

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

3중관 튜브형 잠열 축열조에서의 열전달 특성 연구

이욱균*, 한귀영*, 강용혁**

* 성균관대학교 화학공학과

** 한국에너지기술연구소

Heat transfer characteristics of Triple-Tube Type Latent Heat Storage Tank

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

* Department of Chemical Engineering, Sungkyunkwan University

** Korea Institute of Energy Research

Abstract

The heat transfer experiment in a 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 triple - tube type ; Outer shell for hot water from solar collector, PCM storage vessel in the middle of the tank and inside tube for hot water recovery. The heat storage tank has the dimension of 60 cm long and 34 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. Temperature 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 실정으로서 이를 이용한 축열 시스템의 상업화는 직·간접적으로 많은 문제점을 지니고 있는 실정이다.

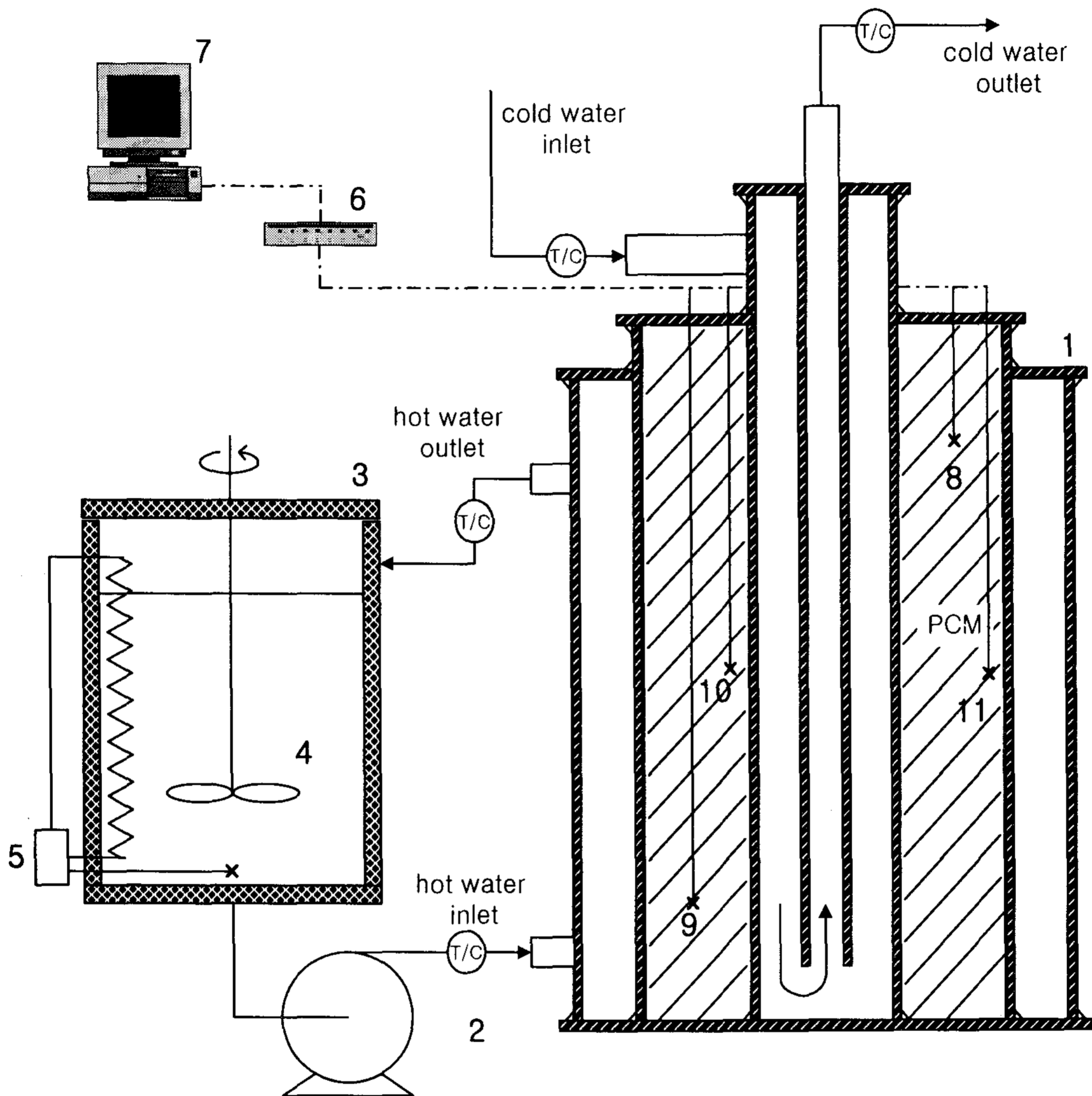
본 연구에서는 이미 많은 문헌을 통하여 가정용 난방 시스템에 적합한 잠열 축열재로서 알려진 무기수화염(sodium acetate trihydrate)과 파라핀 왁스를 이용하여 pilot plant 규모로 제작된 3중관형 축열조의 축열 및 방열 성능을 연구하고자 한다. 실제로 태양열 집열기에서 얻어진 온수에는 동파 방지를 위한 brine 이 포함되어 있기 때문에 이 온수와 축열조에서 열을 회수할 때 사

용하는 냉각수는 다른 관을 사용하여야 한다. 따라서 태양열 온수기와 결합된 축열조에는 온수 흐름관(태양열 집열기에서 공급)과 축열조에서 열을 회수할 때 필요한 냉수 흐름관(축열조내에서 열 회수시) 필요하게 되므로 3중관 방식의 축열조 형태가 요구된다고 할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 형태의 축열시스템에서 사용된 축열 물질에 따른 축열 및 방열특성을 축열 및 방열에 걸리는 시간과 평균 열전달 계수 값, 그리고 축열 및 방열 효율을 통하여 살펴보고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

본 실험에 사용한 축열시스템의 개략도와 축열조의 상세도를 그림 1과 그림 2에 나타내었다. 축열조는 총 높이 606 mm, 총 직경 338 mm의 3중관으로 구성되어 있고, 축열조의 재질은 sus 304와 ss 41로 제작했다. 축열시에는 바깥관으로 뜨거운 열전달 유체가 펌프를 통하여 축열조 하부에서 상부로 phase change material (PCM)과의 열교환을 하면서 흐르고, 방열시에는 차가운 열전달 유체가 안쪽관의 내부를 통해 외부로 흘러 나가면서 PCM과의 열교환을 하게 된다. 또한, 열전달 유체와 열교환을 하는 PCM이 충전되어 있는 중간관에는 열전달의 촉진을 위하여 판형태인 18개의 핀을 부착하였다. 열전달 유체로는 물을 사용하였다.

축열과 방열과정에서 PCM 온도분포를 측정하기 위하여 축열조의 반경방향과 축방향을 기준으로 K-type 의 열전대를 설치하였다. 이들 열전대들은 반경방향으로 온도구배를 측정하기 위하여 250 mm 높이에 중심으로부터 각각 78 mm, 113 mm 떨어진 지점에, 축방향으로 온도 구배의 측정을 위해 92.5 mm 반경에 밑으로부터 각각 100 mm, 400 mm 지점에 총 4개를 설치하였다. 그리고, 열저장 성능과 열회수 성능의 측정을 위해서



- | | |
|----------------------|--------------------------------|
| 1. heat storage tank | 7. computer |
| 2. water pump | 8. 400mm height, 92.5mm radius |
| 3. water tank | 9. 100mm height, 92.5mm radius |
| 4. stirrer | 10. 250mm height, 78mm radius |
| 5. temp. controller | 11. 250mm height 113mm radius |
| 6. data logger | |

Fig. 1. The schematic diagram of latent heat storage system

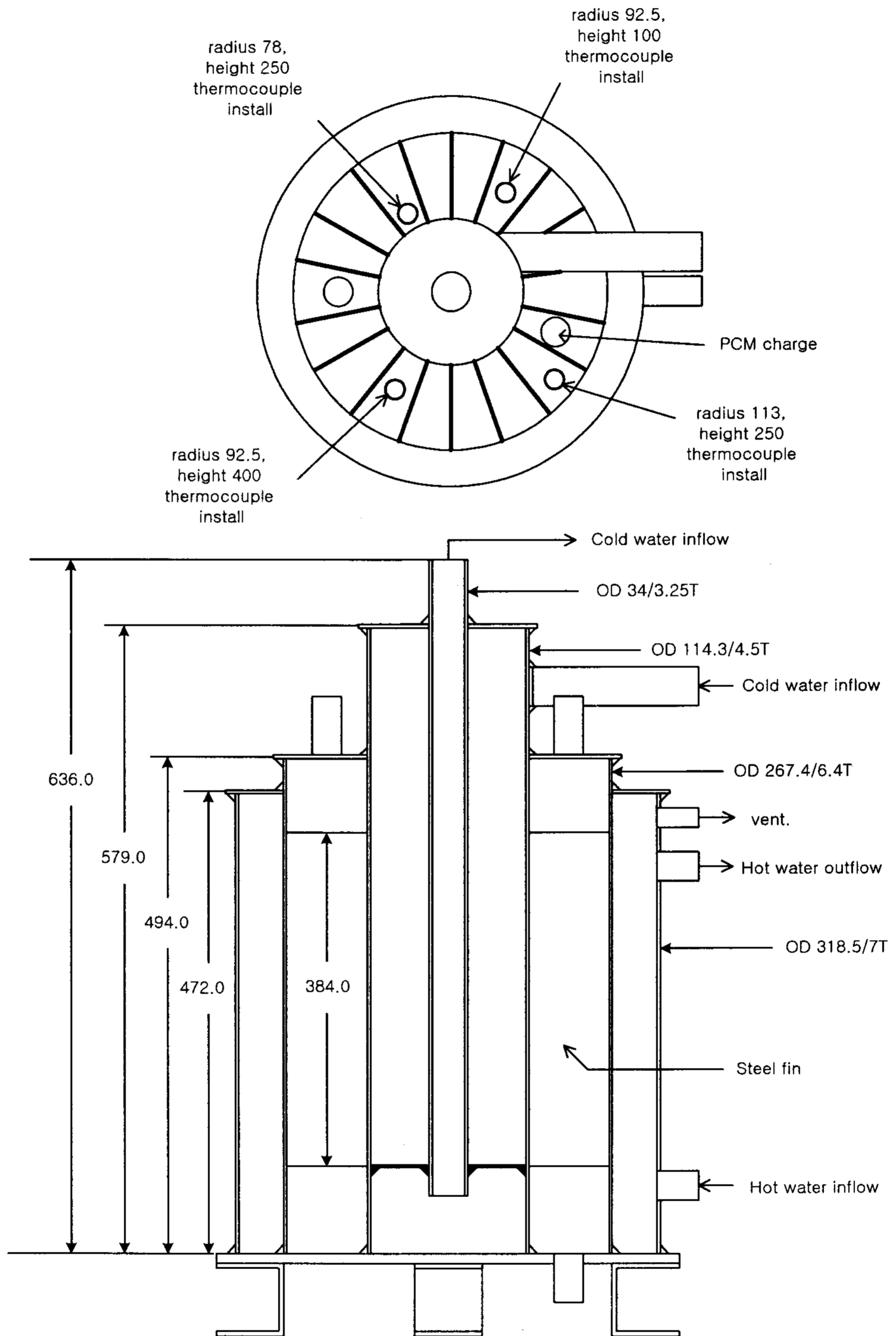


Fig. 2. The details of heat storage tank

열전달 유체의 입구와 출구 부분에 각각 2개씩 설치하였다. 열전대로부터 측정된 온도는 60 초 간격으로 data acquisition unit을 통하여 컴퓨터에 저장하였다.

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°C)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 충전하는 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 충전량을 결정하였다. 충전된 PCM들의 질량은 무기수화염이 23 kg(조핵제, 증점제 등의 첨가제 포함 질량), 파라핀 왁스가 15 kg이었다. 무기수화염의 과냉각 현상과 상분리 현상을 방지하기 위해서 조핵제로는 sodium pyrophosphate decahydrate를 2.0% 첨가하였고, 증점제로는 gellatine을 1.5% 첨가하였다. 표 1에는 실험에 사용한 상변화 물질들의 열역학적 특성들에 대한

Table 1. The thermophysical properties of phase change materials

Property	salt	paraffin wax
Melting Point (°C)	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 °C)	2.929	2.1
Heat Capacity (liquid) (kJ/kg °C)	3.680	2.1
Heat conductivity (W/m · K)	0.50	0.21

데이터를 실었고, 상변화 물질들의 잠열량과 융점은 DSC를 이용하여 측정하였다.

열전달 유체의 흐름은 축열시에는 수조에서 가열된 물의 유량은 펌프를 작동시킨 후에 유량계를 이용하여 조절하였고, 방열시에는 수돗물을 바로 연결하여 열전달 유체로 흘렸기 때문에 축열 과정보다 실험 가능한 한계 유량이 적어지고 유입온도의 변화를 줄 수가 없었다. 실험 변수는 축열시에 열전달 유체의 유입온도를 70, 80°C로 하고, 유량을 3, 5, 7 l/min로 하여 축열실험을 수행하였고, 방열시에는 고정 유입온도(약 14°C)와 유량을 2, 3, 4 l/min로 변화시키면서 방열실험을 수행하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

열전달 유체의 유입온도와 유량을 변수로 하여 각각의 잠열 축열재에 대해서 축열 및 방열 효율, 온도 profile, 그리고 평균 열전달 계수를 구하여 열전달 특성을 살펴보았다.

3.1 온도 profile

축열조로 유입되는 온수의 온도가 70 °C, 유량이 3 liter/min 의 축열과정에서 얻어진 무기수화염과 파라핀 왁스의 온도분포를 그림 3과 그림 4에 나타내었다. 그림 3의 무기염의 경우, 58 °C 의 용융온도에서 잠열구간이 잘 나타나있음을 볼 수 있다. 축방향 온도분포를 보면, 축열조 상부(400 mm)의 온도가 하부(100 mm)의 온도보다 높음을 알 수 있으며, 이것 축열조의 상부에서 먼저 용융이 발생한다는 것을 의미한다. 한편 그림 4의 파라핀 왁스의 경우에는 무기염에 비하여 뚜렷한 잠열구간은 나타나지 않지만, 잠열구간에서의 축열을 볼 수 있다. 이러한 이유는 파라핀 왁스의 경우 액상과 고상과의 밀도차가 크기 때문에 축열과정에서 자연대류의 영향이 커서 축열조 전체의 온도가 균일하게 되기 때문인 것으로 사료된다. 이를 좀더 고찰해보면, 축열이 시작되어 PCM 이 용융을 시작하면 용융면은 축열 전열관의 벽에서 상대적으로 가까운 위치부터 형성이 되고, 초기에는 거의 벽과 평형을 이루면서 형성된다. 시간이 흐름에 따라 용융면은 안쪽으로 움

직여나가지만, 초기와 같은 형태를 이루지는 않는다. 즉, 계속적으로 벽면과 평형을 이루면서 경계면이 형성이 되어 가지는 않는다. 용융면의 형태는 점점 포물선에 가까워지면서 상부의 용융이 하부의 용융에 비하여 빠른 속도로 전개되어 나가고, 용융되지 않은 고상 PCM의 높이는 현저하게 낮아져간다. 이러한 현상의 발생에는 두 가지 요인이 지배적이다. 하나는 용융이 일어남에 따른 PCM의 밀도의 감소이다. 그래서 용융된 PCM은 증가하는 부피로 팽창을 하게 되어 용융면에서 고상 PCM 위에 있는 자유공간으로의 upflow를 일으킨다. 위치 이동을 한 액상 PCM은 인접해 있는 표면뿐만 아니라 상층에 있는 고상 PCM의 용융까지 발생을 시킨다(volume-change-driven motion). 시간이 흘러감에 따라 자연 대류는 튜브벽에 인접한 upflow와 용융면에 인접한 downflow로 용융층 내에서 발전하게 된다. 이러한 재순환 형태는 상대적으로 뜨거운 액체를 고체 PCM층의 윗부분으로 이동시킨다.^{3,7)} 따라서 축열재의 용융과정은 전도와 함께 자연대류가 주요 인자임을 알 수 있다.^{8,9)} 한편 축열조로 유입

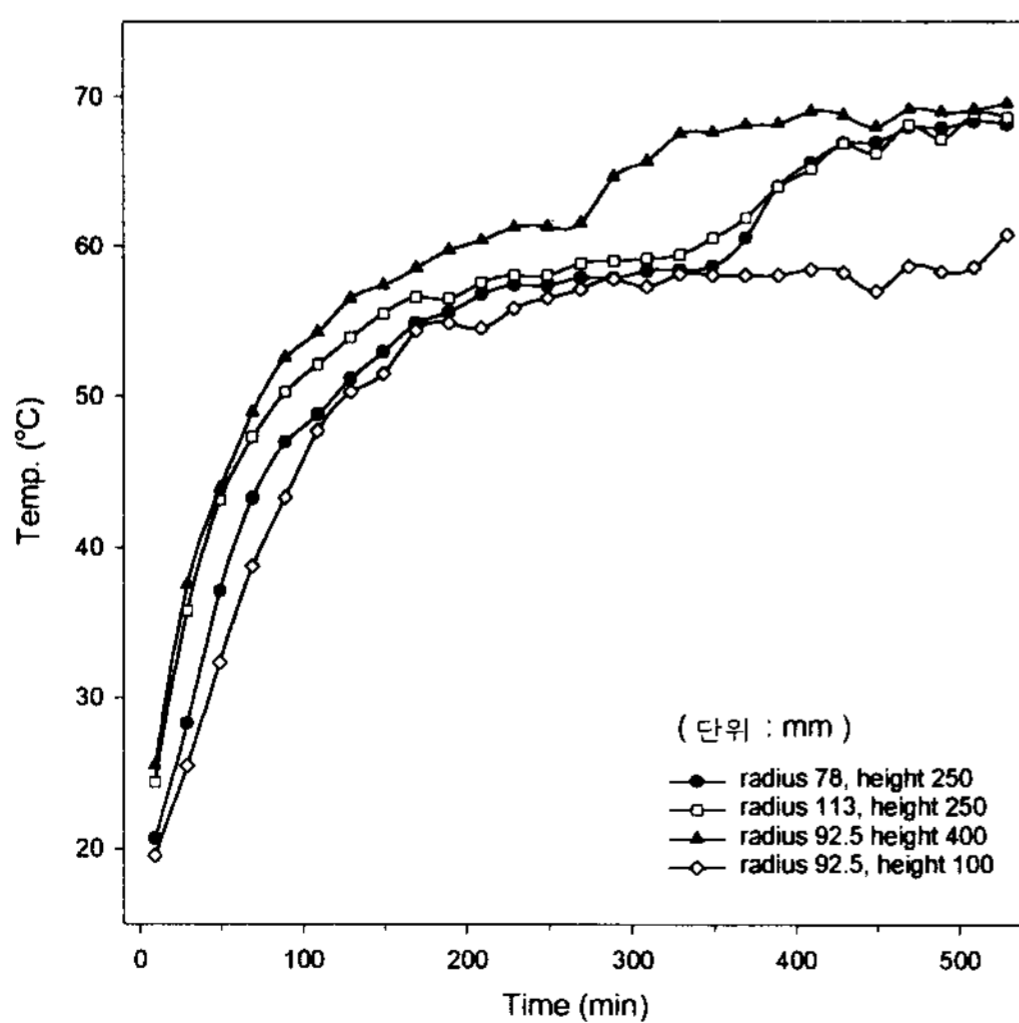


Fig. 3. Temperature profile of salt in heat storage stage(3 l/min, 70 °C)

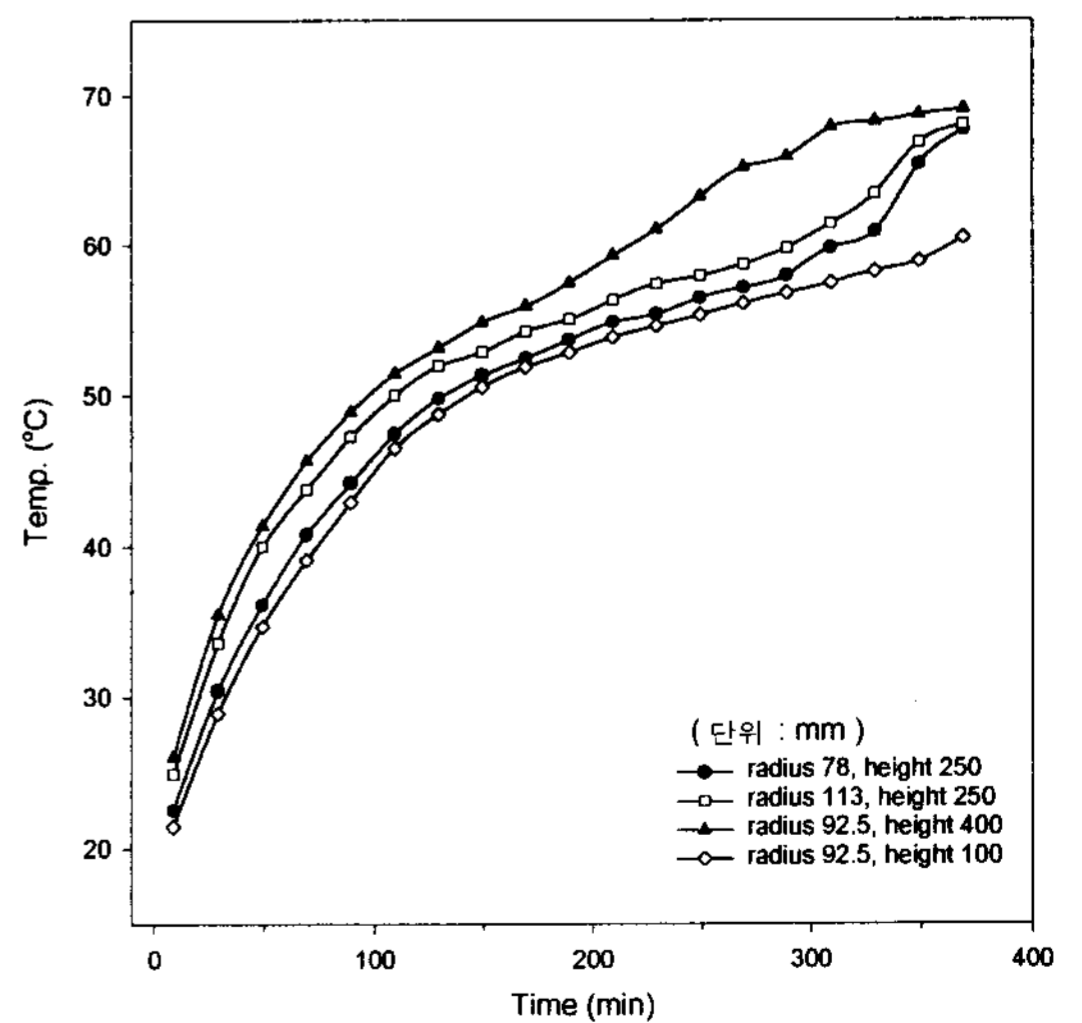


Fig. 4. Temperature profile of paraffin wax in heat storage stage(3 l/min, 70 °C)

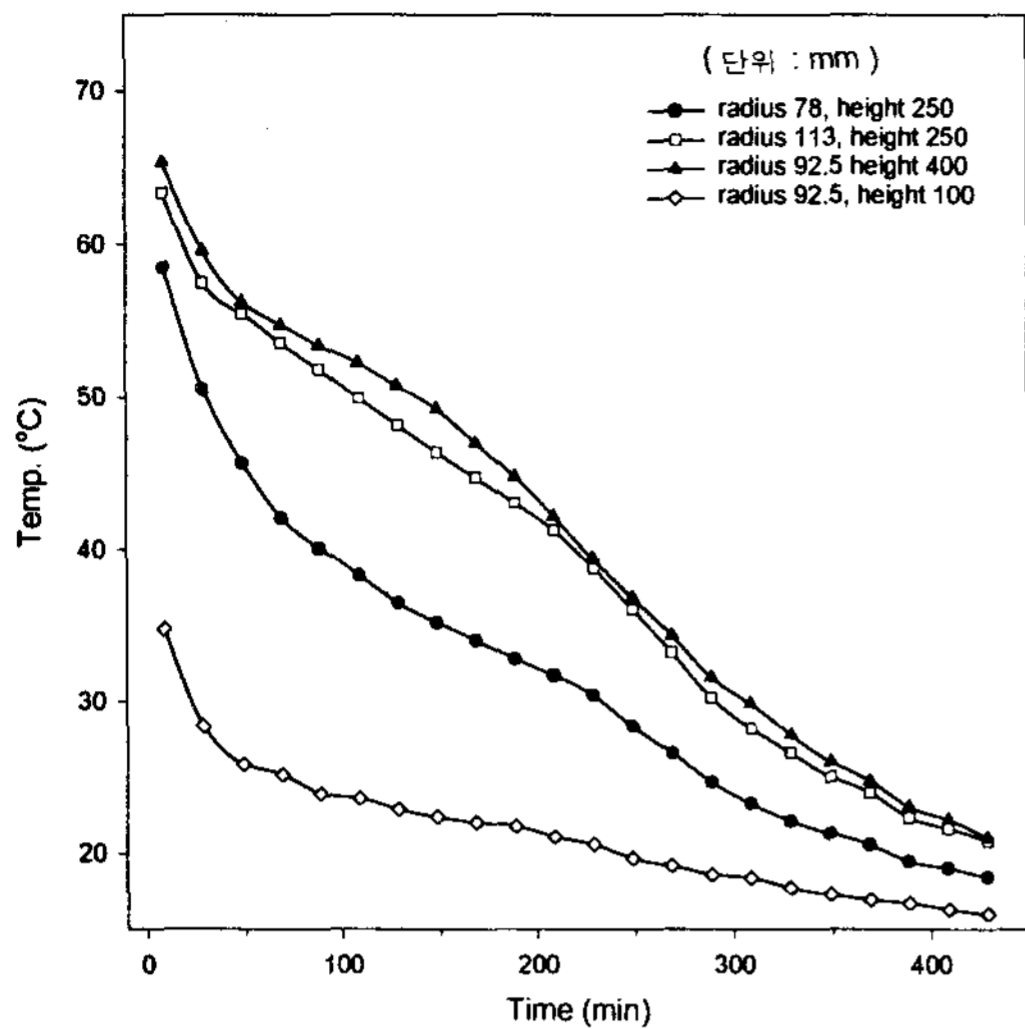


Fig. 5. Temperature profile of salt in heat recovery stage(3//min, 14 °C)

되는 냉각수의 온도가 14 °C, 유량이 3 liter/min의 방열과정에서의 무기염과 파라핀 왁스에 대한 온도분포는 그림 5와 그림 6에 나타내었다. 그림 5의 무기염의 경우를 보면, 앞의 축열과정과 달리 방열과정에서는 잠열구간이 분명하게 나타나지 않고 있음을 알 수 있으며, 축열조 하부(100mm)에서 보이는 매우 낮은 온도로 미루어 보아 축열조 하부에서 급격한 응고현상이 발생하며, 반경방향으로의 온도구배도 큼을 알 수 있다. 이러한 현상은 방열과정시 PCM의 초기온도(65 °C)에 비하여 열전달 유체의 유입온도가 너무 낮아서 열전달이 급속히 이루어지면서 열전달 유체가 PCM의 열량을 상대적으로 빠른 시간 내에 회수하게 되어 잠열 구간을 뚜렷하게 보이지 않게 되는 것으로 여겨진다. 축열조내에서 잠열물질이 이러한 온도구배를 갖는 또다른 이유는 냉각수가 축열조의 하부에서 상부로 흐르기 때문이며, 반경방향의 큰 온도차 또한 열전달 관의 외벽에 응고된 고체면의 높은 열저항 때문으로 여겨진다. 한편 그림 6의 파라핀 왁스의 경우에는 비교적 균일한 응고과정을 보여주고 있으며, 이

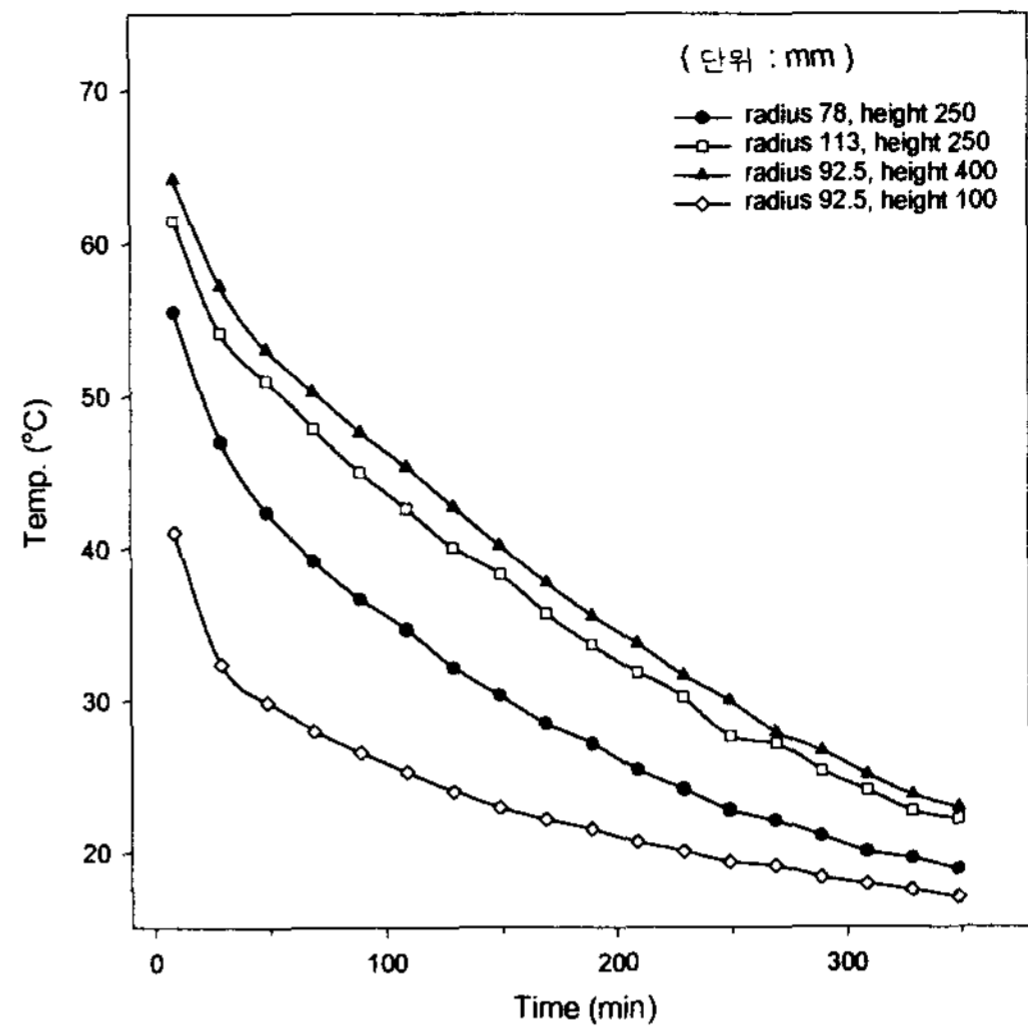


Fig. 6. Temperature profile of paraffin wax in recovery stage(3//min, 14 °C)

것은 아마도 자연대류에 의한 영향으로 여겨진다. 하지만 무기염의 경우와 같이 축열조의 상부와 하부의 온도차가 크게 나타나고 있음을 알 수 있으며, 따라서 열회수를 위한 냉각관의 형태가 효율적인 열회수에 중요한 인자임을 알 수 있다.

3.2 총괄 열전달 계수

축열 및 방열과정에서 축열물질과 열전달관의 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 나타난 이중관 열교환기에서의 총괄 열전달계수식을 사용하여 근사적으로 축열 및 방열과정에서의 열전달계수를 구하였다. 이 경우 열전달 유체의 열저항은 무시하였다.

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

q 는 순간 전달 열량으로 열전달 유체의 질량 유속과 입출구의 온도, 유체의 열용량의 곱으로 구하고, T_{PCM} 의 값은 PCM에 설치된 4개의 열전대가 측정된 온도의 산술 평균값을 사용하였다. 그림 7과 그림 8은 튜브형 축열조의 축열과정에서 얻어진 무기수화염과 paraffin wax의 시간에 따른 열전달 계수를 나타낸 그래프이다. 초기에 축열조 벽면과 열전달 유체간의 온도차가 크고 PCM의 현열과 상변화가 시작됨에 따른 잠열의 회수로 초기에 활발한 열전달이 이루어지지만 전열벽면에 액상의 PCM이 생겨남에 따라 열전달 계수는 급격하게 감소하기 시작한다. 이러한 현상은 액상 PCM이 고상 PCM과 전열벽면 사이에서 열저항으로 작용을 하게 되고 전열벽면에 생긴 액상 PCM이 점차 두꺼워짐에 따라서 열전달이 점차적으로 감소하게 된다. 하지만, 액상의 밀도

변화가 심한 paraffin wax의 경우에는 액상 PCM의 생성이 많아짐에 따라 전도에 의한 열전달에 더불어 대류에 의한 열전달이 활발해지고 이에 따른 액상 왁스 내에서 열전달의 촉진 현상이 발생하여 열전달계수는 증가하게 된다. 반면에 무기수화염의 경우에는 증점제 등의 첨가와 밀도 변화가 작은 이유 등으로 인하여 액상 PCM의 증가에 대한 대류 열전달이 paraffin wax에 비하여 덜 이루어짐을 알 수 있다.

그림 9와 그림 10은 무기염과 파라핀 왁스에 대한 축열과정에서 얻어진 평균 열전달계수를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 열전달 유체의 유량이 커지고, 유입온도가 높아짐에 따라서 열전달계수가 증가함을 알 수 있다. 이는 열전달 유체의 유량이 커지면서 열전달 유체의 난류 흐름이 촉진되어 열전달이 촉진되고 높은 유량에서는 유입유량의 출구온도가 유량이 작은 경우보다 낮기 때문에 PCM과 큰 온도차를 유지하기 때문인 것으로 보여진다. 또한 유입온도가 높을 경우에도 역시 열전달 유체와 PCM 간의 온도차가 커지기 때문에 열전달의 촉진이 생기게 된다. 두

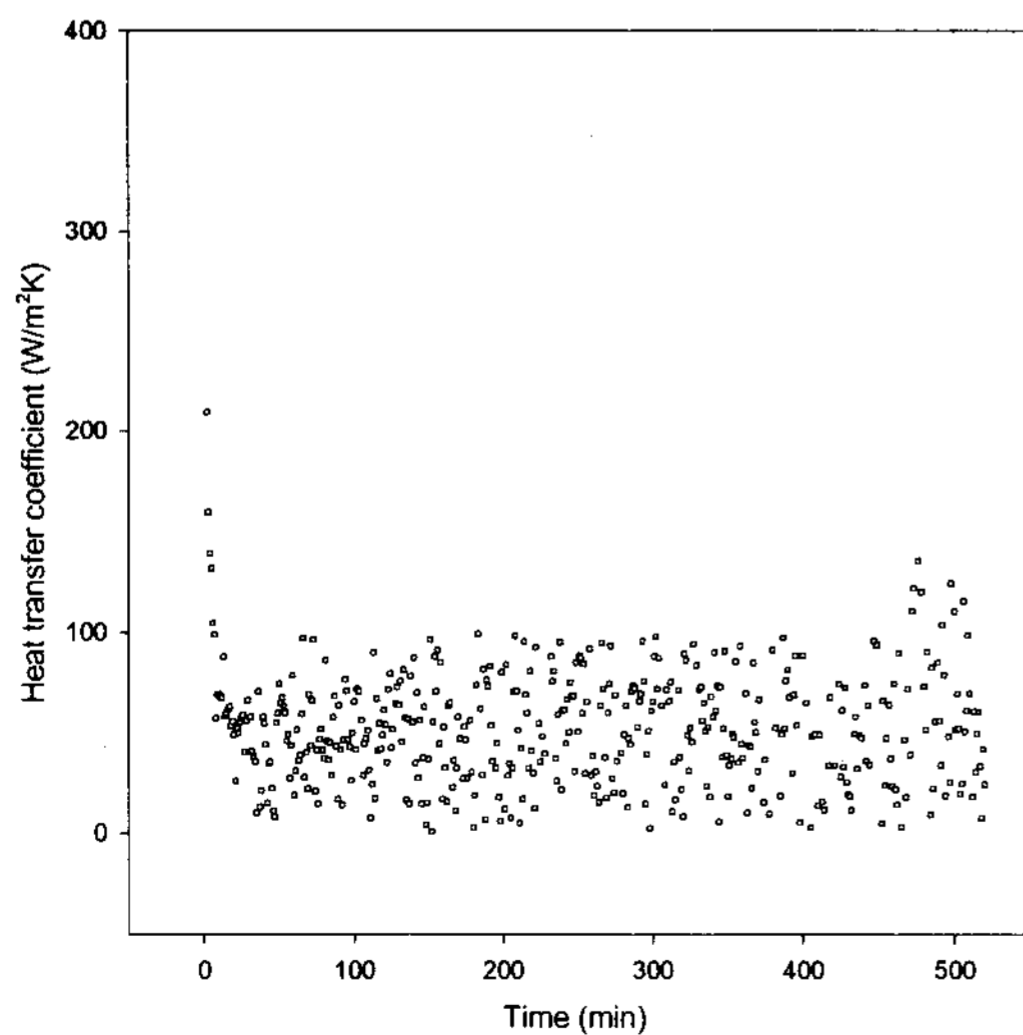


Fig. 7. Heat transfer coefficient of salt with time(5 l/min, 70 °C)

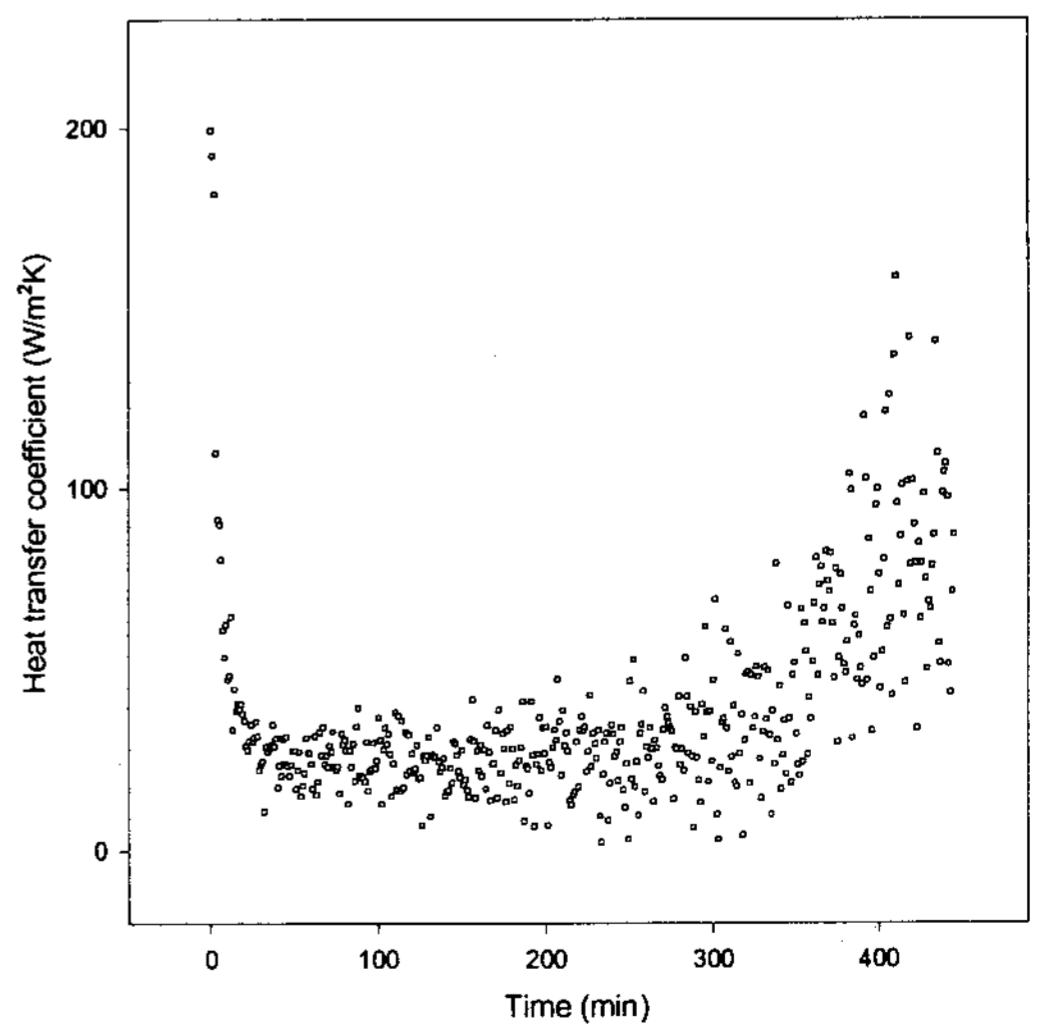


Fig. 8. Heat transfer coefficient of paraffin wax with time(5 l/min, 70 °C)

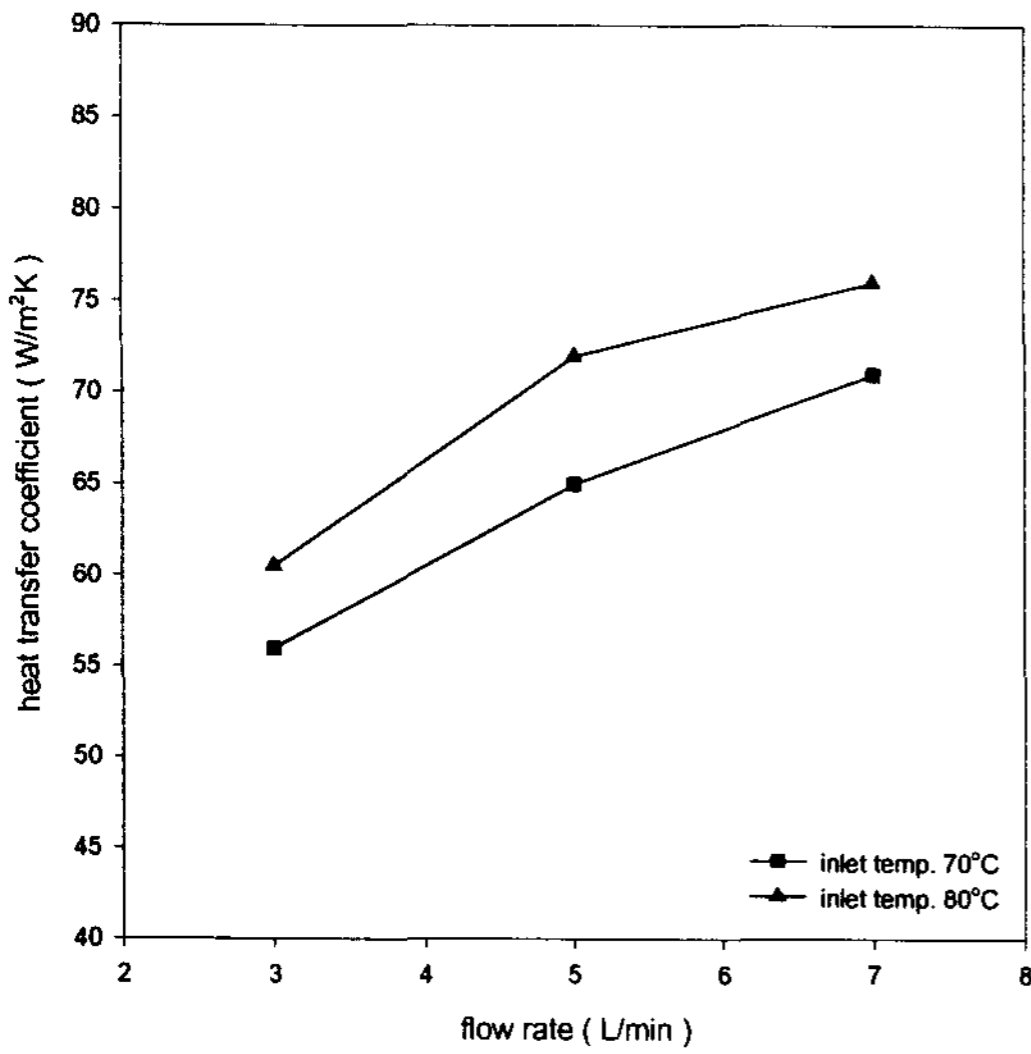


Fig. 9. Average heat transfer coefficient of salt in heat storage stage

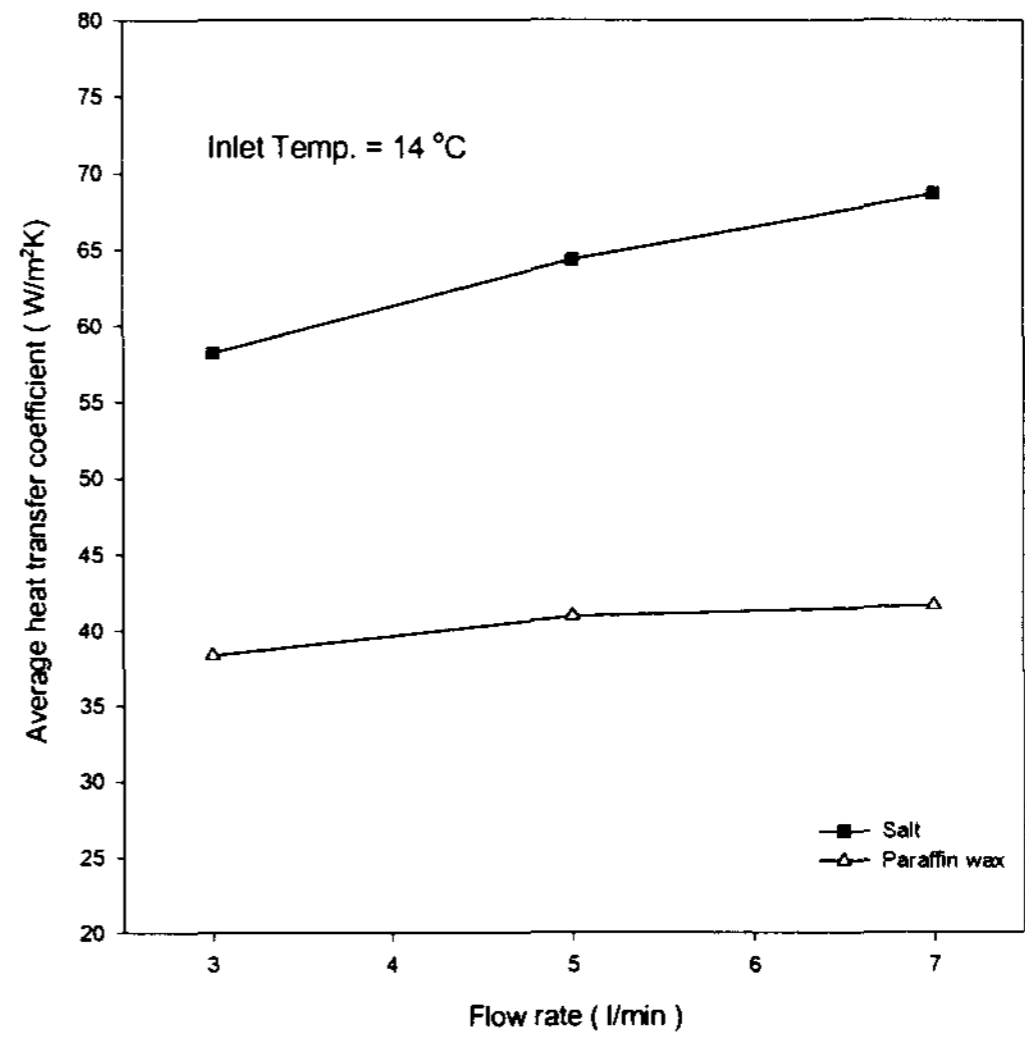


Fig. 11. Average heat transfer coefficient of salt and paraffin wax in heat recovery stage

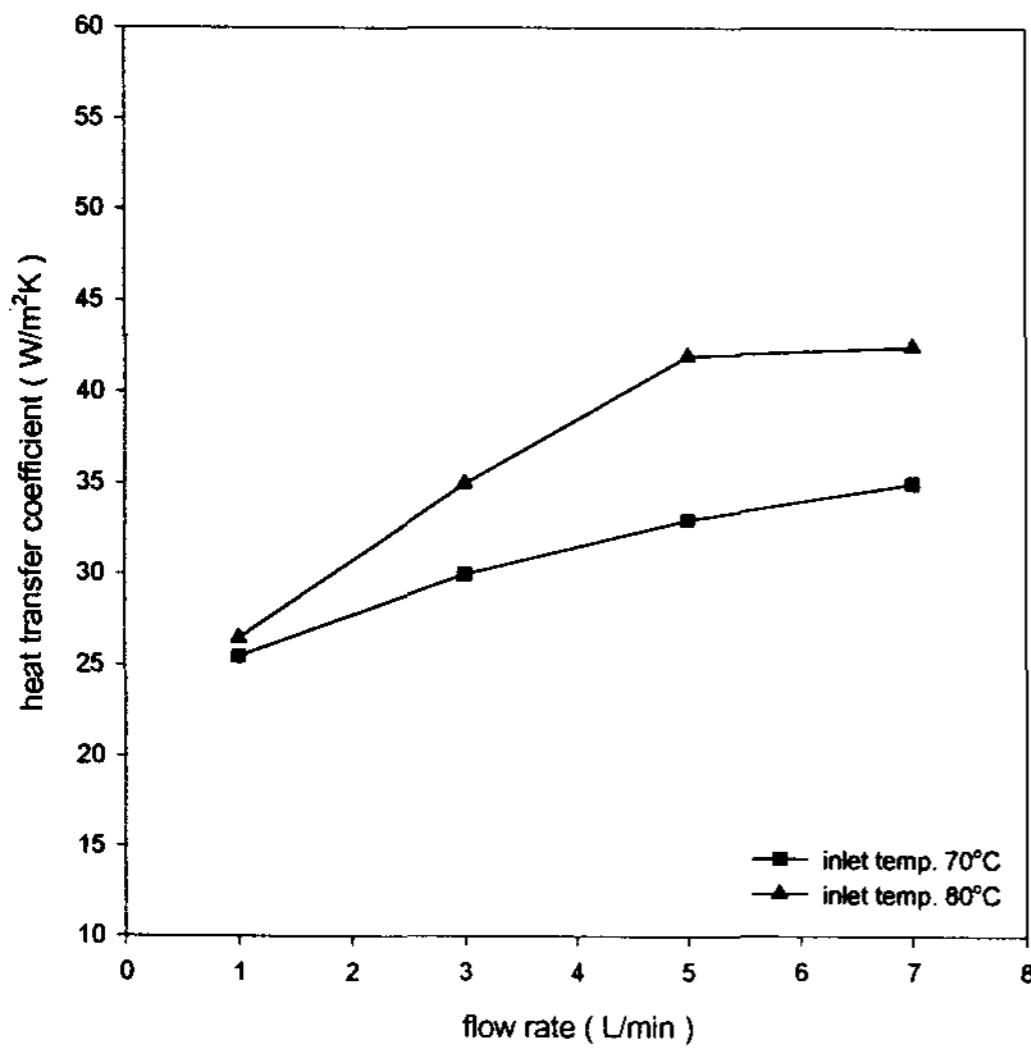


Fig. 10. Average heat transfer coefficient of paraffin wax in heat storage stage

가지 PCM에 대한 평균 열전달계수를 비교하여 보면, 무기수화염이 paraffin wax에 비하여 더 큰 값의 열전달계수를 가지는 것을 알 수 있다. 이는 paraffin wax가 용융이 진행됨에 따라 대류 열전달이 촉진되기는 하지만, 주 열전달 메카니즘

인 열전도의 측면에서 볼 때는 무기염이 paraffin wax에 비하여 2배 이상 더 큰 열전도도를 가지기 때문에 나타나는 현상으로 보여진다. 하지만, 본 연구에서 얻어진 평균 열전달 계수는 본 연구실에서 행한 핀이 설치된 소규모의 축열조 실험에서 얻어진 열전달계수인 115 W/m²K -160 W/m²K와 비교하여 매우 낮은 값을 가짐을 알 수 있었고,^{5,6)} scale-up에 따른 열전달 계수의 저하가 일어남을 알 수 있다.

한편 방열과정에서 얻어진 평균열전달 계수를 그림 11에 나타내었으며, 앞의 축열과정과 비슷한 경향을 보임을 알 수 있다.

본 실험결과로부터 잠열축열조에서 열전달의 주요 메카니즘은 전도이며, 비교적 큰 규모의 축열조에서는 열전달의 저항인 축열물질의 응고층(용융층)의 두께가 증가함으로써 열전달계수가 낮아지게 됨을 알 수 있다. 따라서 상업적 규모의 축열조 설계시에는 이러한 열저항을 최소화하는 형태의 축열조의 설계가 매우 중요함을 알 수 있었다.

3.3 잠열축열조의 축열 및 방열 효율

축열조의 축열 및 방열효율은 주어진 온도구간에서 축열 및 방열시 축열물질의 현열 및 잠열의 이론값에 대한 실제로 열전달 유체의 에너지 수치로부터 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 : 충전된 PCM의 질량
- M : 축열조 재질의 총질량
- C_{ps} : 고체 PCM의 열용량
- C_{pl} : 액체 PCM의 열용량
- C_p : 축열조 재질의 열용량
- λ : PCM의 잠열량

본 실험 조건에서 계산된 Q_{max} 의 양은 무기수화염의 경우 1.182×10^3 kJ, 파라핀 왁스의 경우 6.172×10^2 kJ로 계산되었다. 또한, 열전달 유체의 에너지 수치는 식 (3)에 의해서 계산되었다.

$$Q = \int mCp(Tin - Tout) dt \quad (3)$$

그림 12와 그림 13은 무기수화염과 파라핀왁스에 대하여 축열과정에서 유입되는 열전달 유체의 온도가 80 C 일 때, 열전달 유체의 유량에 따른 축열조의 축열량을 시간에 따라서 나타낸 그림이다. 앞의 열전달 계수 그림에서 언급하였듯이, 열전달 유체의 유량이 증가할수록 축열량이 증가함을 알 수 있다. 이는 열전달 유체의 유량이 커짐

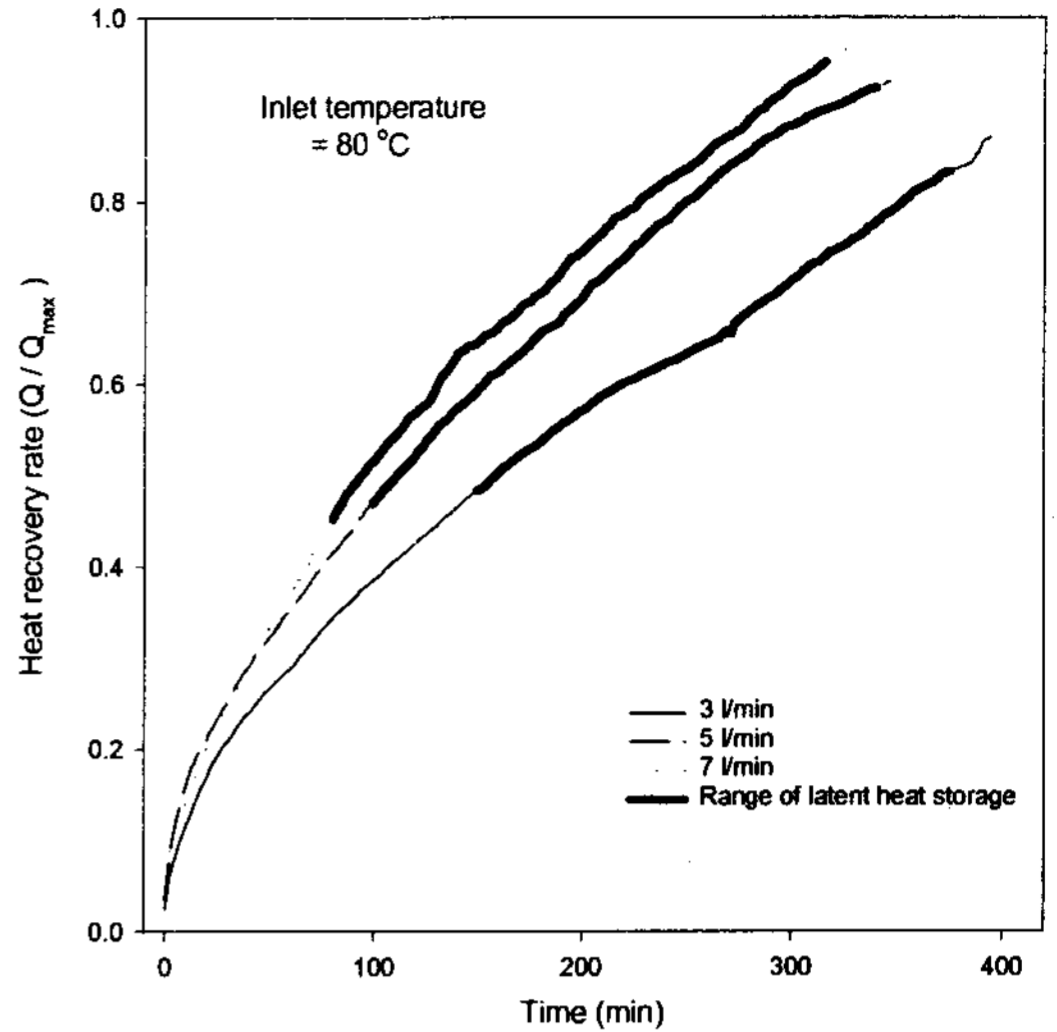


Fig. 12. Heat storage efficiency of salt with different flow rate.(80 °C)

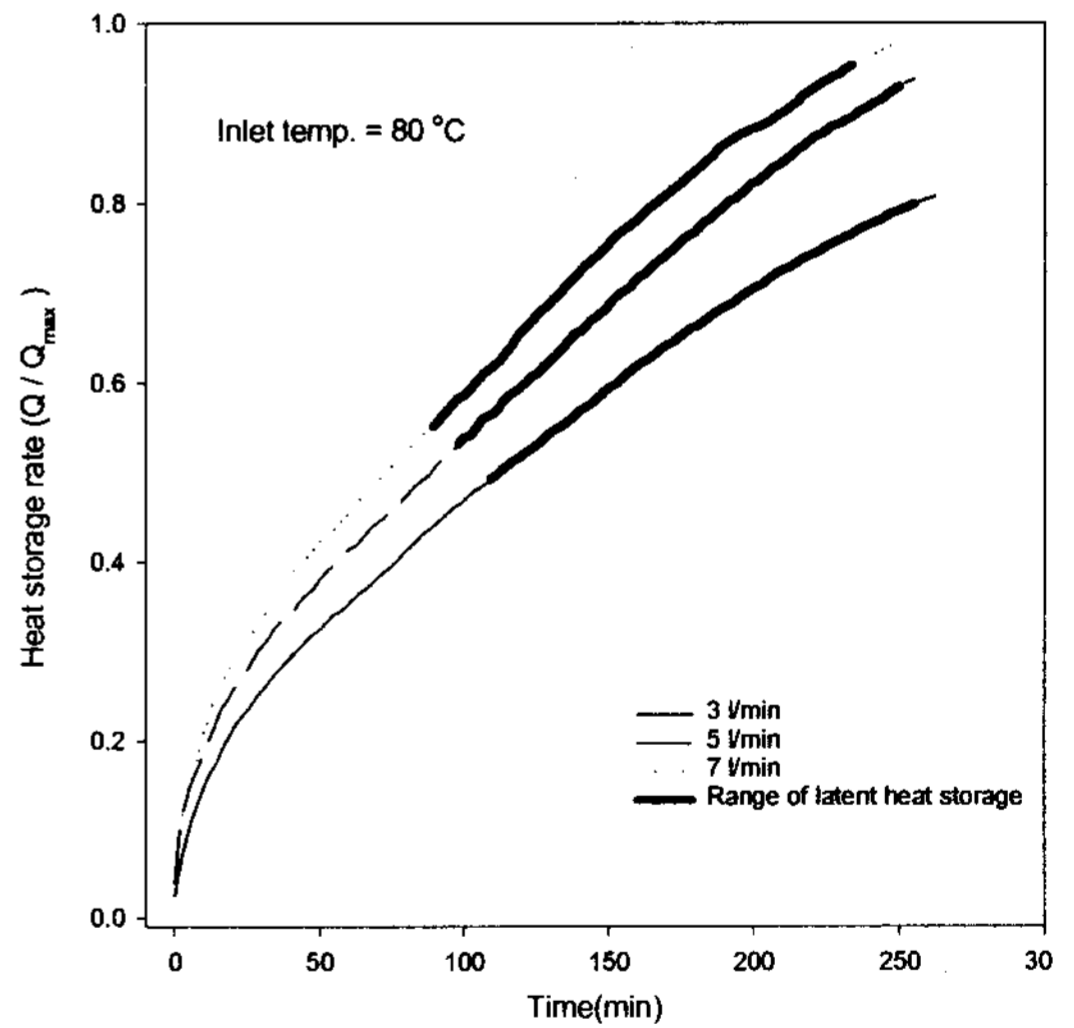


Fig. 13. Heat storage efficiency of paraffin wax with different flow rate (80 °C)

에 따라서 난류 흐름이 촉진되어 열전달이 촉진되고 높은 유량에서는 유입유량의 출구온도가 유량이 작은 경우보다 높기 때문에 PCM과 큰 온도차를 유지하기 때문인 것으로 사려된다. 또한 그림의 굵은 실선은 잠열과정에서의 축열량을 보

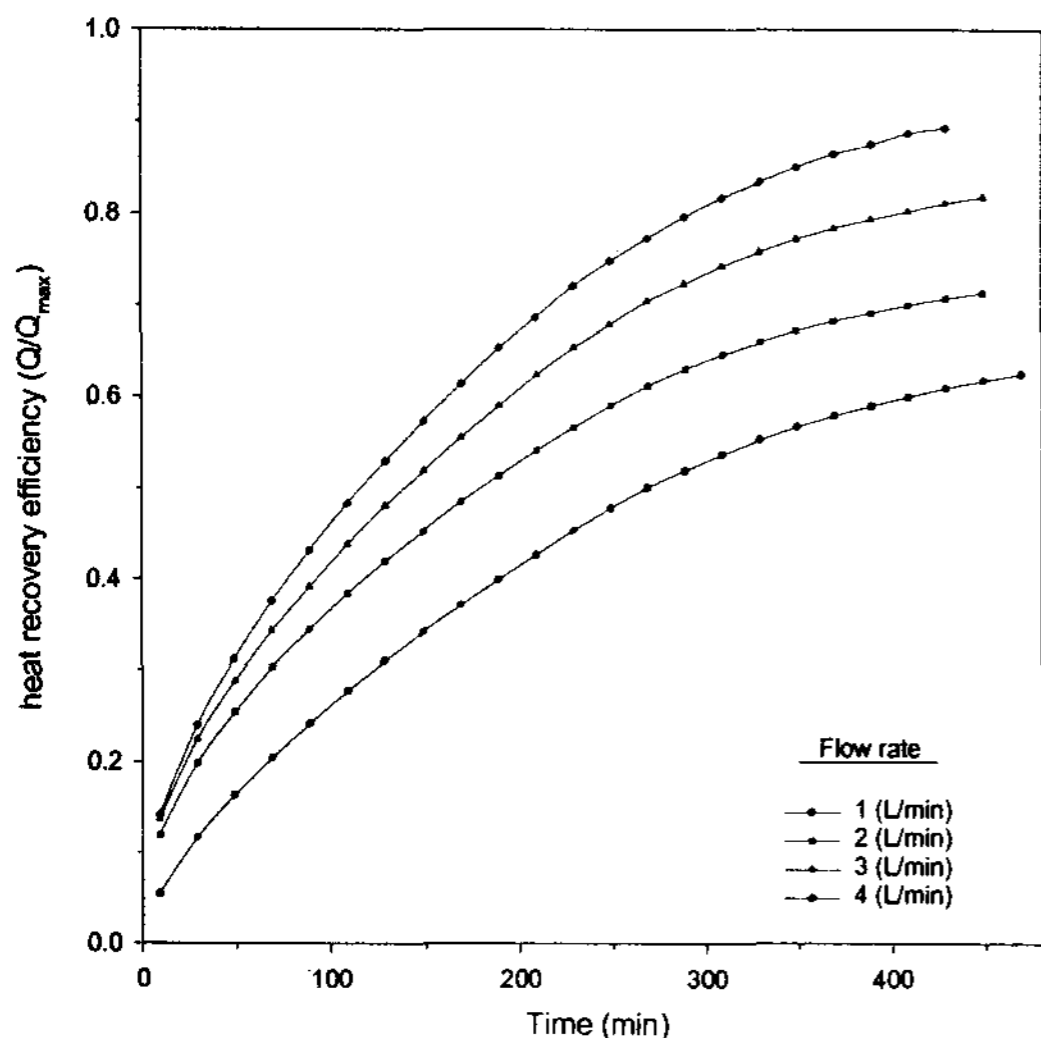


Fig. 14. Heat recovery efficiency of salt with different flow rate (14 °C)

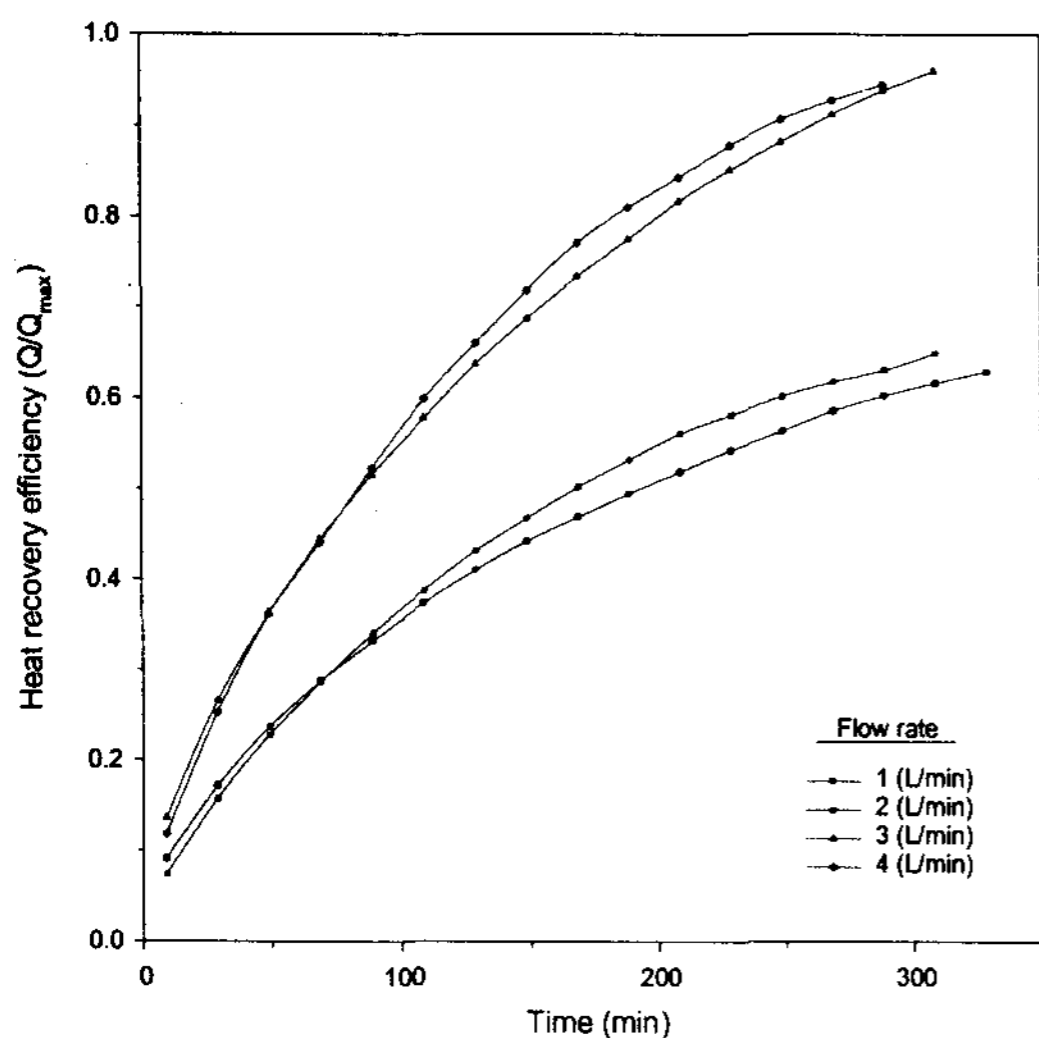


Fig. 15. Heat recovery efficiency of paraffin wax with different flow rate (14 °C)

여주는 것으로서, 시간의 경과에 따라서 열저항이 증가하여 다소 완만한 기울기를 가짐을 볼 수 있다. 그림에서 알 수 있듯이 무기염과 파라핀 왁스의 경우 실제 축열량은 열전달 유체의 유량에

따라서 이론적 축열량의 약 95-80% 정도를 축열하는 것으로 나타났다. 이것은 축열조 내부에는 완전히 용융되지 않은 PCM 이 존재한다는 것을 의미한다고 볼 수 있다.

한편 방열과정에서 무기염 및 파라핀 왁스에 대한 축열조의 방열효율을 그림 14와 그림 15에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 축열과정에 비하여 방열효율이 다소 낮음을 알 수 있으며, 특히 파라핀 왁스의 경우 적은 유량의 열전달 유체가 유입될 경우 매우 낮은 방열효율을 나타냄을 볼 수 있다. 따라서 방열과정에서는 고체 응고층에 의한 열저항이 축열과정보다 더욱 큼을 알 수 있으며 이러한 실험결과로부터 잠열 축열조에서 전열관의 효율적인 배치가 열 회수 및 저장에 매우 큰 요인임을 알게 되었다.

4. 결 론

잠열 축열재로 무기수화염과 파라핀 왁스를 이용한 3중관식 잠열축열 시스템의 축열 및 방열 과정에서 나타난 열전달 특성의 실험으로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 축열효율은 열전달 유체의 유량이 증가할수록 증가하였다.
- 2) 축열물질과 전열관의 열전달계수는 열전달 유체의 유량이 증가하고, 유입온도가 높을수록 큰 값을 나타내었고, 파라핀 왁스에 비해서는 무기수화염의 경우가 더 높은 값을 나타내었다.
- 3) 소규모의 축열조에서 얻어진 열전달계수와 비교시, 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) 축열조의 축열효율 결과로부터 축열물질의 완전한 용융을 위한 좀더 효과적인 축열관의 배치가 필요함을 알게되었다.

ρ_f : fluid 의 밀도 [kg/m^3]
 λ : 잠열 [kJ/kg]
 μ : 점도 [$10^{-3}\text{kg/m}^3 \cdot \text{sec}$]

Nomenclature

A : 전열면적 [m^2]
 C_{Pf} : 열전달 유체의 열용량 [$\text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$]
 C_{Pl} : PCM의 액상열용량 [$\text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$]
 C_{Ps} : PCM의 고상열용량 [$\text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$]
 k_l : 액상축열재의 열전도도 [$\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$]
 k_s : 고상축열재의 열전도도 [$\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$]
 \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 [$^\circ\text{C}$]
 T_f : 열전달 유체의 온도 [$^\circ\text{C}$]
 T_g : 유리전이 온도 [$^\circ\text{C}$]
 T_w : 열전달 튜브의 외벽 온도 [$^\circ\text{C}$]

Greek letters

ρ_s : Solid 의 밀도 [kg/m^3]

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. 양운섭외 4인, “태양열 저장을 위한 축열조 소형화 실험적 연구”, 태양에너지, Vol.18, No.1, 1998, pp.45~56
11. 한귀영외 5인, “캡슐화된 PCM을 이용한 유동층 축열조에서 열전달 특성 연구”, 태양에너지, Vol.18, No.3, 1998, pp.89~94.
12. 한귀영외 1인, “잠열축열시스템의 축열과정에서 자연대류의 영향에 관한 연구”, 태양에너지, Vol.19, No.2, 1999, pp.29~36.