

상변화물질을 적용한 핀-관 열교환기의 열전달 성능 특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Heat Transfer Characteristics of a Finned-Tube Heat Exchanger in a PCM Thermal Energy Storage System

정동일(Dong Il Jung)¹, 장 민(Min Chang)¹, 김용찬(Yongchan Kim)^{2†}

¹고려대학교 기계공학부 대학원, ²고려대학교 기계공학부

¹Graduate School of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul, 02841, Korea

²Division of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul, 02841, Korea

(Received November 26, 2015; revision received November 30, 2015; Accepted: December 1, 2015)

Abstract Phase change materials (PCM) are able to store a large amount of latent heat, and can be applied to thermal energy storage systems. In a PCM, it takes a long time to store heat in the storage system because of the low thermal conductivity. In this study, a finned-tube-in-tank heat exchanger was applied to a PCM thermal energy storage system to increase heat transfer efficiency. The effects of geometric and operating parameters were investigated, and the results were compared with those of the tube-in-tank heat exchanger. The finned-tube-in-tank heat exchanger showed higher heat transfer effectiveness than the tube-in-tank heat exchanger. The heat exchange effectiveness of the storage tank was determined as a function of the average NTU.

Key words PCM(상변화물질), Finned-tube heat exchanger(핀-관 열교환기), Effectiveness(유효도)

† Corresponding author, E-mail: yongckim@korea.ac.kr

기호설명

A : 전열면적 [m^2]
 C : 열용량률 [W/K]
 c_p : 정압비열 [$J/kg \cdot K$]
 \dot{m} : 질량유량 [kg/h]
NTU : 전달단위수 [-]
 q : 열전달률 [W]
 U : 총합 열전달계수 [$W/m^2 \cdot K$]

그리스 문자

ϵ : 유효도(Effectiveness)

하첨자

c : 저온측(cold fluid)
 h : 고온측(hot fluid)
 i : 입구(inlet)
 max : 최대값(maximum)
 min : 최소값(minimum)
 o : 출구(outlet)
 pcm : 상변화물질(phase change material)

1. 서 론

상변화물질(Phase change material, PCM)을 이용한 열 저장 시스템은 잠열을 이용하므로 큰 열량을 저장할 수 있으며, 사용자의 성분 선택에 따라 원하는 상변화 온도로 에너지를 저장할 수 있는 장점이 있다. 그에 따라 기존 현열을 이용한 열저장 시스템에 비하여 높은 에너지 저장밀도를 가지기 때문에 열에너지를 저장하는 여러 분야에서 유용하게 이용되고 있다. 그러나 상변화물질의 낮은 열전도율로 인하여 축열과 방열시 많은 시간이 소요되는 단점이 있다. 이를 해결하기 위하여 Fig. 1과 같은 형태의 직사각형 핀을 갖는 finned-tube-in-tank 형상을 적용하여, 전열 면적을 증가시켜 열전달 시간을 감소시킬 수 있다. 직사각형 핀은 제조가 쉽고 성능이 우수하여 일반적인 냉동기의 열교환기에 범용적으로 적용되고 있다.

전열면적을 증가시키기 위한 연구로써, Agyenim et al.⁽¹⁾은 관에 원형핀과 종형핀을 사용하여 전열면적을 증가시키고 이에 따른 열전달 성능 향상을 실험하였다. Tay et al.⁽²⁾은 tube-in-tank 형상의 상변화물질 열저

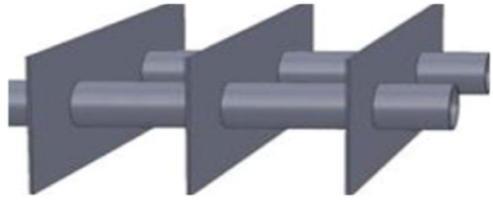


Fig. 1 Shape of the finned-tube heat exchanger.

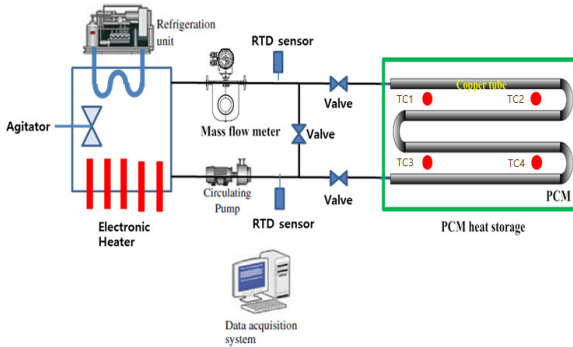


Fig. 2 System diagram of the experimental setup.

장 시스템에서 실험을 수행하여, tube 전열면적 증가와 유용도 사이의 관계를 관찰하였다. Robak et al.⁽³⁾은 히트 파이프를 적용하여 열전달 성능 향상을 실험하였다. 열전달 성능을 향상시키기 위한 다른 방법으로 상변화 물질 내에 이물질을 추가하는 방법도 연구되고 있다. Velraj et al.⁽⁴⁾은 상변화물질 내에 고리 형태의 금속을 추가하여 열전달 성능을 향상시켰다. Mettawee et al.⁽⁵⁾은 상변화물질과 알루미늄 파우더를 혼합하여 그 비율에 따른 열전달 성능 향상을 실험하였다.

기존 핀을 적용한 연구들은 핀의 적용에 따른 열전달 성능 향상에 대한 고찰 위주로 진행되었으며, 핀 적용에 따른 전열면적과 열전달 성능의 상관관계에 대한 연구는 많지 않은 실정이다. 본 연구에서는 직사각형 핀을 적용한 finned-tube-in-tank 형태의 상변화물질을 이용한 열저장 시스템의 열전달 성능을 연구하였다. 이를 위해 핀이 없는 경우와 핀을 적용한 경우의 열교환 성능을 비교하였고, 핀피치와 작동유체의 유량에 따른 성능 변화를 실험하여 전열면적과 열교환 성능과의 상관관계에 대하여 분석하였다. 이에 대한 상관식을 제시하여, 설계한 유용도에 따라 전열면적을 선정하고 핀피치를 설계할 수 있다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험 장치

Fig. 2는 본 연구에 사용한 실험장치 구성도를 나타낸

다. 상변화물질은 36~38℃의 상변화 온도를 가지는 PCM37(N-Tetradecanol) 5.5 kg을 사용하였다. 상변화물질을 담는 용기는 가로 500 mm, 세로 70 mm, 높이 250 mm인 가시화가 가능한 아크릴 수조로 제작하였고, 외부는 단열재로 단열처리 하였다. 상변화물질 내부에 설치된 관에 작동유체인 증류수가 흐르면서 상변화물질과 열을 교환하도록 하였다. 증류수는 항온조에서 실험조건을 일정한 온도로 상변화물질 내의 관으로 유입되도록 하였다. 항온조의 온도는 외부에 연결된 쿨링 유닛과 내부의 전기 히터를 이용하여 제어하였다. 작동유체의 유량은 인버터가 장착된 펌프를 이용하여 조절하였다. 질량 유량은 작동유체의 체적유량과 온도에 따른 증류수의 밀도로부터 계산하였다. 작동유체가 흐르는 관의 입출구의 온도는 PT100 저항 온도계로 측정하였다. 상변화물질의 상변화 상태를 측정하기 위하여 아크릴 수조 내부에 T-type 열전대를 부착하여 온도를 측정하였다.

상변화물질을 이용한 열저장 시스템에 적용된 열교환기는 일반적으로 많이 쓰이는 tube-in-tank 형태의 열교환기와 열전달 성능 향상을 위해 적용된 finned-tube-in-tank 형태의 열교환기를 사용하였다. 열교환기의 핀은 Fig. 1과 같은 형태의 직사각형 핀을 적용하였다. tube-in-tank 열교환기는 외경 6.6 mm, 총길이 5,640 mm의 알루미늄관으로 구성하였다. Finned-tube-in-tank 열교환기는 Tube-in-tank 열교환기에 가로 60 mm, 세로 28 mm, 두께 0.16 mm의 알루미늄 핀을 10, 15, 30 mm의 핀피치로 제작하였다. 실험조건은 Table 1과 같다. 작동유체의 온도는 축열시 57℃, 방열시 17℃로 하였다. 작동유체의 유량은 0.006 kg/s~0.04 kg/s로 변화시키면서 실험하였다.

2.2 실험결과 처리 방법

본 연구에서는 열교환기의 열전달 성능을 비교하기 위하여 유용도로 결과를 수치화 하였다. 열교환기의 유용도는 식(1)과 같이 열교환기의 최대 가능한 열전달률에 대한 실제 열전달률의 비로 정의된다. 이 때 최대 가능한 열전달률은 식(2)와 같다. 축열과정과 같이 작동유체가 고온일 경우 실제 열전달률은 식(3)과 같고

Table 1 Test conditions

Condition	Value
Heat transfer fluid temp. (melting/freezing)	57℃/17℃
Heat transfer fluid mass flow rate	0.006 kg/s~0.04 kg/s
Fin pitch	no fin/10/15/30 mm

C_{\min} 은 작동유체의 열용량률이므로 $C_{\min} = C_h$ 이다. 그러므로 축열과정에서의 유용도는 식(4)와 같다.

$$\epsilon \equiv \frac{q}{q_{\max}} \quad (1)$$

$$q_{\max} = C_{\min} (T_{h,i} - T_{c,i}) \quad (2)$$

$$q = C_h (T_{h,i} - T_{h,o}) \quad (3)$$

$$\epsilon = \frac{(T_{h,i} - T_{h,o})}{(T_{h,i} - T_{c,i})} \quad (4)$$

방열과정과 같이 작동유체가 저온일 경우 실제 열전달률은 식(5)와 같고 C_{\min} 은 작동유체의 열용량률이므로 $C_{\min} = C_c$ 이다. 그러므로 방열과정에서의 유용도는 식(6)과 같다. 이 때의 작동유체의 입출구 온도 및 상변화물질의 온도는 상변화 구간에서의 평균값을 사용하였다.

$$q = C_c (T_{c,i} - T_{c,o}) \quad (5)$$

$$\epsilon = \frac{(T_{c,i} - T_{c,o})}{(T_{c,i} - T_{h,i})} \quad (6)$$

응축기나 증발기에서처럼 식(7)과 같이 정의되는 C_r 이 0인 경우 유용도와 NTU와의 관계는 식(8)과 같다. NTU의 정의는 식(9)와 같다. 식(9)에서와 같이 NTU는 전열면적에 비례하며 질량유량에 반비례함을 알 수 있다. 이것은 단위 면적당 질량유량에 반비례하는 것이므로 유용도를 식(10)과 같이 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 핀피치가 다른 각각의 열교환기를 질량유량을 달리하여 실험하고 이를 통하여 유용도 식을 구하였다. 총합 열전달계수와 정압비열이 일정하다고 가정하면 유용도는 식(10)과 같이 질량유속의 함수로 표현할 수 있다.⁽⁶⁾

$$C_r \equiv C_{\min} / C_{\max} \quad (7)$$

$$\epsilon = 1 - \exp(-NTU) \quad (8)$$

$$NTU \equiv \frac{UA}{C_{\min}} = \frac{UA}{\dot{m}c_p} \quad (9)$$

$$\epsilon = 1 - \exp\{-C_1(A/\dot{m})\} \quad (10)$$

$$C_1 = \text{Constant}$$

3. 실험결과 및 고찰

3.1 핀 적용에 따른 축열 성능 특성

Finned-tube-in-tank 열교환기에서 핀피치와 유량 변화에 따른 축열 성능을 고찰하였다. Fig. 3은 작동유체

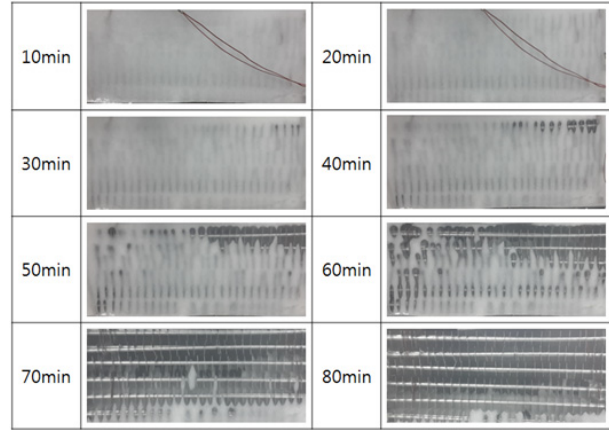


Fig. 3 Photographs of the PCM storage during the melting process.

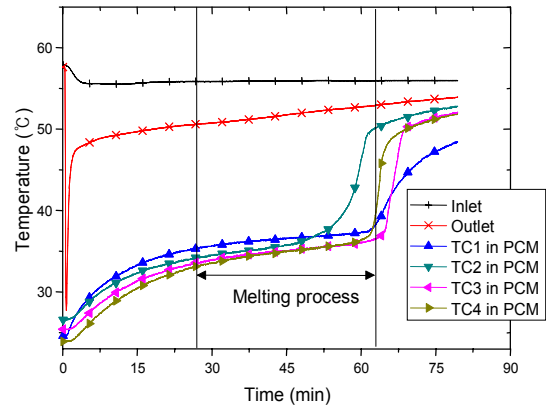


Fig. 4 Melting process at the mass flow rate of 0.02 kg/s, fin-pitch of 15 mm, and an average effectiveness of 0.189.

의 온도 57°C, 핀피치 15 mm, 질량유량 0.02 kg/s 조건에서 10분 간격으로 촬영된 상변화물질과 핀-관 열교환기를 나타냈다. 시간이 지남에 따라 상변화물질이 녹기 시작하여 핀의 형태가 뚜렷하게 나타났다. Fig. 4는 그에 따른 시간 변화에 대한 작동유체와 상변화물질 내부의 온도 변화를 나타냈다. 상변화물질 내부에 설치된 열전대(TC1, TC2, TC3, TC4)의 온도가 시간에 따라 상승하였다. 실험 시작 후 약 25분까지 온도가 상승하며 고체 상태의 현열변화를 나타냈다. 이후 약 35분간 온도 변화가 정체하며 상변화 구간이 나타났으며, 62분부터 열전대의 온도가 다시 상승하며 액체 상태에서의 현열변화 구간이 나타났다.

Fig. 5는 질량유량과 핀피치 변화에 따른 유용도를 나타낸 것이다. 상변화 구간에서의 상변화물질의 온도와 작동유체의 입출구 온도를 이용하여 유용도를 계산하였다. 질량유량이 증가함에 따라 유용도는 감소하였

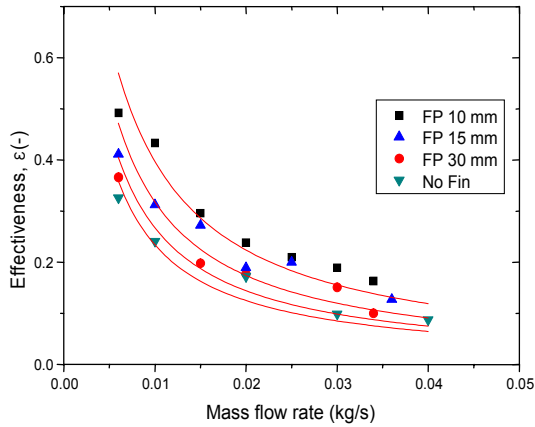


Fig. 5 Effectiveness of the PCM storage tank with the mass flow rate in the melting process.

Table 2 Effectiveness of the PCM storage tank with the mass flow rate in the melting process

Formula	
$\epsilon = 1 - \exp(-C_1/\dot{m})$	
Fin Pitch	C_1
10 mm	0.00506
15 mm	0.00382
30 mm	0.00312
no fin	0.00267

다. 핀을 적용함에 따라 유용도가 상승하여, 핀피치 30 mm 조건에서는 핀이 없는 조건의 유용도에 비해 약 15% 상승하였다. 핀피치가 작아질수록 동일 유량조건에서 유용도는 높게 나타났으며, 유량이 작을수록 핀피치에 따른 유용도의 차이는 증가하여, 0.006 kg/s 조건에서 10 mm에서의 유용도는 30 mm의 유용도에 비해 34% 높게 나타났다. 작동유체의 유량이 0.006~0.04 kg/s인 구간에서 핀피치와 작동유체의 유량에 따른 유용도는 식(8)의 형태로 나타낼 수 있고, 그 결과는 Table 2와 같다.

3.2 핀 적용에 따른 방열 성능 특성

Fig. 6은 작동유체의 온도 17°C, 핀피치 15 mm, 질량유량 0.02 kg/s 조건에서 10분 간격으로 촬영된 상변화물질과 핀-관 열교환기를 나타냈다. 시간이 지남에 따라 상변화물질이 핀과 관의 접촉부에서 얼기 시작하여 핀의 형태로 성장해 가는 것이 뚜렷하게 나타났다. Fig. 7은 그에 따른 시간 변화에 대한 작동유체와 상변화물질 내부의 온도 변화를 나타냈다. 상변화물질 내부에 설치된 열전대(TC1, TC2, TC3, TC4)의 온도가 시간에 따

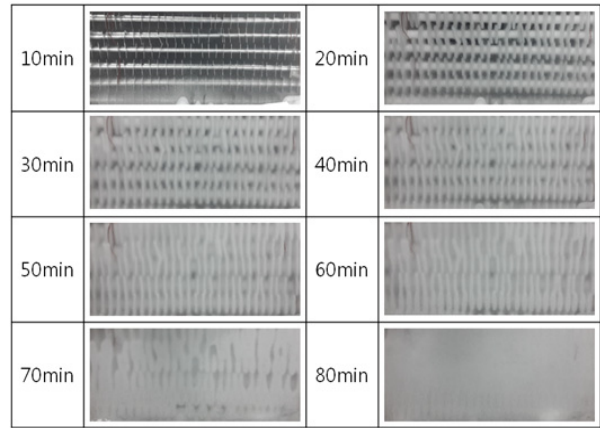


Fig. 6 Photographs of the PCM storage during the freezing process.

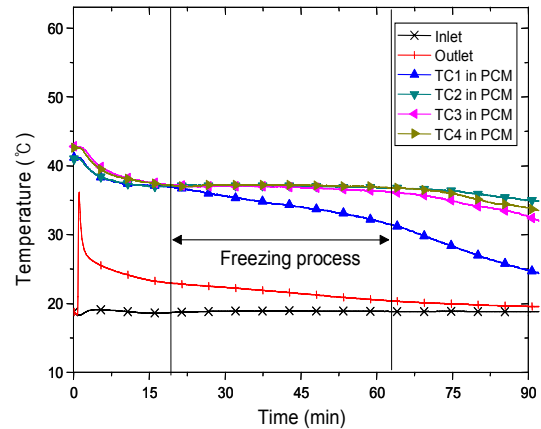


Fig. 7 Freezing process at the mass flow rate of 0.02 kg/s, fin-pitch of 15 mm, and an average effectiveness of 0.222.

라 감소하였다. 실험 시작 후 약 17분까지 온도가 감소하며 액체 상태의 현열변화를 나타냈다. 이후 약 45분간 온도 변화가 정체하며 상변화 구간이 나타났으며, 62분부터 열전대의 온도가 다시 상승하며 액체 상태에서의 현열변화 구간이 나타났다.

Fig. 8은 질량유량과 핀피치 변화에 따른 유용도를 나타낸 것이다. 상변화 구간에서의 상변화물질의 온도와 작동유체의 입출구 온도를 이용하여 유용도를 계산하였다. 질량유량이 증가함에 따라 유용도는 감소하였다. 핀을 적용함에 따라 유용도가 상승하여, 핀피치 30 mm 조건에서는 핀이 없는 조건의 유용도에 비해 약 46% 상승하였다. 핀피치가 작아질수록 동일 유량 조건에서 유용도는 높게 나타났으며, 유량이 작을수록 핀피치에 따른 유용도의 차이는 증가하여, 0.006 kg/s 조건에서 10 mm에서의 유용도는 30 mm의 유용도에 비

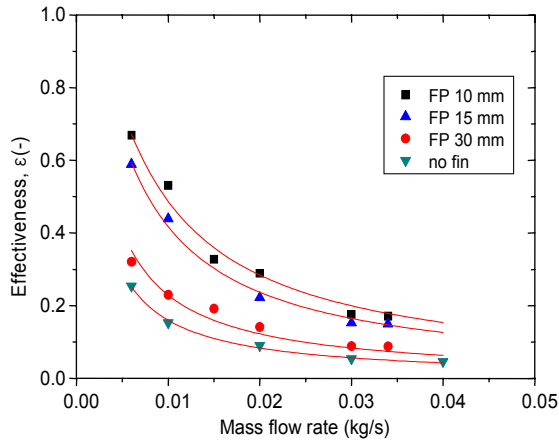


Fig. 8 Effectiveness of the PCM storage tank with the mass flow rate in the freezing process.

Table 3 Effectiveness of the PCM storage tank with the mass flow rate in freezing process

Formula	
$\epsilon = 1 - \exp(-C_1/\dot{m})$	
Fin Pitch	C_1
10 mm	0.00669
15 mm	0.00541
30 mm	0.00260
no fin	0.00174

해 91% 높게 나타났다. 작동유체의 유량이 0.006 ~ 0.04 kg/s인 구간에서 핀피치와 작동유체의 유량에 따른 유용도는 식(8)의 형태로 나타낼 수 있고, 그 결과는 Table 3과 같다.

3.3 전열면적에 따른 열전달 성능 특성

식(8)과 같이 유용도는 작동유체와 상변화 과정 중인 상변화물질 사이의 NTU로 정의할 수 있다. 이 때의 NTU는 Table 2와 Table 3에서와 같이 작동유체의 질량유량의 함수이다. 식(10)에서 설명한 바와 같이 유용도는 전열면적당 질량유량의 함수로 나타낼 수 있다. Fig. 9는 축열과정에서의 실험결과를 전열면적당 질량유량의 함수로 나타낸 것이다. 실험결과를 바탕으로 식(10)과 같은 형태의 상관식을 도출하면 식(11)과 같다. 이 상관식의 표준오차는 5.21%이다.

$$\epsilon = 1 - \exp\{-0.00572(A/\dot{m})\} \quad (11)$$

식(11)에서 0.00572(A/ \dot{m})은 이 열교환기의 NTU 값을

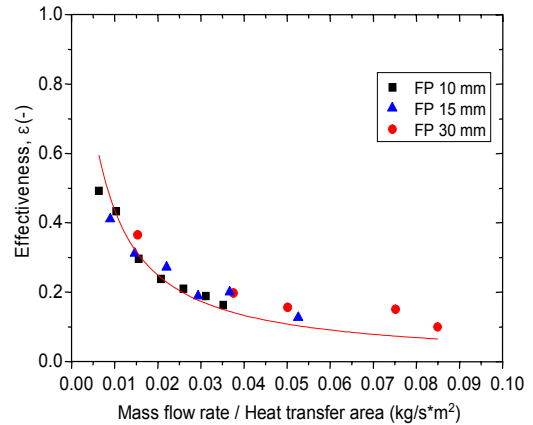


Fig. 9 Effectiveness of the PCM storage with the mass flux in the melting process.

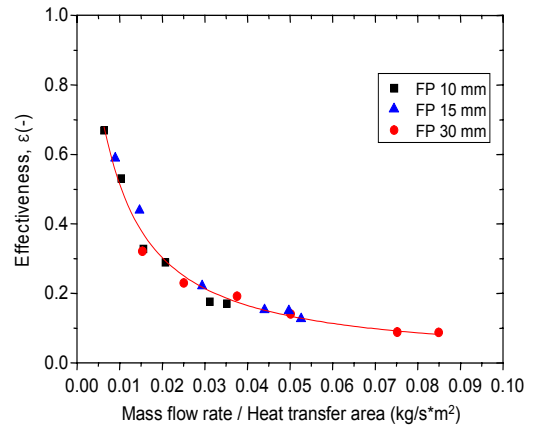


Fig. 10 Effectiveness of the PCM storage with the mass flux in the freezing process.

나타낸다. 설계자는 식(11)을 이용하여 ϵ -NTN 법으로 열교환기를 설계할 수 있다.

Fig. 10은 방열과정에서의 실험결과를 전열면적당 질량유량의 함수로 나타낸 것이다. 실험결과를 바탕으로 식(10)과 같은 형태의 상관식을 도출하면 식(12)와 같다. 이 상관식의 표준 오차는 2.83%이다. 식(11)과 식(12)의 상관식은 본 연구에서 실험한 핀피치 10 mm에서 30 mm 사이에서 유효한 상관식이다. 핀피치가 10 mm 이하일 경우는 작동유체의 동일한 유량에서 유용도가 더 높음을 예측할 수 있다. 30 mm 이상일 경우는 유용도가 더 낮음을 예측할 수 있다.

$$\epsilon = 1 - \exp\{-0.00721(A/\dot{m})\} \quad (12)$$

식(12)에서 0.00721(A/ \dot{m})은 이 열교환기의 NTU 값을 나타낸다. 설계자는 식(12)을 이용하여 ϵ -NTN법으로

열교환기를 설계할 수 있다.

Finned-tube-in-tank 형상의 열교환기를 설계할 때 작동유체의 유량이 설정되면 식(11)과 식(12)을 이용하여 열교환기의 전열면적과 핀피치를 설계할 수 있다. 예를 들어 작동유체의 유량을 0.01 kg/s으로 설계하고 방열시 목표 유용도를 0.3수준으로 설계하면 식(11)에 의해 전열면적은 0.624 m²이 된다. 본 연구에 사용된 열교환기의 핀피치로 계산하면 약 11.2 mm수준으로 설계값을 예측할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 상변화물질 열저장 시스템의 열전달 성능향상을 위하여 finned-tube-in-tank 형상을 적용하였고, 열교환 성능 실험을 수행하였다. 상변화물질 내부의 전열면적과 열교환 성능과의 상관관계에 대하여 분석하고, 이에 대한 상관식을 제시하였다.

- (1) 열교환기의 형태에 따른 열전달 성능을 유용도로 수치화하였다. 작동유체의 유량이 증가함에 따라 유용도가 감소하는 경향을 나타낸다.
- (2) 핀을 적용할 경우 유용도가 상승하게 되고 핀피치에 따라 전열면적이 결정되고 전열면적이 커짐에 따라 유용도는 상승하고 전열면적이 작아짐에 따라 유용도는 낮아진다.
- (3) Finned-tube-in-tank 형상의 경우 열교환기의 유용도는 전열면적당 질량유량의 함수인 상관식을 개발하였다. 개발된 상관식은 10 mm에서 30 mm사이의 핀피치를 가지는 직사각형 핀에 적용될 수 있다. 이를 이용하여 상변화물질 열저장시스템의 열교환기를 설계할 때 전열면적을 예측할 수 있다.

후 기

본 연구는 2014년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20144010200770).

References

1. Agyenim, F., Eames P., and Smyth, M., 2009, A comparison of heat transfer enhancement in a medium temperature thermal energy storage heat exchanger using fins, *Solar Energy*, Vol. 83, pp. 1509-1520.
2. Tay, N. H. S., Belusko, M., and Bruno, F., 2012, Experimental investigation of tubes in a phase change thermal energy storage system, *Applied Energy*, Vol. 90, pp. 288-297.
3. Robak, C. W., Bergman, T. L., and Faghri, A., 2011, Enhancement of latent heat energy storage using embedded heat pipes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 54, pp. 3476-3484.
4. Velraja, R., Seeniraja, R. V., Hafnerb, B., Faberb, C., and Schwarzerb, K., 1999, Heat transfer enhancement in a latent heat storage system, *Solar Energy*, Vol. 65, pp. 171-180.
5. Mettawee, E. S. and Assassa G. M. R., 2007, Thermal conductivity enhancement in a latent heat storage system, *Solar Energy*, Vol. 81, pp. 839-845.
6. Incropera, F. P., Dewitt, A. P., Bergman, T. L., and Lavine, A. S., 2007, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 6th ed., John Wiley and Sons, New York, pp. 790-800.