

[논문] 태양에너지
Solar Energy
Vol. 19, No. 2, 1999

잠열축열시스템의 축열과정에서 자연대류의 영향에 관한 연구

유승남*, 한귀영**

* 성균관대학교 대학원

** 성균관대학교 화학공학과

Effect of Natural Convection on the Heat Transfer in a Latent Heat Storage System

S. N. Ryu*, G. Y. Han**

* *Graduate School, Sungkyunkwan University*

** *Department of Chemical Engineering, Sungkyunkwan University*

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 fatty acid which shows the big density difference during melting 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, it was found that both conduction and natural convection were the major heat transfer mechanism. It was also found that the effect of natural convection on the heat transfer was more significant for the unfinned tube system than that for the finned tube system. The experimentally determined overall heat transfer coefficients were in the range of 50~250

W/m²K and the correlation for natural convection heat transfer as a function of Nusselt and Rayleigh number was proposed.

기 호 설 명

- d_o : 전열관의 직경 [m]
- d : 고-액 경계면의 직경 [m]
- k_l : 액상잠열재의 열전도도 [w/m K]
- L : 전열관의 길이 [m]
- Nu : Nusselt number [-]
- Ra : Rayleigh number (Gr x Pr) [-]
- T_m : 잠열재의 용융온도 [°C]
- T_i : 열전달유체의 유입온도 [°C]
- T_o : 열전달 유체의 출구온도 [°C]
- T_{pcm} : 잠열재의 축열과정에서의 온도 [°C]
- U_o : 축열과정에서 총괄 열전달계수 [W/m² °C]

1. 서 론

축열시스템은 에너지 발생 처와 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 화학 축열법등이 있다. 상변화물질의 잠열을 이용하는 축열방식은 현열축열장치보다 단위부피 및 단위 무게당 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 왔다¹⁾. 또한 잠열축열재의 단점인 상분리와 과냉각 현상을 최소화하는 여러 가지 첨가제의 개발에 주력해 왔으며, 열전달 측면에서의 잠열축열장치의 개발에 관한 연구는 상대적으로 미미하였다. 최근에 이르러 Yanadori와 Masuda²⁾는 축열과 방열과정의 열전달 성능을 개선하기 위해 수직 원통관을 사용하여 축열조내의 열전달 유체를 향류접촉 시킴으로서 열전달 효율을 개선하려고 하였고, Herrick³⁾은 수평 회전 원통관을 이용한 물리적인 교반 효과로서 열전달을 향상시키는 실험을 수행하였다. 국내에서는 Choi 등⁴⁾이 전열관에 핀을 설치하여 열전달 향상을 연구하였고, Fouda 등⁵⁾, 강 등⁶⁾은 열전달 유체와 상변화 물질의 직접접촉에 의한 열교환 방식에 관한 연구를 수행하였다.

이러한 잠열축열시스템의 연구는 태양열 온수기의 축열조로 응용이 가능하기 때문에 최근에 연구가 많이 진행되고 있다. 앞에서 언급하였듯이 무기수화염의 경우 축열밀도는 높지만 과냉각과 상분리의 현상 그리고 부식의 문제로 인하여 축열조의 내구성에 다소 문제가 있다고 여겨진다. 따라서 본 연구에서는 이러한 무기수화염의 단점을 극복할 수 있는 축열재로 지방산의 일종인 myristic acid를 축열재로 선정하여 축열성능을 관찰하였다. 즉 지방산은 무기수화염보다 단위 부피당 축열량은 떨어지지만 증점제나 조핵제와 같은 첨가제가 요구되지 않으며, 액상과 고상간의 밀도 차가 크기 때문에 축열과정에서 축열재와 전열관과의 열교환에서 전도 뿐 아니라 자연대류에 의하여 열전달이 진행될 것으로 예측이 되어 열전달 효율이 향상될 것으로 판단된다. 따라서

본 연구에서는 자연대류가 축열과정의 열전달에 미치는 영향과 축열조의 형태(핀의 유, 무)에 따른 자연대류의 영향을 살펴보고자 하였다.

2. 실험 장치 및 실험 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 mm 이며 전열관은 이중관으로서 내부 관은 직경이 13.5 mm, 높이는 480 mm 이며, 외부 관은 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 내부 관으로 들어가서 밑부분에서 이중관 사이의 환형 공간을 통하여 위로 흐르면서 열교환이 이루어지게 하였다. 열교환이 이루어지는 과정에서 열전달 유체 쪽의 열 저항을 줄이기 위해 유체의 난류 촉진용으로 내부 관 바깥쪽 부분에 직경 2 mm 의 실리콘 선을 감았다.

축열물질의 온도분포를 측정하기 위하여 용기의 각 부위에 반경방향과 축방향을 기준으로 T-type 열전대를 설치하였다. 열전대는 2 mm 의 가는 스테인레스 스틸 보호 관에 삽입하여 끝부분을 junction 시켰다. 이때 열전대 선과 금속 보호 관에 존재하는 온도구배에 따른 열전대 junction 으로의 열 유입을 방지하기 위해 열전대

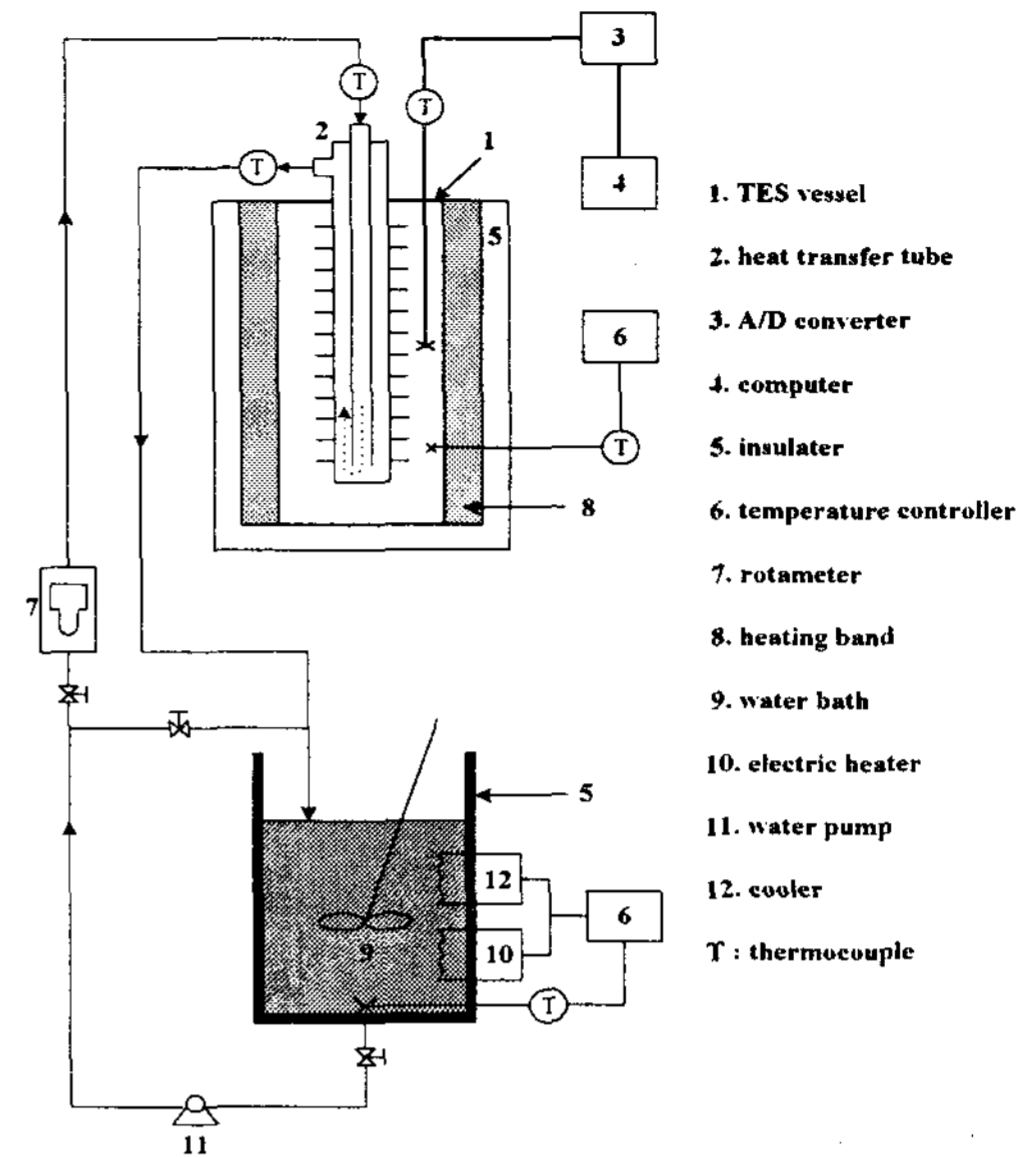
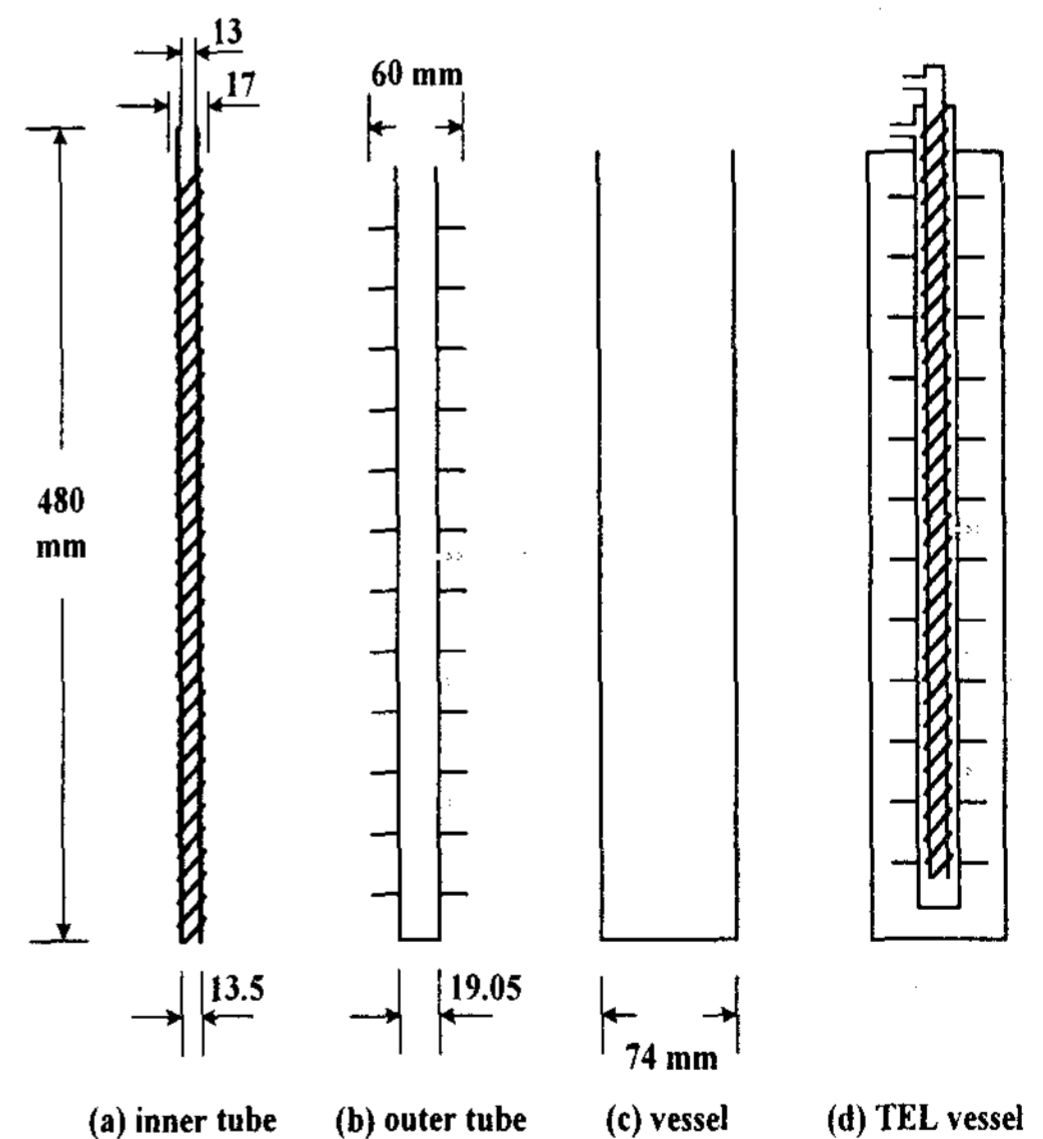


Fig. 1. Schematic diagram of test facility.



○ : thermocouple on the heat transfer tube wall
◇ : thermocouple in the PCM

Fig. 2. Details of heat transfer tubes.

의 길이는 온도구배가 없는 동심원주 형태로 금속 보호관 직경의 40배 길이로 유지하였다¹⁾.

반경방향의 축열재 온도분포를 측정하기 위하여 전열관 벽면과 전열관 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 배출구에 각각 열전대를 설치하였다. 열전달 유체를 일정한 온도로 전열관에 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 고정 한 후 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 60 °C, 70 °C, 80 °C, 였으며, 유입유량은 0.4 l/min 이었다. 축열과정중 축열장치에 설치된 열전대로부터 얻어진 온도변화는 매 15초 간격으로 data acquisition system (Hydra Data Logger) 을 거쳐서 컴퓨터에 저장되었다. 축열재로 사용된 myristic acid의 열적, 물리적 성질은 Table 1 에 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 총괄열전달계수

잠열축열장치를 설계하는데 있어서 중요한 공

Table 1. Thermophysical Properties of Myristic acid

Melting point (°C)	54.8
Heat of Fusion (KJ/kg)	198.0
Density, (g/cm ³)	
liquid	0.861
solid	0.990
Specific Heat (J/g °C)	
liquid	1.59
solid	2.26
Thermal conductivity (W/m °C)	
liquid	0.15

학적 자료중의 하나는 열전달계수이다. 이러한 열전달계수는 축열장치를 설계하는데 있어서 요구되는 전열면적을 계산하고 요구되는 heat load 에 필요한 장치의 크기를 결정하는데 필수적인 자료이기 때문이다.

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

$$U_o = \frac{\ln \left(\frac{T_{pcm} - T_i}{T_{pcm} - T_o} \right)}{\pi D_o L (T_o - T_i)} \quad (1)$$

여기서 T_{pcm} 은 전열관의 축방향 중심의 30 mm 반경위치의 축열재 온도이며 T_i, T_o 는 열전달 유체의 전열관 입구 및 출구온도이다. 한편 핀이 설치되어있는 전열관에서의 총괄열전달계수를 결정하는데 있어서는 핀의 면적은 고려하지 않고 핀이 설치되지 않은 전열관의 열전달 면적을 사용하여 총괄열전달계수를 구했으며, 이로부터

터 핀에 의한 열전달 촉진을 열전달계수의 크기로서 비교하였다. 잠열축열조의 축열과정에서 전열관의 모양변화에 대한 총괄열전달계수의 시간의 경과에 따른 변화를 Fig. 3 에 나타내었다. 그림에서 나타난 축열과정에서 열전달계수의 시간의 경과에 따른 변화를 살펴보면, 초기에 높은 열전달계수 값을 가지다가 서서히 감소함을 볼 수 있으며, 시간이 충분히 경과한 후에는 다시 열전달계수가 증가함을 알 수 있다. 축열과정의 후반부에 열전달계수가 증가하는 것은 축열재가 완전히 용융이 되어서 자연대류의 현상이 크게 나타나기 때문인 것으로 여겨진다. 이러한 열전달계수의 변화는 대류에 의한 열전달이 거의 없는 무기수화염의 경우와 비교해 볼 때 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 즉 상변화시 밀도의 변화가 없는 무기수화염의 경우 열전달계수는 축열과정의 초기에 최대의 열전달계수를 보이며, 그후 시간의 경과에 따라서 전도에 의한 열전달의 저항이 증가하기 때문에 열전달계수는 지속적으로 감소되는 경향을 보인다. 따라서 지방산의 경우 축열과정의 후반부에 대류에 의한 열전달로 축열과정이 촉진된다고 볼 수 있다. 또한 핀이 설치된 전열관에

서의 열전달계수가 핀이 없는 전열관에서보다 높게 나타나는 것을 볼 수 있으며, 이것은 축열과정에서 핀에 의한 전열면적의 증가로 전도에 의한 열전달이 증가하기 때문이라고 볼 수 있다.

축열과정에서 유입되는 온수의 유입온도에 따른 열전달계수의 변화를 핀이 설치된 전열관, 그리고 핀이 없는 전열관에 대하여 각각 Fig 4, Fig.5 에 나타내었다. 그림에서 보듯이 축열조로 유입되는 온수의 유입온도가 높을수록 열전달의 추진력이 커져서 높은 열전달계수를 나타내는 것을 볼 수 있으며, 특히 Fig. 5 의 핀이 설치되지 않은 전열관의 경우 유입온도에 따른 열전달계수의 변화가 핀이 설치된 전열관에 비하여 더욱 커지는 것을 볼 수 있다. 이것은 전열관에 핀이 설치된 경우 환형 핀이 용융된 지방산의 상승흐름을 억제하여 핀이 설치되지 않은 경우에 나타날 수 있는 자연대류를 다소 억제하는 것으로 판단된다. 따라서 핀이 설치된 경우 전열면적의 증가에 따른 열전달계수의 증가를 가져오지만, 지방산과 같은 잠열재를 사용할 경우 축열과정에서 발생하는 밀도 차에 의한 자연대류의 억제라는 단점이 있음을 확인할 수 있었다.

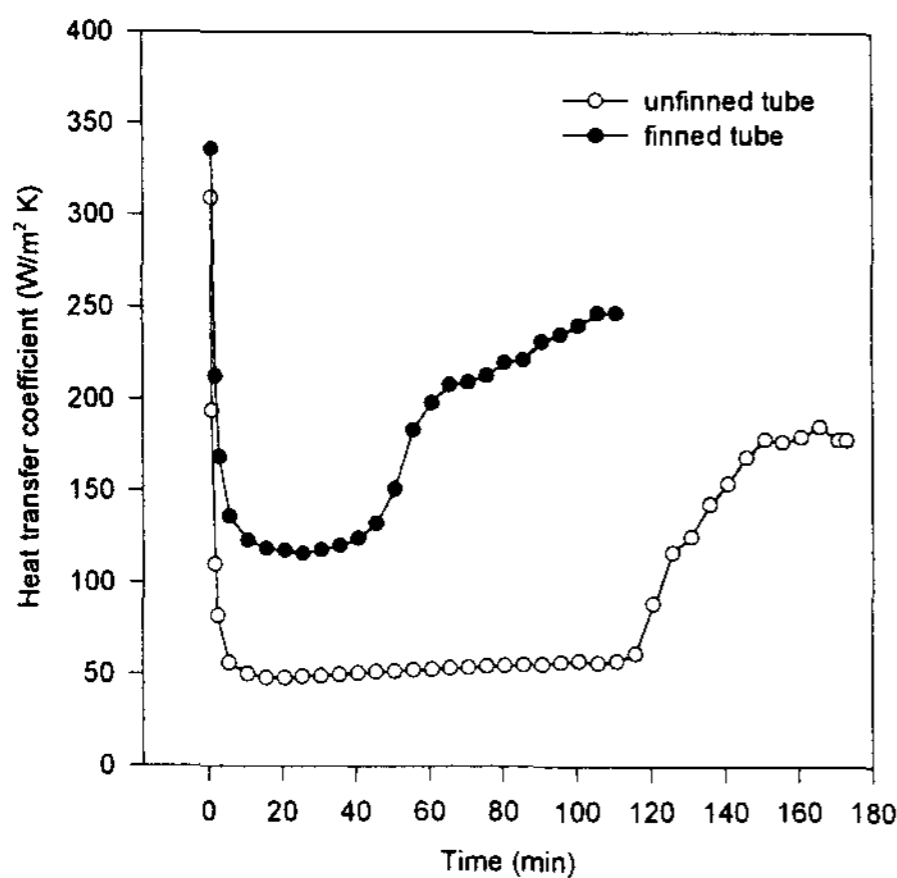


Fig. 3. The time history of heat transfer coefficient during melting stage in the finned and unfinned tube systems.

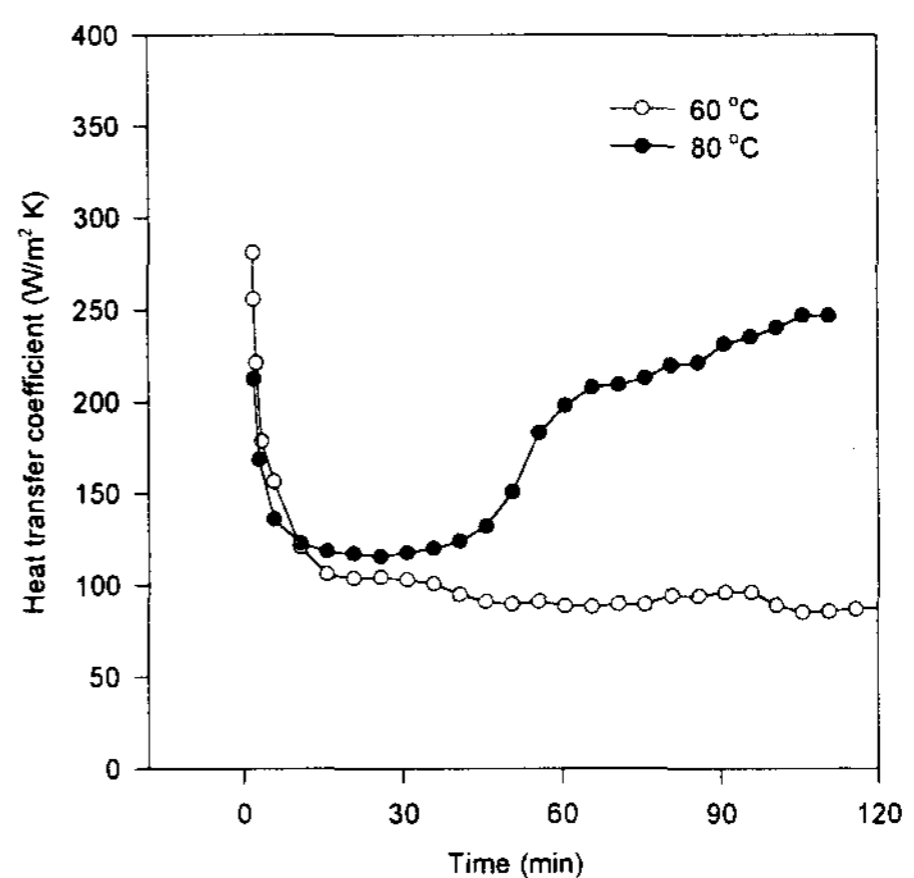


Fig. 4. Effect of inlet temperature on the heat transfer coefficient in the finned tube system.

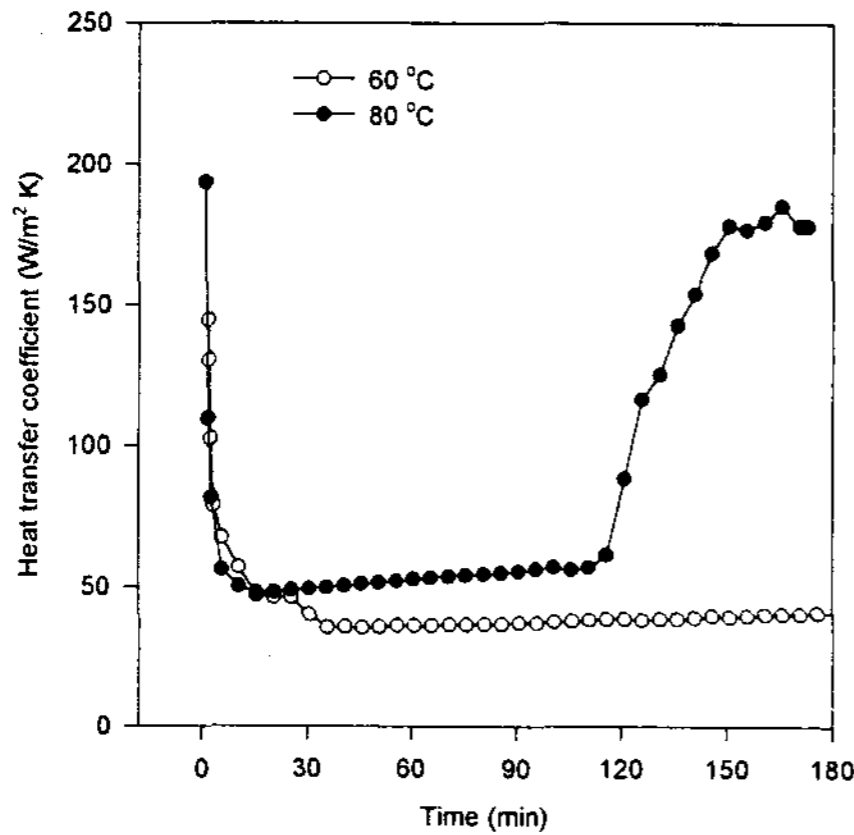


Fig. 5. Effect of inlet temperature on the heat transfer coefficient in the unfinned tube system.

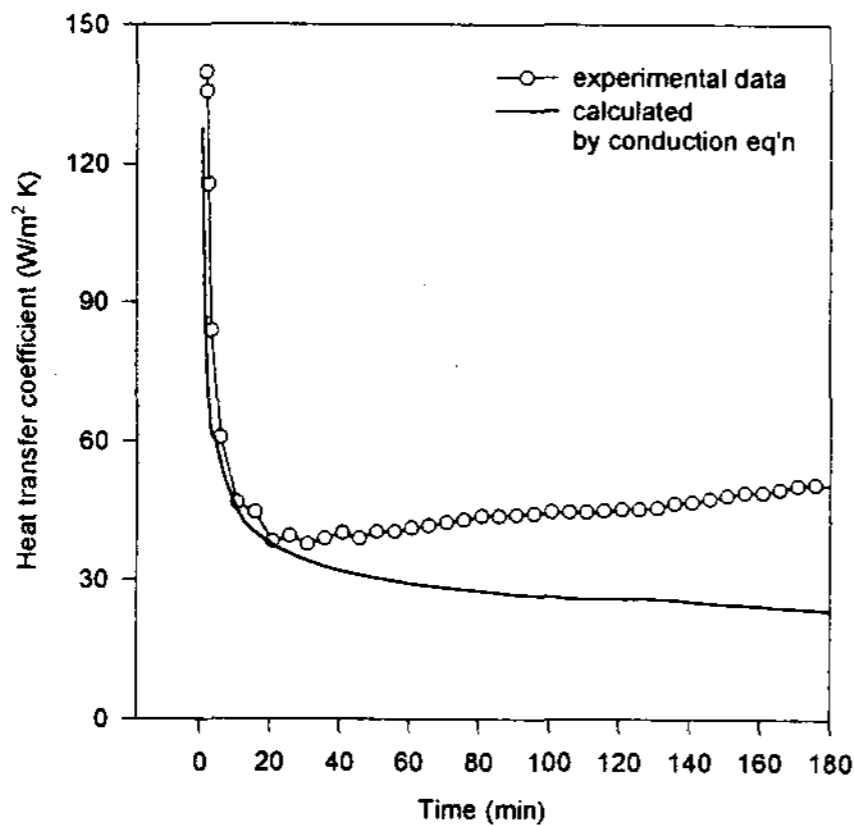


Fig. 6. The comparison of theoretical heat transfer coefficient for conduction only with experimental data for conduction and natural convection.

3.2 자연대류에 의한 열전달

앞의 실험결과로부터 상변화시에 밀도의 변화가 큰 물질을 축열물질로 사용할 때, 자연대류에 의한 열전달이 축열과정에서 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 이러한 자연대류에 의한 열전달 축진을 살펴보기 위하여 다음과 같은 비교를 하였다. 일반적으로 무기수화염의 경

우 축열과정에서의 열전달은 전도에 의하여 이루어지며, 열전달계수는 무기수화염의 용융된 두께에 반비례하게 된다. 즉 축열과정이 진행됨에 따라 용융된 축열물질의 층이 증가하며, 따라서 축열물질의 고체면이 전열관에서 점점 멀어지게 되어 (전도에서의 열저항 증가) 열전달계수가 지속적으로 감소하게 된다. 이러한 열전달계수의 변화는 결국 용융된 잠열재의 열전도도와 액-고체 경계면의 전열관으로부터의 거리에 의해 결정된다고 볼 수 있다. 즉 잠열축열과정에서 전열관과 축열물질의 열전달이 전도에 의하여만 이루어질 경우 열전달계수는 다음과 같이 표현이 된다.

$$U_o = \frac{2 k_l}{d_o \ln(d/d_o)} \quad (2)$$

여기서 k_l , d_o 는 용융된 잠열재의 열전도도, 그리고 전열관의 외경을 나타낸다. 식(2)에서 d 는 액-고체 경계면의 직경으로, 이것은 축열조에서의 에너지 수지식과 잠열재의 용융잠열로부터 계산된다. 따라서 만일 myristic acid 가 오직 전도에 의하여만 열전달이 이루어진다면 이 경우 시간에 따른 열전달계수의 변화는 이론적으로 식(2)을 통하여 얻어진다. Myristic acid 가 전도에 의해서만 열전달이 이루어질 때 이론적으로 계산된 열전달계수와 온수의 유입온도가 70 °C 인 경우 얻어진 열전달계수의 비교를 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 시간의 경과에 따라서 자연대류에 의한 열전달이 점점 증가함을 볼 수 있으며, 축열과정의 마지막 단계에서는 전체 열전달중 자연대류에 의한 열전달이 약 30 ~ 40%를 차지하는 것을 알 수 있다. 따라서 지방산과 같이 상변화시 밀도의 변화가 큰 물질을 잠열축열재로 사용할 때, 자연대류에 의한 열전달을 고려하여 축열조를 설계하여야 한다는 사실을 알 수 있었다.

3.3 자연대류가 존재하는 축열과정에서 열전달계수 상관식

앞의 실험결과로부터 상변화시 밀도의 변화가 큰 물질을 축열물질로 사용할 경우 자연대류에 의한 열전달이 전체 열전달에서 무시할 수 없는 영향을 보이고 있음을 실험을 통하여 관찰할 수 있었다. 이러한 자연대류의 영향은 일반적으로 Rayleigh number 에 의하여 잘 표현이 되므로 핀이 설치된 전열관과 핀이 설치되지 않은 전열관에서 얻어진 열전달계수를 Nusselt number 와 Rayleigh number로 관계식을 제시하였다. 이러한 상관관계식을 도출하는데 있어서 좀더 일반성을 가지기 위하여 이와 한⁹⁾ 이 같은 실험장치에서 수행하였던, 상변화시 밀도의 변화가 큰 물질이며 잠열축열물질로 고려되고 있는, 파라핀와스의 실험결과도 함께 사용하여 관계식을 유도하였다. 핀이 설치된 전열관과 핀이 설치되지 않은 전열관에서 얻어진 파라핀와스와 지방산의 축열과정에서의 열전달계수의 상관식은 다음과 같이 얻어졌으며, 이러한 상관식에서 얻어진 값과 실험에서 얻어진 값의 비교를 Fig. 7과 Fig. 8에 각각 나타내었다.

$$Nu = 0.03 Ra^{0.36}$$

for unfinned tube system (3)

$$Nu = 0.09 Ra^{0.32}$$

for finned tube system (4)

위에 얻어진 상관식은 $10^5 < Ra < 10^7$ 의 범위에서 계산이 되었다. 상관식 (3), (4)을 살펴보면, Ra 수에 대한 의존도가 핀이 없는 경우가 0.36 으로서 핀이 있는 경우의 값 0.32 보다 큰 것을 알 수 있으며, 이것은 핀이 설치된 경우 핀에 의한 자연대류의 역제가 존재한다는 것을 간접적으로 보여주는 결과라고 할 수 있다. Bareiss와 Beer¹⁰⁾는 축열과정에서 열전달계수의 상관식을 $Nu = 0.05 Ra^{0.33} St^{-0.18}$ 로서 제안하였으며, 이

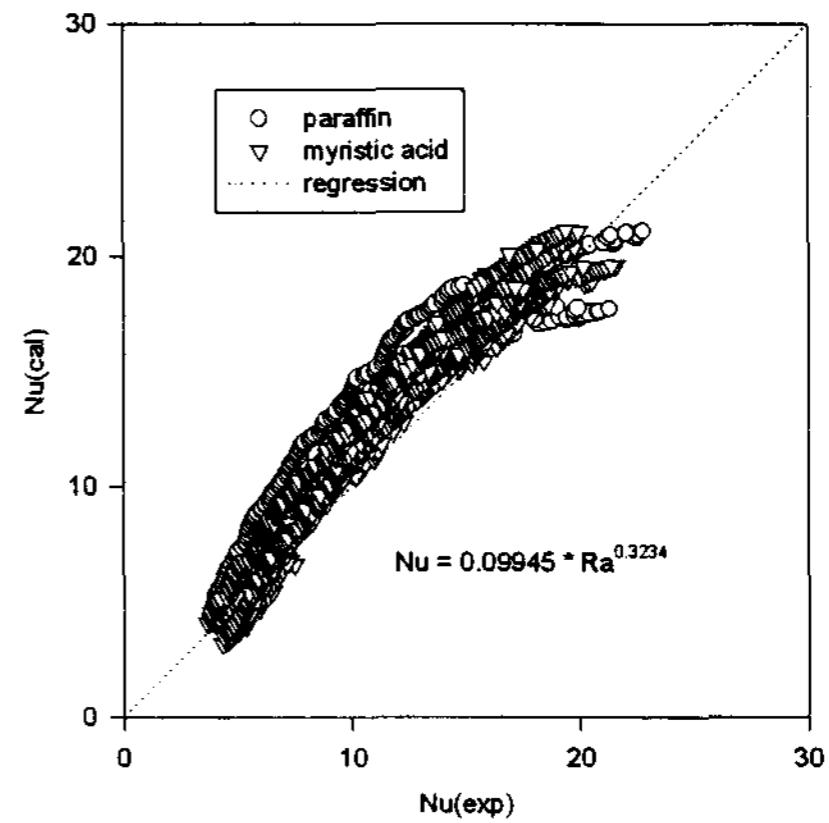


Fig. 7. The comparison of predicted heat transfer coefficient with experimental data for finned tube system.

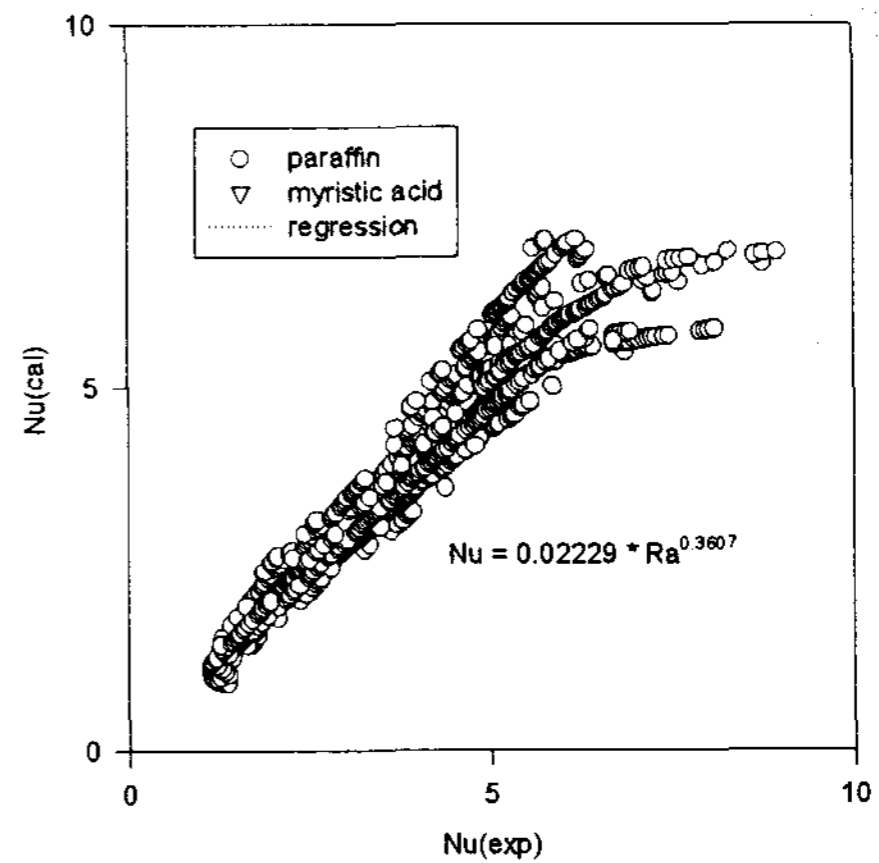


Fig. 8. The comparison of predicted heat transfer coefficient with experimental data for unfinned tube system.

상관식은 본 연구에서 얻어진 상관식과 매우 유사한 값을 가짐을 알 수 있었다. 또한 본 연구에서 얻어진 상관식의 상수 값을 보면 핀이 있는 경우에는 0.9 로서 핀이 없는 경우의 값 0.3 보다 매우 큰 것을 알 수 있다 이것은 핀에 의한 전열면적의 증가로 인한 열전달계수의 증가를 나타내는 것으로 볼 수 있다. 따라서 도출된 상관식은

축열과정에서 열전달계수에 대한 핀에 의한 열전달 촉진, 그리고 자연대류의 영향을 잘 보여주고 있다고 할 수 있다.

4. 결 론

상변화시 밀도의 변화가 큰 지방산을 축열물질로 사용하여 핀이 설치된, 그리고 핀이 설치되지 않은 축열조의 축열과정에서의 열전달 특성을 살펴보았으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 상변화시 밀도의 변화가 큰 myristic acid의 경우 축열과정의 후반부에 자연대류에 의한 열전달계수의 증가를 볼 수 있었다. 즉 지방산의 경우 축열과정에서의 열전달은 전도와 자연대류에 의해 진행됨을 알 수 있었다.
2. 열전달 유체의 유입온도가 높을수록 자연 대류에 의한 열전달 증가가 뚜렷함을 볼 수 있었다.
3. 환형 핀이 설치된 축열조의 경우 열전달 계수는 전열면적의 증가로 증가하였지만, 핀이 설치되지 않은 축열조와 비교하였을 때 핀의 존재가 자연대류를 어느 정도 억제하는 경향을 보여주었다.

감 사 의 글

본 연구는 성균관대학교 63학술연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. Abhat, A.: Solar Energy, 30, 313, (1983)
2. Yanadori, M and Masuda, T.: Solar Energy, 36, 169~177 (1986)
3. Herrick, C.S.: Solar Energy, 28, 99-104 (1982)
4. Choi, H.S., Shin, B.C. and Kim, S.D.: Energy, 14, 513-524 (1989)
5. Fouda, A.E, Despault, G.J.G. Taylor, J.B. and Capes, C.E.: Solar Energy, 32, 57~65 (1984)
6. 강용혁, 전명석, 윤환기, 천원기: 태양에너지, 15(3), 3~14 (1995)
7. Choi, J.C., Kim, S.D. and Han, G.Y.: KJChE, 12(2), 258-263 (1995)
8. 한승구, 한귀영 : 에너지공학, 5(2), 115~122 (1996)
9. 이민경, 한귀영 : 화학공학, 35 (5), 755~761 (1997)
10. Bareiss, M. and Beer, H.: Lett. Heat Mass Transfer, 11, 323~333 (1984)