

수직 증발관에서 CaSO₄ Scale 형성과 열전달에 관한 연구

홍 춘 근* · 최 만 수**
(1999년 1월 16일 접수)

A Study of CaSO₄ Scale Formation and Heat Transfer in a Vertical Tube Evaporator

Choonkeun Hong and Mansoo Choi

Key Words: Scale(스케일), Boiling Heat Transfer(비등 열전달), Desalination Process(담수화 공정)

Abstract

A study of scaling and heat transfer has been carried out for a vertical tube evaporator in which CaSO₄ saturated water flows upward. Experimental apparatus including vacuum chambers and heaters has been designed and manufactured to study scaling phenomena for three different pressures(1atm, 0.27atm and 0.16atm). Overall heat transfer coefficients have been measured and shown to decrease with time as scaling proceeds. After the end of experiments, the vertical tube has been cut to measure the thickness of scale at different heights. Below the height where the bulk fluid temperature does not reach saturated temperature, the thickness of scale increases, however, beyond that height occurring saturated condition, the thickness does not vary much or even decreases a little. The measured fouling resistances also support these variations of scale thickness.

기호설명

G : 질량유속, [kg/m²s]
 h : 열전달계수, [W/m²K]
 k : 열전도계수, [W/mK]
 R_f : fouling 저항계수, [m²K/W]
 q'' : 열유속, [kW/m²]
 r : 반지름, [m]
 z : 축방향의 위치, [cm]

f : CaSO₄ 수용액
 i : inner 내부
 l : 유체
 o : outer 외부
 w : 벽면
 w_i : 원관의 내벽
 w_o : 원관의 외벽

1. 서론

하첨자

avg : 평균
 c : clean water

Scale은 열교환기 등에서 진열면에 부착이 되어 전체적인 열전달 성능을 저하시키는 물질들을 지칭한다. Scale은 시간이 지나면서 장치를 부식시킬 수 있기 때문에 열교환기 설계나 제작에 있어 반드시 고려해야 할 인자이다. 담수화 공정에서 많이 사용되는 수직 증발관에서도 해수의 광물질 성분이 부착되면서 발생하는 scale이 열전달 성능에 큰 영향을 미치며 따라서 적절한 담수화 공정용 열교환기 설계를 하기 위해서는 필수적으로 scale과 그에 따른 열전달 영향을 고려하여야 한

* 서울대학교 대학원
 ** 회원, 서울대학교 기계항공공학부, 정밀기계설계 공동연구소 나노입자제어기술연구단

다.

수직 증발관을 이용한 담수화 공정에서는 해수가 증발관 안을 흐르며 가열이 되어 증발이 일어나는 동안 해수에 포함되어 있던 여러 scale 성분들이 관내벽에 침전되어 부착하게 된다. 시간이 지남에 따라 관에 부착하는 scale은 점점 더 두껍게 성장하여 단열막 혹은 열저항의 역할을 하는데, 이는 총합 열전달계수(overall heat transfer coefficient)의 저하 즉 열전달 성능의 저하를 가져온다. 일반적으로 해수 증발관에서 문제가 되는 scale 성분은 CaSO_4 , CaCO_3 , Mg(OH)_2 등 세가지 물질 들 수가 있으며 본 연구는 수용액의 온도에 따라 용해도가 감소하는 역용해도 물성을 가진 CaSO_4 수용액에 대하여 scale의 형성과 그에 따른 열전달 성능의 변화를 연구하였다. 폐열을 이용하기 위하여 담수화 공정에서는 대기압보다 낮은 압력에서 증발시키는 것이 일반적이기 때문에 진공압력에 따라 달라지는 scale의 성장과 그에 따른 열전달 성능의 변화를 측정하였다.

해수의 scaling 혹은 fouling과 관련하여 지금까지 진행되어 온 연구들은 다음과 같다. Ritter⁽¹⁾는 CaSO_4 와 Li_2SO_4 의 fouling에 있어서 실험 초기에는 fouling 효과가 거의 없는 induction period가 존재함을 밝혔고 fouling에 있어서 중요한 parameter로 과포화 상태와 표면온도가 중요한 인자임을 밝혔다. 실제 해수 담수화 공정과 관련하여 Fujioka 등⁽²⁾은 130°C로 유지된 평판 증발장치에서 scale 형성을 두 군데 위치에서 측정하였다. Sheikholeslami와 Watkinson⁽³⁾은 구리관과 mild steel관에 대해서 CaCO_3 의 scale 형성을 연구하였다. Hasson과 Perl⁽⁴⁾은 수직면에서 낙하하는 층류 유동에서 scale 형성을 연구하였는데, 증발은 일어나지만 boiling이 일어나지 않는 조건에서 CaCO_3 부착물이 가장 작은 조건을 예측하였다. Chan 등⁽⁵⁾은 난류 조건에서 NaCl과 KCl의 fouling 실험을 하였으며, pH, 속도, 농도 등을 실험인자로 하여 데이터를 축적하였다.

지금까지 fouling에 대한 연구는 강제 대류 비동에 대해서 제한적으로 이루어졌으며, 주로 열교환기 전체의 평균적인 열전달 측정에 대한 연구가 많았다. 본 연구에서는 포화된 CaSO_4 수용액이 수직 증발관 내에 상향으로 흐를 때 여러 진공도에 따라서 scale 형성이 어떠한 양상을 가지게 되며 이에 따른 열전달 성능의 저하가 시간

에 따라서 어떤 변화를 나타내는지를 파악하고자 하였다. 또한 수직 증발관의 여러 위치에 열전달률 부착하여 국소 fouling 저항계수를 측정하도록 하였으며, 이에 따라 단상 유동인 경우와 이상 유동인 경우에 대해서 scale 형성과 열전달을 연구하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1에 실험 장치의 전체 개략도를 나타내었다. 개략도에 나타난 바와 같이 세개의 진공 챔버를 설계, 제작하였으며, 이 중 2개는 물과 과포화된 CaSO_4 수용액을 각각 저장하는 진공 챔버이고 나머지 하나는 증발된 증기를 배출시키는 진공 챔버이다. 실험이 정상상태에 도달할 때까지는 물로 먼저 실험을 하여 scale이 발생하기 전의 상태를 측정하여 scaling 전과 후의 변화를 파악하고자 하였으며, 정상상태에 도달한 이후에는 같은 압력, 유량, 열유속에 대해 CaSO_4 포화수용액을 흘려보내 시간에 따라 변화하는 scale 형성과 열전달 성능을 측정하였다. 수직 증발관을 지나 증발된 증기는 진공 펌프에 의해 시스템 밖으로

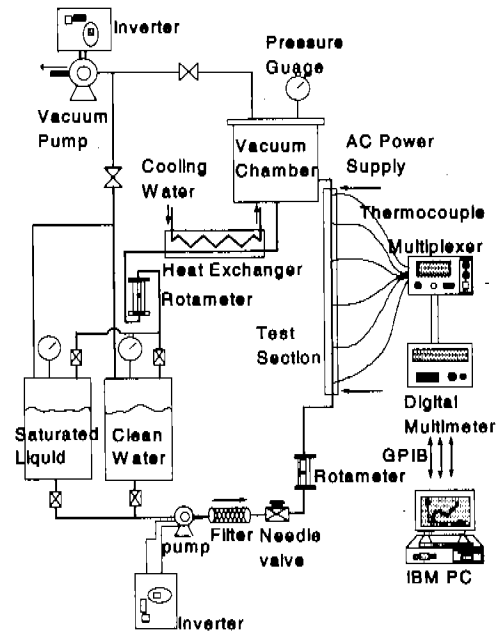


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus.

로 배출되며, 증발되지 않은 용액, 즉 브라운은 냉각장치를 거쳐 다시 챔버 밑바닥으로 흘러돌아가 같은 기압으로 유지되고 있는 CaSO₄ 수용액 저장탱크에 유입되게 된다. 전체 시스템을 진공으로 유지하기 위해서 CaSO₄ 수용액 저장탱크와 진공 챔버에는 진공 펌프가 연결되어 있으며 각 챔버에는 진공계가 하나씩 설치되어 있고 각각의 배출관에는 니들 밸브 및 On-Off 밸브를 설치하여 시스템이 정상상태에 도달하기 전까지는 각각의 밸브를 수동으로 작동시켜 압력을 조절하였다. 저장탱크에 담겨져 있는 물과 수용액은 펌프에 의해 순환되어지며, 용액의 유량은 니들 밸브 및 인버터를 사용하여 제어하였다. 본 실험에서 CaSO₄ 수용액은 CaSO₄ · ½ H₂O(Hemihydrate) 용액으로서 hemihydrate를 직접 끓여 용해시켜 제작하였다. 파코화된 수용액은 입자 형태의 scale을 만들 수 있는데, Fig. 1에 나타난 바와 같이 filter를 사용하여 걸러지며 수직 증발관에 유입되는 수용액은 일정한 포화농도로 유지된다. 증발관은 길이 2.3m, 외경 12.7mm, 내경 10.9mm의 매끄러운 구리관을 사용하였으며 균일한 전기적, 열적 조건을 갖추기 위해 이음매 없는 관을 사용하였다. 매 실험 후 성장한 scale을 측정하기 위하여 증발관을 해체·절단하여야 하므로 분해·조립이 용이하도록 증발관과 히터를 쉽게 장착시킬 수 있는 히터 하우징(heater housing)을 구리로 제작하였다. 히터 하우징은 길이 50cm이며, 길이 방향으로 3부분을 연속적으로 연결하여 증발관 1.5m를 가열하게 하였으며 원주방향으로의 온도 균일성 및 균일한 열유속이 구현 가능하도록 구리로 된 히터 하우징에 8개의 히터를 원주방향으

로 균일하게 장착하였다.(Fig. 2 참조) 히터로는 stainless steel tube(1.5m)를 직접 전기를 가하여 가열하는 방법을 사용하였다. 전력 공급은 220V, 50A의 1차 전원을 가변전원공급기를 사용하여 조절하고 2차로 변류하여 최대 15V, 800A로 만들어 히터에 공급한다. 본 실험에서 열전달계수를 구하기 위해서는 열유속, 유체 온도, 벽면 온도 등을 측정하는 것이 필요하다. 외벽의 온도를 측정하기 위하여 탄소봉으로 미리 열전대의 접점을 만든 후 히터 하우징에 가공된 홈 안으로 밀어 넣어 증발관의 외벽 온도를 측정하도록 하였다. 히터 하우징의 열적 팽창으로 인하여 열전대의 접점이 증발관 외벽에서 떨어지는 경우를 방지하기 위하여 Fig. 2에 나타난 바와 같이 spring을 장착하였으며, 열전대의 접점에는 thermal 에폭시를 사용하여 접촉을 향상시켰다. 축방향으로 변화하는 열전달계수를 측정하기 위하여 1.5m의 증발관을 높이 방향으로 6등분하여 각 위치에 4개의 T형 열전대(OMEGA, 24gauge)를 원주방향으로 90° 간격으로 장착하였다. 따라서 총 24개의 열전대를 수직 증발관의 외벽 온도를 측정하기 위하여 장착하였다. 유체의 입구 및 출구 온도는 T형 열전대(OMEGA, 1/16" sheath)를 증발관 내부로 삽입시켜 측정하였다.

2.2 실험방법

증발관 내부로 유입되는 열유속을 44.1kW/m²로 유지시켰으며 증발관으로 들어가는 CaSO₄ 수용액의 온도는 28°C, 질량유속은 74.3kg/m²s로 고정하였는데, 이는 scaling이 발생하기 전 상태에서 0.074m/s의 관내유속을 지닌다. 주요 실험인자로 세가지 다른 압력 즉, 1기압, 0.27기압, 0.16기압(포화온도 각각 100°C, 67.4°C, 55.2°C)에서 scale 형성과 열전달을 측정하였다. 수직 증발관의 내벽 온도는 측정된 외벽 온도와 주어진 열유속으로부터 정상상태를 가정한 열전도 방정식을 해석하여 구할 수 있다. 즉, 관의 두께가 길이 방향에 비해서 매우 작고 원주방향의 대칭성을 고려하면 일차원 열전도 해석이 가능하고, 또 scale의 성장이 상당히 긴 시간 동안에 천천히 이루어지기 때문에 정상상태로 가정할 수 있다. 일차원 정상상태 열전도 방정식을 수직 증발관에 적용하여 해석하면 내벽 온도는 아래와 같이 얻어진다.

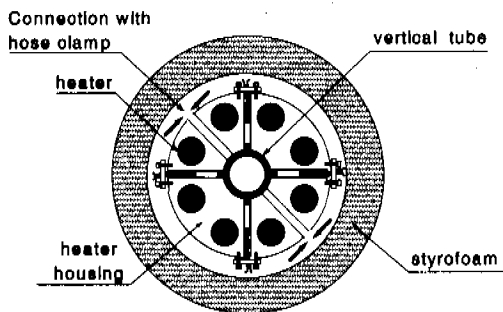


Fig. 2 Cross section of heater housing, heater and a vertical tube.

$$T_{wi} = T_{wo} - \frac{r_o q''}{k} \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right) \quad (1)$$

여기서 r_o 는 판의 바깥 반지름이며, r_i 는 안쪽 반지름이다. 따라서 실험으로부터 얻은 외벽의 온도를 위식에 대입하여 필요한 내벽의 온도를 계산한다. 여기서 내벽의 온도 T_{wi} 는 scale의 표면 온도를 의미하는 것이 아니라 수직관 내벽 구리 표면 온도를 의미한다. 실험에서는 시험부(중발판) 높이 방향으로 6군데에 열전대를 설치하여 각각의 위치에서 원주방향으로 90° 간격으로 네 군데의 외벽 온도를 측정하였고, 각 위치에서의 유체 온도는 균일 열유속을 가하는 조건이므로 출구 온도가 포화 온도를 넘지 않는 경우 각 위치의 평균 유체 온도는 선형적이라는 가정 하에서 구하였다. 수용액이 흐르면서 수직관 내부에서 유체의 평균 온도가 포화온도에 도달하는 경우 주어진 유속과 질량유속으로부터 유체의 온도가 포화 온도에 도달하는 지점을 예측하여 그 지점까지는 선형적으로 변화하는 유체 온도로 가정하고 그 지점 이후부터는 유체의 평균 온도는 포화 온도로 일정하다고 가정하였다. 수직관의 각 높이에서 원주방향으로 4군데에서 측정된 수직관 외벽 온도로부터 식 (1)을 사용하여 내벽 온도를 계산할 수 있었으며, 또 그 평균을 취하여 $T_{wi,avg}$ 를 결정하며 이에 언급한 방법대로 구한 유체의 평균 온도 T_f 를 이용하면 총합 열전달계수 h_f 를 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$h_f = \frac{q''}{T_{wi,avg} - T_f} \quad (2)$$

시간이 지남에 따라 scale은 성장하므로 scale의 열저항 효과들을 포함하는 총합 열전달계수는 값이 감소하게 된다. fouling 저항계수는 scale 성분이 없는 깨끗한 물로 실험하여 측정한 열전달계수 h_c 와 위에서 구한 열전달계수 h_f 로부터 구할 수 있다. Scale 성장으로 인한 fouling 저항계수, R_f 는 다음과 같이 정의될 수 있다.^(1,5,6)

$$R_f = \frac{1}{h_f} - \frac{1}{h_c} \quad (3)$$

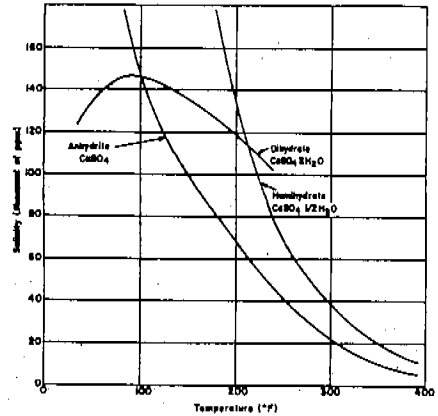


Fig. 3 Solubility of CaSO₄.

3. 결과 및 토의

본 연구에서는 균일 열유속 조건의 수직 원형관 내에서 상향으로 흐르는 포화된 CaSO₄ 용액의 scale 성장과 그에 따른 열전달 성능의 변화를 연구하였으며 같은 열유속 조건일 경우 진공도, 작동압력의 변화에 따라 열전달계수 및 fouling 저항계수 등이 어떻게 변화하는가에 대해 알아보았다. 대기압 하에서 실험한 경우는 주어진 열유속과 유량 조건에 유체의 출구 온도가 포화 온도에 도달하지 않았다. 순수한 물로 실험하여 정상상태에 도달한 후에 CaSO₄ 포화수용액을 흘려보내면 수직 중발판 내에 scale이 형성된다. CaSO₄ 포화수용액은 Fig. 3에 나타난 바와 같이 온도가 상승함에 따라서 용해도가 감소하게 되며

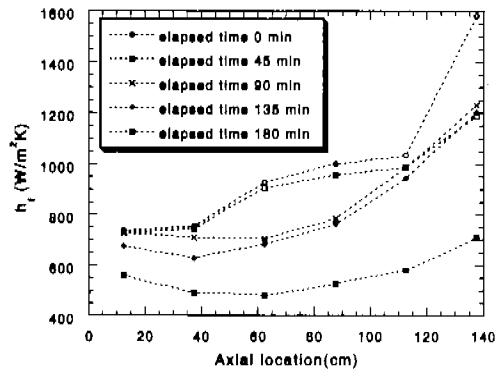


Fig. 4 Variation of heat transfer coefficient along the vertical tube at different times. (p=1atm, G=74.3kg/m²s, q''=44.1kW/m²)

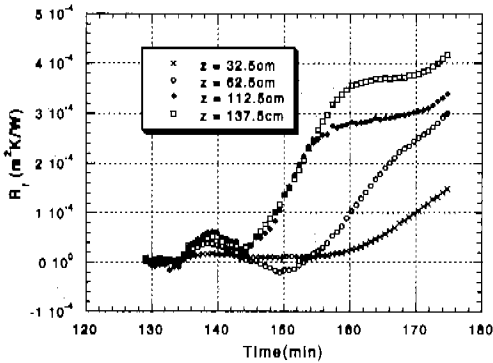


Fig. 5 Variation of fouling resistance with time for different axial locations in a vertical tube.

($p=1\text{atm}$, $G=74.3\text{kg/m}^2\text{s}$, $q''=44.1\text{kW/m}^2$)

수직 증발관의 상향으로 흐르면서 온도가 상승하게 되므로 따라서 용해도가 감소되어 scale이 형성되며 수직 증발관 내에 부착하게 된다. 본 연구에서는 CaSO₄ · ½ H₂O(Hemihydrate)를 사용하였다. Fig. 4에 수직관의 높이에 따라 변화하는 총합 열전달계수가 시간이 지남에 따라 어떻게 변화하는지를 나타내었다. 원으로 나타낸 데이터는 순수한 물로 측정된 정상상태의 열전달계수이며 수직 증발관 내에 scale이 발생하기 전 상태를 나타낸다. 높이 약 50cm 이상부터 열전달계수가 증가하다가 100cm 근처부터는 급격히 증가함을 나타내고 있다. 이는 과냉 핵비등의 영향으로 인한 결과로 판단되어진다. 유체의 평균 온도는 출구까지 포화 온도보다 낮은 온도를 가지지만, 수직관의 높이 z가 50cm보다 높은 위치에서는 수직관 내벽의 온도가 100°C보다 큰값을 가지게 되며 따라서 과냉 핵비등이 발생하여 수직 증발관의 높이에 따라 열전달계수가 상승할 것이다. Fig. 4에서 원을 제외한 나머지 기호들은 scale이 형성된 이후의 총합 열전달계수를 나타낸다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 수직 증발관의 전 구간에서 시간이 지남에 따라서 총합 열전달계수가 감소하며 이는 scale이 수직 증발관 내벽에서 성장되면서 열저항으로 작용한 결과이다. 열전달계수의 감소는 fouling 저항계수의 증가를 의미하며 Fig. 5에 나타난 바와 같이 증발관의 모든 위치에서 fouling 저항계수, R_f는 시간에 따라 증가하게 된다. z가 커짐에 따라 fouling 저항계수가 커지는 것을 관찰할 수가 있는데, 수직관의 높은 위치에

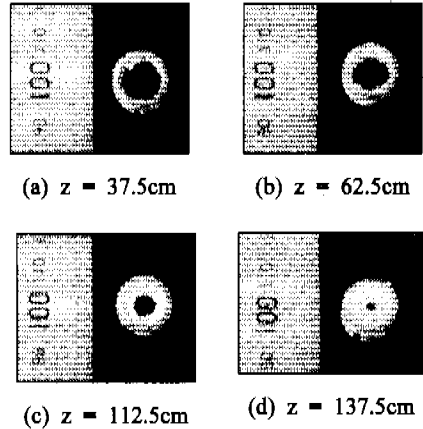


Fig. 6 Photograph of scale growth for different axial locations, after 180min.

($p=1\text{atm}$, $G=74.3\text{kg/m}^2\text{s}$, $q''=44.1\text{kW/m}^2$)

서 높은 온도를 나타내고 있으므로 온도가 증가하면 용해도가 감소하는 역용해도 현상으로 z가 커짐에 따라 좀더 많은 scale이 형성된 것으로 파악할 수 있다. 이러한 scale의 성장을 실험이 끝난 후 수직관을 절단하여 관찰하였으며 Fig. 6에 이를 나타내었다. 앞에서 설명한 바와 같이 scale은 z가 작은 곳보다 큰 곳에서 더 많이 침착되어 성장했음을 보여주고 있으며, Fig. 5에서 보이는 fouling 저항계수의 변화와 일치하는 결과를 나타낸다. z=137.5cm의 단면 사진에서 볼 수 있듯이 수직관의 내부를 거의 채우고 있어 대기압 하의 scale 성장 실험은 180분 이후에는 계속할 수가 없었다.

진공도에 따라 달라지는 증발 현상이 scale 형성에 미치는 영향을 알아보기 위해 전체 시스템의 압력을 낮추어 0.27기압과 0.16기압에 대해서 실험을 수행하였다. 대기압 하에서 실험한 경우와 같이 유량은 74.3kg/m²s, 열유속은 44.1 kW/m²로 유지하였다. Fig. 7은 전체 시스템 압력이 0.27기압인 경우 수직관의 높이에 따라 변화하는 열전달계수를 나타내고 있다. 에너지 균형식으로부터 구해보면 z=100cm 이후부터 내부의 유체온도가 포화온도가 되며 그 위치에서부터 유체의 출구까지는 0.27기압에서의 포화온도인 67~67.5°C로 유지된다. 대기압의 경우와 마찬가지로 열전달계수는 z가 커짐에 따라 증가함을 알 수 있다. 실제로 유체 체적 평균 온도가 포화 온도 이상이

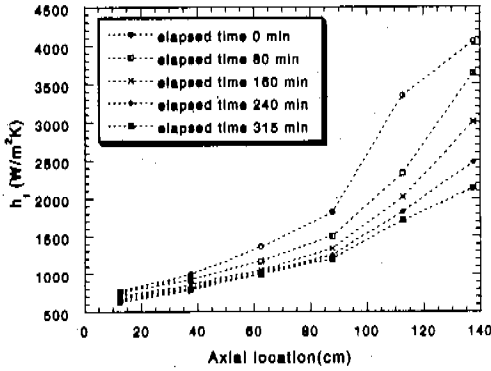


Fig. 7 Variation of heat transfer coefficient along the vertical tube at different times. ($p=0.27\text{atm}$, $G=74.3\text{kg/m}^2\text{s}$, $q''=44.1\text{kW/m}^2$)

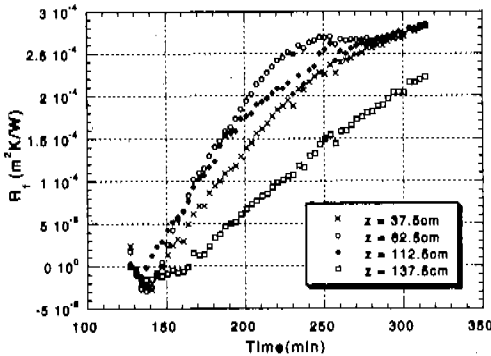


Fig. 8 Variation of fouling resistance with time for different axial locations in a vertical tube. ($p=0.27\text{atm}$, $G=74.3\text{kg/m}^2\text{s}$, $q''=44.1\text{kW/m}^2$)

되어 증발이 일어나는 포화 핵비동 영역(Saturated Nucleate Boiling Regime) 역시 과냉 핵비동과 마찬가지로 가열벽면에서 기포핵이 생성되며 Fig. 7에 나타난 바와 같이 높이 z 에 따라서 열전달이 크게 향상된다. 또한 Fig. 7에서는 증발관의 모든 영역에 scale 성장으로 인하여 열전달계수가 시간에 따라 감소하고 있음을 보여주고 있다. Fig. 8에서는 fouling 저항계수가 시간에 따라 어떻게 변화하는가를 보여주고 있다. 앞에서 설명한 바와 같이 시간이 지남에 따라 네가지 다른 수직관 높이가 위치에서 fouling 저항계수가 점점 증가하고 있음을 보여주고 있으며, z 가 증가할수록 fouling 저항계수는 더 증가하다가 포화 핵비동이 발생하는 $z=100\text{cm}$ 이상에서는 오히려 감소하는 결과를

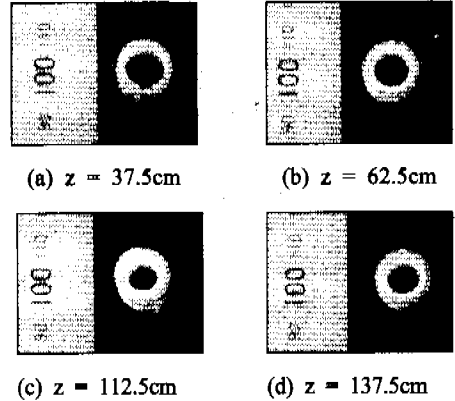


Fig. 9 Photograph of scale growth for different axial locations, after 315min. ($p=0.27\text{atm}$, $G=74.3\text{kg/m}^2\text{s}$, $q''=44.1\text{kW/m}^2$)

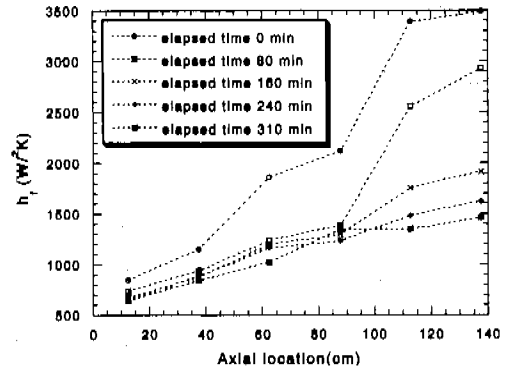


Fig. 10 Variation of heat transfer coefficient along the vertical tube at different times. ($p=0.16\text{atm}$, $G=74.3\text{kg/m}^2\text{s}$, $q''=44.1\text{kW/m}^2$)

볼 수 있다. 유체의 평균 온도가 포화 온도에 도달하기 전까지는 수용액의 온도가 z 에 따라 증가하므로 수용액의 온도가 증가함에 따라 역용해도 성질을 지닌 scale이 더 많이 형성되어 fouling 저항계수가 커지지만, 유체의 온도가 포화 온도에 도달하면 용해도로 인한 scale의 석출이 증가되지 않으며 비동으로 인한 기포 발생이 오히려 scale 부착을 저해하여 fouling 저항계수가 z 가 낮은 위치에서보다 더 작은 결과를 나타내는 것으로 판단된다. Fig. 9에 나타난 네가지 다른 높이에서의 scale의 두께에서 이를 확인할 수 있었다. 즉, z 가 커질수록 scale의 두께가 커지다가 $z=137.5\text{cm}$ 에서는 약간 감소하였음을 관찰할 수 있었다.

Fig. 10에서 Fig. 12까지는 0.16기압에서의 총합

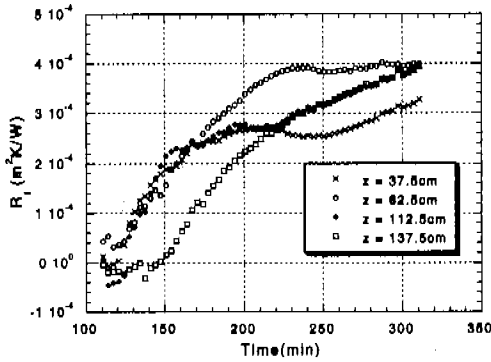


Fig. 11 Variation of fouling resistance with time for different axial locations in a vertical tube. ($p=0.16\text{atm}$, $G=74.3\text{kg/m}^2\text{s}$, $q''=44.1\text{kW/m}^2$)

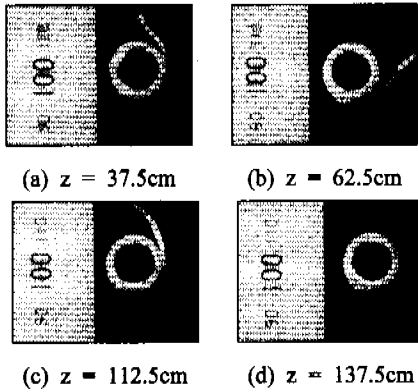


Fig. 12 Photograph of scale growth for different axial locations, after 310min. ($p=0.16\text{atm}$, $G=74.3\text{kg/m}^2\text{s}$, $q''=44.1\text{kW/m}^2$)

열전달계수 및 fouling 저항계수의 시간 및 위치에 따른 변화 그리고 실험이 끝난 후 scale의 성장결과를 촬영한 결과이다. Fig. 10은 Fig. 7과 비슷한 경향을 보여주고 있지만, 0.27기압에서 실험한 경우에 비해서 z의 값이 작은 위치(z=75cm)에서 포화 핵비동이 일어나기 시작하며 그 위치에서 열전달계수는 상당히 증가함을 알 수 있다. z=40cm 이후부터도 열전달계수가 1기압인 경우보다 현저하게 큰 것을 알 수 있는데, 이는 과냉 핵비동의 영향이 압력이 낮을수록 보다 낮은 높이에서 발생할 수 있기 때문으로 분석된다. Fig. 11은 시간에 따라 변화하는 fouling 저항계수를 네가지 다른 수직관 위치 높이에서 보여주고 있다. 대기압과 0.27기압에서의 실험 결과와 같이 네가지 다른 수직관 위치에서 시간에 따라

fouling 저항계수가 증가함을 알 수 있으며, z=37.5cm보다는 z=62.5cm에서의 fouling 저항계수가 더 크지만, 그보다 높은 수직관 위치에서는 오히려 fouling 저항계수가 작아짐을 알 수 있다. 이는 유체의 평균 온도가 포화 온도에 도달하는 위치가 수직관 높이 75cm 지점 근처이며 그 지점 이상에서는 유체의 온도가 포화 온도로 유지되며 CaSO₄의 역용해도 현상으로 인한 scale 석출이 증가할 기대할 수 없으며 오히려 기포의 발생이 scale 부착을 방해하여 scale 성장이 둔화될 것으로 예측된다. 실험이 끝난 후(scaling 시작 310분 후) 수직 증발판을 절단하여 scale 성장을 촬영한 Fig. 12에서 볼 수 있듯이 0.16기압에서는 높이에 따라 scale의 두께 변화가 적음을 파악할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 증발판에 부착하는 해수의 scale 성분 중 CaSO₄의 scaling 현상을 알아보기 위하여 수직 증발판에서 CaSO₄ 포화수용액의 scale 성장현상과 그에 따른 열전달 성능의 변화를 연구하였다. 시간이 지남에 따라 CaSO₄ 포화 수용액의 역용해도 성질로 성장하는 scaling 현상으로 총합 열전달계수가 감소함을 파악할 수 있었으며 세가지 다른 압력 조건에서 각기 다른 scale 성장과 열전달 현상을 파악할 수 있었다. 유체의 평균 온도가 포화 온도에 도달하기 전까지는 수직 증발판의 높이에 따라서 수용액의 온도가 증가하므로 scale의 석출이 증가하고 따라서 scale의 두께가 두꺼워지면서 fouling 저항계수가 큰값을 가지게 되나 유체의 평균 온도가 포화 온도에 도달한 이후에는 오히려 scale의 두께가 감소하거나 거의 변화가 없으며 fouling 저항계수는 오히려 감소함을 알 수 있었다. 이러한 현상을 실험이 끝난 후 수직 증발판을 절단하여 수직관의 높이에 따라 다르게 성장하는 scale의 두께를 파악함으로써 확인할 수 있었으며, 0.16기압에서는 scale 두께의 높이에 따른 변화가 1기압 조건에서보다 적음을 알 수 있었다. 또한 Fig. 6, 9, 12에서 볼 수 있듯이 압력이 낮아지면(포화 온도가 낮아지면) scale 형성이 줄어들음을 알 수 있으나, 0.27기압에서의 R_f보다 0.16기압일 때의 R_f가 높은 것으로 측정되었는데, 이는 식 (3)에서 정의된 fouling이 없을

때의 열전달계수, h_c 에 따라 달라지기 때문이다.

후 기

본 연구는 한국기계연구원의 지원으로 이루어졌으며 이에 감사드립니다. 교육부(MIE96-A-06)의 부분적인 지원에도 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Ritter, R. B., 1983, "Crystalline Fouling Studies," *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 105, pp. 374~378.
- (2) Fujioka, Y., Soda, M., Zama, M. and Shimizu, I., 1989, "Prevention of the Scale Trouble of Multi-Effects Stacked Desalination Plant," *Desalination*, Vol. 73, pp. 371~383.
- (3) Sheikholeslami, R. and Watkinson, A. P., 1986, "Scaling of Plain and Externally Finned Heat Exchanger Tubes," *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 108, pp. 147~152.
- (4) Hasson, D. and Perl, I., 1981, "Scale Formation in a Laminar Falling-Film System," *Desalination*, Vol. 37, pp. 279~292.
- (5) Chan, S. H., Chen, Z. J. and He, P., 1993, "Effects of Sodium and Potassium Chlorides on Silica Fouling," *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 115, pp. 82~90.
- (6) Watkinson, A. P. and Martinez, O., 1975, "Scaling of Heat Exchanger Tubes by Calcium Carbonate," *ASME J. Heat Transfer*, November, pp. 504~508.
- (7) 신지영, 1996, *순수 및 혼합 냉매의 수평원관 내 유동중발 열전달*, 공학박사논문, 서울대학교.