

빙축열 시스템에서의 코일 현의 열전달 촉진 효과에 관한 실험적 연구

성병호, 이분희, 임광빈*, 김철주
성균관대학교, 안산공과대학*

An Experimental Study on the Heat Transfer Enhancement Effect of the Coil Fins for Ice Storage System

Sung Byung Ho, Lee Bun Hee, Lim Kwang Bin, Kim Chul Ju
SungKyunKwan University, AnSan Technical College

The present study was to investigate the heat transfer enhancement effect of coil wire fins in an ice storage system. For the two cases of tubes with internal brine flows, a finned tube with coil wires on its outer surface and a smooth tube, the rates of ice layer were tested and compared for both the icing processes. The coil fins were made of a stainless steel wire with a dia. of 2.0[mm], and the coil had an outer dia. of 10[mm] and a helix angle of 60[°].

The experimental results showed that the coil fins could substantially reduce the thermal resistance of the ice layer, and enhance the heat flow rates between the water in the storage tank and the brine. The ice storing time was found to be shortened by 13[%] for the coil fins to get the same amount of ice layer that was built on the smooth tube wall for 10 hours of operation when the same thermal conditions were provided.

1. 서 론

주거용 시설의 공조 설비를 가동하는 데 필요한 에너지는 생활수단이 향상됨에 따라 매년 급증하고 있으며, 특히 냉방 에너지는 계절적으로 시간적으로 수요의 변동이 심한 특징을 가지고 있다. 이 결과 국가의 전기에너지 수요는 하절기 낮 시간에 피크를 이루게 되며 이를 완화하기 위한 여러 가지 대책들이 시행되고 있다. 하루 중 에너지 수요가 상대적으로 적은 심야시간 동안에 빙축열^{(1)~(9)}을 저장하는 것도 중요한 대책들 중의 하나이다.

빙축열 시스템은 잠열 이용형 냉열저장 방법으로 열저장 성능이 우수하며, 단위 부피당 물은 값이 싸고 쉽게 구할 수 있는 상변화 물질이며, 열용량이 크고 안전한 점 외에 여러 가지 장점을 가지고 있기 때문에 많이 사용되고 있다. 그러나 물은 4[°C]에서 최대 밀도점을 갖기 때문에 빙축열시스템에서 응고 및 용융 과정에서 열전달 현상과 유동 과정은 매우 복잡하다. 또한 착빙형 빙축열 시스템의 문제 중의 하나는 제빙관 벽에 생성되는 얼음은 열전도율이 0.1 [W/m²K] 정도로 매우 낮아서 얼음층이 성장함에 따라 물과 브라인 사이의 열전달 통로에서 열저항을 증가시키며, 이 결과 점차적으로 열전달율이 감소한다는 사실이다. 따라서 얼음층이 성장하는 관 외벽에 금속소재의 현(fin)^{(8),(9)}을 부착하면 얼음층의 상당 열전도율을 증가시킬 수 있으며 물과 브라인 사이의 열저항을 저감시킬 수 있다.

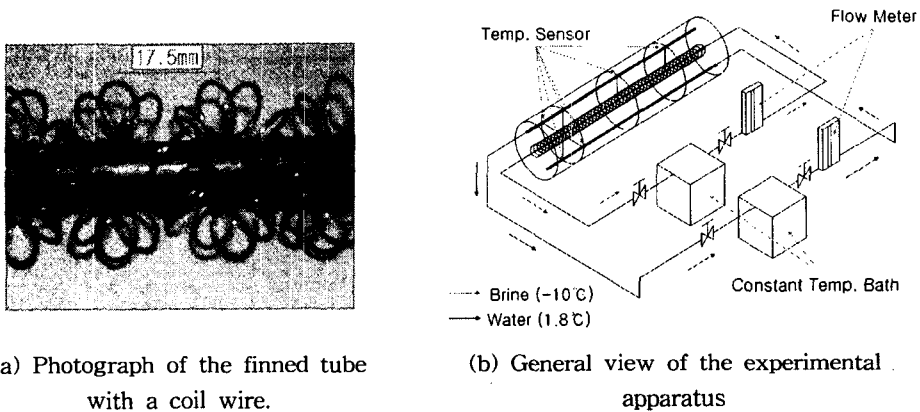
그러나 일반적으로 사용하는 평판형 현은 착빙과 제빙이 반복되면 현의 형상이 파괴될 수 있으며 관과 현사이의 열접촉저항을 급격히 감소시킴으로써 현의 효과를 저하시키는 문제점을 가지고 있다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 개선할 수 있는 현의 형상으로써 금속선 코일을 제시하고 코일형상의 현을 부착한 관을 사용하여 대류가 활발히 작용하는 물의 온도(7[°C])와 상대적

으로 대류작용이 적은 온도(1.8[°C])에 대하여 착빙과정에 관한 연구를 수행하고 열전달측진에 미치는 효과를 실험적으로 확인 하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

실험장치 구성은 소형 축열조와 냉열을 공급하는 항온조, 데이터 처리장치로 구성되어있다. 축열조는 원통형상으로 아크릴 관으로 제작하였고 그 중심에 전열관을 설치하였다. 축열조 내부에는 전열관 상단과 하단에 PVC관을 설치하였고 이 관에 길이 방향으로 마련한 내경 1.5[mm], 19[개]의 구멍을 통하여 균일한 온도의 물을 공급하였다. 착빙과정 동안에는 전열관내부로 저온의 브라인을 일정한 유량으로 흐르게 하였으며 관외벽의 코일 환은 스테인리스 와이어(stainless wire) 코일을 일정한 피치로 감아 제작하였다. 실험장치의 개요와 전열관은 각각 [Fig. 1]에, 그리고 중요한 요소들의 제원은 [Table 1]에 나타내었다.



(a) Photograph of the finned tube with a coil wire.

(b) General view of the experimental apparatus

[Fig. 1] Experimental apparatus to study the icing and melting processes on a tube

[Table 1] Specification of Some Important Elements of the Experimental Equipments.

	Outer Diameter	Thickness	Length	Material
Tube for Brine Flow	9.52[mm](1/8")	0.8[mm]	970[mm]	Cooper
Ice Storage Tank	200[mm]	1.5[mm]	1000[mm]	Acryl
Coil Fin	10[mm] (Coil)	0.7[mm] (Wire)	17.5[mm] (Pith) 16.965[m](Total Length)	AISI(302)
Thermo-Couples (±0.25°C error)	0.03[mm]			T-Type

착빙 과정 동안에 얼음의 두께변화, 얼음층 주위 유동층내부 온도 분포를 측정하기 위하여 전열관 외벽에 축방향으로 각각 155[mm], 475[mm], 755[mm]에 구멍을 뚫고 직경 2[mm]의 튜브 구조 탐침을 설치하였다. 각각의 탐침 끝단에는 열전대 접점을 고정하였다. 축열조내부 물의 온도 분포에 관한 자료를 얻기 위하여 축열조 길이방향 중심단면을 선택하고 전열관 중심에서 방경방향으로 수직선과 그리고 각 120° 선상에서 관 중심으로부터 각 25[mm], 50[mm], 70[mm]인 3지점의 온도를 1시간 간격으로 측정하였다. 착빙과정에서 얼음의 두께

가 평균 약 30[mm]에 도달하는데 약 10시간이 소요되었다.

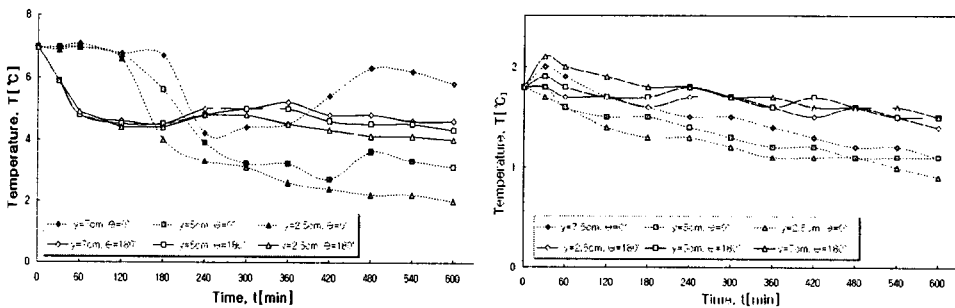
이를 구현하기 위해 빙축열조 내 수평 원관으로 유입하는 저온 냉각유체(ethylene glycol 50[%] + water 50[%])의 입구온도는 -10[°C], 질량유량은 1[kg/min]이었다. 실험은 축열조를 수평으로 설치하고 외벽에 단열재를 설치하여 주위공기와 열교환을 억제하였다. 초기 온도는 최저 0[°C]를 목표로 설정하였으나 실제의 경우 최저 1.8[°C]이하를 얻기 어려웠다. 빙축열조가 초기온도에서 열평형 상태에 유지되도록 하기 위하여 먼저 큰 용기의 냉각 장치를 사용하여 초기상태로 물을 냉각시켰고 이물을 1~2시간동안 실험용 축열조 내부로 순환 공급하였다. 빙축열조의 각 요소들의 온도와 초기 설정 온도의 차이가 0.1[°C]이내에 도달하면 평형상태에 도달한 것으로 가정하고 착빙과정을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 수평형 축열조의 제빙 온도 특성

[Fig. 2]는 냉각유체의 흐름 방향에 따른 제빙 온도를 나타낸 것으로 (a)는 축열조 내 상변화물질의 초기온도가 7[°C] 이고, 냉각유체의 유입 온도가 -10[°C]인 경우 축냉조 축방향 중앙단면($x=475$ [mm])인 지점에서 축냉조 축을 중심으로 수직 상하방향(25[mm], 50[mm], 70[mm])의 온도분포를 나타낸 것이다. 응고과정 초기 용기 하단 ($\theta=180$ [°]) 물의 온도는 급격히 감소하여 최대 밀도점인 4[°C] 부근에 접근하고, 이후 4 ~ 4.5[°C]에 유지되고 있다. 그러나 상단 ($\theta=0$ [°])에서는 초기구간($t=120$ [min])에는 초기 온도 값을 유지하고 있으나 이후 급격히 하강하여 2 ~ 3[°C]값을 유지하였다. 이러한 결과는 축열조 내부 유체층에서 초기 120[min] 구간에서는 중심부 물의 냉각으로 인하여 4[°C]점 저온수는 중심 원통 표면을 따라 하강하고, 초기 상태의 물은 용기 벽을 따라 위로 상승하는 대류 흐름이 발생하는 것을 나타내고 있다.

(b)는 상변화물질의 초기온도가 1.8[°C]인 경우로 7[°C]의 경우와 같은 온도 역전 현상은 일어나지 않았고, 응고과정 초기부터 상·하단 모두 비교적 일정하게 냉각되었다. 이는 앞의 두 경우와 비교한 대류 흐름이 매우 약하게 발생하고 있음을 보여주는 것이라 생각된다.



(a) Temperature variations of water with time for $T_{w,i} = 7$ [°C].

(b) Temperature variations of water with time for $T_{w,i} = 1.8$ [°C].

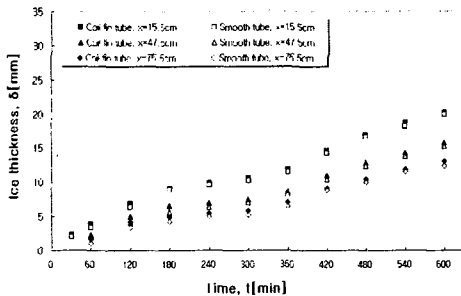
[Fig. 2] Radial temperature variations of water inside the storage tank at circumferential angles ($x=475$ [mm])

3-2. 민관과 코일 원관의 브라인 방향 제빙성능

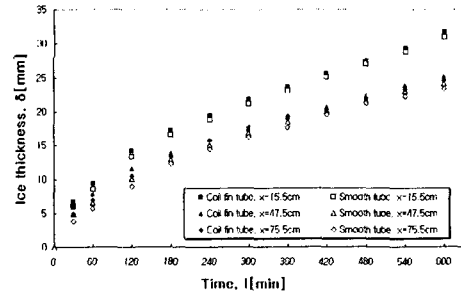
[Fig. 3] (a)는 초기온도가 7[°C]인 경우의 제빙 두께 변화량을 나타낸 것으로 액체층 내부의 강한 대류 유동의 영향으로 얼음의 성장률이 상당히 낮게 나타나는 것을 볼 수 있다. 10시간 동안의 전체 제빙량은 초기온도가 1.8[°C]인 경우의 약 56[%]의 차이로 나타내었다. 그러나 원주 방향으로 얼음의 두께는 큰 차이를 나타내었다. 또한, 얼음의 성장은 냉각관을 중심으로 상하로 타원형을 나타내었다.

[Fig. 3] (b)는 축냉조 내부에 대류 효과가 가장 작게 발생하는 경우로서 초기 물의 온도가 1.8[°C]인 경우에서 축방향 3개(15.5[cm], 14.5[cm], 75.5[cm])와 반경 방향 4개($\theta=0[^\circ]$, $90[^\circ]$, $180[^\circ]$, $270[^\circ]$)의 특정점에서 측정한 제빙두께를 시간에 따라 나타낸 값이다. 축열조 축방향에 따른 얼음의 성장은 냉각수의 유동 입구 영역($x=15.5[mm]$)에서 가장 빠르며 관의 길이방향으로 성장이 둔화되는 것을 확인할 수 있었다. 그 이유는 냉각수의 유동방향으로 온도가 증가하는데 따른 것이다. 길이 방향 얼음두께 성장률은 중단면을 기준으로 입, 출구에 가까운 두 지점의 차이는 평균 약 26.4[%]이었다.

관의 반경방향으로의 성장률은 상부($\theta=0[^\circ]$)와 좌($\theta=90[^\circ]$)·우($\theta=270[^\circ]$)부분의 성장은 비교적 균일한데($\pm 9[％]$) 비해 관의 하부($\theta=180[^\circ]$)에서는 밀도차로 인해 고온의 물의 정체로 인한 성장률에서 상대적으로 큰 차이가 발생하였다. 시간의 경과에 따라 평균 얼음의 성장률은 점차 둔화하며, 그 이유는 얼음이 열저항으로 작용하기 때문이다.



(a) In the direction of brine flow
for $T_{w,i} = 7[^\circ\text{C}]$



(b) In the direction of brine flow
for $T_{w,i} = 1.8[^\circ\text{C}]$

[Fig. 3] Time variation of the ice thickness on the tube wall

3-3. 민관과 코일 원관의 반경방향 제빙성능

[Fig. 4]는 실험을 통해 각각 민관(smooth tube)과 코일 원관(coil fin tube)에서의 축냉과정에서의 제빙량을 측정하여 비교한 것으로 (a)는 초기 물의 온도가 7[°C]인 경우로써 얼음 성장률이 낮는데 이는 초기 축냉조 내 물의 초기온도가 크기 때문에 축냉과정에서 축냉조 내부 물에는 강한 대류가 발생하여 물에 의한 현열 저장이 크기 때문이다.

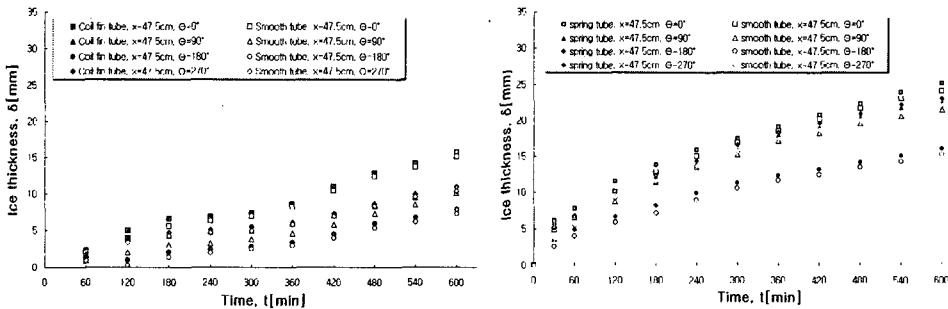
(b)는 물의 초기온도가 1.8[°C]인 경우로 얼음의 성장에 소요된 시간은 coil fin의 높이인 10[mm]지점까지 원을 설치한 경우가 매끈한 표면의 경우에 비하여 약 27[%]작았다. 특히, 얼음두께 성장률은 coil fin의 체적율이 상대적으로 높은 두께 3~5[mm]구간에서 현저하게 높게 나타났다. 10[mm] 이후 구간에서는 매 시간 얼음의 두께 차이가 비교적 균일한 값을 유지하고 있다.

상기 실험의 결과로부터 얼음 성장에 미치는 coil fin의 효과는 여전히 유효한 것으로 나

타났으며 축열 시간 동안 매끈관 표면에서 도달하는 얼음의 평균 두께 값을 기준으로 coil fin이 설치된 경우에 도달된 시간을 비교하면 $T_w = 1.8[^\circ\text{C}]$ 인 경우 540[min]이 소요 되었으며 $T_w = 7[^\circ\text{C}]$ 일 때 560[min]이 소요 되었다.

소요 시간의 절감은 내부 초기 온도의 크기에 따라 7 ~ 15[%]에 도달하였으며 민관에 대한 현의 열저항⁽¹²⁾은 약 6.7[%]향상된 것을 알 수 있다.

이러한 결과로부터 fin coil이 갖는 체적 효율을 동일한 축열조에서 축빙 저장 성능을 증대시킬 수 있음을 보여 주며, 그 이유는 전열관 표면에 높이 10[mm] coil fin을 설치함으로써 얼음의 열저항을 저감시키는 효과가 있음을 알 수 있다.



(a) In the circumferential direction

for $T_{w,i} = 7[^\circ\text{C}]$

(b) In the circumferential direction

for $T_{w,i} = 1.8[^\circ\text{C}]$

[Fig. 4] Time variation of the ice thickness on the tube wall

4. 결론

원통 수평 축냉조에 대하여 냉열 저장수의 초기 온도를 일정하게 유지하고 ($T_{wi} = 1.8, 7.0[^\circ\text{C}]$) 축냉용 냉각수(brine)의 온도 유량을 일정 ($T_b = -10[^\circ\text{C}]$, $m_b = 0.05[\text{kg/s}]$)하게 하고 원통 전열관 표면위의 얼음의 성장 거동을 연구 하였다.

특히 전열관 표면에 wire coil형상의 fin을 설치하고 fin에 의한 얼음층에 대한 열저항 저감 효과가 얼음성장에 미치는 효과를 검토 하여 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 수평 원통관 위의 얼음의 성장거동을 관의 길이 방향, 주어진 관 단면에서 원주 방향으로 다르게 나타났으며, 원주 방향으로는 관 하단부에서 성장률이 제일 낮고, 상단부에서 가장 크게 나타났다. 이것을 물의 밀도 최대점인 $4[^\circ\text{C}]$ 물이 관 하단에 축적되어 축냉조 내부의 상·하단에 밀도차이에 따른 분리가 발생하고 얼음표면을 따라 상승하는 대류 열전달층의 입구 영역이 되기 때문에 대류 열손실에 크기 때문이다.

2) 매끈한 표면에서의 얼음의 평균 성장률은 초기 온도가 $7[^\circ\text{C}]$ 인 경우 성장률이 $1.8[^\circ\text{C}]$ 인 경우에 약 50[%]로 낮게 나타났다. 그 이유는 $T_{w,i} > 4[^\circ\text{C}]$ 에서는 액체층 내부에 강한 대류 흐름이 발생하여 물의 온도를 감소시킨 현열 저장이 상대적으로 증가하는데 있다.

3) 전열관 표면위의 얼음층의 내부 열저항은 줄이기 위해 설치한 coil fin은 얼음 성장률을 촉진 하는 효과가 매우 큰 것으로 확인 되었다. fin 높이 10[mm]에 도달하는 시간은 약

30[%] 감소시켰다. 매끈한 관에서 10시간동안의 축냉과정에서 도달하는 높이의 얼음을 성장 시키는데 걸리는 시간은 coil fin을 설치 할 때 약 13[%] 감소시키는 것으로 나타났다. 이러한 효과는 물의 초기온도 $T_{w,i}$ 가 낮을 수록 크게 나타났으며 $T_{w,i}=7[^\circ\text{C}]$ 에서도 여전히 8[%] 정도의 시간 절약을 얻을 수 있었다.

5. 참고문헌

1. Bathelet, A. G., Buren, P. D., Viskanta. R. : "Heat transfer and Interface motion During melting and Solidification around a Finned Heat Source/Sink", Transactions of ASME, Vol. 103, November, pp. 720~59. (1979)
2. H. Rieger, U. Projahn & H. Beer : "Analysis of the Heat Transport Mechanisms during Melting Around a Horizontal circular Cylinder", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 25, No. 1, pp. 137~147. (1982)
3. M. Yamaha : "Studies on Thermal Characteristics of Ice Storage Tank", 공기조화 · 위생공학회지, No. 56. (1994)
4. Gupta, S. C. : "A moving grid numerical scheme for multi dimensional solidification with transition temperature range", Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 189, pp. 525~544. (2000)
5. Yu, X., Nelson, D. J., Vick, B. : "Phase change with multiple fronts in cylindrical systems using the boundary element method, Engineering analysis with boundary elements", 16, pp. 161~170. (1995)
6. Eames, P. C., Norton, B. : "The effect of tank geometry on thermally stratified sensible heat storage subject to low reynolds number flow", International Journal Heat Transfer, Vol. 41, No. 14, pp. 2131~2142. (1998)
7. Nelson, J. E. B., Balakrishnan, A. R., Srinivasa Murthy, S. : "Parametric studies on thermally stratified chilled water storage systems", Applied Thermal Engineer, 19, pp. 89~115. (1999)
8. Kalhori, B., Ramadhyani, S. : "Studies on Heat Transfer From a Vertical Cylinder, with or without Fins, Embedded in Solid Phases Change Medium", Transaction of the ASME, Vol. 107, Fevruary, pp. 44~50. (1985)
9. 이희찬 : "관의착빙형 코일에 대하여", 공기조화 · 냉동공학회지, Vol. 20, pp. 104~109. (1991)
10. Huang, C. L., and shiuh, Y. P. : "A pertubation Method for Spherical and Cylindrical Solidification", Chem. Eng. Sci., 30, 879~906. (1975).
11. Goring, R. L., and Churchill, S. W. : "Thermal Conductivity of Heterogeneous Materials", Chem. Eng. Progr., vol. 57, no. 7, pp. 53-59. (1961)
12. 이분희 : "빙축열 시스템에서의 관의 열전달 촉진에 관한 연구", 성균관대학교 석사학위 논문, pp. 53-54. (2003)