

해수담수화용 전열촉진관에 관한 실험적 연구

김광희, 김동국
한국에너지 기술연구원(KIER)

Experimental Study for enhanced heat transfer tubes in a Desalination

Kwang-Hee Kim, Dong-Kook Kim
Korea Institute of Energy Research (KIER)

1. 서론

증발방식의 해수담수화 방법으로는 다단플래쉬(MSF: Multi-Stage Flash), 다중효용(ME: Multi-Effect), TVR(Thermal Vapor Recompression), MVR (Mechanical Vapor Recompression) 시스템들이 있다. 증발방식은 높은 에너지원단위 때문에 그 적용에 한계를 가지고 있어 시스템의 고효율화가 필요하다. 최근 들어 증발기의 고효율화를 위해 평활관 대신에 열전달 능력이 보다 우수한 전열촉진관이 주로 사용되고 있는 추세이다. 이는 갈수록 심화되고 있는 사용공간의 제약으로 단위부피당 전열면적을 극대화 하기 위함이다. 그러나 해수담수화장비에 있어 지금까지 평활관이 사용되어 왔으며 특수전열관에 대한 검토가 이루어지지 않고 있다. MVR시스템은 증발기내에서 일차열원에 의해 발생한 증기를 약간의 전기에너지를 추가함으로써 이차열원으로 사용하는 시스템으로 기체-액체의 열교환 형태이다. 본 논문에서는 이러한 조건에 대하여 MVR 시스템의 증발기에 사용될 수 있는 전열촉진관들의 특성에 대하여 연구하였다.

2. 본론

2-1. 실험장치

전열촉진관의 전열 특성을 측정하기 위한 해수 열교환 실험장치의 계략도는 Fig. 1 과 같다. 실험장치는 크게 실선으로 표시된 냉각수 순환회로와 점선으로 표시된 증기 순환회로로 나누어져 있다. 펌프에 의한 맥동현상을 피하기 위해 냉각수는 항온조(①)에서 펌프(②)에 의해 고수조(③)로 이동하며 중력에 의해 유량계(④)를 통하여 test section을 통과한다. test section을 지나 가열된 냉각수는 5RT 용량의 열교환기(⑤)를 지나 일정온도로 냉각된 후 항온조로 복귀한다. Steam Generator(⑥)에서 발생된 고온의 증기는 압력조정 밸브에 의해 일정한 압력으로 test section에 공급된다. test section에서 응축된 증기응축수는 Chiller(⑦)에서 일정온도 까지 냉각되어 진 후 유량계(⑧)에 의하여 유량이 측정된다. test section 및 모든 순환회로를 단열 시켜 외부로의 열에너지 손실을 최소화하였다. test section은 길이 1m의 이중관형 열교환기이다. 전열촉진관의 내관으로는 고온의 증기가 통과하며 투명 Pyrex로 된 외관으로는 냉각수가 통과한다. 외관은 내경이 39mm이며, 내관은 외경이 19mm정도의 다양한 전열촉진관을 삽입 할 수 있도록 설계되었다. 스팀의 입구온도(T_i) 및 출구온도(T_o)와 냉각수의 입구온도(t_i), 출구온도(t_o)를 측정하기 위한 열전대가 삽입되어 있으며, 전열관 외면의 유체 및 표면의 온도를 측정하기 위하여 20cm 간격으로 각각 4개씩의 열전대를 삽입 및 부착하였다.

2-2. 실험방법

실험적인 비교, 평가를 위해 사용된 전열관은 평활관, sprial tube, Fin tube, 개량형 Fin tube(Turbo-C)등 4가지 형태로 평활관 재질은 동관이며 나머지는 해수에서 가장 많이 사용되는 백동(Ni:30%, Cu:70%)이다. Fig. 2은 평활관을 제외한 전열촉진관의 형상 및 규격을 나타내었다. 모든 전열관의 동일 구간에서 온도를 측정하였으며 측정된 데이터는

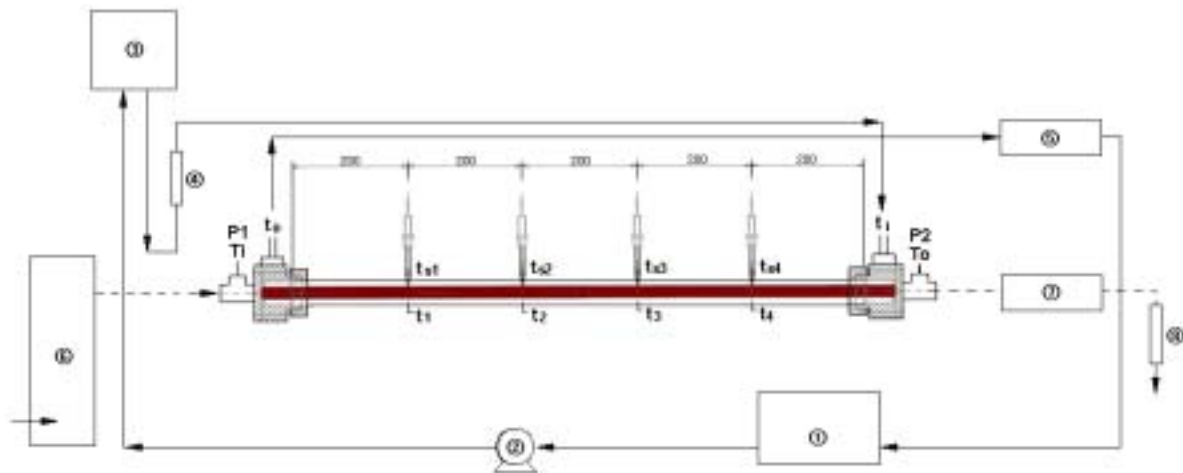


Fig. 1 Schematic diagram of test apparatus

- ①cold water tank ②pump ③high level tank ④water flow meter
- ⑤water chiller ⑥steam generator ⑦condensing chiller ⑧flow meter

Data Acquisition System(HP model: 34970A)를 통해 수집, 분석되었다. 측정된 온도는 스팀의 입출구온도, 냉각수의 입출구온도, 전열관의 표면온도(t_s) 및 냉각수의 온도(t)이다. 스팀은 1bar의 압력으로 공급되며 냉각수로 물이 사용되었다. MVR시스템과 동일한 조건에서 실험하기 위하여 증기의 입구온도를 100℃, 냉각수의 입구온도는 바닷물의 온도와 유사하므로 25℃ 정도로 유지하였다. Table 1 에 나타난 것처럼 증기의 유량을 일정하게 유지하고 냉각수의 유량을 변화시켜가며 향류조건으로 실험하였다. 모든 경우에 대하여 증기의 완전응축조건이며 roughness를 고려하지 않은 경우 레이놀즈수(Re)는 10^3 이하로 층류조건을 갖는다.

2-3. 이론

MVR 증발기에서 스팀이 전열관의 내부로 이동하고 외부로 냉각수가 이동하는 경우에 대하여 두 유체사이의 열전달은 식(1)에 의해서 정의된다.

$$Q = U A \Delta T_{lm} \dots\dots\dots (1)$$

Q는 전열량이며, A는 전열관의 내부표면적, ΔT_{lm} 는 logarithmic mean temperature difference, U는 총괄전열계수이다.

측정된 스팀과 냉각수의 입출구 온도로부터 ΔT_{lm} 는 식(2)와 같다.

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln(\Delta t_1 / \Delta t_2)} \dots\dots\dots (2)$$

여기서 $\Delta t_1 = T_i - t_o$
 $\Delta t_2 = T_o - t_i$ 이다.

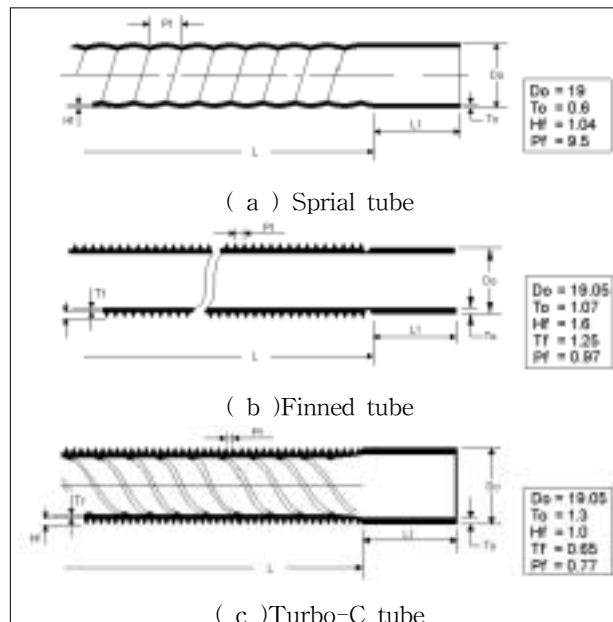


Fig. 2 Tested tube geometries

Table 1. Experimental variables

	단위	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6	Case7	Case8	Case9
증기	L/min	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
냉각수	L/min	4	3.6	3.2	2.8	2.4	2	1.6	1.4	1.2

증기와 냉각수사이의 열전달량 Q는 증기의 에너지손실량과 동일하다. 따라서 Q는

$$Q = \dot{m} (C_p \Delta T + \lambda) \dots\dots\dots (3)$$

여기서 \dot{m} 는 증기의 질량유량, $\Delta T = T_o - T_i$, λ 는 증기의 응축잠열이다.

식(3)과 식(1)로부터 총괄전열계수의 식(4)를 이끌어 낼 수 있다.

$$U = \frac{\dot{m} (C_p \Delta T + \lambda)}{A \Delta T_{lm}} \dots\dots\dots (4)$$

A는 전열관의 내부표면적으로 $A = \pi D_i L$ 이며 D_i 는 전열관의 내부지름이다.

3. 결과 및 고찰

MVR증발시스템과 동일한 조건으로 증기와 냉각수의 입력온도를 유지하고, 냉각수의 유량과 전열관의 변화를 통해 실험하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

레이놀즈수(Re)가 800일 때 전열관의 위치에 따른 표면온도(ts)분포를 Fig. 3에 나타내었다. 비교대상으로 검토된 전열축진관들은 평활관에 비하여 전열축진현상이 두드러지게 나타났음을 알 수 있으며 Turbo-C 전열관의 열전달 성능이 가장 우수함을 알 수 있다. 전열관의 전도저항이 대류저항에 비하여 매우 작기 때문에 전열관의 표면온도와 증기의 온도가 동일하다고 가정할 수 있다. 증기의 응축잠열에 의한 열전달 구간(x=0.6~0.8)에서 평활관을 제외한 모든 전열관이 일정한 온도분포를 나타내었으며 응축된 증기의 현열에 의한 열전달이 진행되면서 급격히 감소함을 볼 수 있다. 또한 Fig. 4는 응축전열구간인 x=0.6에서 Re에 따른 전열관의 표면온도를 나타낸 그림으로, Re의 증가에 따라 표면온도가 다소 감소되는 것을 볼 수 있다.

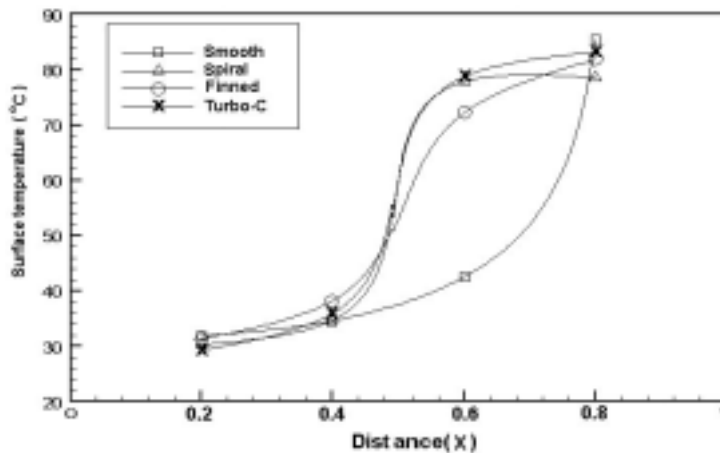


Fig. 3 Surface temperature distribution with distance(x) at Re=800

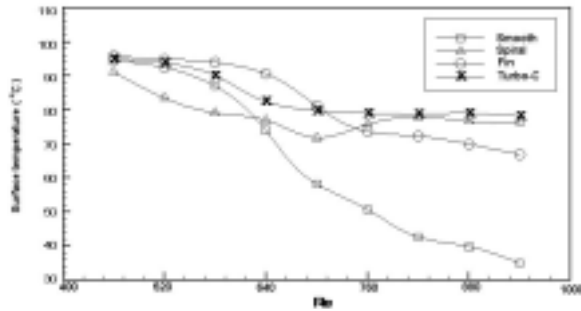


Fig. 4 Surface temperature distribution with Re at $x=0.6L$

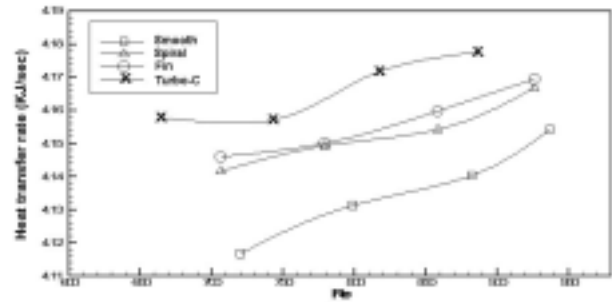


Fig. 5 Variation of the heat transfer rate against coolant Reynolds number

Fig. 5는 전열관내 증기의 완전응축조건에 대하여 식(3)에 의해 계산한 결과이다. Re가 증가함에 따라 열전달율이 모두 선형적으로 증가하였으며, Turbo-C가 모든 Re에 대하여 가장 크게 나타났다.

해수담수화용 전열관은 높은 총괄전열계수 뿐만 아니라 낮은 파울링 특성 및 내부식성을 가져야 한다. 장시간의 실험을 통하여 각 전열축진관의 파울링 특성 및 부식특성을 분석할 계획이며, 스팀의 외부 응축 조건 및 전열관의 수직조건에 대한 추가적인 연구가 진행 될 것이다.

4. 참고문헌

- 1) "Heat Transmission", McGraw-Hill
- 2) G. Sun, G.F. Hewitt, 2001, "Evaporation and condensation of steam-water in a vertical tube", Nuclear Engineering and Design 207, pp. 137-145
- 3) A.Y. Kalendar, A.J. Griffiths, 2001, "Performance study of enhanced and smooth surface tubes in a system condenser of a multistage flash desalination unit", Desalination 134, pp. 269-283
- 4) A. Schaffrath, A.K. Krussenberg, 2001, "Modeling of condensation in horizontal tubes", Nuclear Engineering and Design 204, pp. 251-265