[논문] 한국태양에너지학회 논문집
Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol. 21, No. 1, 2001

내부코일형 잠열 축열조에서의 열전달 특성 연구

이욱균*, 한귀영*, 강용혁**

*성균관대학교 화학공학과
**한국에너지기술연구원

Heat transfer characteristics of Immersed Coil Type Latent Heat Storage Tank

W. K. Lee*, G. Y. Han*, Y H. Kang**

**Department of Chemical Engineering, Sungkyunkwan University*
***Korea Institute of Energy Research*

Abstract

The heat transfer experiment in a pilot scale latent heat storage tank as a solar energy storage system for the hot water supply was carried out. The latent heat storage tank was consisted of three parts; Outer shell for hot water from solar collector, PCM storage vessel in the middle of the tank and immersed coil in the PCM vessel for hot water recovery. The heat storage tank has the dimension of 115 cm in height and 32 cm outside diameter. Paraffin wax (m.p = 55.4C) and sodium acetate trihydrate (m.p = 58 C) were employed as the PCM this study. Experimental variables were inlet temperature and flow rate of the hot water for heat storage stage and cold water for heat recovery stage. Temperaure profiles, heat transfer coefficient and the efficiency of heat storage (Q/Q_{max}) and heat recovery (Q/Q_{max}) were determined for the paraffin wax and inorganic salt respectively.

Key words : 잠열축열조, 열전달계수, 상변화물질, 축열효율, 방열효율

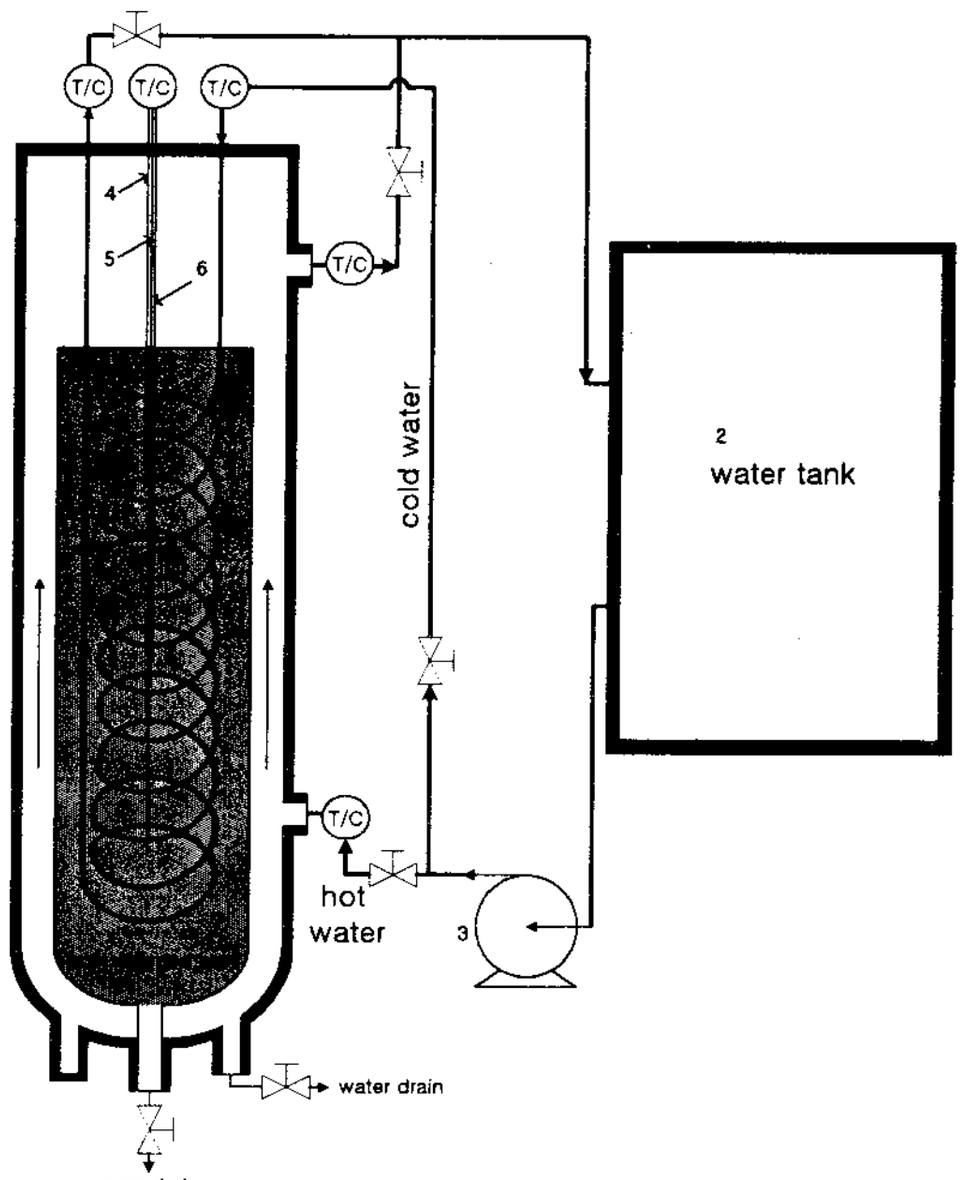
1. 서 론

에너지를 저장하는 방법은 크게 열적 저장, 화학적 저장, 기계적 저장, 전기·자기적 저장 방법으로 분류된다. 이 중에서 현열 저장 방법과 잠열 저장 방법으로 구분되는 열적 저장은 그 방법이 비교적 간단하여 이미 일부 활용이 되고 있으며, 지금까지의 연구 결과나 기술 수준 등을 고려할 때 가장 실용화 가능성이 큰 에너지 저장 방법이라 할 수 있다.[1,2] 현열 저장 방법은 축열 밀도가 작기 때문에 축열 시스템의 부피가 커지고 이에 따른 장치비가 많이 든다. 반면 잠열 저장의 경우에는 축열 밀도가 크므로 현열 저장에 비하여 작은 부피의 시스템으로도 많은 열량의 에너지를 저장할 수 있으며 일정온도에서 잠열이 발생하기 때문에 균일 온도에서 열의 축·방열이 가능하다는 장점이 있어서 최근 많은 연구가 이루어지고 있다.[3,4,5,6] 지금까지는 잠열 축열 시스템의 개발을 위해서 상변화 물질에 관한 특성과 그의 성능 향상에 대한 연구가 주를 이루어 왔으나, 축열조에 관한 열전달 특성에 대한 연구는 아직 미비한 상태이다. 상업적으로 유용한 축열 시스템의 구축을 위해서는 사용처에 적합한 용량의 축열조를 설계하고, 그에 맞는 열전달 특성의 연구가 뒷받침되어야만 한다. 또한 축열조에 관한 연구조차도 실험실 규모인 소형의 축열조에 국한된 실정이어서 이를 이용한 축열 시스템의 상업화는 직·간접적으로 많은 문제점을 지니고 있는 실정이다.

본 연구에서는 이미 많은 문헌을 통하여 가정용 난방 시스템에 적합한 잠열 축열재로서 알려진 무기수화염(sodium acetate trihydrate)과 파라핀 왁스를 이용하여 pilot plant 규모로 제작된 내부코일형 축열조의 축열 및 방열 성능을 연구하고자 한다. 본 연구는 비교적 큰 규모의 축열조 실험을 통하여 기존의 소형 축열조에서 얻어진 열전달 특성과의 비교를 통하여 scale-up에 따른 문제 등을 살펴보고자 한다. 따라서 축열조 실험의 내용은 기존의 소형 축열조 실험에서 주로 다루었던 사용된 축열물질에 따른 축열 및 방열과정에서의 온도분포, 평균 열전달 계수 값, 그리고 축열 및 방열 효율 측정하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

본 실험에 사용된 축열시스템의 개략도와 축열조의 상세도면을 그림 1.과 그림 2.에 나타내었다. 코일형 축열조는 높이 115 cm, 직경 32 cm로 제작이 되었고, 축열조의 재질은 SUS 304와 SUS



1. heat storage tank 2. water tank
3. water pump 4. 550mm length thermocouple
5. 770mm length thermocouple
6. 980mm length thermocouple

Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus for Coil type latent heat storage system.

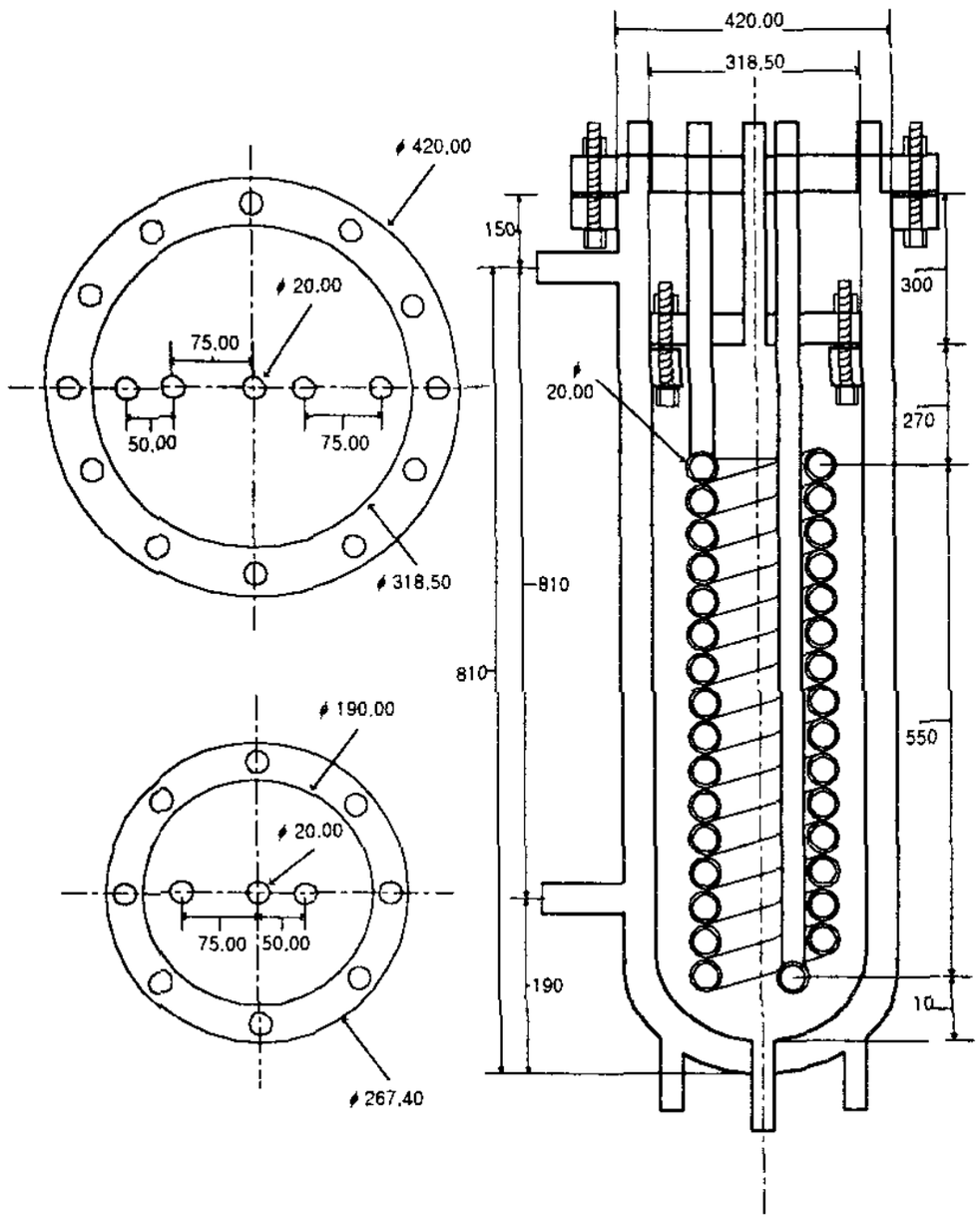


Fig. 2. Detail of Coil type heat storage tank.

41로 제작되었다. 본 코일형 잠열축열조에서의 축열실험에서는 축열조 외부의 자켓으로 고온의 열전달 유체가 흘러 축열조 내부에 있는 축열물질로 열전달을 통한 축열실험을 수행하였고, 열을 회수하는 방열과정에서는 축열물질에 잠겨져 있는 코일형 전열관을 통하여 저온의 열전달 유체를 흘려서 축열물질로부터 열을 회수하는 방열실험을 수행하였다.

축열 및 방열과정에서 잠열축열조의 열전달 특성을 파악하기 위하여 축열조내의 온도분포를 thermocouple 로서 측정하였다. 우선 축열물질의 축열 및 방열과정에서의 온도분포를 측정하기 위하여 축열조 중앙에서 축방향으로 축열조 하부에서부터 170 mm, 380 mm, 600 mm 지점에 K-type thermocouple을 3개 설치하였다. 또한, 축열과정시 축열되는 열량, 그리고 방열과정시 회수되는 열량을 측정하기 위하여 고온 유체쪽 열전달 유체의 입·출구 부분, 그리고 코일형 전열관의 입·출구 부분에 각각 2개씩의 K-type thermocouple을 설치하였다. Thermocouple로부터 측정된 온도는 60초 간격으로 각 위치에서의 온도가 Data Logger (Fluke 사)를 통해서 computer에 저장된다.

축열조의 단열은 ceramic wool과 polyethylene foam을 이용하여 두께 60 mm로 하여 열의 손실을 방지하였다. 축열실험시 온수공급을 위하여 온수탱크에서 물을 승온하였다. 온수탱크의 온도를 일정하게 하기 위하여 PID 콘트롤러를 사용하여 전기 히터(3 kW)로 전열량을 조절하였고, 축열조의 열손실을 방지하기 위해 ceramic wool과 폴리에틸렌폼으로 축열조의 외곽부분을 60 mm 두께로 단열시켰다. 축열실험의 경우에는 상온(20℃)에서부터 축열실험을 시작하여, PCM 이 채워진 축열조 내에 설치된 모든 열전대의 온도가 잠열 구간을 벗어날 때까지 실험을 수행하였다. 한편 방열실험은 축열실험이 종료되어 PCM 이 완전히 용해되어 액체로 존재하는 상태에서 곧바로 차가운 열전달 유체를 축열조 내부의 냉수관으로 흘려 PCM 이 완전히 응고될 때까지 실험을 수행하였다.

PCM을 충진하는 방법은 무기수화염의 경우에는 무수화물로 변화하는 것을 방지하기 위해서 입자상태로 채운 뒤 입자들 사이에 있는 공극을 제거하기 위하여 무기수화염을 용융시켜서 입자층을 낮춘 후에 다시 입자를 채워 넣는 방법을 반복적으로 사용하였고, 파라핀 왁스는 용융되는 과정에서 물질의 변질이 없으므로 왁스에 열을 가하여 용융액을 만든 뒤에 곧바로 용융액을 채워 넣는 방법을 사용하였다. 파라핀 왁스의 경우에는 고상과 액상의 밀도의 변화가 심하므로 밀도가 작은 액체 상태일 때의 부피를 기준으로 하여 충진량을 결정하였다.

본 실험에서 축열조에 충전된 PCM의 양은 무기수화염이 약 44 kg(증점제, 조핵제 질량 포함), paraffin wax가 약 27 kg이었다. 한편 주요 실험변수는열전달 유체의 유입온도, 그리고 유량이었

으며, 축열실험에서는 열전달 유체의 유입온도를 70, 80℃로 하고, 유량을 3, 5, 7 *l*/min로 하였으며, 방열실험에서는 열전달 유체의 유입온도를 30 ℃, 40 ℃그리고 유량을 2, 3, 4 *l*/min로 변화하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

열전달 유체의 유입온도와 유량을 변수로 하여 각각의 잠열 축열재에 대해서 축열 및 방열 과정에서 축열물질의 온도분포, 평균 열전달 계수, 그리고 방열효율을 구하여 열전달 특성을 살펴보았다.

3.1. 온도 profile

무기수화염을 축열재로 사용한 코일형 잠열축열조의 축열과정에서 시간의 경과에 따른 축열물질의 축방향 온도분포를 그림 3.과 그림 4.에 나타내었다. 그림 3.은 열전달 유체의 유량이 3 l/min. 이고, 유입온도 70 C, 일 때이며, 그림 4.는 열전달 유체의 유입온도가 80 C일때의 온도분포이다. 그림 3을 보면, 축열물질은 축열조 상부에서 먼저 용융이 일어남을 알 수 있으며, 축열조 상부에서는 잠열구간이 보이지 않고, 축열조 하부에서는 분명한 잠열구간이 보임을 알 수 있다. 이것은 상부에서 용융된 PCM은 바로 현열과정으로 진행이 되며, 축열조 하부에서는 용융상과 응고상의 PCM 이 공존하고 있는 것으로 판단된다. 한편 그림 4.의 열전달 유체의 유입온도가 80 C 인 경우, 앞의 그림 3.의 경우와 다른 온도분포를 갖는 것을 알 수 있다. 즉 축열조 하부로부터 380 mm 윗쪽에 위치한 PCM 의 온도분포가 앞의 그림 3.과 매우 다른 것을 볼 수 있다. 이것은 유입온도가 높음으로 인하여 열전달의 추진력인 온도차가 커서, 빠른 시간내에 잠열축열이 끝나고, PCM 이 용융된 상태에서 현열축열로 진행

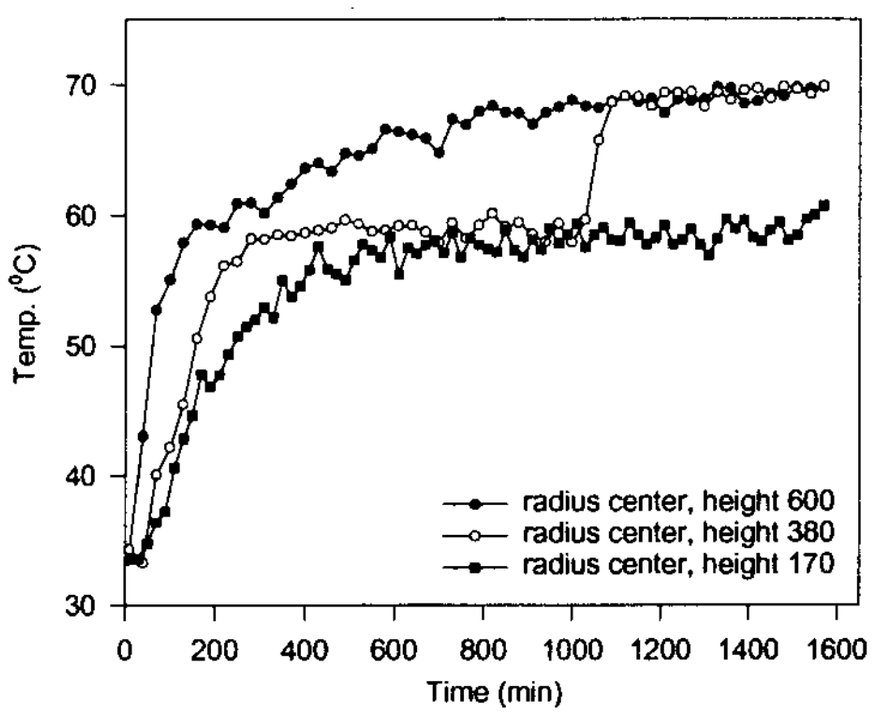


Fig. 3. Temperature profile of salt in heat storage stage (condition : 유량 3 l/min, 유입온도 70 ℃).

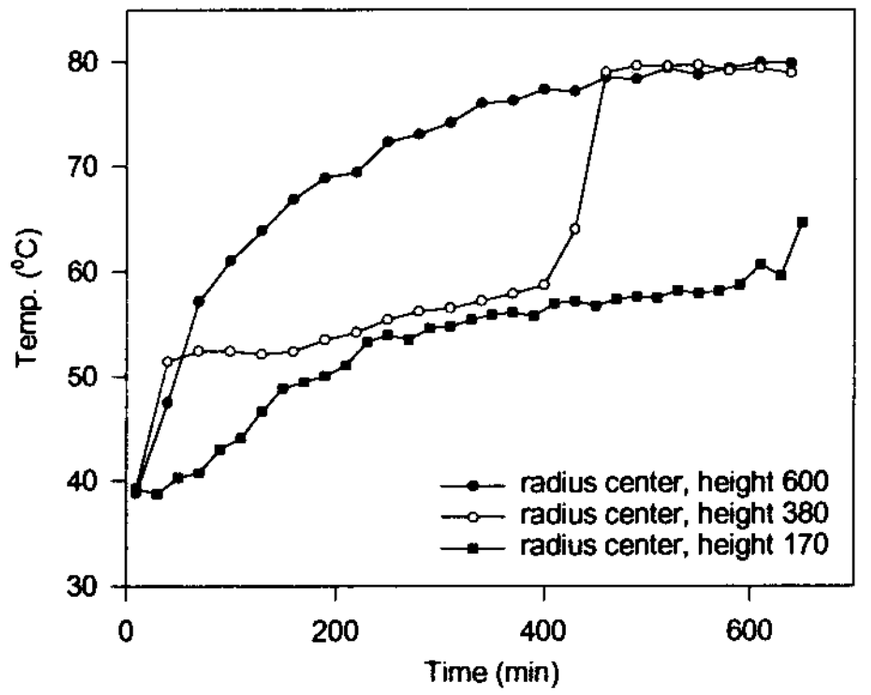


Fig. 4. Temperature profile of salt in heat storage stage (condition : 유량 3 l/min, 유입온도 80 ℃).

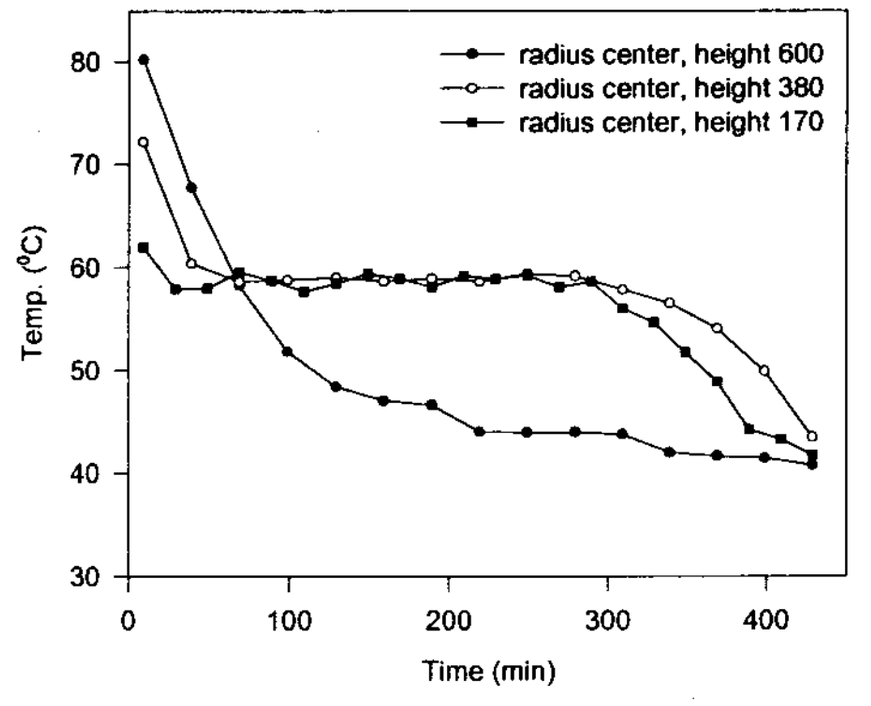


Fig. 5. Temperature profile of salt in heat recovery stage (condition : 유량 3 l/min, 유입온도 30 ℃).

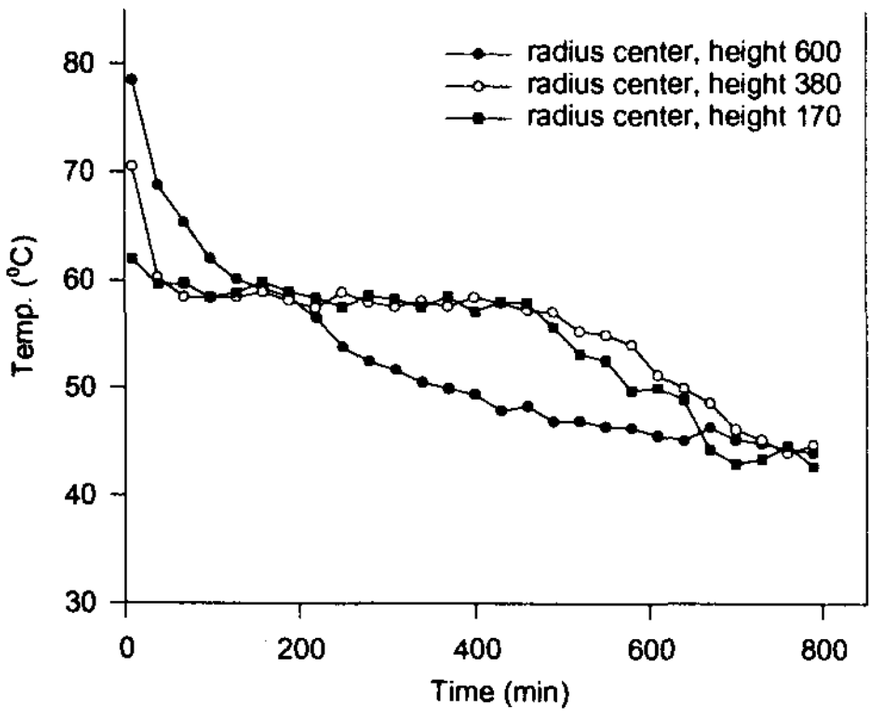


Fig. 6. Temperature profile of salt in heat recovery stage
(condition : 유량 3 l/min, 유입온도 40 ℃).

됨을 알 수 있다.

한편 그림 5.와 그림 6.은 무기수화염을 사용한 코일형 축열시스템의 방열실험에서 얻어진 PCM의 시간의 경과에 따른 온도분포를 나타낸 것이다. 본 실험에서 유입되는 열전달 유체의 유입온도는 각각 30 ℃ 및 40 C였으며, 유량은 3 l/min. 이었다. 그림 5.의 유입온도 30 ℃인 경우 잠열재의 상변화온도인 57 ℃에서 잠열의 회수가 일어남을 알 수 있다. 한편 그림 5.의 온도분포 자료에서 보듯이 축열조의 상부에서 PCM 의 응고가 먼저 발생함을 알 수 있다. 이것은 축열조 내의 열전달 관인 코일의 상부에서부터 저온의 열전달 유체가 유입이 되므로, 축열조 상부에서는 PCM 과 열전달 유체와의 온도차가 커서 급속한 냉각으로 PCM 의 응고가 빨리 일어나면서 이러한 온도분포를 갖는 것으로 여겨진다. 그림 6.의 유입온도가 40 ℃인 경우에 얻어진 온도분포를 살펴보면, 축열조 상부에서도 잠열구간에서의 열회수 영역을 볼 수 있다. 따라서 그림 5.와 그림 6.의 비교로부터 열전달 유체의 유입온도에 따른 잠열회수 영역의 차이를 볼 수 있으며, 균일한 온도에서의 열회수를 위한 열전달 유체의 유입온도의 영향을 알 수 있었다.

3.2. 총괄 열전달 계수

축열 및 방열과정에서 축열물질과 열전달관과의 열전달계수는 축열 및 방열과정이 unsteady-state 이므로, 시간평균값으로 그 값을 구하였다. 또한 앞의 축열물질의 온도구배에서 보았듯이 축열물질의 온도가 공간적으로 불균일하기 때문에 열전달계수의 계산에 필요한 축열물질의 온도는 축방향, 반경방향 축열물질 온도의 평균값으로 계산하였다. 한편 열전달 관의 표면온도 또한 측정이 어려우므로, 식(1) 에 나타낸 이중관 열교환기에서의 총괄 열전달계수식을 사용하여 근사적으로 축열 및 방열과정에서의 열전달계수를 구하였다. 이 경우 열전달 유체의 열저항은 무시하였다.

$$U_o = \left(\frac{\pi D_o L (T_{in} - T_{out})}{q \cdot \ln\left(\frac{T_{in} - T_{PCM}}{T_{out} - T_{PCM}} \right)} + \frac{x_w \cdot D_o}{k_w \cdot D_L} \right)^{-1} \quad (1)$$

q는 순간 전달 열량으로 열전달 유체의 질량유속과 입출구의 온도, 유체의 열용량의 곱으로 구하고, T_{PCM}의 값은 PCM에 설치된 4개의 열전대가 측정한 온도의 산술 평균값을 사용하였다. 그림 7.

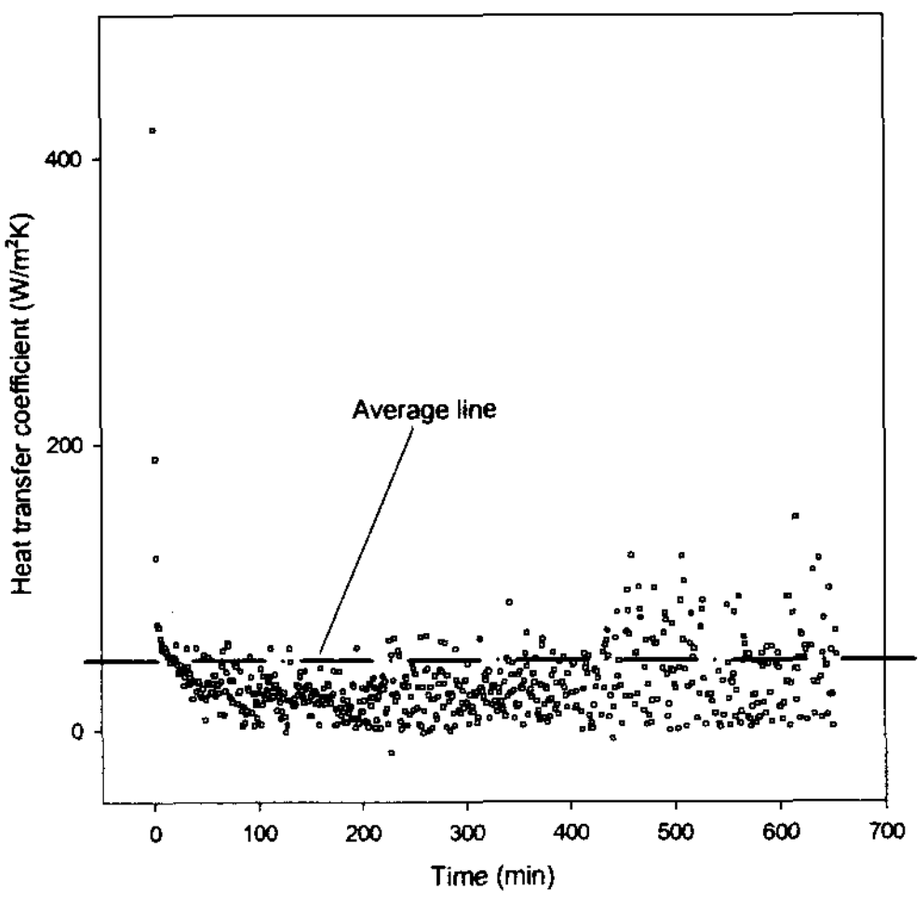


Fig. 7. Overall heat transfer coefficient of salt during heat storage stage
(condition : 유량 : 3 l/min, 유입온도 : 80 ℃).

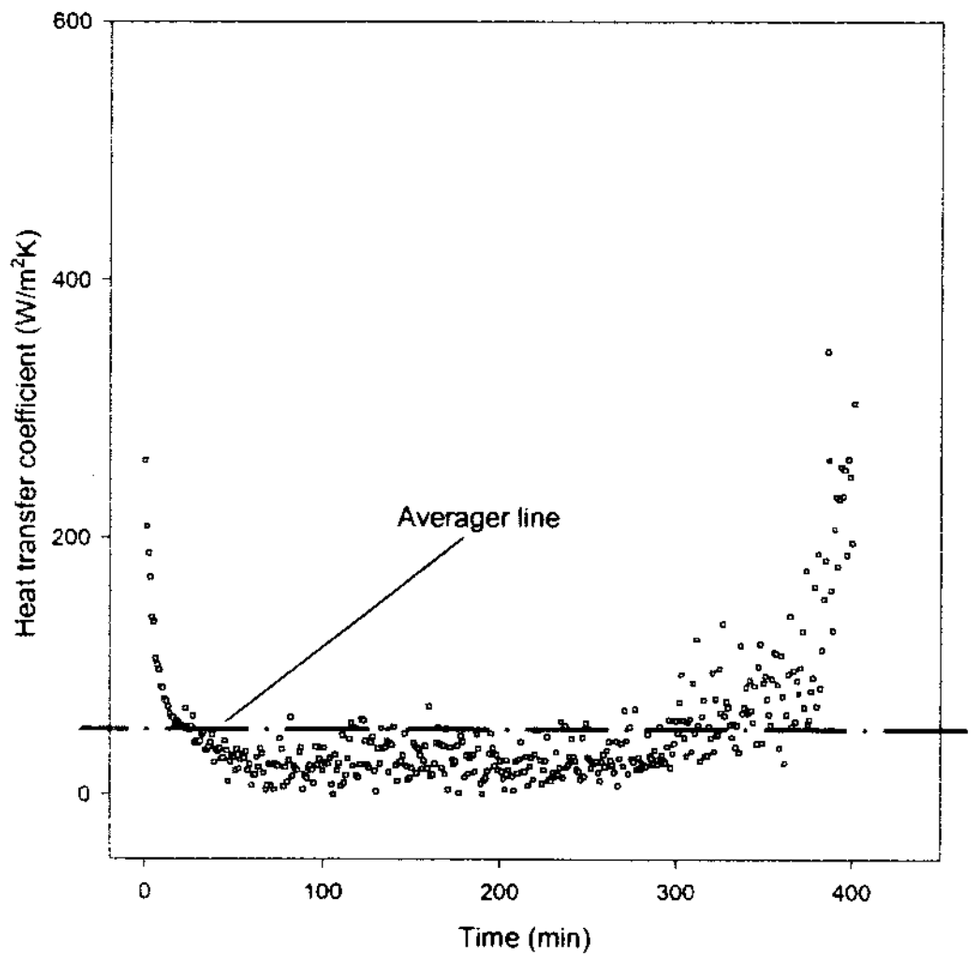


Fig. 8. Overall heat transfer coefficient of paraffin wax during heat storage stage (condition : 유량 3 l/min, 유입온도 80 ℃).

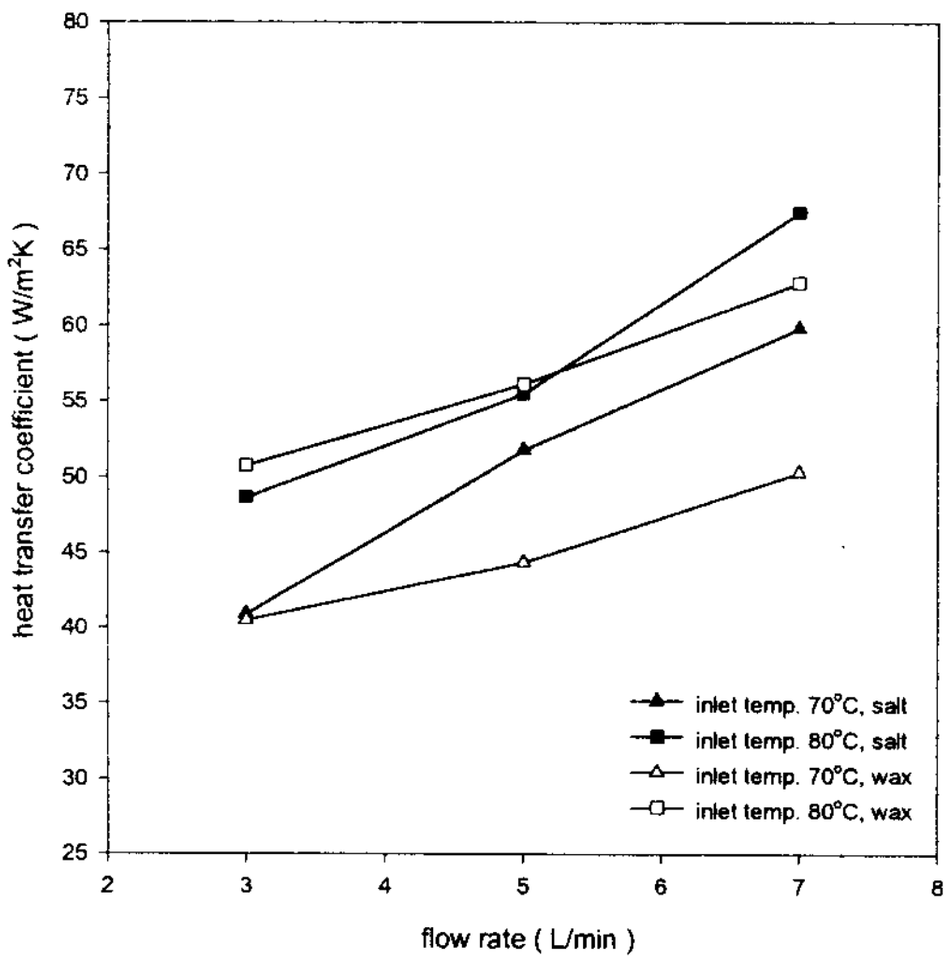


Fig. 9. Average heat transfer coefficient of salt and paraffin wax during the heat storage stage

과 그림 8.은 코일형 축열조의 축열과정에서 보여지는 무기수화염과 paraffin wax의 시간의 경과에 따른 열전달 계수의 변화를 나타낸 그림이다. 그림 8.의 파라핀 왁스의 경우 축열이 진행됨에 따라서 용융된 파라핀 왁스의 자연대류에 의하여 열전달계수가 크게 증가함을 볼 수 있다. 한편 자연대류에 의한 열전달 계수의 증가는 소형 축열조의 경우보다 크게 나타나고 있으며, 이것은 축열조의 크기가 증가함에 따른 자연대류의저항이 작아짐에 기인한 것으로 보여진다. 본 실험에서 사용된 각각의 축열물질에 대한 축열과정에서의 평균열전달계수를 그림 9.에 나타내었다. 그림 9.에서 볼 수 있듯이 축열조로 유입되는 열전달 유체의 온도가 높을수록 높은 열전달계수를 가짐을 알 수 있으며, 같은 조업조건에서 무기수화염과 파라핀 왁스를 비교하면 파라핀왁스가 자연대류에 의한 열전달 촉진 효과가 있음에도 불구하고 무기수화염이 높은 열전달계수를 나타냄을 알 수 있다. 이것은 무기수화염이 파라핀왁스에 비하여 2배이상 높은 열전도도를 갖는 열적 성질의 차이에서 연유되며, 따라서 축열과정의 주요 열전달 메카니즘은 전도에 의한 것임을 의미한다. 하지만 소형의 잠열축열조 실험에서 얻어진 열전달계수값 (약 70~150 W/m^2K)와 비교하면, 낮은 열전달계수값을 가짐을 알 수 있다. 이것은 장치의 증가에 따라 축열물질과 전열관과의 거리가 멀어져서 전도 열저항이 증가하기 때문으로 여겨진다. 따라서 대규모의 잠열축열조를 설계할 때, 전도 열전달의 저항이 되는 축열물질과 전열 관과의 거리를 좁히는 구조를 고려하여야 할 것이다.

3.3. 잠열축열조의 방열 효율

축열조의 성능평가에서 고려할 또 다른 중요한 사항은 축열조의 축열 또는 방열효율이다.축열조의 축열 및 방열효율은 주어진 온도구간에서 축열 및 방열시 축열물질의 현열 및 잠열의 이론값에 대한 실제로 열전달 유체의 에너지 수지로부터 얻어진 축열량 또는 회수된 방열량의 비로서 정의하였다. 즉 축열 또는 방열효율은 (Q/Q_{max})

로 나타내어지며, 이론적 축열 또는 방열량은 다음의 식 (2)로부터 계산되었다.

$$Q_{\max} = \int_{T_i}^{T_m} m \cdot C_{ps}\, dT + \lambda \cdot m + \int_{T_m}^{T_f} m \cdot C_{pl}\, dT + \int_{T_i}^{T_f} M \cdot C_p\, dT \quad (2)$$

m : 충진된 PCM의 질량
M : 축열조 재질의 총질량
C_{ps} : 고체 PCM의 열용량
C_{pl} : 액체 PCM의 열용량
C_p : 축열조 재질의 열용량
λ : PCM의 잠열량

그림 10.과 그림 11.은 무기수화염을 축열물질로 사용한 축열조의 방열과정시 시간의 경과에 따른 열회수 특성을 열전달 유체의 유입온도가 30 ℃, 40 ℃인 경우에 대하여 각각 나타내었다. 그림 10과 그림 11에서 굵은 선으로 나타낸 영역은 방열과정에서 보여지는 잠열구간을 의미한다. 잠열 구간이 나타나는 시점을 유입온도의 변화에 따라서 비교하여 보면, 유입온도가 30 ℃의 경우에는 초기 열회수 속도가 빠르게 이루어지다가 잠열 구간에 들어설 때쯤에서 속도가 느려지는 것을 볼 수 있다. 이는 방열관의 벽면에 형성되기 시작하는 고상 PCM의 온도가 빠르게 벽면을 따라서 형성되는데 전반적으로 고상의 무기수화염이 형성되어 잠열이 회수되기 시작하면 부분적으로 형성되는 고상의 무기수화염 층이 점점 열저항으로 작용하게 되면서 열회수 속도는 느려지게 된다. 하지만, 유입온도가 40 ℃인 경우에는 유입온도가 30 ℃일 경우에 비해서 방열 속도가 처음부터 느리기 때문에 고상 무기수화염의 형성에 따른 방열 속도의 저하가 상대적으로 차이가 나지 않는 것처럼 보이게 되는 것으로 사료된다. 한편 잠열축열조에 축적된 열에너지를 약 80% 정도 회수하는데 걸리는 시간을 살펴보면, 유입온도가 30 ℃, 유량 7.0m liter/min 인 경우 약 350분이 소요되는데 비하여, 유입온도가 40 ℃, 유량 7.0 liter/min 의 경우 약 500분이 소요됨을 알 수 있다. 따라서 유입온도에 따른 열회수 속도의 차이를 관찰할 수 있었다.

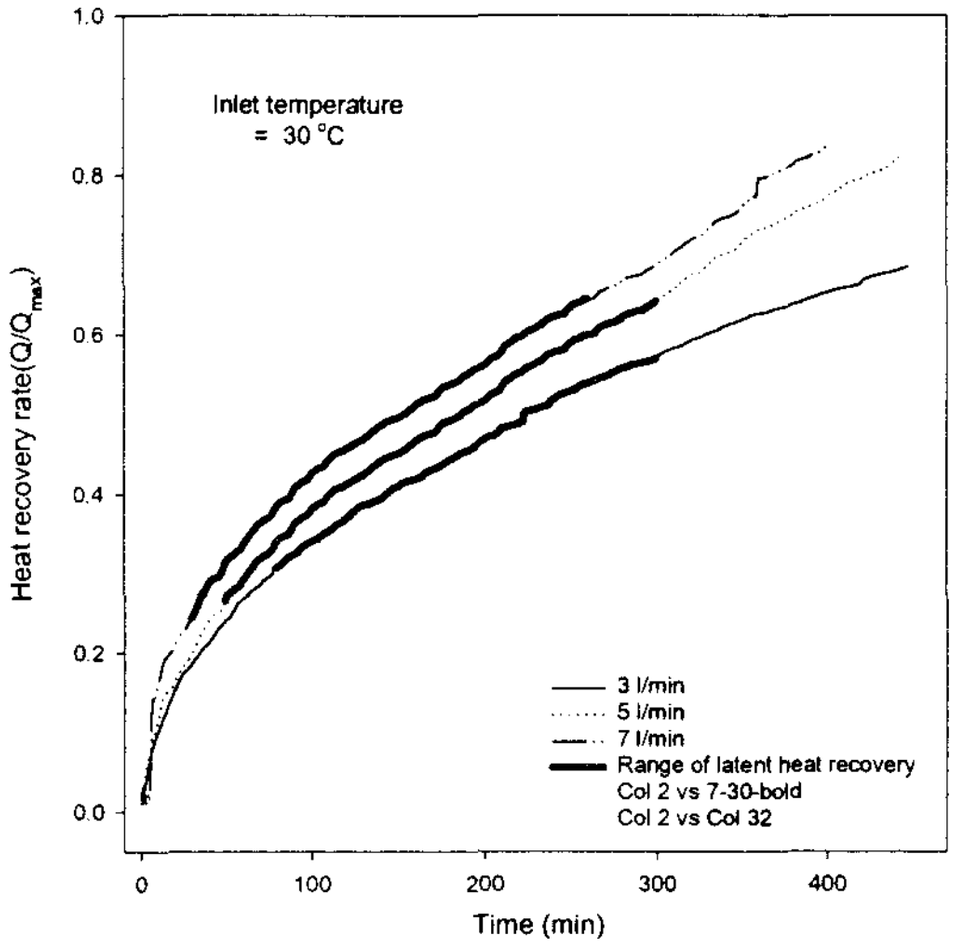


Fig. 10. Heat recovery ratio of salt with inlet water temperature of 30 ℃

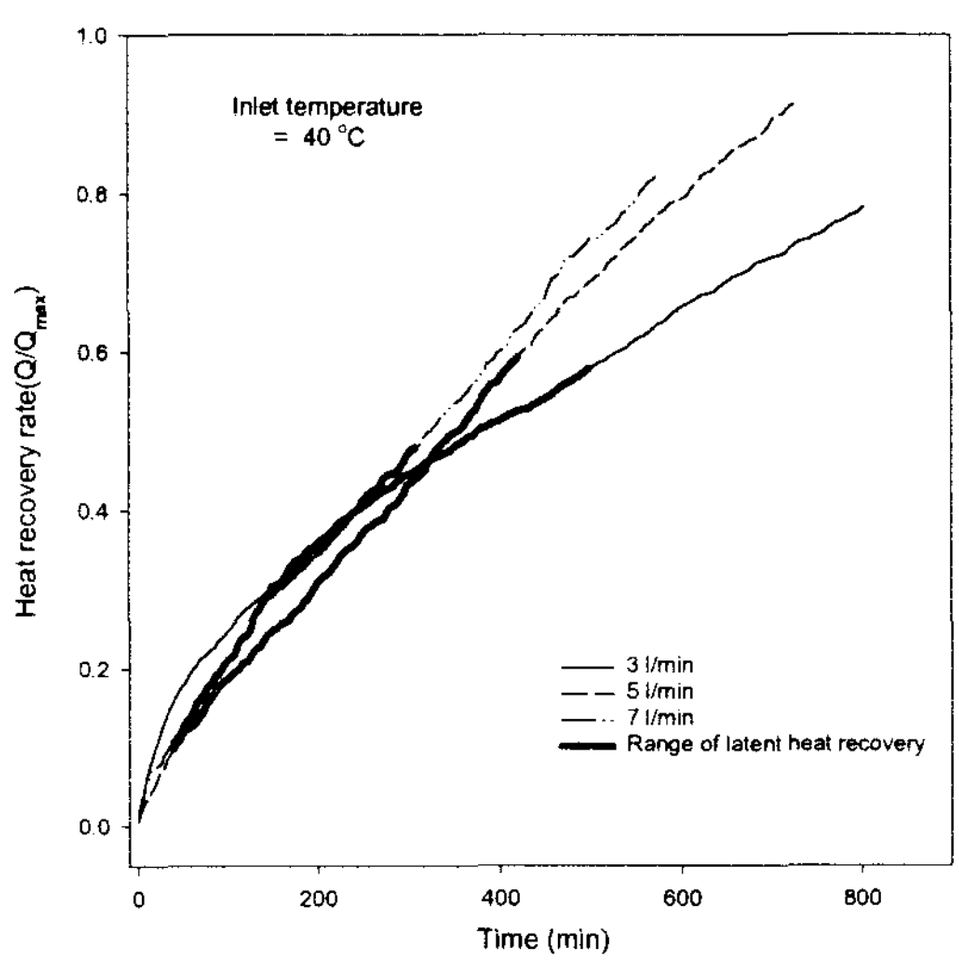


Fig. 11. Heat recovery ratio of salt with inlet water temperature of 40 ℃

Table 1. Thermophysical properties of employed phase change materials

Property	salt	paraffin wax
Melting Point (℃)	58	55.47
Latent Heat (kJ/kg)	263.59	145.01
Density (solid) (kg/m^3)	1450	856
Density (liquid) (kg/m^3)	1280	665
Heat Capacity (solid) (kJ/kg℃)	2.929	2.1
Heat Capacity (liquid) (kJ/kg℃)	3.680	2.1
Heat conductivity (W/m · K)	0.50	0.21

결 론

잠열 축열재로 무기수화염과 파라핀 왁스를 이용한 내부코일형 잠열축열 시스템의 축열 및 방열 과정에서 나타난 열전달 특성의 실험으로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 축열과정에서 잠열구간은 두가지 잠열물질의 경우에 뚜렷이 나타남을 볼 수 있었다.
2) 축열물질과 전열관과의 열전달계수는 열전달 유체의 유량이 증가하고, 유입온도가 높을수록 큰 값을 나타내었고, 파라핀 왁스보다 열전도도가 큰 무기수화염의 경우가 더 높은 값을 나타내었다.
3) 소규모의 축열조에서 얻어진 열전달계수와 비교시, 전도저항의 증가로 낮은 열전달 계수를 가짐을 알 수 있었다.
4) 축열 및 방열과정의 주요 열전달 메카니즘은 전도에 의하여 일어남을 알 수 있었다.
5) 액상과 고상간의 밀도차가 큰 파라핀 왁스의 경우 축열과정에서 자연대류에 의한 열전달이 수반됨을 확인하였다.
6) 방열과정에서 열회수 속도는 유입되는 열전달 유체의 유입온도에 크게 의존하였다.

Nomenclature

A : 전열면적 [m^2]
C_{Pf} : 열전달 유체의 열용량 [kJ/kg · ℃]
C_{Pl} : PCM의 액상열용량 [kJ/kg · ℃]
C_{Ps} : PCM의 고상열용량 [kJ/kg · ℃]
k_l : 액상축열재의 열전도도 [W/m · ℃]
k_s : 고상축열재의 열전도도 [W/m · ℃]
$\dot{m}$: 열전달 유체의 유량 [kg/min]
M : 상변화물질의 질량 [kg]
PCM : 상변화 물질 (Phase Change Material)
q : 단위 시간당 회수 열량 [kW]
Q_l : PCM의 액상 현열량 [kJ]
Q_λ : PCM의 잠열량 [kJ]
t : 시간 [min]
T_i : 열전달유체의 입구 온도 [℃]
T_f : 열전달 유체의 온도 [℃]
T_g : 유리전이 온도 [℃]
T_w : 열전달 튜브의 외벽 온도 [℃]

Greek letters

ρ_s : Solid 의 밀도 [kg/m^3]
ρ_f : fluid 의 밀도 [kg/m^3]
λ : 잠열 [kJ/kg]
μ : 점도 [10^{-3}kg/m^3 · sec]

참 고 문 헌

1. Abhat, A. : Solar Energy, 30 , 313 (1983)
2. Ulman, A. and B. Valentin : Solar Energy Materials, 9, 177 (1983)
3. Choi, H. S. Shin, B. C. and Kim, S. D. : Energy, 14 , 513 (1989)
4. Yanadori, M. and Masuda, T. : Solar Energy, 42, 27 (1989)
5. 이민경, 한귀영 : HWAHAK KONGHAK, 35, 755 (1997)
6. 한승구, 한귀영 : 에너지공학, 5, 115 (1996)
7. Sparrow, E. M. and J. A. Broadbent : J. of Heat Transfer, 104, 309 (1982)
8. Hale, N. W. and Viskanta, R. : Int. J. Heat Mass Transfer, 23, 283 (1980)
9. Kalhori, B. and Ramadhyani, S. : J. of Heat Transfer, 107, 44 (1985)
10. 양윤섭외 4인, "태양열 저장을 위한 축열조 소형화 실험적 연구", 태양에너지, Vol.18, No.1,1998, pp.55~56
11. 한귀영외 5인, "캡슐화된 PCM을 이용한 유동층 축열조에서 열전달 특성 연구", 태양에너지, Vol.18, No.3, 1998, pp.89~94.