

하천수를 이용하는 열교환 시스템 내 파울링 형성에 관한 연구

성순경[†] · 서상호^{*} · 노형운^{**}

(2003년 11월 26일 접수, 2004년 4월 17일 심사완료)

A Study on the Formation of Fouling in a Heat Exchanging System for River Water

Sun-Kyung Sung, Sang-Ho Suh and Hyung-Woon Roh

Key Words: Fouling(파울링), Heat Exchanging System(열교환 시스템), River Water(하천수)
Fouling Resistance(파울링 저항), 열관류율(Overall Heat Transfer Coefficient)

Abstract

When the water flowing inside of the heat transfer equipments such as heat exchangers, condensers, and boilers is heated, calcium, magnesium sulfate, and other minerals in the water are deposited and built up for scales on the heat transfer surfaces. When those scales accumulate on the heat transfer surfaces, their performance of the heat transfer become progressively reduced due to the increase of the heat transfer resistance. The mechanism of this reduced heat transfer is called fouling. This study investigated the formation of the fouling in a heat exchanger with river and tap water flowed inside of it as a coolant. In order to visualize the formation of the fouling and to measure the fouling coefficients, a lab-scale heat exchanging system was used. Based on the experimental results, it was found that the formation of fouling for river water was quite different with the formation for tap water.

기호설명

R_f : 파울링 저항계수 $m^2 \cdot K/W$
 U_c : 초기 열관류율 $W/m^2 \cdot K$
 U_f : 파울링 생성 열관류율 $W/m^2 \cdot K$
 A : 전열면적 m^2
 ΔT_{LMTD} : 대수평균온도차 $^{\circ}K$
 $T_{h,i}$: 온수 입구온도 $^{\circ}K$
 $T_{h,o}$: 온수 출구온도 $^{\circ}K$
 $T_{c,i}$: 냉수 입구온도 $^{\circ}K$
 $T_{c,o}$: 냉수 출구온도 $^{\circ}K$

\dot{m} : 질량유량 kg/s
 C_p : 비열 $J/kg \cdot ^{\circ}K$
 \dot{Q} : 열전달량 W

1. 서론

기후변화 등 심각한 환경변화에 대응하기 위해서는 빌딩의 냉난방이나, 산업현장에서 사용되는 화석에너지의 사용을 최대한 줄이면서 환경친화적인 에너지 이용 기술을 발전시켜야 한다. 우리나라에는 여러 부분에 미활용 에너지가 존재한다. 즉 생활폐기물 소각열, 하수처리수열, 해수, 하천수 등 열에너지 부존량은 연간 236,400Tcal이므로 이와 같은 미활용 에너지를 효과적으로 이용할 수 있는 시스템을 구축하면 열공급 분야의 에너지 절약에 크게 기여할 것으로 기대된다.⁽¹⁾

미활용 에너지를 산업공정이나 건물의 냉난방에 활용하기 위해서는 열을 흡수 또는 방출하는

[†] 책임저자, 회원, 숭실대학교 기계공학과
E-mail : sksung@kwc.ac.kr
TEL : (031)750-8644 FAX : (031)750-8688
^{*} 회원, 숭실대학교 기계공학과
^{**} 회원, 숭실대학교 기계공학과

열교환기의 이용이 필수적이다. 열교환기를 장시간 사용할 경우에는 작동유체가 순환함에 따라 열전달표면에 열전달을 방해하는 침전물의 층이 형성되는데 이러한 물리화학적인 현상을 파울링이라고 한다. 열전달 표면에 탄산칼슘이 침착되어 파울링이 생성되면 파울링이 없는 경우에 비하여 열전달 성능이 크게 감소된다. 또한, 열전달 표면에 형성된 파울링은 유체가 흐르는 단면적을 감소시켜 유량을 감소시키고 압력손실을 증가시켜 펌프의 동력소비율을 증가시키게 한다.⁽²⁾

열교환기의 성능을 향상시키기 위하여는 열교환기의 파울링을 저감시켜야 하는데, 이에 관한 많은 연구가 진행되고 있으나 아직 이를 완전히 해결하지 못하고 있다.

국내의 경우 1990년대 이후 이와 관련된 연구의 필요성이 제기되어 파울링 제거 방법에 관한 몇 종류의 논문과 아주 기초적인 파울링 생성에 관한 연구가 있었으나 파울링 생성에 관한 구체적인 연구활동은 비교적 미진한 형편이다.⁽³⁾

본 연구에서는 하천수의 경우 파울링 발생과 열전달에 미치는 영향이 일반적으로 사용되고 있는 시수의 경우와 어떻게 다른가를 파악함으로써, 앞으로 하천수를 냉각용 용수로 이용하고자 할 때 파울링 저감대책에 대한 기초 자료로 활용하고자 한다. 이 연구를 위하여 실험실용 소형 열교환 시스템을 제작하고 하천수와 시수에 대한 파울링 형성에 관한 실험을 수행하였다.

2. 파울링

2.1 파울링

파울링은 열교환기의 열전달표면에 어떤 물질이 형성되어 열전달을 방해하는 현상을 말하며, 침전(precipitation), 입자(particulate), 화학반응, 부식(corrosion), 생물학적(biological), 응고(freezing) 파울링 등으로 분류된다. 일반적으로 산업현장에서 사용하는 열교환기에서 문제가 되는 주된 파울링은 침전에 의한 경우가 많다. 열교환기로 유입되는 유체는 온도가 변화되고, Fig. 1의 포화곡선과 같이 온도변화에 따라 유체의 용해도는 변화한다. 이때 유체의 온도가 상승하면 포화용해도는 내려가게 되므로 과포화 상태만큼 석출하게 되어 전열면에 침전 파울링이 형성된다. 산업체의 열교환기에서 침전 파울링을 유발하는 유체 내의

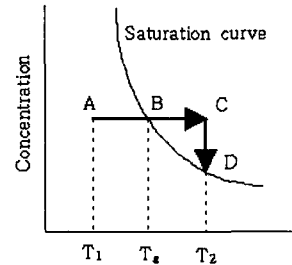


Fig. 1 A heating process of a solubility salt solution

성분은 탄산칼슘(CaCO₃), 황산바륨(BaSO₄), 황산칼슘(CaSO₄), 규산염(Silica), 철(Fe) 등이다. 이 중 대표적인 것이 탄산칼슘이며, 우리나라의 하천수는 칼슘이온을 포함하고 있으므로 열교환기의 냉각수로 사용할 때 열전달 표면에 탄산칼슘 침전에 의한 파울링이 발생하게 된다.⁽⁴⁻⁵⁾

2.2 파울링 저항

파울링 저항 R_f 는 다음 식으로 계산할 수 있다.

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

여기서 U_f 는 파울링이 생성된 열교환기의 열관류율이고, U_c 는 파울링이 생성되지 않은 경우의 열관류율이다. 열관류율은 다음 식으로 계산된다.

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

여기서 A 는 전열면적이고, ΔT_{LMTD} 는 대수평균 온도차로 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 \dot{Q} 는 다음 식으로 구한다.

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

식 (4)의 \dot{Q} 와 ΔT_{LMTD} 는 열교환기 실험장치의 시험편의 입구와 출구에서 냉수와 온수의 온도와

유량을 측정하여 구할 수 있다.

열전대로부터 측정된 자료는 A/D 변환기를 통하여 전압값으로 입력된다. 입력된 실시간 자료는 Visual Basic과 Excel로 구성된 프로그램으로부터 \dot{Q} 와 ΔT_{LMTD} 를 각각 구하고, 식 (2)와 식 (1)을 이용하여 열관류율과 파울링 저항을 구할 수 있다.

3. 실험

3.1 수질분석

열전달 매체로서 지금까지 가장 많이 사용된 것은 물이다. 물은 열역학적 성질이 매우 우수할 뿐만 아니라 많은 양을 공급할 수 있다. 그러나 열전달 매체로 물을 사용할 경우 고려해야 할 문제점은 칼슘, 마그네슘과 같은 용해된 미네랄 이온이 열전달 표면에 침전하여 스케일을 발생시키는 점이다. 물의 경도는 칼슘과 마그네슘 이온의 양에 따라 결정된다. 물을 작동유체로 사용하는 열교환 장치에서 전열면에 발생하는 스케일은 물성분과 밀접한 관계가 있다. 본 연구에서는 Fig. 2와 같은 실험기재와 시약을 이용하여 하천수와 시수돗물의 성분을 분석하였다. 실험에 사용된 하천수는 수량이 많고 대도시 내를 흐르는 한강을 대상으로 하여 당인리 발전소 건너편인 여의도 선착장 부근에서 취수하였다. 또한 취수 장소에 따른 수질의 변화 상태를 비교해 보고자 팔당, 잠실, 김포의 3곳을 추가하였으며, 일반적으로 밀폐시스템에서 냉각용수로 많이 사용하는 수돗물을 하천수와 비교하기 위하여 같이 분석하였다. 또한 취수시기에 따른 수질변화를 파악하기 위하여 같시기인 1월부터 5월



Fig. 2 Experimental equipments and reagents for water analysis

까지 변화상태를 조사하였다.

수질분석은 파울링을 일으키는 성분과 관련있는 항목을 대상으로 하였다. 칼슘이온과 같은 물질의 양과 관련있는 전기전도도, pH, 총경도, 칼슘경도, 마그네슘경도, 알카리도, 염화물 등을 측정하였다. 이 측정을 위하여 전기전도도계, pH미터, 표준시약을 이용하였다.

3.2 실험장치 및 방법

하천수 대응 열교환기 시스템의 파울링 생성과정을 실험하기 위하여 Fig. 3과 Fig. 4와 같이 실험장치를 구성하였다. Fig. 3은 본 실험을 위하여 제작된 실험장치를 사진으로 찍은 것이고, Fig. 4는 Fig. 3의 실험장치의 계통도를 나타낸 것이다. 본 실험장치의 구성은 크게 경수를 만드는 부분과 파울링을 생성시키는 부분으로 나눌 수 있다.

우선 경수를 만드는 부분은 크게 냉각탑, 전기가 열장치, 온수순환펌프, 냉수순환펌프, 전기전도

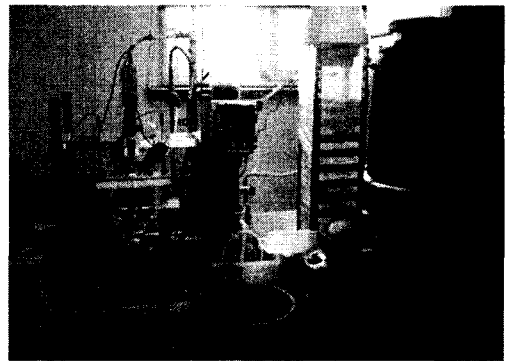


Fig. 3 Photograph of a lab-scale fouling experimental apparatus

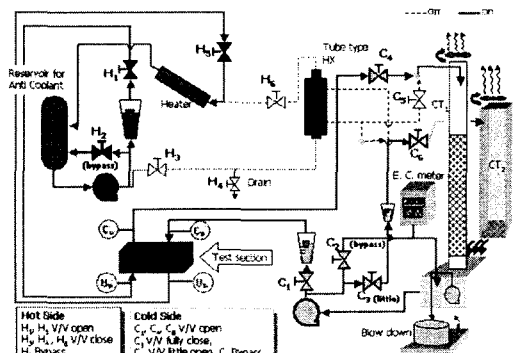


Fig. 4 Schematic diagram of lab-scale fouling experimental apparatus

도계, 열교환기, 탱크, 유량계와 밸브 등으로 구성되어 있으며, 순환펌프에 의하여 전기가열장치를 통과한 물을 냉각탑에서 증발시켜 농축하고, 증발된 만큼 물을 보충하여 물의 경도를 증가시키는 과정이다. 이는 하천에서 취수해 온 물은 전기전도도와 경도가 낮기 때문에 직접 파울링 실험을 하기 위하여 많은 시간이 소요되기 때문이다.

파울링을 생성시키는 부분은 경수를 만드는 부분의 구성요소를 이용하여 냉수와 온수를 공급하도록 하고 Fig. 5와 같은 열교환기 시험편으로 구성한다. 열교환기 시험편은 파울링의 생성과정을 관찰할 수 있도록 냉수가 흐르는 부분은 투명한 아크릴 판으로 덮여져 있으며, 냉수와 온수가 지나가는 유로 사이는 동판으로 구성되어 있다.

파울링 생성실험을 위한 설정 파라미터의 하나인 온도 값은 Table 2와 같이 냉수 쪽을 20℃로 설정하였으며 20±0.3℃ 범위내를 유지하기 위하여 온도가 상승하면 냉각팬이 가동되게 하여 실험의 신뢰성을 향상시켰다. 한편 고온수쪽의 온도는 전기가열기를 이용하여 95±0.5℃ 범위내에서 동작하도록 하였다. 설정 전기전도도의 값은 일반적으로 많이 사용하는 냉각탑 내의 수질조건을 만족하도록 2000±30 μS/cm가 되게 설정하였다. 열교환기의 전열면을 통과하는 냉수의 유속은 파울링의 생성을 촉진하기 위하여 0.5m/s를 기준으로 하였으며, 온수측은 3m/s로 하였다.

또한 파울링의 진행사항을 실시간으로 관찰하고 가시화하기 위하여 측정창에는 광학현미경(×40)과 CCD 카메라(SONY사)를 장착하였다. 좋은 영상을 얻기 위하여 조명장치(50W)를 설치하였다. 그리고 냉수와 온수의 유로 입구와 출구의 온도를 측정하기 위하여 열전대를 4개 설치하여 A/D 변환기를 거쳐 PC에서 실시간으로 자료를 처리토록 하였다.

4. 결과 및 검토

4.1 수질분석

하천수와 시수의 수질분석을 위해 2003년 4월 초 한강의 4개 권역(팔당, 잠실, 여의도, 김포)에서 하천수를, 수전에서 서울시 수도물(시수, tap water)을 채수하여 실험실에서 수질분석을 수행하였다. 수질분석을 수행한 결과는 Table 1과 같다.

Table 1에서 보듯이 한강물의 전기전도도와 총경도는 각각 평균 220 μS/cm와 71 mg/ℓ로서 시수보다 평균 40% 정도와 23% 정도 높게 나타났다. 즉 시수보다 한강물의 경도가 높음을 알 수 있다. 총경도는 칼슘경도와 마그네슘경도를 합한 값인데, 한강물의 칼슘과 마그네슘 구성비는 80:20으로서 칼슘의 성분이 지배적임을 알 수 있다. 시수의 칼슘과 마그네슘 구성비도 80:20으로서 비슷하게 나타났다. 채수 위치에 따른 수질 변화를 보면 Table 1과 같이 하류지역으로 갈수록 전기전도도는 상류지역보다 높게 나타나지만 총경도는 약간 증가함을 알 수 있다. 그리고 하천수의 수질 성분은 계절이나 강우 상태에 따라

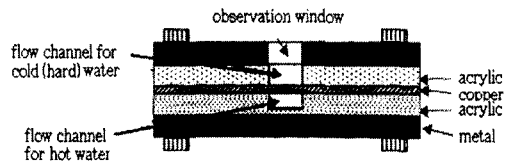


Fig. 5 Cut-away view of a test section

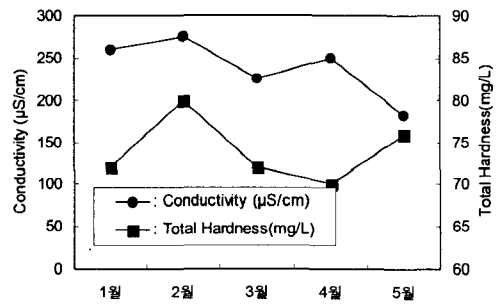


Fig. 6 Changes of conductivity and hardness for Han-river

Table 1 Water analysis data measured for river water and tap water

	pal dang	jam sil	yeoui do	gimpo	tap water
Conductivity(μS/cm)	162	163	246	306	158
pH	8.7	8.1	8.4	7.4	7.4
Ca Hardness(mg/ℓ)	50	52	62	62	50
Mg Hardness(mg/ℓ)	16	20	10	12	12
Total Hardness (mg/ℓ)	66	72	72	74	62
Alkalinity (mg/ℓ)	52	42	74	78	40
Chloride (mg/ℓ)	12	12	28	34	26

Table 2 Setting values of fouling parameters

	values
Conductivity	2000 $\mu\text{S/cm}$
Temperatures	Cold side : 20 $^{\circ}\text{C}$
	Hot side : 95 $^{\circ}\text{C}$
Flow rates	Cold side : 0.24 lpm(0.5m/s)
	Hot side : 2.6 lpm

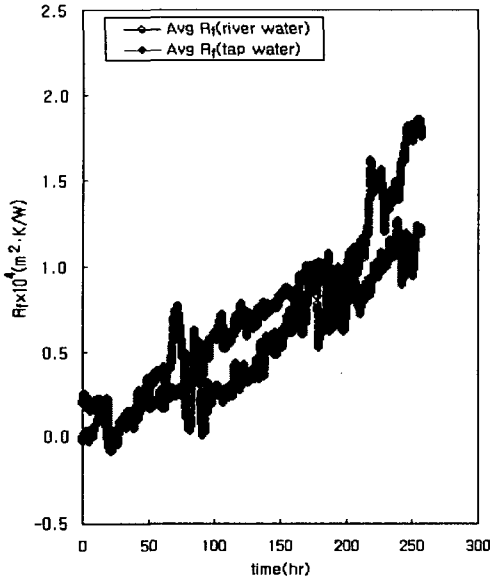


Fig. 7 Variation of fouling resistance with time

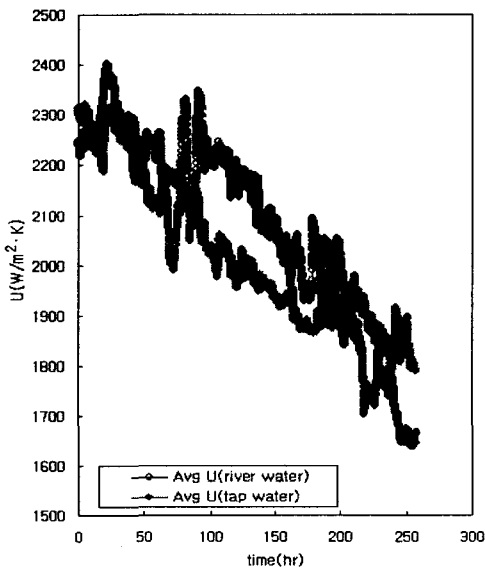


Fig. 8 Variation of overall heat transfer coefficient with time

수시로 변화하여 일정하지는 않다. Fig. 6은 2003년 1월부터 2003년 5월까지 여의도에서 채수한 한강 물의 수질변화를 보여준다.

4.2 파울링 생성실험

열교환기 시험편의 냉·온수의 입구와 출구에서 온도센서로부터 측정된 온도값으로 파울링 저항과 열전달율을 계산하여 Fig. 7과 Fig. 8에 나타내었다. 이 결과는 파울링 생성 실험을 약 300시간 정도 수행한 결과이며, 이때 파울링 저항값과 열관류율은 2분 간격으로 얻은 실험결과 값을 20개의 평균값으로 계산하였다.

또한 전열면에서의 파울링 형성과정을 가시화하여 Fig. 9에 나타내었다.

Fig. 7의 결과를 살펴보면 시간이 경과하면서 파울링 저항이 증가하고 있음을 알 수 있다. 파울링 저항 곡선은 크게 세 가지 영역으로 나눌 수 있다. 즉 유도단계(induction period), 성장단계(growth period), 안정화 단계(asymptotic period)로 표현할 수 있다.

Fig. 7에서 하천수의 경우를 보면 60시간 정도 진행될 때까지 파울링 저항은 큰 변화가 없다. 이 과정이 유도단계로 보여진다. 이 과정 동안은 전열면에 스케일 형성의 진행이 아주 미미한 것을 의미하며, 유체 속에 있는 분진, 점토, 미생물 등의 부유물질이 부유하다 전열면에 부착되었다 이탈되었다 하는 것으로 보인다. 이는 Fig. 9의 (a)와 (b)의 가시화 영상을 통하여서도 확인할 수 있었다. 이 기간 초기에는 열전달표면이 부분적으로 매끈한 표면에서 약간 거친 표면으로 바뀌기도 한다. 따라서 열전달계수는 증가하고, 파울링 저항은 음의 값을 가질 수도 있게 된다.

유도단계를 지나 230시간 정도 경과할 때까지 파울링 저항은 빠르게 증가하는 것을 알 수 있으며 열전달율도 25%정도 떨어졌다. 이는 성장단계로 Fig. 9의 (c)~(e)에서 보듯이 열전달 표면에 입자파울링이 전면에서 걸쳐 진행되며, 입자파울링 아래에는 침전파울링이 전열면에 확산되면서 부착되는 것을 볼 수 있다.

입자파울링과 같이 발생된 칼슘 부착물은 아주 연하고 쉽게 제거될 수 있는 성질의 스케일로서 대개 흐르는 열교환기내의 유속이 1m/s 정도가 되면 전단응력에 의해 쉽게 제거되기도 한다.

Fig. 7에서 보듯이 하천수를 사용해 얻어진 파울링 곡선에서 입자파울링의 생성과 일시적인 탈락으로 저항값의 변동이 불규칙적으로 나타나고 있음을 볼 수 있다.

성장단계를 지나 파울링이 어느 정도 형성되면

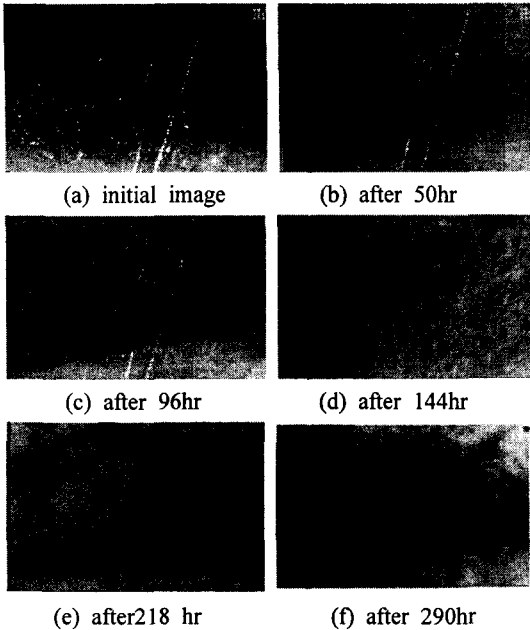


Fig. 9 Time history photographs at inlet temperature of 20°C and velocity of 0.5m/s (magnification =40×)

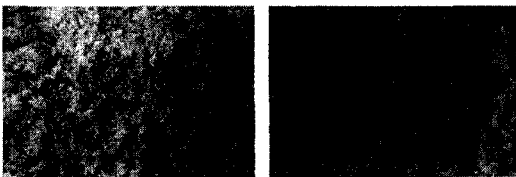


Fig. 10 Time history microphotographs at inlet temperature of 20°C and velocity of 0.5m/s (magnification =100×)

Fig. 7의 파울링 저항에서 안정화단계로 진행된다. 이 후에는 파울링 저항이 서서히 상승하게 된다. Fig. 9의 (f)는 성장단계를 지나면서 침전파울링이 상당히 진행된 것을 나타낸다.

시수일 때의 파울링은 시간 경과에 따라 유도 단계, 성장단계의 명확한 구분없이 지속적으로 진행된다 180시간 정도를 경과하면서 안정화단계로 진행됨을 Fig. 7과 Fig. 8을 통하여 알 수 있다. 이는 시수의 경우 하천수 보다 부유물질의 양이 상대적으로 적으므로 입자파울링에 의한 영향보다 침전파울링에 의한 영향을 많이 받는 것으로 보인다. 따라서 하천수와 시수의 파울링 생성과정이 다를 수 있다.

Fig. 10은 300시간 경과 후 Fig. 9의 가시화 영상을 현미경으로 100배 확대한 것으로 좀 더 자세한 파울링 형상을 볼 수 있다.

5. 결론

하천수 대응 열교환기 시스템의 파울링 형성을 실험적으로 살펴 보았으며, 그 결과는 다음과 같다.

(1) 하천수의 수질을 분석한 결과 하천수의 전기 전도도와 총경도는 각각 280 μ S/cm와 76mg/L로서 서울시 상수도 수돗물보다 약간 높음을 확인하였다.

(2) 하천수의 경우 300시간동안 0.5m/s의 조건에서 실험한 결과 전열면에 생성되는 파울링으로 인하여 총 열전달율은 약 25%정도 감소하였고, 유도단계를 지나 성장단계에서는 파울링 저항이 급격하게 증가하였다.

(3) 하천수의 경우 유도단계에서 입자파울링이 서서히 형성되는 반면에, 시수의 경우는 유도단계에서부터 침전파울링이 생성됨을 알 수 있다.

(4) 하천수와 시수의 파울링 저항곡선이 상이하게 나타났고, 파울링 생성 과정이 다를 수 있음을 확인하였다.

(5) 이를 통해 하천수를 냉각수로 사용하는 경우에 있어서 파울링 방지를 위한 접근방법이 다를 수 있다는 것을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 숭실대학교 교내 연구비 지원으로 이루어 졌음.

참고문헌

- (1) Pilavachi, P. A. and Isdalem, J. D., 1992, "European Community R&D Strategy in the Field of Heat Exchanger Fouling. Project," *Fouling Mechanisms, Theoretical and Practical Aspects*, pp. 13~20.
- (2) Bott, T. R., 1995, "The Fouling of Heat Exchangers," *Elsevier Science*, New York.
- (3) Koo Sang-Mo, Kim Chang-Soo, Kim Gun-Woo and Sohn Chang-Hyun, 2002, "Prevention of Particulate Scale with a New Winding Method in the Electronic Descaling Technology," *Trans. KSME B*, Vol 26, No. 5 pp. 658~665.
- (4) 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.
- (5) Moody, D. L., 1966, "Method and Apparatus for Treatment of Flowing Liquids to Control Deposition of Solid Matter Therefrom," *U. S. Patent number 3,228,878*, Jan. 11.