냉각수로 하천수를 이용하는 열교환 시스템내 Fouling 형성에 관한 연구

성순경*·서상호†·노형운**·조영일***

A Study on the Formation of Fouling in a Heat Exchanging System for HAN-River Water as Cooling Water

Sun-Kyung Sung*, Sang-Ho Suh†, Hyung-Woon Roh** and Young-Il Cho***

Key Words: Fouling(파울링), Heat Exchanging System(열교환 시스템), River Water(하천수) 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 exchanger surface, it is traditionally called fouling. The objective of the present study is to investigate the formation of fouling in a heat exchanging system. A lab-scale heat exchanging system is built-up to observe and measure the formation of fouling experimentally. Water analyses are conducted to obtain the properties of HAN river water. In the present study a microscopic observation is conducted to visualize the process of scale formation. Hardness of HAN-river water is higher than that of tap water in Seoul.

1. 서 론

2002년 8월 전국에 내린 집중폭우는 수많은 이재민과 엄청난 재산 피해를 가져왔다. 세계 기상학자들은 이러한 집중폭우의 원인을 오염된 갈색 구름층 때문이라고 지적하고 있다. 갈색 구름층을 형성하는 대기오염의 주요 원인은 산업혁명이후 산업의 기본 동력원으로 사용된 화석원료에 의한 이산화탄소의 급증이다. 이 구름층은 일조량, 대지 및 해수면의 온도를 변화시키고 구름층 윗 부분의 온도를 높여 비구름의 성격을 변화시키고 있다.

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

기후변화 등 심각한 환경변화에 대응하기 위해서는 난방이나, 공장에서 사용되는 1차 에너지인 화석에너지의 사용을 최대한 줄이면서 환경친화적인 에너지이용기술을 발전시켜야 한다. 우리나라에는 무궁무진한 미활용에너지가 존재한다. 즉 생활폐기물 소각열, 하수처리수열, 해수, 하천수 등 열에너지 부존량은 연간 236,400Tcal이므로 이와 같은 미활용에너지를 효과적으로 이용할 수 있는 시스템을 구축하면 열공급부문의 에너지 이용효율의 극대화에 크게 기여할 것으로 기대된다[1].

미활용에너지를 산업공정 및 건물의 냉난방에 활용하기 위해서는 열을 흡수 또는 방출하는 열교환기의 이용이 필수적이다. 그러나, 열교환기의 열전달표면에는 열전달을 방해하는 침전물의 층이 형성되는데 이러한 물리화학적인 현상을 파울링(Fouling)이라고 한다. 열전달 표면에 $CaCO_3$가 침착되면 파울링이 없는 경우에 비해 열전달율이 300분의 1로 감소된다. 또한 열전달 표면에 형성된 파울링은 유체가 흐르는 단면적을 감소시켜 유량를 감소시키고 압력손실을 증가시켜 결론

적으로 펌프의 동력을 과소비하게 된다.[2]

열교환기 효율을 향상시키기 위해 수많은 과학자들이 노력해왔으며 파울링이 열교환기의 성능을 저감시킨다는 것도 많은 연구를 통하여 밝혀졌으나 아직 이를 완전히 극복하지 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 등 기초적인 기술 수준에 머무르고 있다.

본 연구의 최종목표는 미활용에너지 종합네트워크 시스템중 하천수 열원대응 열교환시스템을 개발하는데 있다. 본 논문에서 최종목표 달성을 위한 과정중의 하나로서 lab-scale용 열교환시스템을 제작하고 하천수를 이용할 때의 파울링형성에 관한 실험을 수행하였다. 열교환 시스템에서 하천수를 사용하였을 경우의 Fouling의 생성과정을 미시적으로 분석하고자 하였다.

2. 파울링의 정의

2.1 파울링이란?

파울링은 침전(precipitation), 입자화(particulate), 화학반응, 부식(corrosion), 생물학적(biological) 및 응고(freezing) 파울링 등으로 분류된다. 열교환기의 특성상 열교환기내로 유입되는 유체는 Fig. 1과 같이 열교환기의 표면 근처에서 유체의 온도가 변화되고 이러한 온도변화는 유체의 용해도(solubility)를 변화시켜 유체와 접하는 열교환기 표면에 유체내의 불용성 이온의 침전물이 형성되는 침전 파울링이 발생된다. 산업체의 열교환기에서 볼 수 있는 침전 파울링의 종류는 탄산칼슘($CaCO_3$), 황산바륨($BaSO_4$), 황산칼슘($CaSO_4$), 규산염(Silica), 철(Fe) 등이다. 이 중 대표적인 것이 탄산칼슘($CaCO_3$)이며 하천수를 열교환기의 냉각수(coolant)로 사용할 때 열전달 표면에 파울링이 생성된다[3-5]

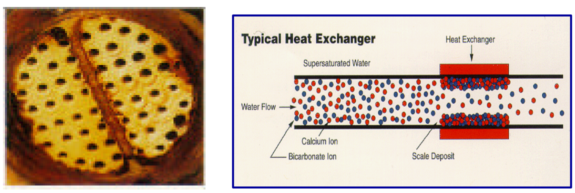


Fig. 1 Photograph of fouling and schematic diagram of fouling formation

2.2 Fouling resistance

파울링 저항은 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$R_f = \frac{1}{U_f} - \frac{1}{U_c} \tag{1}$$

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

$$U = \frac{\dot{Q}}{A \Delta T_{LMTD}} \tag{2}$$

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

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

열전달량 $\dot{Q}$은 다음 식으로 구한다.

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

식 (4)의 $\dot{Q}$와 $\triangle T_{LMTD}$는 열교환기 실험장치의 test section에서 냉수와 온수의 유입유출 온도로 구할 수 있다.

열전대로부터 입력되는 데이터는 A/D convertor를 통하여 전압값이 입력된다. 입력된 실시간 자료는 Visual Basic과 Excel로 구성된 프로그램으로부터 $\dot{Q}$와 $\triangle T_{LMTD}$을 각각 구하고 식 (2)을 이용하여 총열전달계수를 구할 수 있으며, 총열전달계수로부터 식 (1)과 같은 파울링 저항을 구할 수 있다.

3. 한강수 수질 분석과 파울링 실험

3.1 수질분석

열전달 매체로서 지금까지 가장 많이 사용된 것은 물이다. 물은 열역학적 성질이 매우 우수할 뿐만 아니라 많은 양을 공급할 수 있기 때문이다. 그러나, 열전달 매체로 물을 사용할 경우 고

Fig. 2 Experimental equipments and reagents for water analysis

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

려해야 할 문제점은 칼슘, 마그네슘과 같은 용해된 미네랄 이온(dissolved mineral ions)이 열전달 표면에 스케일이 발생되는 점이다. 물의 경도는 칼슘과 마그네슘 이온의 양에 따라 변하게 된다. 모든 산업현장에서 발생되는 스케일 생성문제는 물 성분과 밀접하게 관계되어 있다. 본 연구에서는 Fig. 2와 같은 실험기재와 시약(reagents)을 이용하여 하천수의 성분을 분석하였다. 실험에 사용된 하천수는 한강물을 이용하였다. 취수장소는 당인리 발전소 건너편인 여의도선착장 인근이다.

측정 실험장치로는 buret, 비이커와 볼밸브가 필요하고, 혼합하기 위하여 Stirrer가 필요하다. 또한, pH와 원수의 전기전도도(conductivity)는 pH meter와 conductivity meter로 측정하였다. 그리고, 경도(hardness)와 alkalinity, chloride 등을 측정하기 위하여 각종의 buffer, powder, indicator와 같은 시약들을 이용하였다.

3.2 Fouling 실험장치

하천수 대응 열교환기 시스템의 Fouling 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 Hard water를 만드는 부분과 파울링을 생성시키는 부분으로 나눌 수 있다. 첫 번째로 hard water를 만드는 부분은 크게 냉각탑, 히터, 온수순환펌프, 냉수순환펌프, conductivity meter, 열교환기, 탱크, 유량계와 밸브 등으로 구성되어

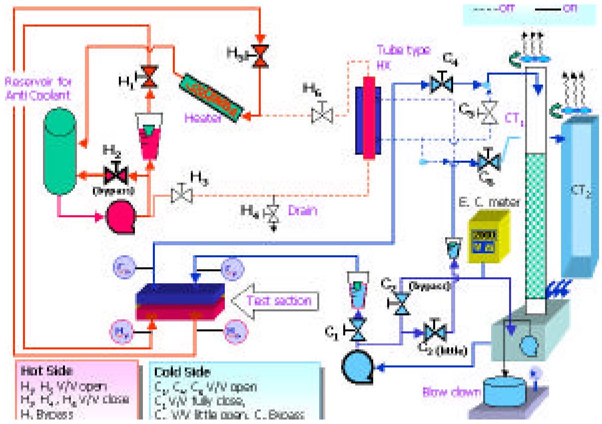


Fig. 4 Schematic diagram of lab-scale fouling experimental apparatus

있다. 하천에서 취수해 온 물은 전기전도도와 경도가 낮기 때문에 직접 파울링 실험을 하기 위하여 많은 시간이 소요된다. 따라서, 냉각탑을 이용하여 물을 일정시간 증발시키고, 증발된 만큼 물을 보충하는 순환의 과정을 거쳐 물의 경도를 증가시켜야 한다. 파울링을 생성시키는 부분은 Fig. 5와 같이 fouling의 생성과정을 관찰할 수 있도록 투명한 아크릴 판으로 덮여져 있으며, 냉수와 온수가 지나가는 유로 사이는 동판(copper plate)으로 구성하였다.

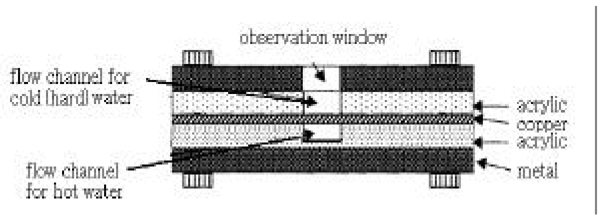


Fig. 5 Cut-away view a test section

또한, 파울링의 진행사항을 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 측정하기 위하여 thermo-couple을 4개 설치하여 A/D convertor를 걸쳐 PC에서 Visual Basic과 엑셀로 작성된 프로그램으로 실시간 자료를 처리하도록 하였다.

4. 결과 및 토의

4.1 하천수 수질 분석

Fig. 2와 같은 실험장치로부터 한강물의 pH, 전기전도도, 경도와 alkalinity, chloride 등을 Fig. 6과 같이 측정하였고, 이를 서울시 상수도의 수질과 비교하여 Table 1에 정리하였다.

Table 1에서 볼 수 있듯이 겨울철(1월, 2월) 한강물의 전기전도도와 총경도는 각각 평균 280μS/cm과 76mg/L로서 서울시 상수도 물보다 평균 50%정도 와 23%정도 많게 측정되었다. 이는 서울시 상수도물보다 한강물의 경도가 높음을 알 수 있다.

(a) Calcium hardness

(b) Chloride

Fig. 6 Photographs of experimental procedures for measuring water properties

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

	HAN-river	Tap water
Conductivity (μS/cm)	260 ~ 300	187
pH	7.8 ~ 8.2	7.4
Ca Hardness (mg/L)	58 ~ 74	50
Mg Hardness (mg/L)	13 ~ 16	12
Total Hardness (mg/L)	71 ~ 82	62
Alkalinity (mg/L)	60 ~ 80	42
Chloride (mg/L)	26 ~ 32	26

Total hardness는 Ca과 Mg hardness를 합한 값으로 나타나는데, 한강물의 Ca와 Mg 구성비는 80%:20%로서 Ca의 성분이 지배적임을 알 수 있다. 서울시 수돗물의 Ca과 Mg 구성비도 80%:20%로서 비슷한 성분 구성을 보여주고 있다.

또한 한강물의 pH는 평균 8.0로서 서울시 상수도 물보다 강한 알칼리성을 띄고 있음을 알 수 있었다. 그리고, 한강수의 Alkalinity와 Chloride도 서울시 상수도 물보다 더 높게 측정되었다.

4.2 파울링 생성실험

Fig. 3과 Fig. 4의 실험장치를 구성하여 파울링 생성 실험을 시작하였다. 이때의 설정파라미터 값은 Table 2와 같이 냉수쪽의 온도를 20℃로 설정하였다. 20℃이상으로 온도가 상승하면 냉각팬이 가동되게 하여 실험의 신뢰성을 향상시켰다. 또한 고온수쪽의 온도도 95℃로 설정하였으며 이 경우도 온도가 떨어질 때 히터가 가열되게 하였다. 설정 전기전도도의 값은 실제 냉각탑내의 조건을 만족하도록 2000±30 μS/cm가 되게 설정하였다.

Table 2 Setting values of fouling parameters

	values
Conductivity	2000 μS/cm
Temperatures	Cold side : 20℃ Hot side : 95℃
Flow rates	Cold side : 0.24 lpm(1.5m/s) Hot side : 2.6 lpm

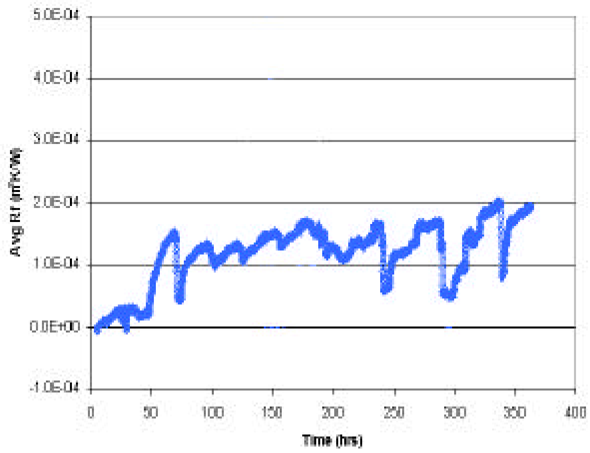


Fig. 7 Variation of fouling resistance with time

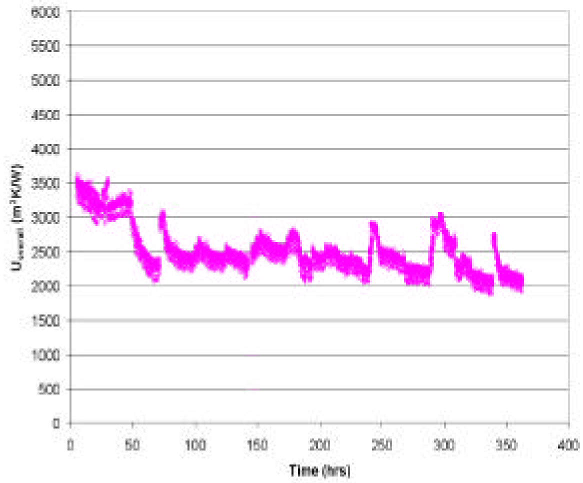


Fig. 8 Variation of overall heat transfer coefficient with time

Test section의 냉온수의 입구와 출구에서 온도 센서로부터 측정된 온도값으로 파울링 저항과 총 열전달계수를 계산하여 Fig. 7과 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 7과 Fig. 8은 파울링 생성실험을 360시간 이상 수행한 결과이다.

Fig. 7의 결과를 살펴보면 시간이 경과하면서 파울링 저항이 증가하고 있음을 알 수 있다. 파울링 저항곡선은 크게 세 가지 영역으로 나눌 수 있다. 즉, 침전 파울링(Particulate Fouling)이 생성되는 구간, 결정 파울링(Precipitation or Crystallization Fouling)이 생성되는 구간과 안정화 단계로 표현할 수 있다.

첫 번째 침전 파울링(Particulate Fouling)이 생성되는 구간에서는 50시간이상 지나면 파울링 저항은 곡선은 일정한 값을 갖는다. 이는 test section 열전달 표면에 점토, 모래, 진흙, 녹 등이 부유되다가 열교환기에 침착되는 것을 의미한다. 침전 파울링은 화학반응을 일으키는 파울링의 촉매로 작용하기도 한다.

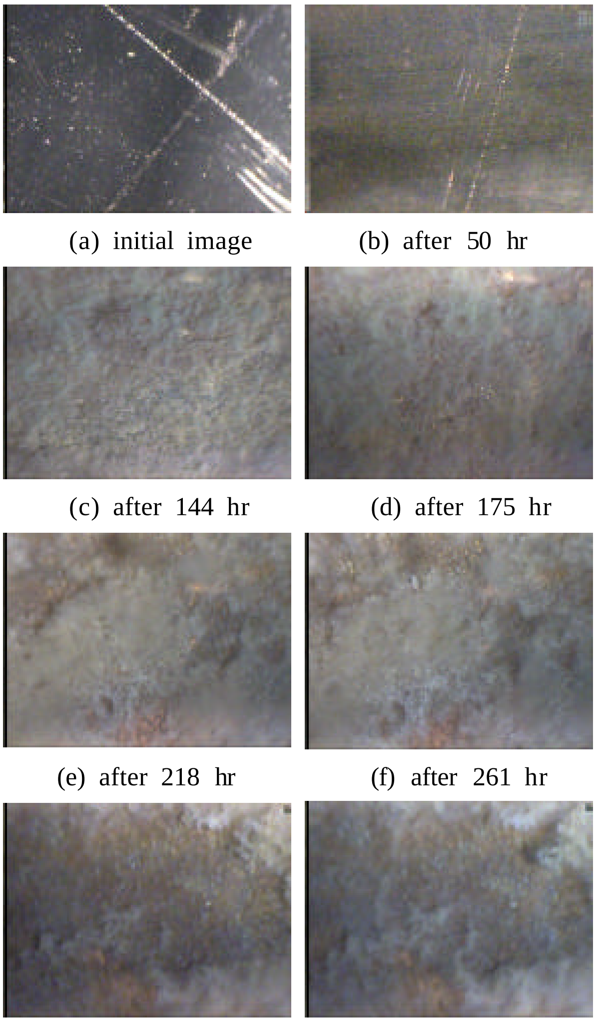
결정 파울링이 생성되는 구간에서는 200시간이 지나면 급격히 파울링 저항이 증가하는 경향을 나타낸다. 이는 test section 열전달 표면에 비교적 용해가 잘 되지 않는 탄산칼슘($CaCO_3$)이 과포화의 결과로 결정층을 이루기 때문이다. 대부분의 경우 Ca^+의 양이온과 CO_3^-의 음이온의 지속적인 반응으로 열분해되어 전열면적 위에 침착된다.

세 번째의 안정화 단계는 이런 경향이 진행되다가 파울링 저항 곡선이 수평을 유지하면 파울링이 완전히 형성되었음을 의미한다.

파울링 생성실험에서 주의해야 할 점은 test section에 파울링이 발생되면 표면저항의 증가로 유속의 변화가 일어날 수 있다는 점이다. 이를 방지하기 위하여 냉수 쪽의 설정유량이 항상 일정하게 유지되고 있는지 살펴보는 것이 필요하다.

Fig. 8에서 보는 바와 같이 총열전달계수는 식 (2)에 의하여 구해지며 파울링 저항과는 반대의 경향을 나타내고 있다.

파울링 형성과정을 가시화하여 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9를 보면 붉은 색은 표면의 구리판을 나타내고, 우유빛 나는 부분은 파울링 결정이다. 파울링 저항곡선에서 설명하였듯이 50시간 이후까지는 약간의 침전 파울링밖에 발생지 않다가 150시간이 경과한 후에는 열전달 표면에 점차적으로 결정파울링이 발생되고 있음을 알 수 있다. 파울링의 형성은 200시간이상 지나야 확연하게 나타남을 알 수 있다.



(a) initial image (b) after 50 hr

(c) after 144 hr (d) after 175 hr

(e) after 218 hr (f) after 261 hr

(g) after 334 hr (h) after 363 hr

Fig. 9 Time history photographs at inlet temperature of 20℃ and velocity of 1.5m/s (magnification =40×)

Fig. 10 Time history microphotographs at inlet temperature of 20℃ and velocity of 1.5m/s (magnification =100×)

Fig. 10은 Fig. 9의 가시화 영상을 현미경으로 100배 확대한 것으로 미시적인 파울링 결정구조를 볼 수 있다.

5. 결론

하천수 대응 열교환기 시스템의 Fouling 특성을 구하기 위하여 열교환기시스템 장치를 구성한 후 실험한 결과는 다음과 같다.

1. 한강물 수질분석을 한 결과 한강물의 conductivity와 hardness는 각각 280μS/cm와 76mg/L로서 서울시 상수도 수돗물보다 약간 높음을 확인하였다.
2. 열교환 표면에 파울링이 생성됨으로 인하여 총열전달 계수가 감소하였고, fouling 저항도 증가하였다.
3. 시간경과에 따른 파울링 생성 상태를 파악하였다.

후 기

본 연구는 이산화탄소 저감 및 처리 기술개발 사업단의 지원으로 이루어졌습니다.

참고문헌

(1) Pilavachi, P. A. and Isdalem J. D., 1992, "European Community R&D Strategy in the field of Head Exchanger Foluing. 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) 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.