frozen mass
 M_{tot} : total mass of phase change material
Q : Quantity of heat transfer from water
 Q_{tot} : total heat capacity of phase change

* 정회원 : 유한공전

** 정회원 : 인하대공대

- material
- r : Radius of solid - liquid interface
 - r_w : Radius of tube wall
 - t : time
 - T : Temperature range of water
 - T_b : Liquid or solid bulk temperature
 - T_i : initial temperature of liquid or solid
 - T_m : Phase change temperature
 - T_o : Mean temperature of melted or frozen mass
 - T(r) : Temperature distribution in liquid or solid
 - λ : Latent heat of phase change material
 - η : Coefficient of heat loss
 - ρ : Liquid or solid phase density

1. 서 론

에너지의 저장은 부존에너지원이 빈약한 국내 여건과 에너지의 효율적 활용의 측면에서 중요하며, 효율적 에너지 활용의 방법에는 공장의 폐열, 값싼 심야 잉여전력, 태양열의 저장 등을 들 수 있다.^{1,2,3)}

최근 에너지 저장에 관한 연구는 새로운 축열방식으로 주목되는 상변화물질을 축열매질로 이용하는 잠열이용형 축열방식에 대하여 많은 연구가 수행되고 있으며, 잠열이용형 축열조를 주거난방에 사용할 경우 단위체적당 축열밀도가 크기 때문에 주거난방에 사용할 경우 축열조의 크기가 적어지므로 축열조의 장소선택이 비교적 자유롭고 비용이 적게드는 장점이 있다.

주거난방에 사용할 수 있는 잠열축열제로서는 온도범위, 잠열용량의 크기, 과냉도, 열전도도, 가격, 비독성 등의 조건을 충족시키는 저온상변화물질 이어야하며, 그 예로서 파라핀류와 무기염수화물류를 들 수 있다.⁴⁾ 파라핀류의 경우에는 무기염수화물에 비해 열

전도도가 낮고 가격이 고가이기 때문에 무기염수화물류를 저온축열제로 이용할 경우 실용적인 가치가 높다.

본 연구에서는 무기염수화물류인 용융점이 79-80°C이고 순도 100%인 Sodium Pyrophosphate (Na₄P₂O₇·10H₂O)의 열전달특성을 규명하기 위하여 초기온도와 순환수의 온도를 변화시켜 축열, 방열현상을 실험적으로 검토하였다.

2. 이론적 해석

본 실험은 상변화물질을 축열매질로 하는 내향형 (inward melting, solidification) 용융응고과정에서 열전달현상을 연구하였고, 온도경계조건은 상변화물질이 채워진 용기 상하부의 단열조건, 용기벽면 온도경계조건은 순환수를 순환시키는 방법을 이용한 벽면등온조건에 대하여 수행하였다. 이때 열량의 계산은 두 가지 방법으로 계산할 수 있는데 그 중 하나는 유출입하는 순환수의 유량과 온도차를 측정하여 계산하는 방법과 또 하나는 용융, 응고된 상변화물질의 질량 혹은 체적을 측정하여 계산하는 방법이다. 순환수가 상변화물질에 전달하여 축열, 방열된 열량은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$Q = \eta \int_T [\int_t \dot{m} C dt] dT \quad (1)$$

여기에서 \dot{m} 는 유출입한 물의 질량유량이고, C는 물의 단위질량당 비열이며, dT는 입출구에서 온도차이며, η는 불완전한 단열로 인한 방열손실을 고려한 효율계수이다. 그리고 축열, 방열과정에서 상변화물질과 용기로 전달되는 열량은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$Q_{tot} = \lambda M + |MC_{sol}(T_m - T_o)| + |M \int_{T_m}^{T_i} C_{liq} dT| + |(M_{tot} - M) \int_{T_b}^{T_i} C_{liq} dT| \quad (2)$$

여기서 첫째항은 상변화물질의 응고용융과정에서 추출된 잠열량이고, 둘째항은 상변화온도 이하의 온도범위에서 현열이며, 셋째항은 상변화온도 이상의 온도범위에서 현열이며, 넷째항은 상변화가 완전히 이루어지지 않고 잔류하는 잔류상변화물질이 갖는 현열이다. 여기서 T_m 은 상변화물질의 상변화온도이며, T_b 는 잔류상변화물질의 bulk temperature, C_{sol} 은 고체 상변화물질의 비열이며, C_{liq} 는 액체 상변화물질의 비열이고, T_o 는 상변화가 이루어진 상변화물질의 평균온도로 다음과 같이 계산된다.

$$T_o = \frac{\int_{r_i}^{r_w} T(r) \rho 2\pi r dr}{\int_{r_i}^{r_w} \rho 2\pi r dr} \quad (3)$$

여기서 r_w 는 PCM용기의 반경이고, r_i 는 상변화한 상변화물질의 반경이며, ρ 는 액체, 고체 상변화물질의 밀도이다.

$T(r)$ 은 상변화한 상변화물질의 반경방향 온도 분포로서 준정적 model을 가정하고 경계조건 ($r=r_i$ 에서 $T=T_i$ 이고 $r=r_w$ 에서 $T=T_w$)을 에너지 방정식 $d(Kr dT/dr) = 0$ 에 대입함으로써 얻어질 수 있다.

3. 실험장치 및 실험방법

3.1 실험장치

본 실험에 사용한 실험장치의 개략도는 Fig.1에 나타나 있고 상변화 물질이 채워진 용기의 상세도는 Fig.2에 나타내었다. 실험장치의 주요부는 저온항온조 ①, 온도조절장치 ②, ③, 고온항온조 ④, Heater ⑤, 순환펌프 ⑥, 상변화물질이 담긴 용기 ⑦, Data logger ⑧ 및 기타 측정장치 등으로 이루어져 있다. PCM 물질이 담긴 용기 ⑦를 중심으로 왼쪽 부

분은 상변화물질의 초기온도 평형상태를 맞추기 위한 저온항온조로서 100 L 용량이며 3KW 용량의 전기 히터로 내장하여 온수를 가열하고 순환 Pump 로 (한일순환펌프 PDB-86) PCM 용기 주위를 순환 시켰다. 이때 순환수는 유량계를 거쳐 PCM 용기 주위를 순환하여 다시 저온항온조로 순환된다. 그리고 저온항온조 주위는 외부와 단열을 위하여 Glass wool 과 Styrofoam을 피복시켰고 저온항온조와 PCM 용기 사이의 배관용 강관과 고무호스는 단열재로 단열하였다.

가열항온조의 온도 조절은 자동온도 조절장치 (정도 0.1 °C)를 사용하였고 이것은 가열항온조의 온도를 감지하고 이와 연결된 전기 개폐기 (일명 Magnetic Switch)로 전기적 신호를 보내어 Slidac을 통하여 조절된 전력을 공급, 차단하여 항온조 내의 온수를 일정 온도로 유지하였다. 또한 상변화물질이 담긴 용기는 내경 70 mm, 높이 300 mm, 두께 2 mm인 동관을 사용하였으며 Fig.2에 나타낸 바와같이 관 내의 벽면을 등온으로 유지 하기 위하여 내경 95 mm, 110 mm의 이중관을 사용하여 재순환시켰다. 이때 이중관 내부의 유속은 2.5 m/s로 유지 하였다.

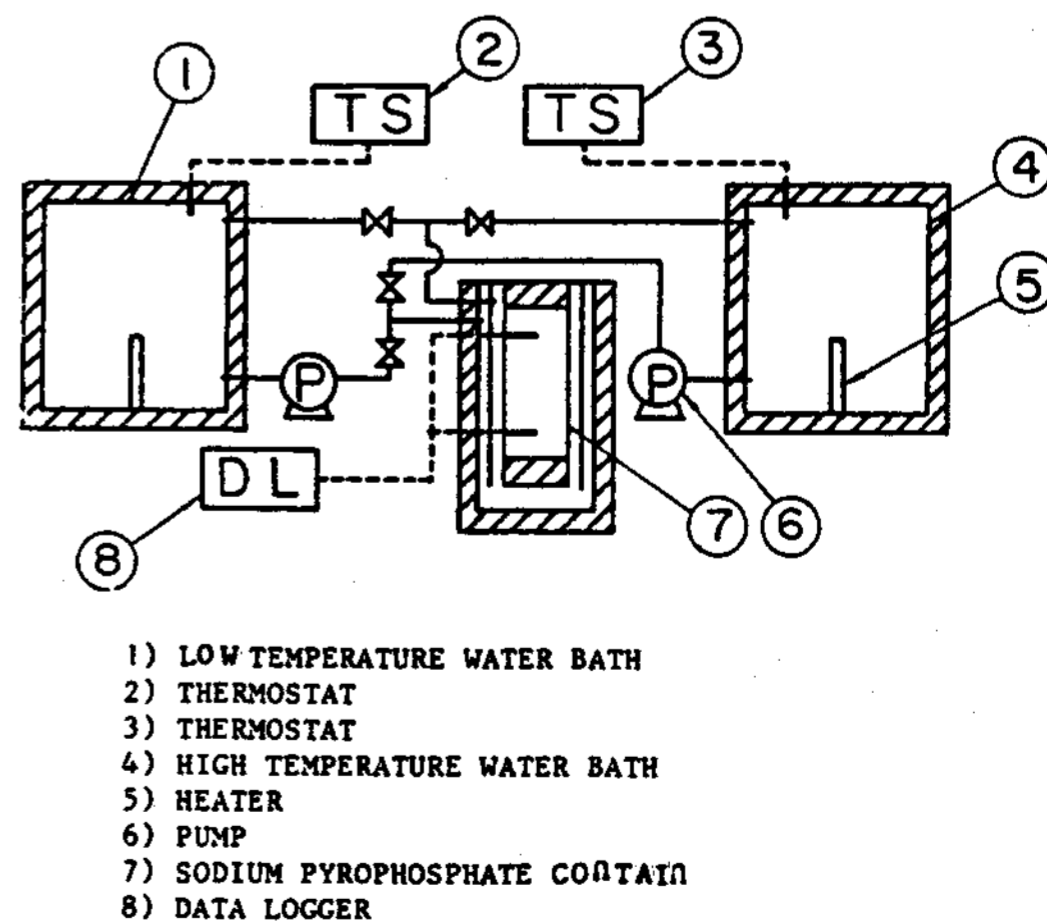
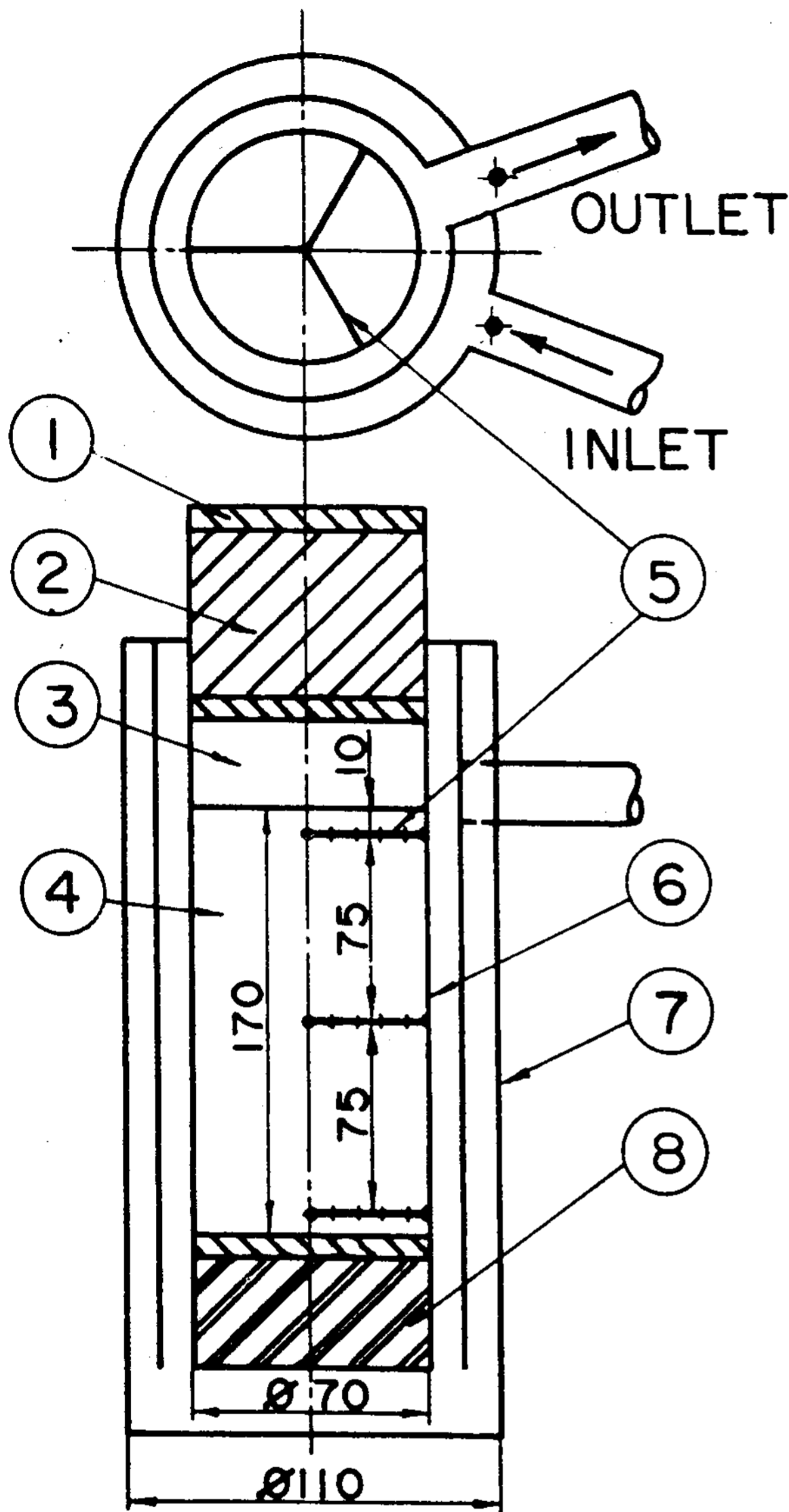


Fig. 1 Schematic Diagram of Experimental Apparatus



- 1) PLEXYGLASS DISK
- 2) STYROFOAM DISK
- 3) AIR GAP
- 4) SODIUM PYROPHOSPHATE
- 5) THERMO COUPLE
- 6) CYLINDRICAL CONTAINMENT VESSEL
- 7) STEEL PIPE (110 mm) THERMOCOUPLE POSITION
- 8) GLASS WOOL

Fig. 2 Detail of the Test Section

PCM용기의 상하부는 두께 45 mm Styroform으로 단열하였으며, PCM이 Styroform에 흡수되는것을 막고 표면의 마찰저항을 줄이기 위하여 8 mm의 Plaxyglass disk을 부착하

였다. PCM용기의 단열은 Glass wool로 하였다.

냉각실험 진행중 PCM 내부의 온도분포 및 시간의 경과에 따른 온도의 변화를 측정하기 위하여 열전대 (type T 0.5 mm)를 설치하였으며 열전대의 위치는 Fig 4-3에 나타난 바와 같이 Y/H=1.0, 0.5, 0.0인 지점에 r/Rw= 1.0, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2, 0.0,인 위치에 각각 6개씩 18개 입구관 2개, 출구관 2개, 가열향온조 1개, 냉각향온조 1개, 총 24개의 열전대를 설치하였다.

3.2 실험방법

본 실험에서 사용한 상변화물질은 sodium pyrophosphosphate (Na₄P₂O₇·10H₂O, 일본 Shiyo pure chemical)이며 물성치는 아래와 같다.

본 연구에서 수행한 실험범위는 온도경계 조건이 상하부는 단열, 그리고 벽면은 등온조건으로 하여 상변화물질의 초기온도가 용융점 이상일 때와 용융점 이하인 상태에서 용융 및 응고실험을 수행하였다.

용융 및 응고실험의 전 단계로 상변화 물질을 PCM용기에 넣은 후 열적 평형상태로 유지시켜야 하며, 이 과정이 약 12시간 정도 소요되었으며 이의 확인은 PCM용기 내의 온도 분포로서 알 수 있다.

실험 DATA는 온도변화가 많이 나타나는 실험초기 10분 동안에는 1분 간격으로, 비교적 온도변화가 적게 나타나는 10분 경과 후에는

Table 1 Sodium Pyrophosphate의 물성치

Property	Unit	Value
Density	kg/liter	1.25
melting Temp	deg. c	79-80
Freezing Temp	deg. c	74-75
Latent Heat	Wh/liter	90
Specific Heat	Wh/liter/deg. c	1.78 (s)
Thermal Conductivity	W/m/deg. c	0.6-0.7

5분 간격으로 실험 DATA을 얻었다. 용융 축열실험시에는 상변화물질의 초기온도를 50 °C, 60 °C, 70 °C로 유지시키고, 벽면온도를 85 °C, 90 °C, 95 °C로 하여 240분간 실험을 수행하였으며 응고 방열실험시에는 상변화물질의 초기온도를 85 °C, 90 °C, 95 °C로 유지시킨 후 벽면온도를 50 °C, 60 °C, 70 °C로 하여 240분간 실험을 수행하였다.

4. 결과 및 고찰

Fig.3은 상변화물질의 초기온도가 60 °C 인 경우 PCM용기벽면온도를 90 °C로 축열할 때 PCM용기 상부지점 (Y/H = 1.0) 과 하부지점 (Y/H = 0.0) r/Rw = 0.4의 위치에서 온도를 시간의 경과에 따라 나타낸 것이다.

PCM 용기 벽면으로 부터 일정한 열량을 공급할 때 용융된 상변화물질의 액상영역내에서 열전달특성이 전도만이 지배될 때에는 PCM 물질의 수직방향온도가 모두 동일하게 되나, 열전달특성이 자연대류에 의하여 지배될 때에는 용융된 액상영역내에는 밀도차로 인한 자연대류가 발생하게 되고, 이 영향으로 인하여 PCM 물질 상부온도는 높고 하부온도는 낮게 된다.

상변화물질이 sodium pyrophosphate의 경

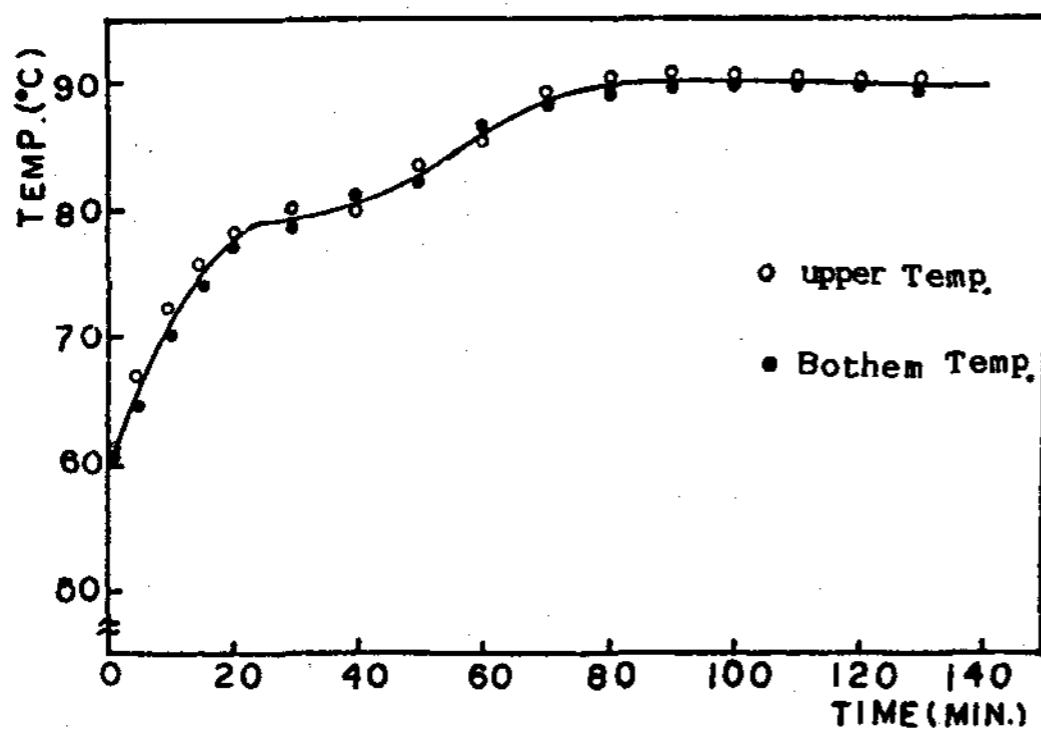


Fig. 3 Timewise Variations of Temperature at the Charge Time : Inlet Water Temp. = 90 °C (The Initial Temp. of S.P. = 60 °C)

우에는 상부와 하부의 온도차가 전 실험시간에 걸쳐서 거의 나타나지 않는 것으로 보아 용융된 상변화물질 내에서는 대부분 전도 열전달이 지배함을 알 수 있다.

실험초기 시간에서는 현열구간이 존재하며 상변화물질의 초기온도와 PCM용기 벽면 온도와 의 차가 크기 때문에 온도구배가 크게 나타났고 실험 중반에 걸쳐서 온도구배가 줄어든 것은 잠열구간이 존재함을 나타낸다.

잠열구간을 경과한 후의 현열구간에서 온도구배가 완만하게 증가하는 것은 상변화물질 과 용기벽면의 온도차가 줄어들어 기인한 것이다.

Fig.4는 상변물질의 초기온도가 90 °C인 경우 PCM용기벽면온도를 60 °C로 하여 상변화 물질의 방열과정 시 PCM용기 상부지점 (Y/H = 1.0) 과 하부지점 (Y/H = 0.0) r/Rw = 0.4 위치에서 온도를 시간의 경과에 따라 나타 낸 것이다.

방열과정에서도 PCM물질 내의 수직방향온도차가 거의 없는 것으로 보아 상변화물질 내의 열전달 특성이 대부분 전도열전달에 의존함을 알 수 있다.

실험시간의 경과에 대한 온도구배의 크기는 축열과정과 거의 유사하게 나타났다.

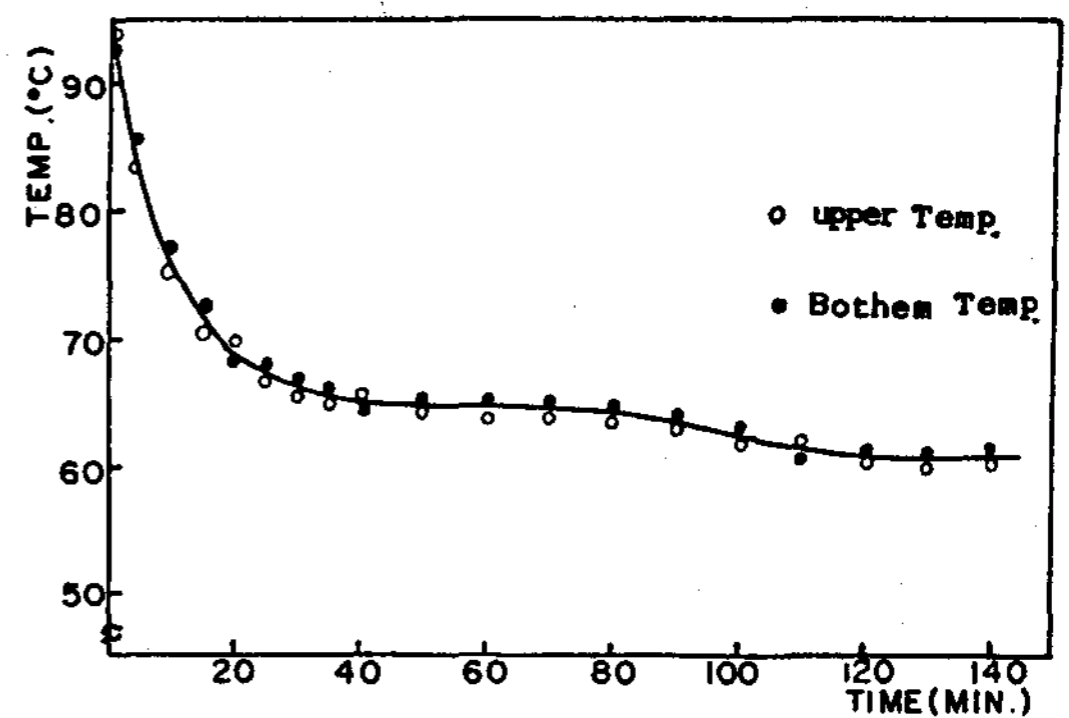


Fig. 4 Timewise Variations of Temperature at the Discharge Time : Inlet Water Temp. = 60 °C (The Initial Temp. of S.P. = 90 °C)

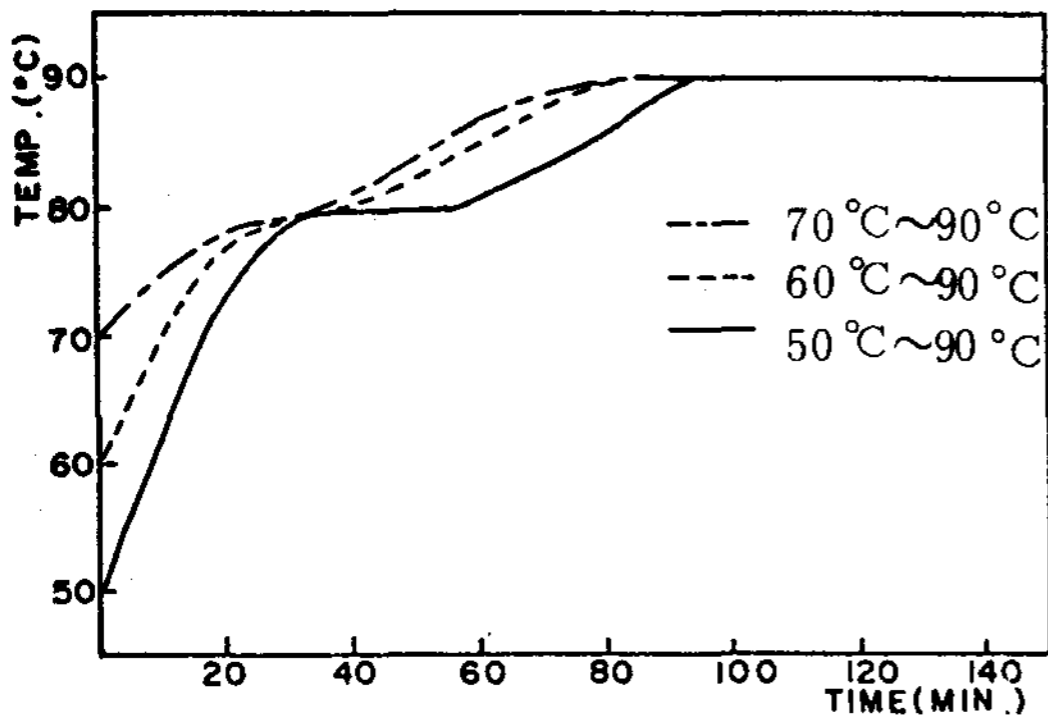


Fig. 5 Timewise Variations of Temperature at the Charge Time : Inlet Water Temp. = 90°C (The Initial Temp. of S.P. = 50°C, 60°C, 70°C)

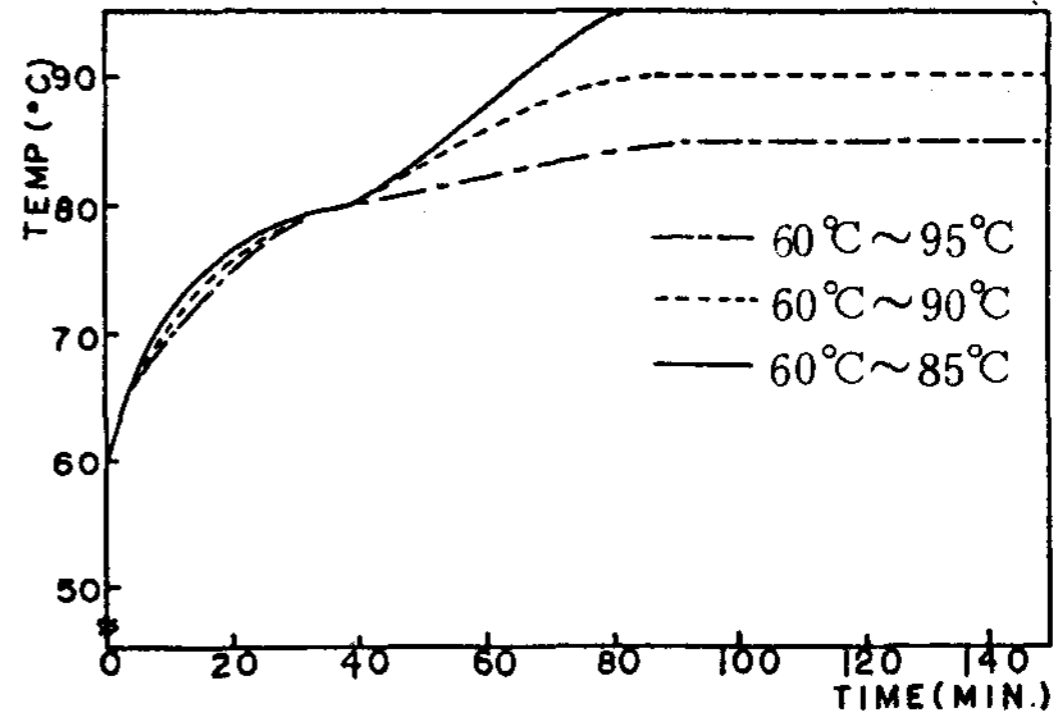


Fig. 6 Timewise Variations of Temperature at the Charge Time : Inlet Water Temp. = 85°C, 90°C, 95°C, (The Initial Temp. of S.P. = 60°C)

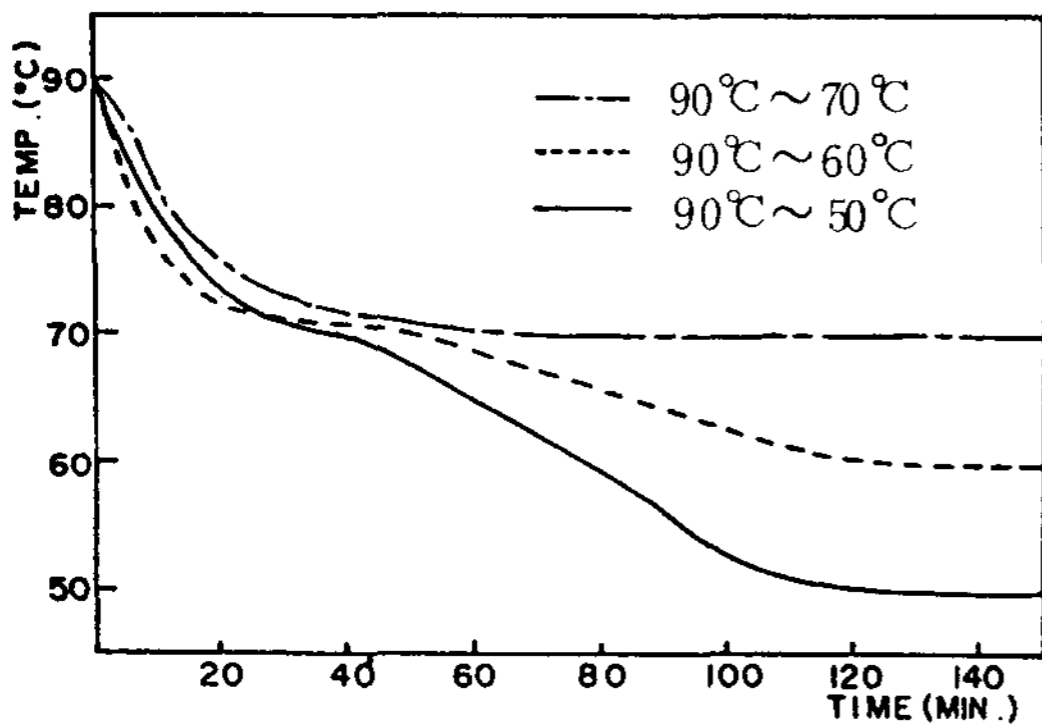


Fig. 7 Timewise Variations of Temperature at the Discharge Time : Inlet Water Temp. = 50°C, 60°C, 70°C. (The Initial Temp. of S.P. = 90°C)

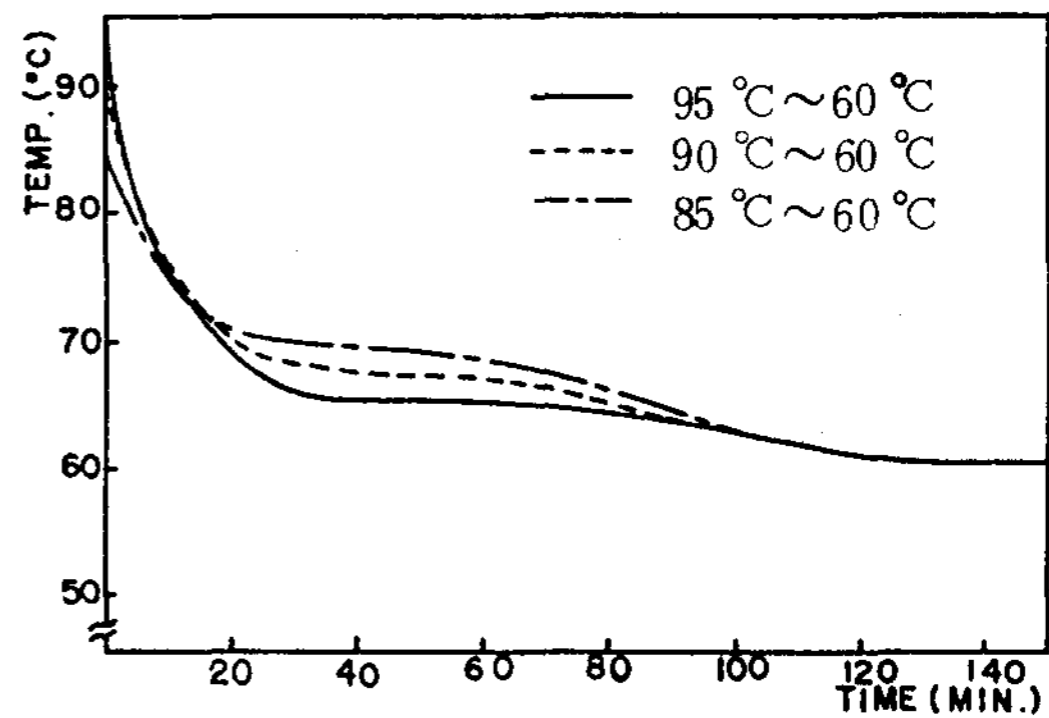


Fig. 8 Timewise Variations of Temperature at the Discharge Time : Inlet Water Temp. = 60°C (The Initial Temp. of S.P. = 85°C, 90°C, 95°C)

Fig.5는 상변화물질의 축열과정에서 상변화물질의 초기온도를 50°C, 60°C, 70°C로 유지하면서 PCM용기벽면온도를 90°C로 하여 순환시킬 때 시간의 경과에 따른 온도를 높이 Y/H=0.5 지점에서 반경방향 r/Rw=0.4 위치의 시간의 경과에 따른 온도변화과정을 나타낸 것이다.

실험 시간에는 상변화물질의 초기온도가 낮을수록 온도구배가 크게 나타났으며 잠열구간에 도달하는 시간은 대체로 상변화물질의 초

기온도가 높을수록 짧게 나타났다. 이것은 상변화물질의 초기온도와 PCM용기 벽면의 온도차가 클수록 열전달이 잘 이루어지며 PCM용기벽면으로 부터 상변화물질에 많은 열량을 전달하기 때문이다.

잠열구간을 경과한 후에는 상변화물질의 초기온도의 영향을 거의 받지 않았다.

Fig.6는 상변화물질의 초기온도를 60°C로 유지하면서 PCM용기의 벽면온도를 85°C, 90°C, 95°C로 변화시켰을 때 Y/H=0.5 지점의

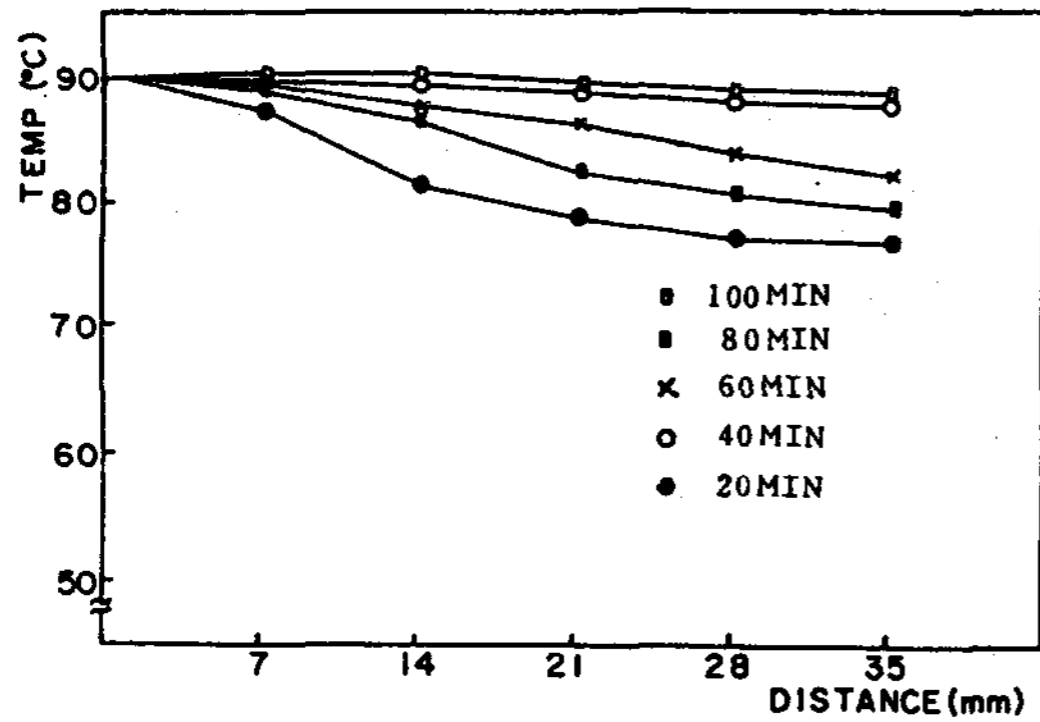


Fig. 9 Timewise Variations of Temperature on the Distant at the Charge Time : Inlet Water Temp. = 90°C (The Initial Temp. of S.P. = 60°C)

$r/R_w=0.4$ 위치에서 시간의 경과에 따른 온도변화를 나타낸 것이다.

실험초기에는 잠열구간에 이르기 까지 거의 동일한 온도구배를 보였으며 잠열구간을 경과한 후에는 PCM용기벽면의 온도가 높을수록 온도구배가 크게 나타났고 열평형상태에 도달하는 시간은 짧게 나타났다.

Fig.7은 상변화물질의 방열과정 시에 상변화물질의 초기온도를 90°C로 하고 PCM용기 벽면온도를 50°C, 60°C, 70°C로 하였을 때 $Y/H = 0.4$ 지점, $r/R_w=0.4$ 위치의 온도를 시간의 경과에 따라 나타낸 것이다.

초기 냉각 시에는 냉각수온도의 영향이 적고, 잠열구간을 경과한 후에는 PCM용기 벽면의 온도가 낮을수록 온도구배가 크며, 열평형상태에 도달하는 시간은 PCM용기 벽면온도가 높을수록 빠르게 된다.

Fig.8은 상변화물질의 방열과정시 상변화물질의 초기온도를 85°C, 90°C, 95°C로 유지하면서 PCM용기 벽면의 온도를 60°C로 일정하게 유지하였을 때 높이 $Y/H = 0.5$ 반경방향 $r/R_w=0.4$ 위치에서 시간 경과에 대한 온도분포를 나타낸 것으로 상변화 물질의 초기온

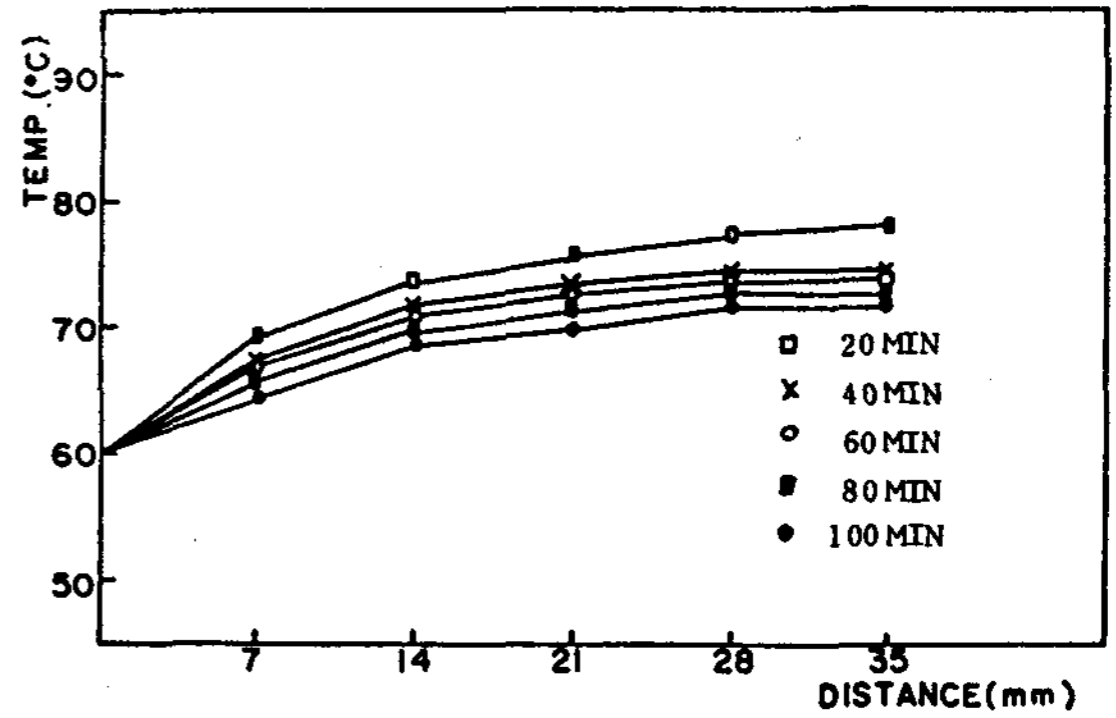


Fig. 10 Timewise Variations of Temperature on the Distant at the Discharge Time : Inlet Water Temp. = 60°C (The Initial Temp. of S.P. = 90°C)

도가 높을수록 잠열구간에 도달하는 시간이 지연되었으며, 잠열구간을 경과한 후에는 거의 일치하는 경향을 보여주고 있다.

Fig.9는 상변화물질의 축열과정 시에 상변화물질의 초기온도 60°C로 하고 PCM용기 벽면온도를 90°C로 할 때 상변화물질 내부의 각 위치에서 시간의 경과에 대한 온도분포를 나타낸 것이다.

여기서 알 수 있는 것은 실험초기에는 각 위치에서 온도의 변화 폭이 크고 시간이 경과할수록 기울기가 완만해 졌다.

Fig.10은 상변화물질의 방열과정 시에 상변화물질의 초기온도를 90°C로 하여 시간의 경과에 대한 상변화물질 내부의 온도분포를 나타낸 것이다.

방열과정에서도 축열과정과 거의 같은 경향을 보이고 있다.

5. 결 론

본 실험은 용융온도가 79~80°C인 Sodium Pyrophosphate의 축열, 방열과정에 있어서 열전달 실험을 행한 것이다.

축열과정에서는 Sodium Pyrophosphate의 초기온도를 50 °C, 60 °C, 70 °C로 하고 PCM 용기 벽면온도를 85 °C, 90 °C, 95 °C로 변화시키면서 용융시켰으며 방열과정에서는 Sodium Pyrophosphate의 초기온도를 85 °C, 90 °C, 95 °C로 유지시키고 냉각수들의 온도를 50 °C, 60 °C, 70 °C로 변화시키면서 실험을 행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 축열과 방열과정에 있어서 열전달의 형태는

전도 열전달이 지배적이었다.

2. 축열과정에서 초기온도의 영향은 잠열구간 이전에 크게 나타났다.
3. 방열과정에서는 냉각수 온도가 낮을수록 열적평형상태에 도달하는 시간이 짧았다.
4. 축열, 방열과정에서 시간의 경과에 따른 PCM내의 온도의 변화는 시간이 경과할수록 그 기울기가 완만하다.

REFERENCE

1. 이재목, 이채문, 임장순, “수직 냉각관내에서 상변화물질의 응고에 관한 실험적 연구” 공기조화냉동공학회 13(4), (1984. 12)
2. 이영호, 임장순, “상변화물질을 이용한 축열과정의 열전달 현상에 관한 실험적 연구” 인하대학교 석사학위 논문, (1987)
3. 이채문, 임장순, “상변화물질의 대류유동 및 열전달에 관한 연구”, 한국태양에너지학회, 6(2), (1986)
4. “상변화 현상을 이용한 에너지 저장연구” 한국전력공사 기술연구원, (1987, 6)
5. Sparrow E.M., Schmidt R.R., & Ramsey J.W., “Experiments on the Role of Natural Convection in the Melting of Solids”, Jour. of Heat Transfer, Vol. 100 (1978)
6. Page J., “Phase Change Storage System”, Calor Alternative Energy Technical Review, (1984)