열교환기 모델내 하천수와 시수의 Fouling 특성 비교

성순경* 서상호† 노형운**.

A Comparative Study on the Fouling Characteristics of River and Tap Water in a Heat Exchanging Model

Sun-Kyung Sung*, Sang-Ho Suh†, Hyung-Woon Roh**

Key Words: Fouling(파울링), Heat Exchanging System(열교환 시스템), 파울링현상의 가시화 (Visualization of fouling phenomena), Fouling Resistance(파울링 저항), 총열전달계수 (Overall Heat Transfer Coefficient)

Abstract

Scale is formed when hard water is heated or cooled in heat transfer equipments such as heat exchangers, condensers, evaporators, cooling towers, boilers, and pipe walls. When scale deposits in a heat exchanging surface, it is traditionally called fouling. The objective of the present study was to compare the fouling characteristics of river and tap water in a heat exchanging model. From the SEM analyses for tap water the calcite form of $CaCO_3$ was formed. For river water, however, the aragonite $CaCO_3$ was formed. In order to investigate velocity effects on the fouling characteristics in the heat exchanging model, the inlet velocity was varied with 0.5, 1.0 and 1.5 m/s, respectively. The fouling characteristics of river water were quite different from those of tap water. For the case of the 'velocity of 1.5m/s', the overall heat transfer coefficient was reduced up to 26% than that of the 'velocity of 0.5m/s'

1. 서 론

산업현장이나 가정에서 이용하는 전기적에너지나 열에너지는 주로 화석연료로부터 만들어진다. 이 화석연료는 연소과정을 거치면서 우리가 필요한 에너지를 만들어내고 그 과정 중에 발생된 배기가스는 대기 중으로 방출된다. 배기가스는 화석연료의 구성성분에 따라 다소 차이는 있지만 주로 이산화탄소와 아황산가스로 이루어진다. 화석연료의 사용 폭증에 따라 대기 중으로 방출되는 이산화탄소의 양도 폭증하게 되었다. 이 이산화탄소는 대기의 안정상태를 변화시켜 기후의 이상변화를 가져오고 있다. 여러 변화 중 갈색 구름층을 형성하여 일조량, 대지 및 해수면의 온도를 변화시키고 구름층 윗부분의 온도를 높여 비? 구름의 성격을 변화시키고 있다.

기후변화 등 심각한 환경변화에 대응하기 위해서는 난방이나, 공장에서 사용되는 1차 에너지인 화석에너지의 사용을 최대한 줄이면서 환경친화적인 에너지이용기술을 발전시켜야 한다.

우리나라에는 무궁무진한 미활용 에너지가 존재한다. 즉, 생활폐기물 소각열, 하수처리수열, 해수, 하천수 등 열에너지 부존량은 연간 236,400 Tcal이므로 이와 같은 미활용 에너지를 효과적으로 이용할 수 있는 시스템을 구축하면 열공급 부문의 에너지 이용 효율의 극대화에 크게 기여할 것으로 기대된다[1].

미활용 에너지를 산업공정이나 건물의 냉난방

† 숭실대학교 기계공학과
E-mail : suhsangho@sfel.ssu.ac.kr
TEL : (02)820-0658 FAX : (02)821-6758
* 경원전문대학 건축설비과
** 시립인천전문대학교 기계과

과정에 활용하기 위해서는 열을 흡수 또는 방출하는 열교환기의 이용이 필수적이다. 그러나 열교환기의 열전달 표면에는 열전달 과정 중에 열의 전달을 방해하는 침전물의 층이 형성되는데 이러한 물리화학적인 현상을 파울링이라고 한다. 열전달 표면에서 2mm정도의 스케일이 형성되면 총열전달율이 47%정도 저하한다. 일반적으로 열교환기를 제작할 때 필요한 규격보다 70 80% 정도 더 크게 만드는 데, 이 가운데 30 50%는 파울링으로 인한 성능저하를 미리 고려하기 위한 것이다. 또한, 열전달 표면에 형성된 파울링은 유동통로의 단면적을 감소시켜 유량을 감소시키고 압력손실을 증가시켜 펌프의 소비동력을 증가시킨다.(2)

수많은 과학자들이 열교환기의 구조개선을 통하여 효율 향상에 커다란 기여를 하여 왔으며, 파울링이 열교환기의 성능을 저감시킨다는 것도 많은 연구를 통하여 밝혀졌으나 아직 이를 완전히 제어하지 못하고 있다. 국내의 경우 1990년대 이후 이와 관련된 연구의 필요성이 제기되고 있으나 연구활동은 비교적 기초적인 이론 연구와 열교환기의 파울링 제거 설계에 기계적인 방법을 적용하여 설계하는 기술 수준에 머무르고 있다.

본 연구에서는 냉각수를 이용하는 열교환 시스템에서 미활용 에너지의 한가지인 하천수를 이용하는 경우의 파울링 특성을 실험으로 구하고, 이 결과를 시수에 대한 파울링 특성과 비교하고자 하였다.

2. 파울링의 정의

2.1 파울링이란?

파울링은 결정(cristallization), 입자화(particulate), 화학반응, 부식(corrosion), 생물학적(biological) 및 응고(freezing) 파울링 등으로 분류된다. 파울링은 경수가 열교환장치의 가열면에서 가열될 때 발생한다. 이는 열교환기내로 유입되는 저온의 유체는 열교환 표면을 지나며 온도가 상승하게 되고 이러한 온도변화는 유체 속에 녹아 있는 여러 물질의 용해도(solubility)를 Fig. 1의 온도 T_1인 A에서 T_2인 C로 변화시킨다. 이때 C상태는 과포화상태이므로 불안정한 상태가 되어 안정된 상태인 D상태로 변화하려 하며, 유체와 접하는 열교환기 표면에 유체내의 불용성 이온의 침전물이 형성된

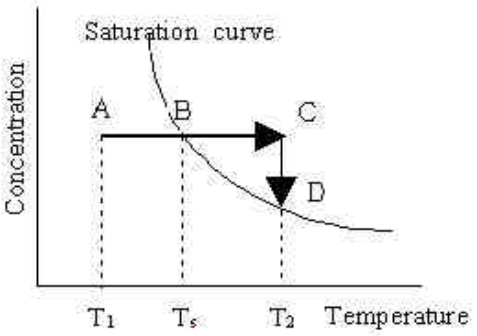


Fig. 1 A heating process of an inverse solubility salt solution

다. 이 침전물이 스케일의 형태로 부착하여 파울링을 발생시킨다.(3-5) 이 스케일은 사용하고 있는 물의 성분에 따라 다르게 된다. 산업 현장의 열교환기에서 자주 발생하는 파울링의 성분은 탄산칼슘($CaCO_3$), 황산바륨($BaSO_4$), 황산칼슘($CaSO_4$), 규산염(Silica), 철(Fe) 등이다. 이 중 대표적인 것이 탄산칼슘($CaCO_3$)이며, 자연계에서는 일반적으로 두 가지의 구조를 가진 탄산칼슘이 발견되며 이는 calcite $CaCO_3$와 aragonite $CaCO_3$이다.

2.2 파울링 저항식

파울링 저항은 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$R_f = \frac{1}{U_f} - \frac{1}{U_c} \quad (1)$$

식 (1)에서 U_f는 파울링이 생성된 열교환기의 총열전달계수이고, U_c는 파울링이 생성되지 않은 경우의 총열전달계수이다. 총열전달계수는 다음 식으로 계산된다.

$$U = \frac{Q}{A \Delta T_{LMTD}} \quad (2)$$

식 (2)에서 A는 전열면적이고, ΔT_{LMTD}는 대수평균온도차로 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{(T_{h,i} - T_{c,o}) - (T_{h,o} - T_{c,i})}{\ln\left[\frac{T_{h,i} - T_{c,o}}{T_{h,o} - T_{c,i}}\right]} \quad (3)$$

열전달량 Q는 다음 식으로 구한다.

$$Q=[\dot{m}C_p(T_i-T_o)]_h=[\dot{m}C_p(T_o-T_i)]_c \quad (4)$$

식 (4)의 Q와 $\triangle T_{LMTD}$는 열교환기 실험장치의 test section에서 냉수와 온수의 유입유출 온도로부터 구할 수 있다. 이 온도는 열전대로부터 입력되는 데이터를 A/D converter를 이용하여 측정된다. 측정된 실시간 자료는 Visual Basic과 Excel로 개발된 프로그램으로부터 Q와 $\triangle T_{LMTD}$을 각각 구하였으며 식 (2)를 이용하여 총열전달계수를 구하였으며, 총열전달계수로부터 식 (1)과 같은 파울링 저항을 구하였다.

3. 파울링 생성실험

냉각수를 이용하는 열교환기 시스템의 파울링 특성을 실험하기 위하여 Fig. 2와 Fig. 3과 같이 실험장치를 구성하였다.

Fig. 2는 본 실험을 위하여 제작된 실험장치를 사진으로 찍은 것이고, Fig. 3은 실험장치의 계통도를 나타낸 것이다. 본 실험장치의 구성은 크게 경수(hard water)를 만드는 부분과 파울링을 생성시키는 부분으로 나눌 수 있다. 첫 번째로 경수를 만드는 부분은 크게 냉각탑, 히터, 온수순환펌프, 냉수순환펌프, conductivity meter, 2중관식 열교환기, 저수탱크, 유량계와 밸브 등으로 구성되어 있다.

하천이나 시수전에서 취수해 온 물은 전기전도도와 경도가 낮기 때문에 직접 파울링 생성 실험을 하기 위해서는 많은 시간이 소요된다. 따라서,

Fig. 2 Photograph of a lab-scale fouling experimental apparatus

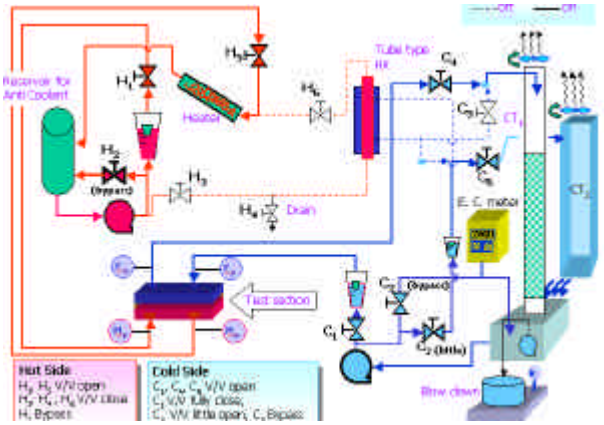


Fig. 3 Schematic diagram of the lab-scale fouling experimental apparatus

냉각탑을 이용하여 물을 증발시키고, 증발된 만큼 물을 보충하는 순환의 과정을 거쳐 물의 경도를 증가시켰다. 파울링을 생성시키는 부분은 Fig. 4와 같이 파울링의 생성과정을 관찰할 수 있도록 투명한 아크릴판으로 덮여져 있으며, 냉수와 온수가 열교환을 일으키는 유로 사이의 전열면은 동판(copper plate)으로 구성하였다.

또한, 파울링의 형성과정을 실시간으로 관찰하고 가시화하기 위하여 측정창에는 광학현미경(×40)과 CCD camera(SONY사)를 장착하였다. 좋은 영상을 얻기 위하여 조명장치(50W)를 설치하였다. 그리고 냉수와 온수의 유로 입구와 출구의 온도를 측정하여 총열전달계수와 파울링계수를 구하기 위하여 thermo-couple을 4개 설치하여 A/D converter를 걸쳐 PC에서 Visual Basic과 엑셀로 작성된 프로그램으로 실시간 자료를 처리하도록 하였다. 이때의 설정파라미터 값은 Table 1과 같이 냉수쪽의 온도를 20℃로 설정하였다. 20℃이상으로 온도가 상승하면 냉각휀과 냉각장치를 가동하도록 하여 실험의 신뢰성을 확보하였다. 또한 고온수쪽의 온도는 95℃로 설정하였으며 ±0.

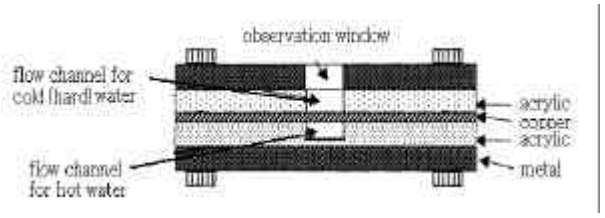


Fig. 4 Cutaway view of the test section

Table 1 Setting values of the fouling parameters

	values
Conductivity	2000 μS/cm
Temperature	Cold side : 20℃ Hot side : 95℃
velocity	Cold side : 0.5,1.0,1.5m/s Hot side : 3m/s

5℃범위내에서 히터가 작동되도록 하였다. 전기전도도의 값은 실제 냉각탑내의 조건을 만족하도록 2000±30 μS/cm가 되게 설정하였다.

4. 결과 및 토의

4.1 파울링 구조 분석

하천수와 시수를 사용할 때의 열교환기에 발생되는 파울링의 구조를 살펴보기 위하여 약 300시간 동안 파울링 생성실험을 하였다. 하천수와 시수의 파울링 생성과정을 가시화하기 위해 Fig. 5와 같이 CCD 카메라로 매 시간마다 영상을 측정하였고, 실험을 종료한 후 SEM으로 분석을 통하여 Fig. 6과 같은 파울링의 3차원 구조에 대한 결과를 얻었다.

먼저 하천수를 사용할 때는 Fig. 5(a)에서 보는 바와 같이 파울링이 전체적으로 응집된 먼지와 같은 결정체로 형성되고 있음을 알 수 있다. 이 응집먼지와 같은 결정체를 SEM으로 분석하여 본 결과 Fig. 6(a)와 같이 복층(multiple layers)으로 불규칙하게 생성된 구조임을 확인하였다.

반면 시수의 경우는 CCD 카메라로 측정된 결과를 보아도 하천수와 달리 파울링이 구슬모양으로 생성되었음을 알 수 있었고 SEM 분석결과 Fig. 6(b)와 같이 원형의 조밀한 입자가 전체적으로 얇게 깔려 있음을 알 수 있었다.

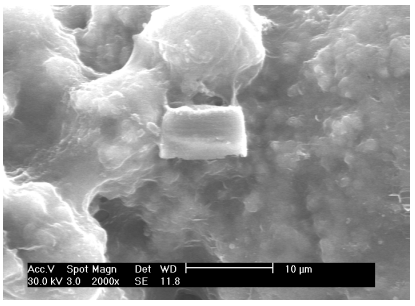
SEM 구조분석을 통한 Fig. 6의 결과는 시수와 하천수의 결정모양이 서로 다름을 알 수 있다. 하천수의 경우(Fig. 6(a))에 결정체 입자들이 엉키어 복층을 형성하면서 커다란 덩어리로 나타난 것은 Aragonite $CaCO_3$이 생성되었음을 X-ray diffraction의 비교자료로부터 확인하였고 시수의 경우에는 Fig. 6(b)의 규칙적인 구슬모양을 한 Calcite $CaCO_3$ 입자들의형태로 나타났다.

Aragonite $CaCO_3$는 입자파울링이 생길 때 나타나는 대표적인 결정체이고 그와 반대로 시수의 경우 얻어진 각개 결정체의 뚜렷한 존재는 결정파울링이 생길 때 나타나는 현상의 대표적인 예

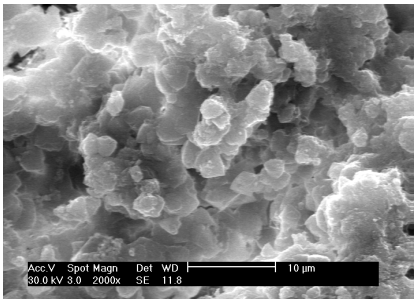
(a) river water

(b) tap water

Fig. 5 Visualization of the fouling formation

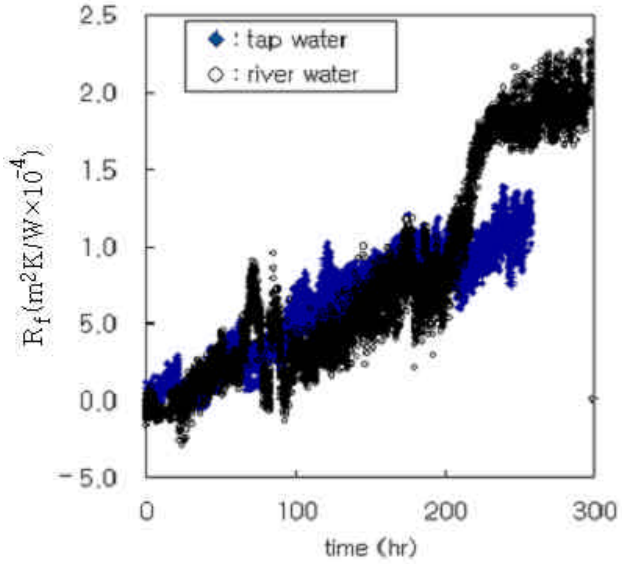


(a) river water

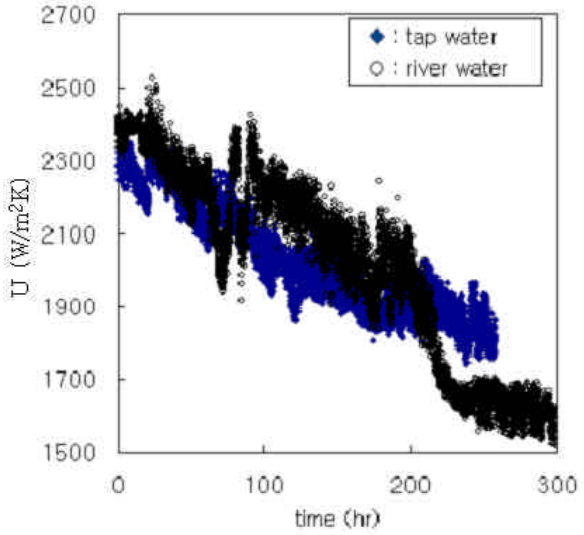


(b) tap water

Fig. 6 SEM images for the fouling structure



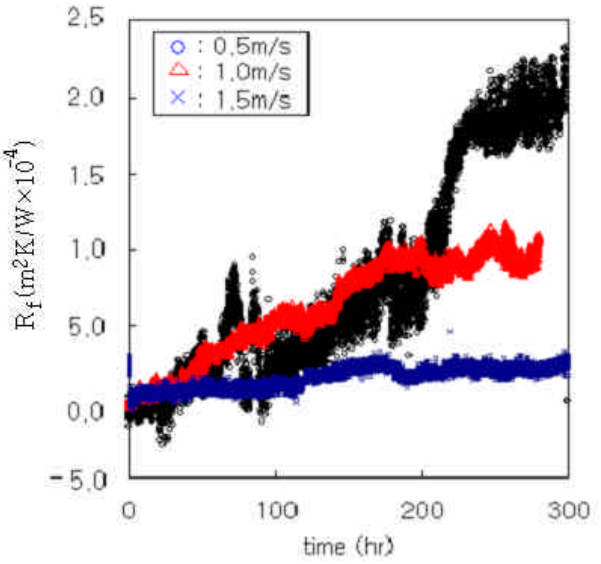
(a) Fouling resistance



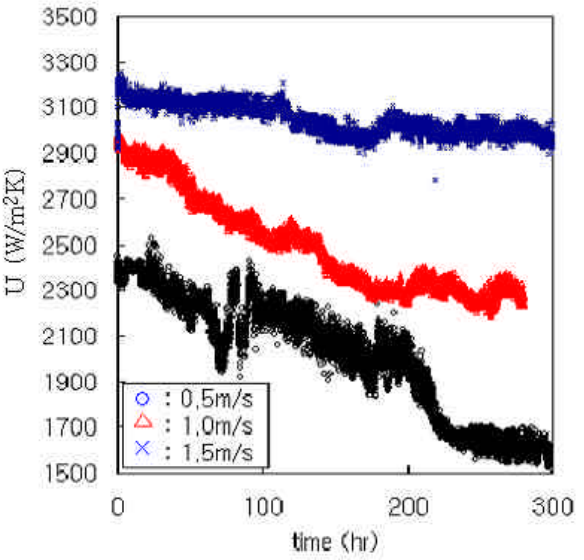
(b) Overall heat transfer coefficient

Fig. 7 Comparison of the fouling characteristics for river and tap water

로서 문헌상의 결과와 같다[3]. 하천수와 시수의 파울링 구조가 다른 이유는 하천수의 경우 파울링 생성이 부유물질인 점토, 모래, 진흙, 녹 등 때문에 시수보다 늦게 진행되다가 Aragonite $CaCO_3$의 scale 이 형성될 수 있는 결정체들이 열교환기에 서서히 부착되는 것을 의미한다. 이런 Aragonite $CaCO_3$는 생성되기 어렵지만 일단 생성되기 시작하면 시수에서 발생된 Calcite $CaCO_3$ 보다 딱딱한 구조를 가지고 있고 제거하기 어려운 특징을 가지고 있다.



(a) Fouling resistance



(b) Overall heat transfer coefficient

Fig. 8 Variations of the fouling resistance and overall heat transfer coefficient for different flow velocities(river water)

4.2 파울링 특성

하천수와 시수의 파울링 생성으로 인한 열전달 과정의 영향을 살펴보기 위하여 Fig. 7과 같이 파울링 생성실험을 수행하여 파울링 저항과 총열전달계수를 구하였다. Fig. 7은 열교환기내의 유속이 0.5m/s일 때 하천수와 시수의 파울링 특성을 비교한 것이다.

Fig. 7에서 보듯이 하천수의 경우에는 induction period에서는 파울링 저항 곡선은 큰 변화가 없고 일정 기간동안 scale 부착도 없다. 파울링 성장(fouling growth)기간 동안에는 입자파울링이 형성된 후의 전형적인 파울링특성을 나타내고 있다. 입자파울링에 의해 생긴 부착물은 부드러워 쉽게 제거될 수 있는 성질의 scale로서 대개 흐르는 열교환기내의 유속이 1m/s 이상이 되면 전단응력에 의해 쉽게 제거된다. Fig. 7에서와 같이 하천수를 사용해 얻어진 파울링 저항 곡선에서 입자파울링의 생성과 스케일 제거가 주기적으로 나타나고 있음을 볼 수 있고, 시간의 경과에 따라 입자파울링이 결정파울링으로 바뀌기 시작한다. 또한, 파울링의 진행속도가 빠르게 되어 파울링 저항계수가 급격하게 상승하는 것을 알 수 있다.

시수의 경우, 이와 반대로 시간이 계속 경과되면 물 속에 있는 이온들이 석출하여 생긴 결정파울링이 생성되어, 파울링 저항계수가 완만하게 증가한다.

또한, 파울링의 생성인자인 열교환기내 유속변화에 따른 파울링 특성변화를 살펴보기 위하여 하천수인 경우에 있어서 Fig. 8과 같이 파울링특성을 구하여 살펴보았다. Fig. 8은 냉수측 유속이 0.5m/s, 1.0m/s와 1.5m/s인 경우 파울링 저항계수와 총열전달계수를 나타낸 것이다. Fig. 8(a)의 결과에서 보듯이 3가지 속도 모두 시간이 경과하면서 파울링 저항이 증가한다. 특히 유속이 0.5m/s인 경우는 초기에는 1.0m/s의 경우와 비슷하게 나타나지만, 200시간이 지난 후 유속이 1.0과 1.5m/s보다도 파울링 저항이 급격히 상승하고 있음을 알 수 있다. 이는 파울링 생성구조에서도 검토하였듯이 결정 파울링이 생성되는 구간에서 결정 파울링이 생기는 지점이 빨리 도래했음을 의미한다. 반면에 유속이 1.5m/s인 경우는 초기부터 파울링 저항곡선의 기울기가 완만하게 진행되고 200시간이 지나도 그 기울기가 작음을 알 수 있다.

위의 결과로부터 열교환기내의 파울링 생성을 줄이기 위해서는 유속을 1.5m/s 보다 크게 해주어야 한다는 것을 알 수 있다. 그러나 설계속도를 1.5m/s이상으로 해주어도 매니폴더나 연결부와 같은 곳에서 국부적으로 유속이 0.5m/s와 같은 저속영역이 발생하면 물속에 포함되어 있는 여러 가지 부유물 등으로 인한 결정파울링으로 인하여 파울링이 심하게 발생할 것으로 보인다.

Fig. 8(b)과 같이 유속이 감소함에 따라 총열전달계수는 각각 7.0%, 23.0%, 33.5% 만큼 감소됨을 알 수 있다. 이는 유속이 0.5m/s인 경우가 유속 1.5m/s인 경우보다 약 26%의 열전달 손실을 가져온다는 것을 의미한다.

5. 결론

1. SEM 구조분석을 통해 하천수의 경우에는 결정체 입자들이 엉키어 복층을 형성하면서 커다란 덩어리로 나타나는 Aragonite $CaCO_3$이 생성되었고, 시수의 경우에는 규칙적인 구슬모양을 한 Calcite $CaCO_3$ 입자들의 형태로 나타나므로 시수와 하천수의 파울링 결정모양이 서로 다름을 확인하였다.

2. 하천수의 경우 초기에는 시수와 비교하여 파울링 저항계수가 차이가 없으나 어느 시간이 경과하면 시수보다 급격하게 증가 되는 것을 알 수 있다. 이는 하천수의 경우 일단 파울링이 형성되기 시작하면 시수보다 훨씬 더 많이 발생되는 것을 의미한다.

3. 하천수의 경우 속도가 1.5m/s일 때의 파울링 저항계수가 0.5m/s일 때 보다 약 1/3 정도로 낮게 나타났고, 유속이 빠를수록 파울링의 생성이 더디게 일어나는 것을 알 수 있으며 약 26%의 열전달 손실을 피할 수 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

(1) Pilavachi, P. A. and Isdalem J. D., 1992, Fouling Mechanisms, Theoretical and Practical Aspects, European Community R&D Strategy in the field of Head Exchanger Foluing, pp. 13-20.

(2) Bott T. R., 1995, The Fouling of Heat Exchangers, Elsevier Science, New York.

(3) Kim W. T. and Cho Y. I., 2000, "Experimental Study of the Crystal Growth Behavior of CaCO3 Fouling Using a Microscope", Experimental Heat Transfer, Vol. 13, pp. 153-161.

(4) Moody D. L., 1966, Method and apparatus for treatment of flowing liquids to control deposition of soild matter thereform, U. S. Patent number 3,228,878, Jan. 11.

(5) Incropera F. P. and Dewitt D. P., Fundamentals of Heat Transfer, John Wiley & Sons, New York.