

잠열축열시스템의 축열과정에서 핀에 의한 열전달 촉진 특성

이민경 · 한귀영[†]

성균관대학교 화학공학과
(1997년 4월 29일 접수, 1997년 8월 18일 채택)

Heat Transfer Enhancement by Fins during Heat Storage Stage in a Latent Heat Storage System

Min Kyung Lee and Gui Young Han[†]

Department of Chemical Engineering, SungKyunKwan University, Suwon 440-746, Korea
(Received 29 April 1997; accepted 18 August 1997)

요 약

망초와 파라핀왁스를 잠열축열재로 하여 환형 핀이 부착된 전열관을 통한 잠열축열시스템의 축열과정에서의 열전달 특성을 살펴보고자 하였다. 실험에 사용된 축열조는 높이가 530 mm, 직경이 74 mm이고 축열조 중앙부에 삽입된 열전달관은 높이가 480 mm, 직경이 13.5 mm인 이중관으로 되어 있으며, 열전달 유체로는 물을 사용하였다. 축열재로 열을 저장하는 축열과정에서 파라핀왁스의 경우에는 고체와 액체간의 상 전이에 따른 밀도 차이가 커서 전도 및 자연대류에 의해 열전달이 이루어지는데 반하여 망초의 경우에는 주로 전도에 의하여 열전달이 이루어짐을 알 수 있었다. 핀에 의한 열전달 촉진 효과는 얇은 핀의 경우에는 그다지 효과가 크지 않은데 반하여 두꺼운 핀의 경우에는 뚜렷한 열전달 촉진현상을 볼 수 있었으며 파라핀왁스의 경우에서 핀에 의한 열전달 촉진의 경향이 크게 나타났다. 실험에서 얻어진 축열과정에서의 열전달계수는 망초의 경우에는 80-180 W/m²K, 파라핀왁스의 경우에는 50-180 W/m²K이었다.

Abstract—Heat transfer characteristics of a low temperature latent heat storage system during the heat storage stage was examined for the circular finned tubes using Na₂SO₄ · 10H₂O and paraffin wax as phase change materials. The heat storage vessel has the dimension of 530 mm height, 74 mm inside diameter and inner heat transfer tube is 480 mm in height and 13.5 mm outside diameter. Hot water was employed as the heat transfer fluid. During the heat storage stage, conduction was the major heat transfer mechanism for the Na₂SO₄ · 10H₂O, while both conduction and natural convection were the major heat transfer mechanism for the paraffin wax. The heat transfer enhancement by fins over the unfinned heat transfer tube was negligible with the thin finned tube system whereas the enhancement by the thick finned tube was significant. The experimentally determined overall heat transfer coefficients for Na₂SO₄ · 10H₂O and paraffin wax were in the range of 80-180 W/m² K and 50-180 W/m² K respectively.

Key words: Latent Heat Storage, Heat Storage Rate, Heat Transfer Coefficient

1. 서 론

최근 인구의 증가와 문명의 발달로 가속화된 석유자원의 고갈과 이에 따른 대기오염, 지구온난화 등 환경문제에 대응하기 위해 석유 대체 에너지원에 대한 연구개발이 활발히 진행되고 있다. 이에 따라 새로운 에너지원의 개발뿐만 아니라 효율적인 에너지의 사용기술 또한 주요한 연구과제가 아닐 수 없다. 국내에서도 열에너지의 효율적인 이용을 위한 기술개발이 중요한 연구과제로 부각되어 태양열, 산업폐열, 심야 잉여전력 등의 효과적인 이용기술이 연구되고 있다. 이러한 에너지원들은 시간적, 질적으로 변동하며 분산되어 있는 저급 에너지이므로 이것을 안정화, 균일화하여 집중된 고급 에너지 형

태로 사용하기 위해서는 축열시스템의 기술개발이 요구된다.

축열시스템은 에너지 발생처와 에너지 사용처 간의 시간적, 양적, 질적으로 발생하는 불일치를 해결하여 다량의 에너지의 효율적 사용을 가능하게 한다. 이러한 축열시스템에는 크게 자갈, 물 등을 이용하는 현열축열법과 일정온도에서 상변화를 일으키는 물질(주로 무기수화물)을 이용하는 잠열축열법, 그리고 가역반응열을 이용하는 화학축열법 등이 있다. 상변화물질의 잠열을 이용하는 축열방식은 현열축열장치보다 단위부피 및 단위무게당 열에너지의 저장용량이 커서 장치의 크기를 줄일 수 있는 장점이 있다. 또한 잠열 축열방식은 사용되는 잠열재의 상전이 온도부근의 거의 일정한 온도에서 축열 및 방열을 하므로 회수되는 에너지의 질이 균일한 장점이 있다.

이러한 잠열축열시스템에 관한 연구는 주로 적절한 축열재로 요구되는 물성인 높은 축열밀도, 상변화시의 부피변화의 최소, 높은 열전도도, 화학적 안정성 및 낮은 부식성 등을 만족하는 잠열물질을 찾는 데 주력해 왔다[1]. 또한 잠열축열재의 단점인 상분리와 과냉각 현상을 최소화하는 여러 가지 첨가제의 개발에 주력해 왔으며, 열전달 측면에서의 잠열축열장치의 개발에 관한 연구는 상대적으로 미미하였다. 최근에 이르러 Yanadori와 Masuda[2]는 축열과 방열과정의 열전달 성능을 개선하기 위해 수직 원통관을 사용하여 축열조내의 열전달 유체를 향류접촉시킴으로서 열전달 효율을 개선하려고 하였고, Herrick[3]은 수평 회전 원통관을 이용한 물리적인 교반 효과로서 열전달을 향상시키는 실험을 수행하였다. 국내에서는 Choi 등[4]이 전열관에 핀을 설치하여 열전달 향상을 연구하였고, Fouada 등[5], 강 등[6]은 열전달 유체와 상변화 물질의 직접접촉에 의한 열교환 방식에 관한 연구를 수행하였다.

이러한 연구결과를 바탕으로 본 연구에서는 무기수화염의 일종인 망초와 또 다른 종류의 축열재로 고려되는 파라핀왁스를 축열물질로 선정하여 열의 저장단계인 축열과정에서 축열물질의 물리적, 열적 성질의 변화에 따른 열전달 특성을 비교하고자 하였다. 무기수화염 계열의 축열재인 망초는 단위부피당 축열량은 파라핀왁스보다 크지만, 과냉각과 층분리를 억제하기 위하여 조해제와 증점제가 필요하다는 단점이 있다. 한편 파라핀왁스는 망초보다 단위 부피당 축열량은 떨어지지만 증점제나 조해제와 같은 첨가제가 요구되지 않으며, 액상과 고상간의 밀도차가 크기 때문에 축열과정에서 축열재와 전열관과의 열교환에서 전도뿐 아니라 자연대류에 의하여 열전달이 진행될 것으로 예측이 되어 열전달 효율이 향상될 것으로 판단된다. 때문에 이러한 다른 성질의 축열재의 사용에 따른 축열과정에서의 열전달 특성을 살펴보는 것은 축열재의 선정에 기초적인 자료가 될 것으로 여겨진다. 아울러 잠열축열시스템에서 열전달을 촉진하기 위하여 열전달 유체가 흐르는 축열조 내부의 수직 원통 전열관에 두 가지 형태의 환형 핀을 부착하여 열전달 면적이 증가된 축열장치에서 사용된 핀의 형상에 따른 열전달 촉진의 정도를 사용되는 축열재의 종류, 열전달 유체의 유입온도와 유량을 변수로 하여 실험적으로 관찰하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 실험에 사용된 축열시스템의 개략적 구성도는 Fig. 1에 나타내었다. 축열조는 축열물질을 저장하는 원통형 용기와 그 내부에 축열물질과 열전달 유체간의 전열이 일어나는 전열관으로 구성되어 있다. 축열조는 스테인레스 스틸로 만들어졌으며 직경이 74 mm, 높이는 530 mm이며 전열관은 이중관으로서 내부관은 직경이 13.5 mm, 높이는 480 mm이며, 외부관은 직경이 19 mm, 높이는 530 mm이다. 실험에 사용된 전열관은 모두 3가지 종류였으며 하나는 전열관 벽에 핀이 없는 수직 관, 다른 두 가지는 열전달 촉진을 위하여 두께가 각각 0.4 mm(thin fin), 3.0 mm(thick fin)인 환형 핀을 사용하였다. 핀은 40 mm 간격으로 12개가 축방향으로 전열관에 용접되어 있다. 사용된 전열관에 대한 상세한 도면은 Fig. 2에 나타내었다. 열전달 유체로는 물을 사용하였고 열전달 유체는 전열관의 내부관으로 들어가서 밑부분에서 이중관 사이의 환형 공간을 통하여 위로 흐르면서 열교환이 이루어지게 하였다. 열교환이 이루어지는 과정에서 열전달 유체쪽의 열 저장을 줄이기 위해 유체의 난류 촉진용으로 내부관 바깥쪽 부분에 직경 2 mm의 실리콘 선을 감았다.

축열물질의 온도분포를 측정하기 위하여 용기의 각 부위에 반경 방향과 축방향을 기준으로 T-type 열전대를 설치하였다. 열전대는 2 mm의 가는 스테인레스 스틸 보호관에 삽입하여 끝부분을 junction

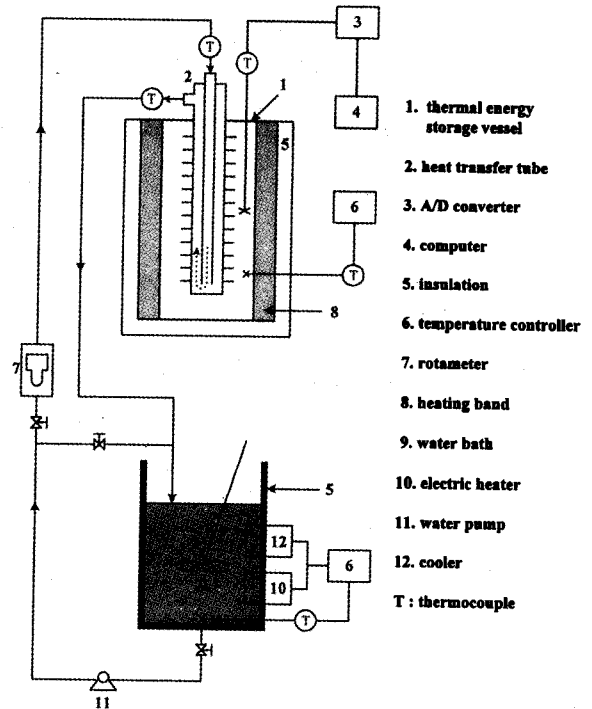


Fig. 1. Schematic diagram of test facility.

시켰다. 이때 열전대 선과 금속 보호관에 존재하는 온도구배에 따른 열전대 junction으로의 열유입을 방지하기 위해 열전대의 길이는 온도구배가 없는 동심원주 형태로 금속보호관 직경의 40배 길이로 유지하였다[1]. 반경방향의 축열재 온도분포를 측정하기 위하여 전열관 벽면과 전 열관 중심으로부터 20, 30 그리고 37 mm에 열전대를 설치하였다. 또한 축방향의 축열재 온도분포를 측정하기 위하여 전열관 중심으로부터 20 mm 지점에 축방향으로 전열관의 밑바닥으로부터 각각 80, 160, 240 mm 지점에 열전대를 설치하였다. 또한 축열장치의 열저장 능력을 측정하기 위하여 열전달 유체의 유입구와 배

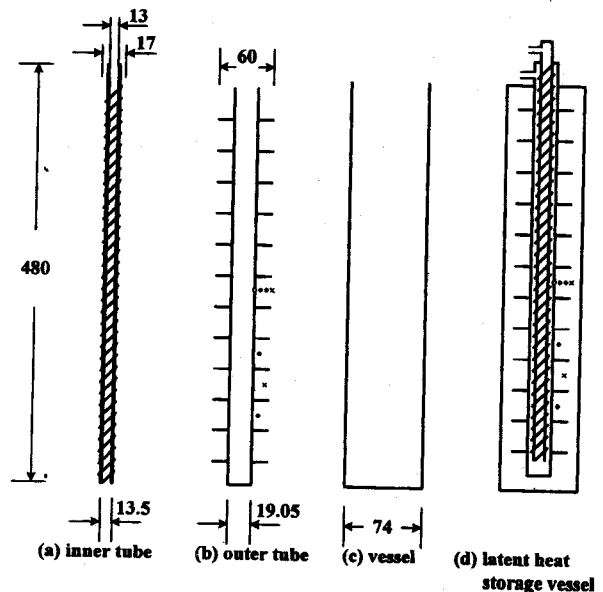


Fig. 2. Details of heat transfer tubes.

○: thermocouple on the heat transfer tube wall, ◇: thermocouple in the medium into the radial direction, ×: thermocouple outside into the radial direction, *: dimension in mm.

Table 1. Thermophysical properties of phase change material

	Paraffin wax	Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O
Peritectic point	42-44 °C	32.4 °C
Heat of transition	189 kJ/kg	241 kJ/kg
Specific heat(solid)	2.4 kJ/kg · K	1.76 kJ/kg · K
Specific heat(liquid)	1.8 kJ/kg · K	3.30 kJ/kg · K
Thermal conductivity(solid)	0.21 W/m · K	0.544 W/m · K
Density(solid)	765 kg/m ³	1460 kg/m ³
Density(liquid)	910 kg/m ³	1330 kg/m ³

출구에 각각 열전대를 설치하였다. 열전달 유체를 일정한 온도로 전 열관에 유입시키기 위하여 전기히터와 온도 조절계가 부착된 온수 공급탱크를 설치하였고, 일정한 온도의 열전달 유체는 유량계를 통하여 축열조내의 전열관으로 흐르게 하였다. 실험방법은 축열재의 용융온도보다 약 4-5 °C 낮은 온도가 되도록 축열재의 초기 온도를 고정하고 온수 공급탱크에서 일정한 온도로 유지되고 있는 열전달 유체를 전열관으로 흘리면서 잠열재와 유체간의 열교환을 수행하였다. 축열재의 반경방향으로 37 mm 떨어진 곳에 위치한 열전대의 온도가 축열재의 용융온도보다 약 5-6 °C 높은 온도를 보일 때 축열물질의 상변화에 의한 열저장이 종료되었다고 가정하였다.

본 실험의 변수인 열전달 유체의 유입온도는 망초의 경우에는 50, 60, 70 °C였으며, 파라핀 왁스의 경우에는 60, 70 °C였다. 한편 유입 유량은 두 가지 축열물질 모두 각각 0.2, 0.4, 0.6 l/min이었다. 축열 과정 중 축열장치에 설치된 열전대로부터 얻어진 온도변화는 매 15 초 간격으로 data acquisition system(Hydra Data Logger)을 거쳐서 컴퓨터에 저장되었다.

축열재로 사용된 망초는 Shinyo Chemical Co.의 1급 시약을 사용하였고 파라핀왁스는 Yakuri Chem. Co.의 1급 시약을 사용하였다. 본 실험에 사용된 축열물질의 열적, 물리적 성질은 Table 1에 나타내었다. 한편 실험에 사용한 망초는 상분리 현상과 과냉각 현상을 억제하기 위하여 조해제로 Borax를 사용하였고 증점제로는 코오롱 유화의 Acrylic acid sodium sulfate를 사용하였으며 축열재와 첨가제의 혼합비율은 망초:조해제:증점제가 94.8:3.0:2.2 wt%가 되게 하였다. 망초의 경우에 배합된 첨가제의 영향으로 순수한 망초보다 잠열량이 줄어들게 되고 첨가제가 배합된 망초의 실제 잠열량은 DSC를 이용하여 측정한 결과 176.8 J/g이었으며 파라핀왁스의 경우에는 175 J/g이었다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 온도분포

파라핀왁스와 망초를 사용하여 축열과정에서 반경방향 및 축방향의 시간의 경과에 따른 온도분포의 변화를 살펴보았다. Fig. 3과 4는 파라핀왁스와 망초의 축열과정에서 시간에 따른 축방향 온도분포이다. Fig. 3에 나타난 파라핀왁스의 경우 전열관으로부터 전도에 의하여 열전달이 되면서 파라핀왁스의 온도가 용융온도 이상이 되면 온도에 따른 밀도의 변화가 커지면서 밀도가 작은 용융된 액체는 상부로 올라간다. 따라서 시간이 경과함에 따라 축열조의 상부와 하부의 온도차가 커짐을 볼 수 있다. 그러나 Fig. 4의 망초의 경우에는 축열재의 온도가 용융온도 이상이 되어도 액상과 고상과의 밀도 차이가 크지 않기 때문에 축열장치의 상부와 하부간에 뚜렷한 온도차를 보이지 않고 있음을 알 수 있다.

이러한 축열재의 온도분포로부터 잠열 축열시스템에서 파라핀왁스의 경우 자연대류에 의한 열전달이 전도와 병행하여 일어나는 반면, 망초의 경우에는 자연대류의 영향이 미미하여 축열물질과 전열

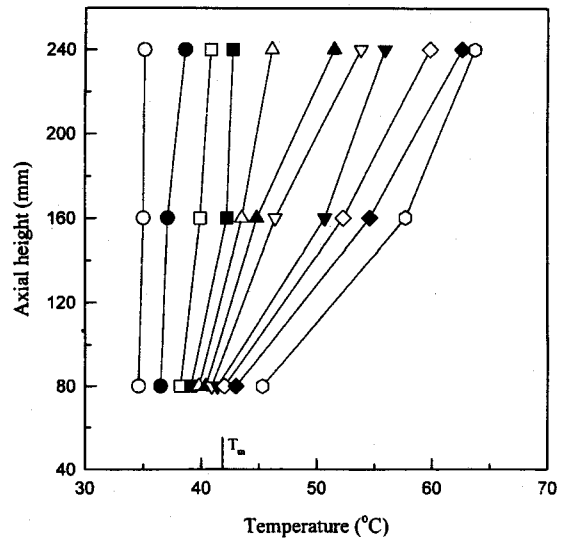


Fig. 3. Axial temperature distribution of paraffin wax in the unfinned tube system.

관과의 열전달은 주로 전도에 의하여 발생한다고 여겨진다.

3-2. 축열속도

잠열축열장치에서 축열과정은 비정상상태로서 축열의 초기단계에서는 전열관과 축열재와의 높은 온도차에 의하여 높은 축열성능을 보이며 시간이 경과할수록 온도차가 적어지므로 축열량이 떨어질 것으로 예상된다. 축열과정에서 전열관을 통한 잠열재로의 단위 시간당 축열량인 축열속도 q 는 열전달 유체의 입, 출입 온도차로부터 다음의 식으로 계산이 되었다.

$$q = m C_{pw} (T_i - T_o) \quad (1)$$

Fig. 5와 6은 각각 파라핀왁스와 망초에 대한 열전달 유체의 유입 온도 및 유입유량에 따른 축열속도의 영향을 나타내었다. 그림에서 보듯이 파라핀왁스와 망초의 경우 모두 열전달 유체의 유입온도가

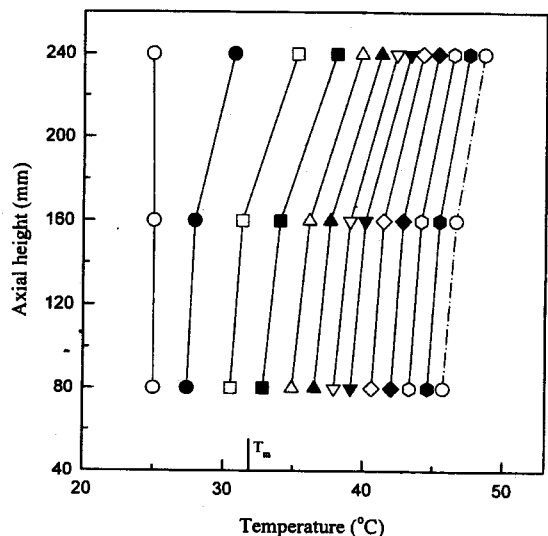


Fig. 4. Axial temperature distribution of Na₂SO₄ · 10H₂O in the unfinned tube system.

(time=0.5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 min from left to right).

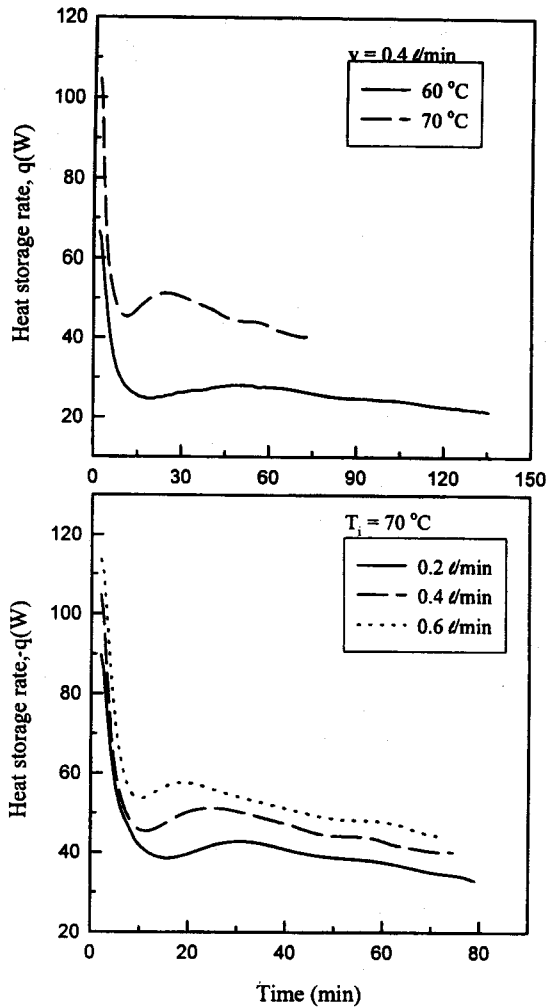


Fig. 5. Effect of inlet temperature and flowrate on heat storage rate for paraffin wax in the unfinned tube system.

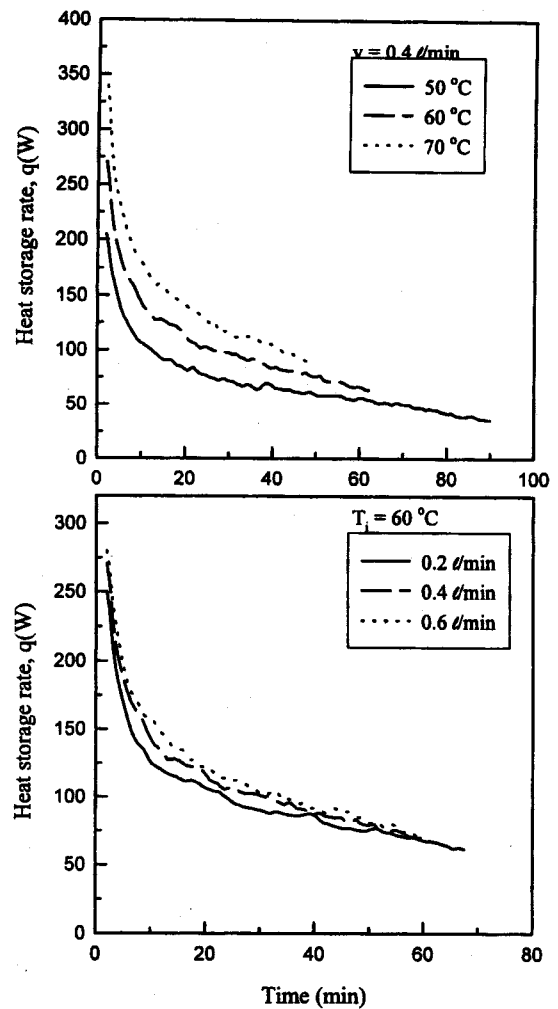


Fig. 6. Effect of inlet temperature and flowrate on heat storage rate for $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ in the unfinned tube system.

높을수록 축열속도가 높은 것을 볼 수 있다. 이것은 열전달의 추진력인 온도차가 크기 때문인 것으로 여겨진다. 또한 열전달 유체의 유입량이 클수록 높은 축열속도를 보이는 것은 유속이 높을수록 열전달 유체쪽의 열저항이 감소하기 때문이며, 또한 유량이 클수록 같은 유입온도에 대하여 출구온도가 상대적으로 높기 때문에 적은 유량보다는 큰 유량일 때 잠열재와 전열관 사이의 온도차가 높게 유지되어 축열속도가 높은 값을 가진다고 여겨진다. Fig. 7과 8은 파라핀 왁스와 망초의 시간의 경과에 따른 축열속도를 각기 다른 전열관의 형태에 대하여 나타내었다. Fig. 7에서 볼 수 있듯이 두꺼운 핀을 사용한 전열관과 얇은 핀을 사용한 전열관 그리고 핀이 없는 전열관의 순서로 축열속도에서 차이를 보이며 시간이 경과함에 따라 축열속도가 서서히 감소함을 알 수 있다. 한편 Fig. 8의 망초의 경우에도 전열관의 형태에 따른 축열속도의 차이는 유사하나 시간에 따른 축열속도의 감소가 파라핀 왁스의 경우보다 큼을 알 수 있다. 이것은 파라핀 왁스의 경우에는 축열시간이 경과함에 따라 축열물질의 밀도변화에 따른 자연대류에 의한 열전달이 상대적으로 증가하기 때문인 것으로 여겨진다. 하지만 축열속도의 절대치를 살펴보면, 망초의 경우가 파라핀 왁스의 경우보다 높은 축열속도를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이것은 망초가 주로 축열과정에서 전도에 의하여 열교환이 일어나며 전도에 큰 영향을 미치는 열전도도가 파라핀 왁스보다 크기 때문인 것으로 판단된다.

3-3. 총 열저장률

잠열축열장치는 외부에서 공급되는 열에너지를 잠열물질의 상변

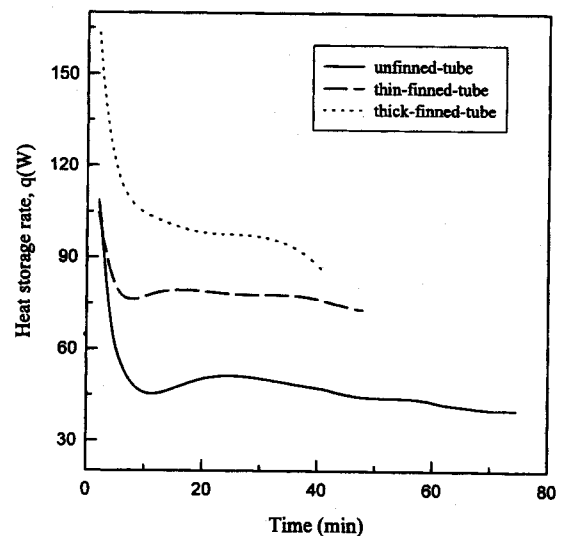


Fig. 7. Heat storage rates of paraffin wax for three different tube systems.

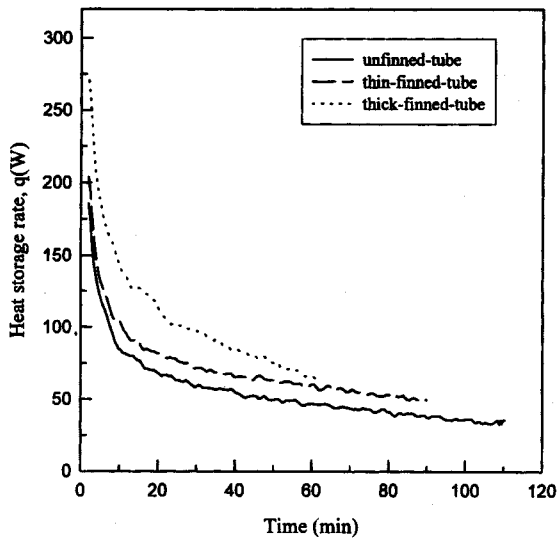


Fig. 8. Heat storage rates of $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ for three different tube systems.

화를 통하여 저장하는 것으로서 이 경우 축열조에 채워진 축열물질의 이론적 축열량과 실제로 축열된 열량을 비교하는 것은 축열조의 성능을 판단하는데 매우 중요한 자료가 된다. 본 연구에서는 총 열저장률(Q/Q_{\max})은 고체상태의 초기 온도에서 잠열을 흡수하여 용융이 되었을 때까지의 이론적 현열과 잠열을 합한 값에 대한 시간의 경과에 따른 순간 열저장 속도의 누적치의 비로 계산하였다.

즉 최대 축열량 Q_{\max} 는 다음의 식에 의하여 계산이 되었다.

$$Q_{\max} = \int_{T_i}^{T_m} M C_{pl} dT + \lambda M + \int_{T_m}^{T_o} M C_{ps} dT \quad (2)$$

여기서 M 은 축열물질의 양이고 λ 는 축열재의 잠열, 그리고 T_m 은 축열물질의 용융온도이다. 본 연구에서 주어진 실험조건에서 얻어진 Q_{\max} 는 망초의 경우에는 530 KJ, 파라핀왁스의 경우에는 300 KJ로 계산되었다. Fig. 9와 10은 각각 파라핀왁스와 망초에 대한 총 열저장률을 시간을 함수로 하여 각기 다른 전열관의 형태에 대하여 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 두 가지 종류의 잠열물

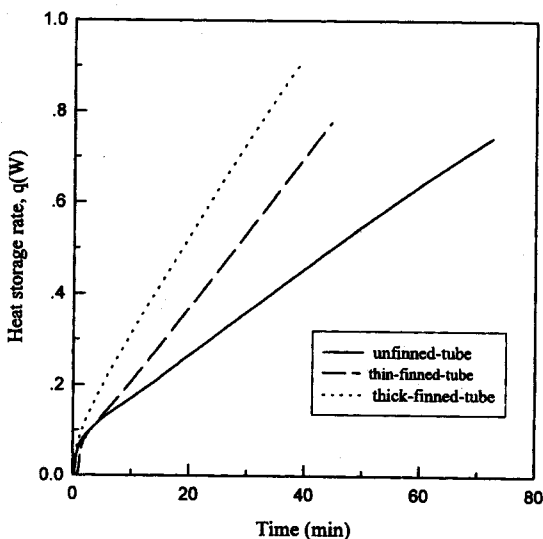


Fig. 9. Total heat storage ratio for paraffin wax.

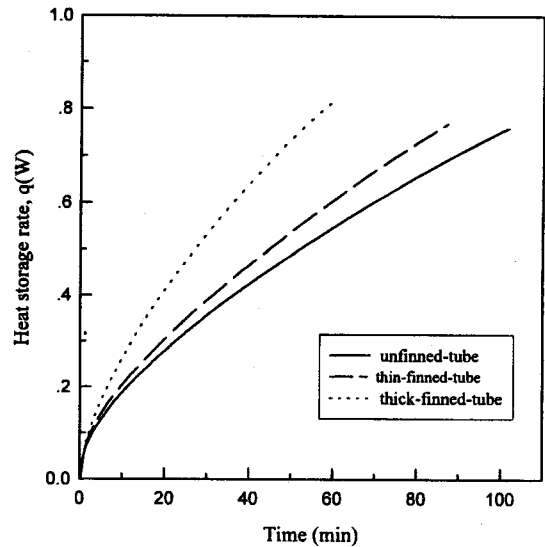


Fig. 10. Total heat storage ratio for $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$.

질 모두 열전달 유체의 유입온도와 유입유량에 비례하여 열저장량이 증가함을 볼 수 있다. 또한 핀이 부착된 경우가 핀이 없는 전열관에 비하여 단위시간당 축열량이 큼을 알 수 있다. Fig. 10의 망초의 경우를 살펴보면, 총 축열량의 70%를 축열하는데 요구되는 시간이 주어진 실험조건에서 두꺼운 핀이 부착된 전열관을 사용할 경우 40 분이 소요되는데 비하여 핀이 없는 전열관을 사용한 경우에는 약 80 분이 소요됨을 알 수 있다. 결국 같은 양의 열을 축열하는데 소요되는 시간은 전열관에 핀이 부착된 전열관의 경우가 핀이 없는 경우보다 반으로 단축됨을 알 수 있으며 이로서 핀에 의한 열전달 촉진의 영향을 볼 수 있었다. 한편 파라핀 왁스의 경우에는 얇은 핀과 두꺼운 핀의 축열능력의 차이가 그다지 크지 않는데 반하여 망초의 경우에는 얇은 핀과 두꺼운 핀의 경우에 축열능력의 큰 차이가 존재함을 알 수 있다. 이것은 파라핀왁스의 경우에는 자연대류에 의한 영향으로 핀의 확장면이 대류와 전도의 영향을 받는 반면, 망초의 경우에는 이와같은 자연대류의 효과가 미미하기 때문인 것으로 여겨진다.

3-4. 총괄열전달계수

잠열축열장치를 설계하는데 있어서 중요한 공학적 자료 중의 하나는 열전달계수이다. 이러한 열전달계수는 축열장치를 설계하는데 있어서 요구되는 전열면적을 계산하고 요구되는 heat load에 필요한 장치의 크기를 결정하는데 필수적인 자료이기 때문이다.

본 실험에서는 축열과정에서 열전달 유체의 유입온도, 출구온도, 그리고 축열물질의 온도를 시간의 경과에 따라서 측정하였고 이 실험자료로부터 전형적인 이중관 열교환기에서의 열전달계수식을 사용하여 축열과정에서의 총괄 열전달계수(U_o)를 결정하였다.

$$U_o = \frac{\ln \frac{(T_{pcm} - T_i)}{(T_{pcm} - T_o)}}{\pi D_o L (T_o - T_i)} \quad (3)$$

여기서 T_{pcm} 은 전열관의 축방향 중심의 30 mm 반경위치의 축열재 온도이며 T_o , T_i 는 열전달 유체의 전열관 입구 및 출구온도이다. 한편 핀이 설치되어 있는 전열관에서의 총괄열전달계수를 결정하는데 있어서는 핀의 면적은 고려하지 않고 핀이 설치되지 않은 전열관의 열전달 면적을 사용하여 총괄열전달계수를 구했으며, 이로부터 핀에 의한 열전달 촉진을 열전달계수의 크기로서 비교하였다. 잠열축열조의 축열과정에서 전열관의 모양변화에 대한 총괄열전달계수의

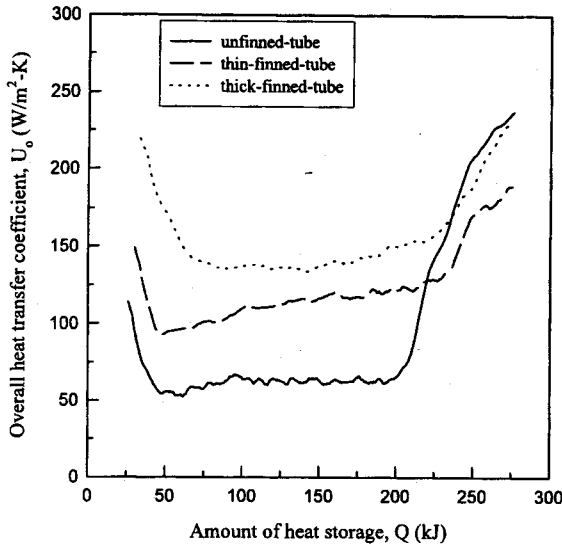


Fig. 11. Overall heat transfer coefficients of paraffin wax during heat storage stage.

시간의 경과에 따른 변화를 파라핀왁스와 망초의 경우에 각각 Fig. 11과 12에 나타내었다. Fig. 11의 파라핀왁스를 축열재로 사용하였을 때 얻어진 열전달계수의 시간의 경과에 따른 변화를 살펴보면, 초기에 높은 열전달계수값을 가지다가 서서히 감소함을 볼 수 있으며, 시간이 충분히 경과한 후에는 다시 열전달 계수가 증가함을 알 수 있다. 축열과정의 후반부에 열전달계수가 증가하는 것은 축열재가 완전히 용융이 되어서 자연대류의 현상이 크게 나타나기 때문인 것으로 여겨진다. 한편 Fig. 12의 망초의 경우에는 초기에 매우 높은 열전달계수를 갖고 시간이 지남에 따라 급격히 감소하여 일정한 값을 갖게 됨을 볼 수 있으며, 망초가 완전히 용융된 후에도 앞의 파라핀왁스의 경우에서 본 자연대류의 영향이 나타나지 않음을 볼 수 있다. 이것은 망초의 경우에 상분리를 방지하기 위해 첨가된 증점제의 영향으로 자연대류가 억제되었기 때문이며, 결과적으로 망초의 경우에는 전열관과 잠열재간의 전도에 의하여 축열이 이루어지고 있음을 알 수 있다. 한편 실험에서 얻어진 망초와 파라핀왁스의 총괄 열전달계수를 살펴보면 파라핀왁스의 경우에 전도뿐만 아니라 자연대류에 의해서도 열전달이 이루어짐에도 불구하고 핀이 부착되지 않은 전열관에서 얻어진 평균 열전달계수는 약 $70 \text{ W/m}^2\text{K}$ 로서 같은 형태의 전열관을 사용하여 망초를 축열재로 하여 얻어진 평균 열전달계수인 $90 \text{ W/m}^2\text{K}$ 보다 오히려 작음을 알 수 있었다. 이것은 축열과정에서 열전달의 주요 메카니즘은 전도이며, 전도를 결정하는

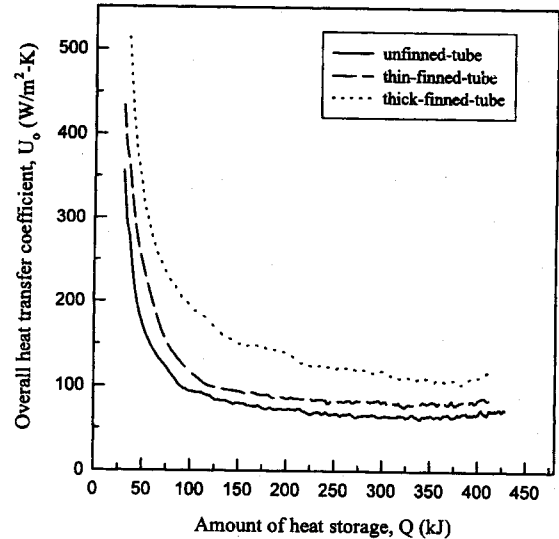


Fig. 12. Overall heat transfer coefficients of $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ during heat storage stage.

축열물질의 열전도도가 망초는 0.54 W/mK 인데 반하여 파라핀왁스는 0.21 W/mK 의 값을 갖는 것으로 설명할 수 있다. 따라서 파라핀왁스의 경우 단지 전도에 의하여 열이 전달된다고 하면 망초와의 열전도도의 차이로 볼 때 대략적으로 망초에서 얻어진 열전달계수의 절반정도인 약 $45 \text{ W/m}^2\text{K}$ 의 열전달계수를 가질 것으로 예상이 되나 축열과정에서 발생하는 자연대류의 영향으로 열전달이 촉진되어 망초와 유사한 크기의 열전달계수를 갖는 것으로 판단된다. 한편 Choi 등[7]이 유사한 실험장치에서 초산염을 축열재로 사용하여 얻어진 열전달계수는 약 $60\text{--}70 \text{ W/m}^2\text{K}$ 로서 본 실험에서 얻어진 열전달계수와 비슷한 값을 보이고 있으며 첨가된 증점제의 영향으로 자연대류가 발생하지 않음을 관찰하였다.

3-5. 핀의 열전달촉진 효율

잠열축열조에서 상변화 물질과 전열관의 열교환을 촉진하기 위하여 설치된 핀의 효율을 알아보기 위하여 비교의 기준으로 핀이 설치되지 않은 전열관에서 얻어진 열전달계수를 사용하였다.

본 연구에서는 핀의 효율을 핀의 설치에 따른 전열면적의 증가에 대한 핀의 설치에 따른 열전달계수의 증가비로서 정의하였다. Table 2는 얇은 핀과 두꺼운 핀을 전열관에 설치하여 얻어진 평균 열전달계수와 핀의 효율을 나타내었다. 표에서 볼 수 있듯이 두꺼운 핀을 사용한 경우가 얇은 핀을 사용한 경우보다 높은 핀의 효율을 보이고

Table 2. Fin efficiency for thin and thick finned tube system

	Thin-finned-tube		Thick-finned-tube	
	Paraffin wax	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	Paraffin wax	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
Bare tube surface area $A_b(\text{cm}^2)$	239	278	239	278
Extended fin area $A_f(\text{cm}^2)$	516	619	565	678
Ratio of finned tube area/bare tube area $A_c = \frac{A_f}{A_b}$	2.1	2.2	2.3	2.4
Time averaged overall heat transfer coefficient $U(\text{W/m}^2 \cdot \text{K})$	115	119	156	163
Ratio of enhanced heat transfer coefficient $U_c = \frac{U_{\text{system}} - U_{\text{plain}}}{U_{\text{plain}}}$	0.6	0.3	1.2	0.8
Fin efficiency $\eta_f = \frac{U_c}{A_c}$	0.27	0.14	0.51	0.33

*Average overall heat transfer coefficient in the unfinned-tube system. Paraffin wax= $71 \text{ W/m}^2\text{K}$, $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ = $90 \text{ W/m}^2\text{K}$.

있으며 파라핀왁스가 망초보다 핀의 설치에 따른 열전달 촉진의 영향이 큰 것으로 나타났다. 두꺼운 핀이 얇은 핀보다 높은 열전달 촉진현상을 보이는 것은 두꺼운 핀이 얇은 핀보다 높은 표면온도를 유지하여 전도에 의한 열전달 과정에서 다소 높은 온도차를 나타내는 것으로 여겨진다. 이와 같은 핀의 두께 차이에 의한 열전달 촉진의 차이는 환과 한[8]이 망초를 축열재로 사용하여 잠열축열시스템에서 열을 회수하는 방열과정 실험에서 얻어진 핀의 효율이 두꺼운 핀의 경우에는 0.26인데 반하여 얇은 핀의 경우에는 0.05의 큰 차이를 보였다. 이것으로 얇은 핀은 두꺼운 핀에 비하여 축열 및 방열과정에서 열전달 촉진의 영향이 미미함을 알 수 있었다. 한편 파라핀왁스의 경우에는 두꺼운 핀이 얇은 핀보다 상대적으로 낮은 핀의 효율을 보였지만 전열면적의 증가에 대한 열전달계수의 증가비는 0.27로서 열전달촉진의 효과가 있다고 여겨진다. 이같은 결과는 축열과정에서 파라핀왁스가 높은 온도의 전열관 및 핀과의 접촉에서 용융이 되면 밀도차에 의한 대류가 발생하여 전열관과 축열재간의 용융층 열저항이 줄어들어 열교환이 용이하기 때문인 것으로 여겨진다.

4. 결 론

저온 상변화물질인 망초와 파라핀왁스를 이용한 축열시스템에서 축열재와 열전달 유체와의 열전달을 촉진하기 위하여 전열관에 두 가지 형태의 환형 핀을 설치하여 축열재에 열을 저장하는 축열과정에서 열전달 특성을 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 망초와 파라핀왁스의 물리적 성질의 차이로 인하여 파라핀왁스의 경우에는 자연대류에 의한 열전달이 전도와 함께 발생함을 알 수 있었으며, 망초의 경우에는 전도에 의하여만 열이 전달됨을 알 수 있었다.
- (2) 두 가지 축열재 모두 열전달 유체의 유입온도가 높을수록 열전달의 추진력인 온도차가 증가하여 높은 축열속도를 나타내었다.
- (3) 핀의 사용에 따른 총괄열전달계수는 두꺼운 핀의 경우에는 열전달 촉진의 효과가 두드러지게 나타났지만 얇은 핀의 경우에는 다소 미미하였다.

감 사

본 연구는 한국학술진흥재단의 신진교수연구지원사업에 의하여

수행되었기에 이에 감사를 드립니다.

사용기호

- C_{pl} : heat capacity of liquid phase PCM [KJ/Kg °C]
 C_{ps} : heat capacity of solid phase PCM [KJ/Kg °C]
 C_{pw} : heat capacity of heat transfer fluid [KJ/Kg °C]
 D_o : diameter of heat transfer tube [m]
 L : heat transfer tube length [m]
 m : mass flow rate of heat transfer fluid [kg/s]
 M : inventory of PCM [Kg]
 q : instantaneous heat storage rate [J/s]
 Q_{max} : theoretical maximum heat storage [KJ]
 T_1 : initial temp. of PCM [°C]
 T_2 : final temp. of PCM [°C]
 T_m : melting temp. of PCM [°C]
 T_i : inlet temp. of heat transfer fluid [°C]
 T_o : outlet temp. of heat transfer fluid [°C]
 T_{pcm} : PCM temp. in the vessel [°C]
 U_o : overall heat transfer coefficient [W/m²°C]
 λ : latent heat of PCM [KJ/Kg]

참고문헌

1. Abhat, A.: *Solar Energy*, **30**, 313(1983).
2. Yanadori, M. and Masuda, T.: *Solar Energy*, **36**, 169(1986).
3. Herrick, C. S.: *Solar Energy*, **28**, 99(1982).
4. Choi, H. S., Shin, B. C. and Kim, S. D.: *Energy*, **14**, 513(1989).
5. Fouda, A. E., Despault, G. J. G., Taylor, J. B. and Capes, C. E.: *Solar Energy*, **32**, 57(1984).
6. 강용혁, 전명석, 윤환기, 천원기: 태양에너지, **15**(3), 3(1995).
7. Choi, J. C., Kim, S. D. and Han, G. Y.: *KJChE*, **12**(2), 258(1995).
8. 한승구, 한귀영: 에너지공학, **5**(2), 115(1996).